

Che cosa è, come funziona

L'acustica architettonica

Parametri di progetto e scelta dei materiali

Parte II

Leonardo **Scopece**,
Alberto **Ciprian**

1. ELEMENTI PRATICI DI PROGETTAZIONE

Quando si parla di progettazione acustica di un ambiente è necessario tener conto, oltre all'analisi modale, anche del concetto di frequenza limite, meglio conosciuta come frequenza di Schröder. Questa rappresenta il limite inferiore delle frequenze in cui il campo sonoro assume connotati statistici e si calcola secondo la seguente relazione:

$$f_{\text{lim}} = \frac{5000}{(V \cdot k_{n,\text{mod}})^{1/2}} \cong 2000 \cdot \left(\frac{T}{V}\right)^{1/2}$$

dove $k_{n,\text{mod}}$ rappresenta il valore medio della costante di smorzamento di molti modi, T è il valore del tempo di riverberazione e V è il volume dell'ambiente. Al di sotto della frequenza di Schröder prevalgono le caratteristiche modali legate all'ambiente.

Questa frequenza divide la risposta in frequenza del livello di pressione sonora in tre zone (figura 1):

- **zona dominio modale:** prevale un comportamento deterministico in cui i modi sono pochi e la densità modale è bassa.

Sommario

Il campo dell'acustica architettonica è molto ampio e nel voler realizzare un progetto di trattamento acustico non basta conoscere soltanto gli aspetti fisici, ma è opportuno considerare sia i parametri di progetto generali, derivanti dai vari studi sviluppati nel corso degli anni, sia la scelta dei materiali da utilizzare per ottenere un particolare effetto. Il presente è il secondo di tre articoli riguardanti l'acustica architettonica e fornisce una panoramica sui temi appena citati.

La fisica delle onde va presa come punto di partenza per poter capire che tipo di progettazione acustica applicare in base alle proprie esigenze. Qui si intende sviluppare il discorso sui parametri dell'ambiente, dimensionamento e struttura dei vari componenti architettonici in gioco, e successivamente la scelta dei materiali da utilizzare in funzione delle frequenze e del tipo di riverbero che ci si aspetta in funzione dell'obiettivo da raggiungere

- **zona di diffusione:** inizia il comportamento statistico dei modi che rende il campo diffuso e provoca un aumento della densità modale.
- **zona di assorbimento:** in questa zona i modi sono molti e indistinguibili, quindi il comportamento dipende maggiormente dalle caratteristiche di assorbimento dell'ambiente.

Siccome la frequenza di Schroeder dipende da $(T/V)^{1/2}$, si nota subito come negli ambienti di grandi dimensioni, in cui quindi il parametro V ha un valore grande, la considerazione dei modi perda di significato. Quindi la descrizione modale è necessaria prevalentemente per gli ambienti di piccole dimensioni. Tuttavia è pressoché impossibile fare previsioni quantitative sul comportamento acustico di un piccolo ambiente senza l'aiuto di un software dedicato, ed è necessario basarsi su alcuni parametri di progetto standard che possano approssimare al meglio il comportamento acustico della stanza. Generalmente si considerano quattro fasi:

- progettazione geometrica
- dimensionamento delle superfici
- scelta dei materiali
- posizionamento delle sorgenti e dell'ascoltatore

La progettazione di tipo geometrico (*geometrical design*) è uno dei metodi più importanti da considerare

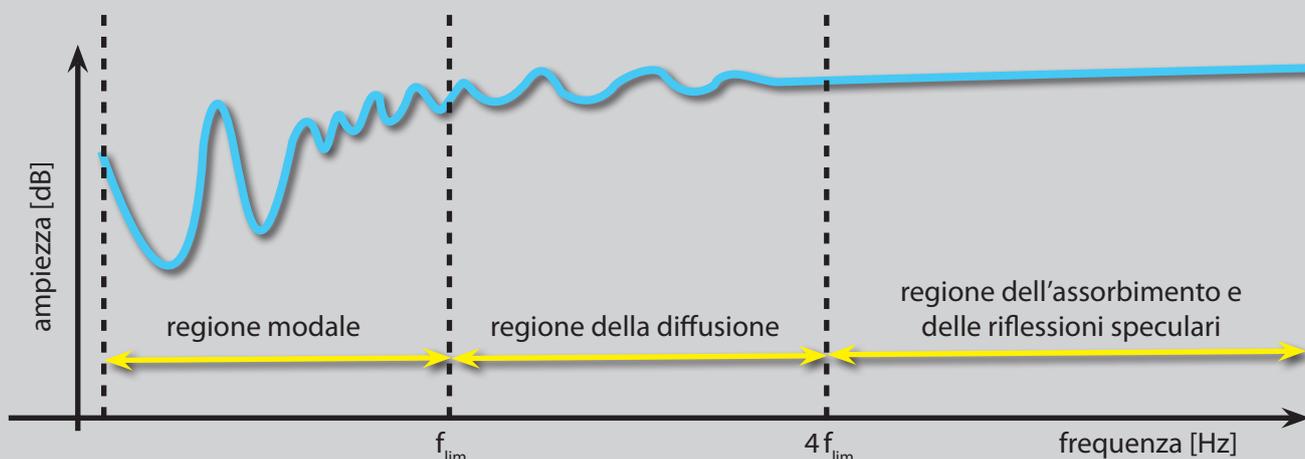
per ridurre il più possibile la presenza dei modi assiali all'interno dell'ambiente a favore di modi meno energetici. La scelta peggiore che si può adottare consiste nello scegliere una pianta a pareti parallele tra loro (soffitto e pavimento compresi) in quanto consentono la generazione di modi assiali e di onde stazionarie. È quindi necessario studiare soluzioni ad hoc per ogni ambiente, anche considerando il tipo di suono che deve essere riprodotto all'interno.

Il corretto dimensionamento dei lati della stanza è un altro parametro a cui bisogna prestare molta attenzione, poiché permette di aggirare l'ostacolo di avere le pareti parallele e non poter agire direttamente su esse. Come detto, è molto difficile prevedere la risposta modale della stanza, per questo motivo si può creare all'interno della struttura parallelepipedica un guscio a pareti non parallele. Ma questo procedimento, ovviamente, deve essere seguito tenendo conto di un corretto dimensionamento dei lati.

- **Rapporti di Bolt:** si considera l'idea secondo cui si ha una migliore risposta in frequenza e un minore ROS^{Nota 1} imponendo che i modi siano equispaziati in frequenza. I rapporti ottenuti sono 1 : 1,26 : 1,59 (considerando altezza, larghezza e lunghezza).

Nota 1 - acronimo per Rapporto di Onde Stazionarie, rappresenta la differenza, espressa in dB, fra massimi e minimi dei valori di livello di un'onda stazionaria.

Fig. 1 – Regioni di comportamento stazionario.



- **Rapporti di Sepmeyer:** vengono definite tre famiglie di rapporti ottimali, a seconda che, a parità di altezza, si preferiscano stanza più o meno allungate. I rapporti sono elencati nella tabella seguente:

Altezza	Larghezza	Lunghezza
1	1.14	1.39
1	1.28	1.54
1	1.60	2.33

- **Criterio di Bonello:** è un metodo basato sulla psicoacustica e utilizza un diagramma per verificare l'accettabilità di una distribuzione di modi. Sull'asse delle ordinate viene riportato il numero dei modi la cui frequenza naturale è contenuta in bande a terzi di ottava, mentre sulle ascisse vengono riportate le bande a terzi di ottava. Secondo il criterio, il tracciato risultante deve essere crescente, cioè il numero di modi in una banda deve essere maggiore o uguale a quello contenuto nella banda precedente. Un esempio di applicazione di questo criterio è rappresentato in figura 2.

Infine, rimane la scelta sui dispositivi acustici e sui materiali da utilizzare. Quest'ultimo punto non si basa su precisi standard come può essere il dimensionamento delle pareti, perché, come detto ogni ambiente può essere realizzato con finalità diverse:

un parlatorio avrà la necessità di avere un riverbero bassissimo, e al contrario un ambiente destinato alla riproduzione musicale necessiterà di un valore di riverbero più o meno alto a seconda del genere riprodotto.

1.1 MISURAZIONE IMPULSIVA DI UNA STANZA

Spesso l'analisi modale non è sufficiente per studiare la risposta impulsiva di una stanza, in quanto va bene soltanto per ambienti parallelepipedi. Per questo motivo negli ultimi anni sono stati introdotti i cosiddetti metodi geometrici, in cui le onde sonore vengono trattate come i raggi luminosi, per i quali valgono le leggi di ottica geometrica di Snell. Inoltre, si suppone che l'angolo di incidenza e quello di riflessione siano uguali, ma questa affermazione a sua volta vale soltanto nel caso in cui si considerino due ipotesi: dimensione delle pareti grande e curvatura/irregolarità delle superfici riflettenti piccola rispetto alla lunghezza d'onda del suono.

I principali metodi utilizzati sono il *metodo delle immagini* e l'*algoritmo di ray tracing*.

1.1.1 METODO DELLE IMMAGINI

È un metodo basato sull'idea che ogni parete si comporta come uno specchio acustico e viene rimpiazzata da una sorgente immagine, detta anche sorgente fantasma.

Fig. 2 - Criterio di Bonello.



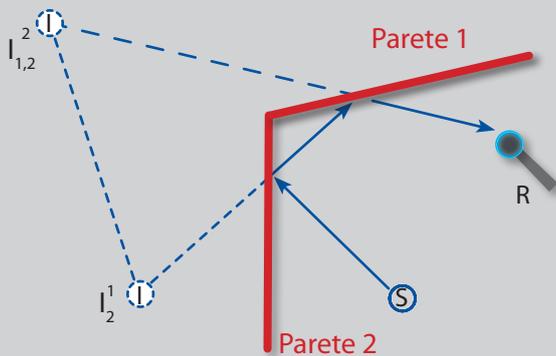


Fig. 3 - Immagine valida.

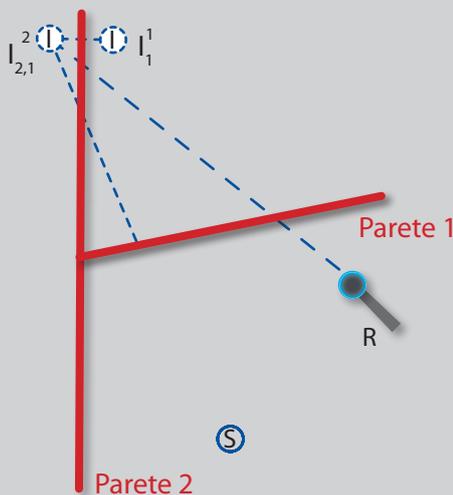


Fig. 4 - Immagine non valida.

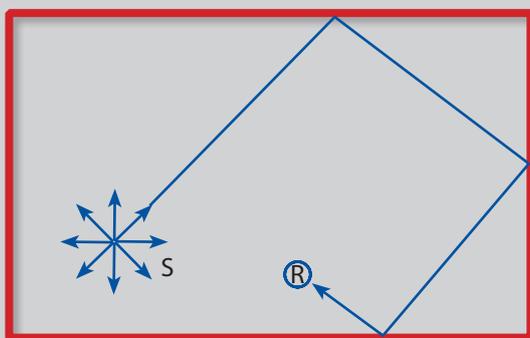


Fig. 5 - Algoritmo di ray tracing.

Per valutare il procedimento è utile considerare un caso semplice in cui si considerano due pareti non perpendicolari tra loro e immagini fino al secondo ordine. In figura 3 si indica l'immagine del primo ordine relativa alla parete 2 della sorgente con I_2^1 , mentre con $I_{1,2}^2$, si indica l'immagine del secondo ordine generata da quella del primo ordine relativa alla parete 1. L'apice indica ordine dell'immagine, mentre il pedice indica la sequenza delle pareti che hanno generato l'immagine a partire dal ricevitore.

Per calcolare il percorso di propagazione dell'immagine si parte dal ricevitore e si risale fino alla sorgente mediante un processo di backtracking. Nel caso rappresentato $I_{1,2}^2$ è un'immagine valida, poiché si incontrano tutte le pareti. In figura 4, invece, è rappresentato il caso di un'immagine non valida.

Il raggio che parte dal ricevitore incontra la parete 1 e raggiunge l'immagine $I_{2,1}^2$. Proseguendo con il backtracking e tracciando la perpendicolare alla parete 1 non si incontra mai la parete 2, quindi è impossibile trovare un raggio emesso dalla sorgente che attraversi la parete 2, la parete 1 e giunga al ricevitore. Nel caso in cui le pareti fossero perpendicolari, $I_{2,1}^2$ e $I_{1,2}^2$ coinciderebbero. Per realizzare l'algoritmo è necessario determinare tutte le immagini.

Ad esempio, si consideri un ambiente con 6 pareti: la sorgente genera 6 immagini del primo ordine, ogni immagine del primo ne genera 5 del secondo, che a loro volta ne generano altre 5 del terzo e così via. Quindi, per una simulazione di ordine n il numero delle immagini da considerare sono:

$$N_{imm}^n = \sum_{i=1}^n p(p-1)^{i-1}$$

dove p indica il numero delle pareti.

1.1.2 ALGORITMO RAY TRACING

Il modello che utilizza l'algoritmo di ray tracing si basa su una sorgente sonora che emette un numero finito di raggi sonori modellati come particelle sonore con emissione radiale. Nel loro percorso, le particelle incontrano degli ostacoli, i quali, a loro volta, emettono altre particelle sonore (figura 5).

I problemi che emergono però sono due:

1. il primo consiste nel fatto che bisogna approssimare un numero teoricamente infinito di raggi sonori. Il numero di raggi dipende soprattutto dalla forma e dalle dimensioni della stanza considerata. Infatti, per una stanza parallelepipedica il numero è contenuto, al contrario in una stanza complessa il numero cresce in modo esponenziale. Per controllare il numero di raggi emessi si utilizzano le tecniche dette *pyramid tracing* e *cone tracing*.
2. Il secondo consiste nelle dimensioni del ricevitore. È necessario, infatti, che le dimensioni del ricevitore non siano troppo piccole, in quanto si rischierebbe di non intercettare alcun raggio sonoro (figura 6).

Da vari studi è emerso che la forma migliore per il ricevitore è sferica, inoltre Lehnert ha proposto, per la dimensione del ricevitore, di adottare una grandezza variabile a seconda del numero e della lunghezza dei raggi. La relazione che descrive questa soluzione è la seguente:

$$r = l \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{N}}$$

dove l è la lunghezza del raggio, mentre N è il numero di raggi emessi. Il grande vantaggio di questi modelli consiste nel fatto di poter modellare in modo accurato fenomeni fisici come la diffrazione.

2. LA COIBENTAZIONE SONORA

Una buona scelta dei materiali e una buona gestione delle superfici (soprattutto il pavimento) può permettere di ridurre notevolmente il numero di componenti aggiuntivi, lavorando sul trattamento di un largo range di frequenze e riducendo al minimo le vibrazioni prodotte dalla strumentazione presente nella camera (come strumenti musicali o componenti di un impianto).

Innanzitutto è necessario definire cosa si intende generalmente per isolamento acustico: è la capacità

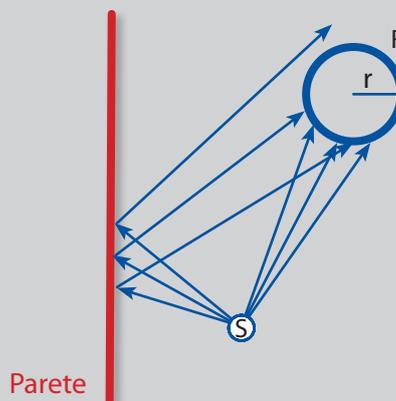


Fig. 6 - Problema delle dimensioni del ricevitore.

che una struttura ha di ridurre l'energia acustica che si propaga per via aerea dall'ambiente disturbante a quello ricevente. Quando un fronte d'onda incide su una superficie (figura 7) avvengono diversi fenomeni: l'energia che si propaga per via aerea viene trasformata in vibrazione meccanica della struttura; l'energia meccanica si ritrasforma parte in energia acustica che si propaga per via aerea, parte in energia dissipata in calore e parte in energia meccanica trasmessa per via solida ad altre strutture.

Questa può essere nuovamente irradiata dalle strutture eccitate nell'ambiente di ricezione (*flanking transmission*).

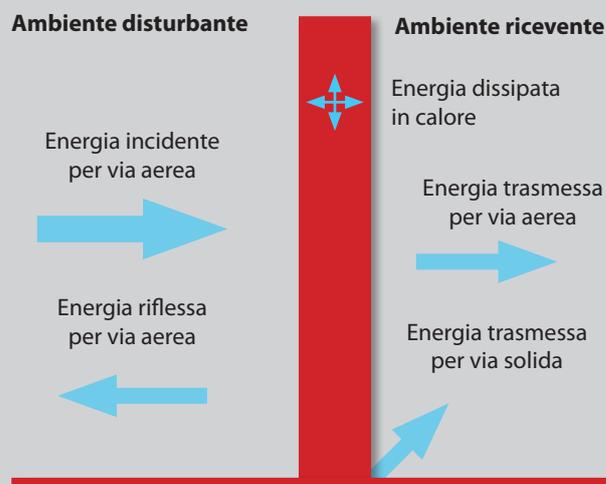


Fig. 7 - Trasmissione acustica.

La norma ISO 31-7 prevede l'esistenza di quattro coefficienti:

- **coefficiente di dissipazione δ** : rapporto tra la potenza sonora dissipata e potenza sonora incidente;
- **coefficiente di trasmissione τ** : rapporto tra la potenza sonora trasmessa e potenza sonora incidente;
- **coefficiente di assorbimento α** : rapporto tra potenza sonora assorbita e potenza sonora incidente. Vale la seguente relazione:

$$\alpha = \delta + \tau$$

- **coefficiente di riflessione r** : rapporto tra la potenza sonora riflessa e la potenza sonora incidente. Vale la seguente relazione:

$$r + \delta + \tau = r + \alpha = 1$$

2.1 IL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE

Il coefficiente di trasmissione è il rapporto tra la potenza sonora trasmessa e la potenza sonora incidente, ma siccome l'intensità sonora è definita come la potenza che fluisce attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, il coefficiente di trasmissione τ può essere espresso anche come il rapporto tra l'intensità sonora trasmessa e quella incidente:

$$\tau(\theta) = \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)}$$

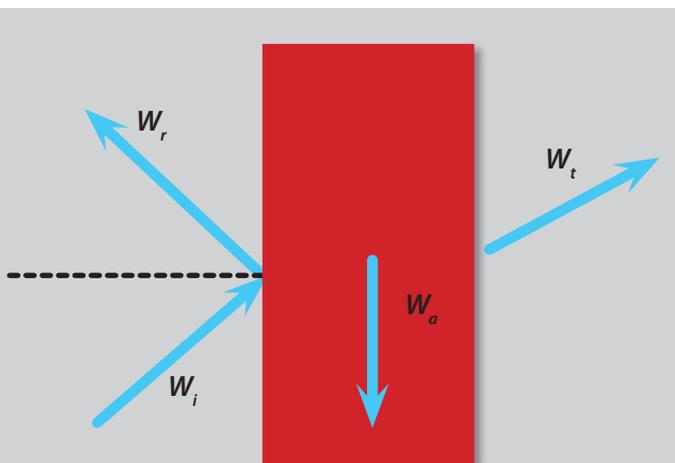


Fig. 8 - Ripartizione della potenza sonora.

da questa relazione si nota come questo coefficiente dipenda dall'angolo di incidenza θ , misurato rispetto alla normale alla superficie del divisorio.

Inoltre, τ è utilizzato anche per definire il concetto di potere fonoisolante $R^{\text{Nota 2}}$ di una qualunque superficie divisoria, grandezza logaritmica espressa in dB:

$$R(\theta) = 10 \log \frac{1}{\tau(\theta)}$$

nel caso in cui il fronte acustico incida sull'elemento in direzione normale alla superficie, quindi con $\theta = 0$, si definisce il potere fonoisolante per incidenza normale. In realtà i fronti d'onda incidono sull'elemento da molti angoli contemporaneamente, quindi per tenerne conto è necessario effettuare una media sull'angolo di incidenza.

2.2 IL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

Le proprietà assorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acustico α , che è definito come il rapporto tra la potenza acustica assorbita e la potenza sonora incidente:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}$$

Il valore di α rappresenta quindi la frazione di energia sonora assorbita da un determinato materiale e può variare da 0, nel caso in cui tutta l'energia venga riflessa, a 1, nel caso in cui tutta l'energia venga assorbita. In figura 8, si può notare il fenomeno ripartizione della potenza sonora incidente: una parte viene riflessa (W_r), una parte viene assorbita (W_a) e una parte viene trasmessa (W_t).

Per uno stesso tipo di materiale, il valore del coefficiente di assorbimento può variare in base al valore della frequenza e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica. Per questo motivo i coefficienti di assorbimento sono espressi in funzione della frequenza in banda di ottava o di 1/3 di ottava^{Nota 3}.

Nota 2 - in inglese Transmission Loss, TL.

Nota 3 - Nelle schede tecniche fornite dai produttori 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 si utilizza 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.

2.3 DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

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

- per incidenza diffusa in camera riverberante
- per incidenza normale in tubo a onde stazionarie

Il principio di misura per **incidenza diffusa** consiste nell'effettuare la misura del tempo di riverberazione in una camera riverberante, che secondo la norma UNI EN 20354 deve essere di superficie non inferiore a 10 m², con e senza il campione in esame. I risultati delle due misure vengono poi elaborati in modo da ottenere i valori di α in funzione della frequenza. La norma specifica, inoltre, i requisiti fondamentali della camera riverberante come il volume, maggiore di 150 m³, e la lunghezza massima interna l_{max} minore di $1,9V^{1/3}$.

La misura dei tempi di riverberazione viene eseguita per bande di 1/3 d'ottava nel campo di frequenze compreso tra 100 Hz e 5 kHz, inviando a un sistema di altoparlanti sistemato nella camera un rumore bianco, che viene periodicamente interrotto per permettere la misura del tempo di decadimento del segnale. Il segnale deve essere rilevato in almeno tre postazioni microfoniche fisse (distanti tra loro $\lambda/2$, a 1 m dal campione e a 2 m dalla sorgente) e inviato a un analizzatore digitale, che attraverso l'elaborazione di una serie di multispettri provvede a calcolare il tempo di riverberazione. L'area di assorbimento equivalente del materiale si ottiene tramite la seguente formula:

$$A = 55,3 \cdot \frac{V}{v} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

dove T_1 è il tempo di riverberazione della camera vuota, T_2 è il tempo di riverberazione della camera contenente il campione, V è il volume della camera e v è la velocità di propagazione del suono nell'aria.

Il secondo metodo si basa sull'utilizzo di un tubo alle cui estremità vengono collocate una sorgente e un campione di prova. Il principio di misura consiste

nella rilevazione, in termini di pressione sonora, dell'andamento dell'onda piana stazionaria che si crea nel tubo, a causa della sovrapposizione di un'onda incidente con l'onda riflessa dal campione in esame.

2.4 TIPOLOGIE DI ASSORBIMENTO

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

I principi attraverso cui un sistema assorbe energia sonora si possono suddividere in tre classi:

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

2.4.1 ASSORBIMENTO PER POROSITÀ

L'assorbimento acustico di questa classe è dovuto al fenomeno della viscosità: la dissipazione dell'onda sonora avviene per trasformazione del suono in energia cinetica nel momento in cui viene attraversato il materiale. La superficie di un elemento è tanto più assorbente quanto maggiore e la sua capacità di trasformare l'energia sonora incidente in calore per attrito delle microcavità del materiale. I materiali migliori sono quelli porosi e fibrosi come: lana di vetro, lana di roccia, schiume di poliuretano espanso a celle aperte e feltri. Per questo tipo di materiali, il coefficiente di assorbimento dipende da:

- porosità;
- spessore;
- densità;
- forma;
- frequenza del suono incidente.

L'assorbimento per porosità risulta elevato alle frequenze medie e medio-alte, mentre per ottenere un significativo smorzamento delle basse frequenze è necessario l'utilizzo di spessori elevati di materiale. Per un uso efficace di un materiale fonoassorbente è necessario distanziarlo di qualche centimetro (tra 5 e 30 cm) dagli elementi strutturali piani.

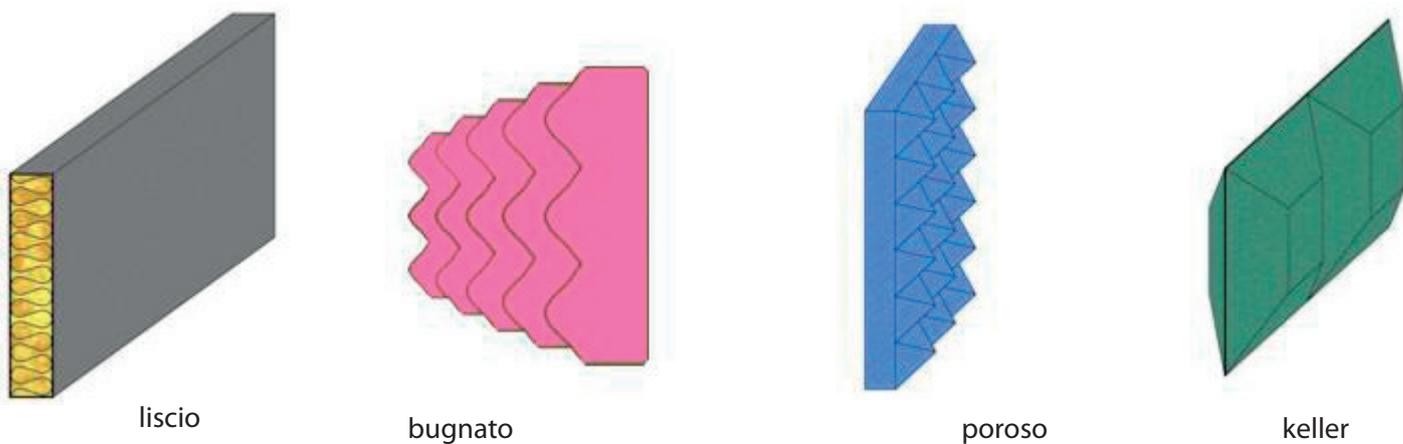


Fig. 9 - Tipologie di materiale poroso.

Per aumentare il potere fonoisolante dei materiali porosi è consigliabile utilizzare materiale sagomato. In questo modo aumenta la superficie di contatto con l'onda sonora e quindi si ha una migliore dissipazione in energia cinetica (figura 9).

Come detto lo spessore del materiale condiziona molto la quantità di 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 a una distanza di $\lambda/4$ (figura 10) dalla parete (distanza corrispondente alla massima ampiezza dell'onda da trattare). Da questo si deduce che α è crescente all'aumentare dello spessore per le basse frequenze, mentre cresce in misura poco significativa per le alte frequenze.

Molto spesso per migliorare l'efficienza del materiale alle frequenze medio-basse, si interpone un'intercapedine d'aria tra le superfici da trattare e il pannello assorbente, il quale dovrà essere collocato a una distanza dalla superficie corrispondente al massimo dell'ampiezza dell'onda sonora (cioè a $\lambda/4$).

Una soluzione alternativa consiste nell'utilizzare materiali porosi con una maggiore densità, come il poliuretano espanso (massa: 30 kg/m^3 ca.) o lane minerali con densità fino a 100 kg/m^3 .

2.4.2 ASSORBIMENTO PER RISONANZA DI MEMBRANA

Questo tipo di assorbimento avviene tramite il posizionamento di un pannello di buona densità a una distanza di qualche decina di centimetri dalla parete, in modo che lo smorzamento si verifichi tramite un sistema massa-aria-massa che entra in gioco per realizzare prestazioni di tipo fonoisolante. Il pannello risona alla sua frequenza di coincidenza e l'energia sonora viene smorzata dal cuscino d'aria retrostante. L'efficacia di questo sistema è limitata all'assorbimento delle frequenze per le quali avviene la risonanza. Tuttavia è sufficiente inserire

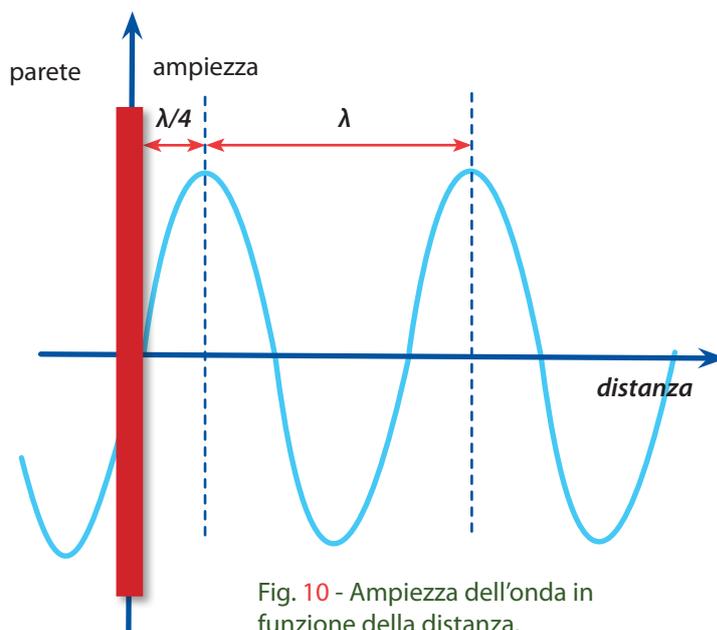


Fig. 10 - Ampiezza dell'onda in funzione della distanza.

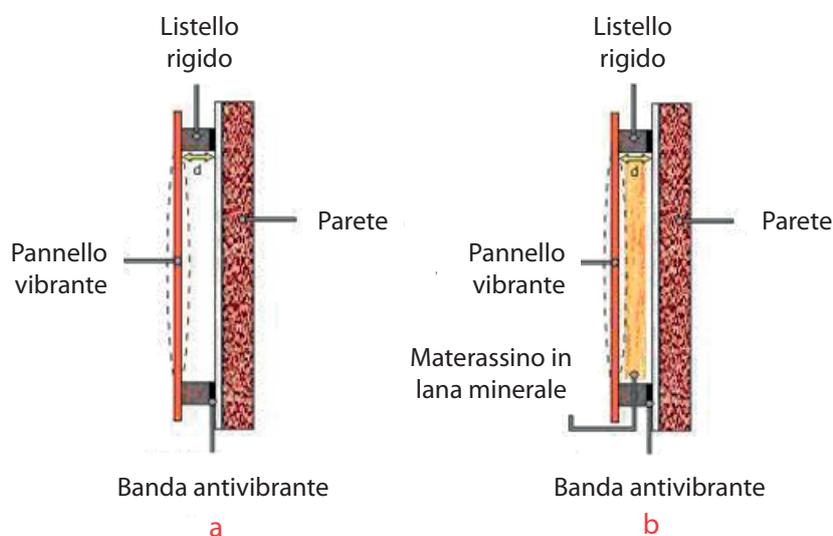


Fig. 11 - Sistemi fonoassorbenti per risonanza di membrana: sistema semplice (a) e sistema con interposto materiale poroso (b).

del materiale fonoassorbente di tipo poroso o fibroso nell'intercapedine, per aumentare l'efficacia fonoassorbente su una gamma sonora più ampia (figura 11).

2.4.3 ASSORBIMENTO PER RISONANZA DI CAVITÀ

Per realizzare questo tipo di risonanza si utilizzano delle strutture costituite da pannelli di materiale non poroso (come una lastra di gesso) sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni e tali pannelli vengono montati a una certa distanza dalla superficie da trattare.

L'assorbimento avviene per viscosità che si realizza all'imboccatura di un'area cava all'interno del materiale, secondo il concetto del risonatore di Helmholtz^{Nota 5} (figura 12). 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 sua 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 tra 50 e 400 Hz.

Nota 5 - la risonanza di Helmholtz è il fenomeno di risonanza dell'aria in una cavità.

Nel caso in cui l'interno del materiale venga 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. La frequenza di risonanza di questo tipo di pannelli è data dalla seguente relazione:

$$f_0 = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{D \cdot L}}$$

dove P rappresenta la percentuale di foratura, v è la velocità di propagazione del suono, D è la distanza dalla parete (spessore dell'eventuale materiale poroso e dell'intercapedine) e L corrisponde alla lunghezza del collo del risonatore.

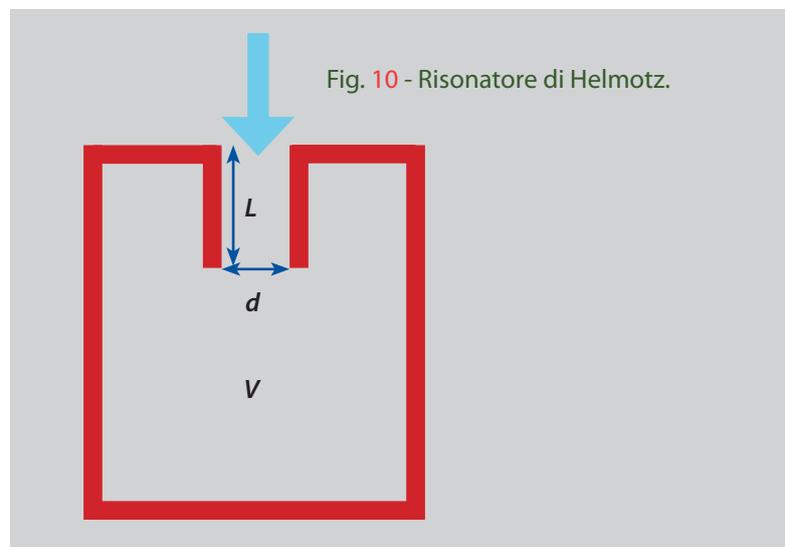


Fig. 10 - Risonatore di Helmholtz.

2.5 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI

I materiali utilizzati nel trattamento acustico degli ambienti vengono normalmente classificati in due categorie: fonoisolanti, quando sono caratterizzati dalla possibilità di minimizzare la potenza sonora trasmessa, e fonoassorbenti, che tendono a minimizzare la potenza riflessa.

I materiali fonoisolanti considerano, oltre al coefficiente di trasmissione, anche un parametro detto **potere fonoisolante (R)** espresso in dB, a cui viene associato lo stesso coefficiente di trasmissione t :

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right)$$

Analizzando il comportamento dei materiali fonoisolanti in funzione della frequenza e del potere fonoisolante, si possono individuare quattro regioni di comportamento (figura 13):

- **regione di rigidità** del pannello: in cui il potere fonoisolante diminuisce di 6 dB/ottava;
- **regione di risonanza**;
- **regione di massa** del pannello: in cui il potere fonoisolante aumenta di 6 dB/ottava;
- **regione di coincidenza**: l'effetto diminuisce il potere fonoisolante del materiale.

Questa tipologia di materiali viene utilizzata soprattutto per determinate zone di una stanza come ad esempio il pavimento, in modo da attenuare sia le vibrazioni prodotte dalle onde sonore, ma anche quelle prodotte dai vari componenti presenti nella stanza.

I materiali fonoassorbenti, invece, sono utilizzati per controllare le riflessioni indesiderate, il riverbero e il rumore e generalmente sono caratterizzati da una bassa densità. Nell'ipotesi di campo acustico riverberante, il valore dell'attenuazione del livello sonoro (DL) espresso in dB conseguente all'installazione di materiale fonoassorbente sulle pareti vale:

$$DL(f) = 10 \log \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

dove A indica l'area equivalente di assorbimento data dalla relazione $\sum \alpha_i \cdot S_i$ (S_i indica l' i -esima superficie e α_i l' i -esimo coefficiente di assorbimento), mentre i pedici indicano l'area equivalente prima e dopo il trattamento acustico. A loro volta i materiali fonoassorbenti si dividono in quattro categorie:

- **Porosi**: l'assorbimento è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente e dipende da fattori come lo spessore del materiale e il posizionamento rispetto alla parete. Alcuni materiali

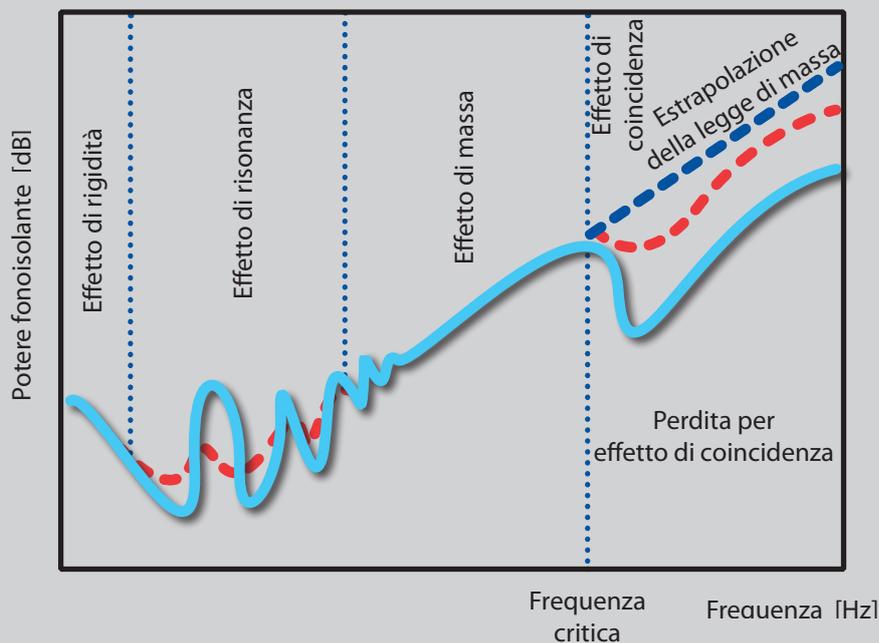


Fig. 13 - Comportamento dei materiali fonoisolanti. Sono messi a confronto gli andamenti della curva reale (continua), quella auspicabile (tratteggiata) e la estrapolazione della legge di massa.

di questo tipo sono lane di vetro e di roccia, schiume di poliuretano espanso a celle aperte, fibre di legno e feltri.

- **Risonatori acustici:** sono schematizzabili come una cavità comunicante con l'esterno attraverso un foro praticato su una parete (detto collo). Quando l'onda colpisce l'ingresso del risonatore, l'aria contenuta in esso si comporta come un pistone, mentre quella contenuta nella cavità funge da elemento elastico del sistema. La frequenza di risonanza del risonatore è pari a:

$$f_0 = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r^2}{V \cdot \left(l + \frac{\pi}{2r} \right)}}$$

dove r ed l sono rispettivamente il raggio e la lunghezza del collo del risonatore, mentre V è il volume d'aria contenuto nella cavità. Se la frequenza dell'onda incidente è approssimabile a quella di risonanza, la velocità delle particelle d'aria contenute nel collo assume valori elevati e l'effetto dei fenomeni dissipativi raggiunge il suo massimo con conseguente assorbimento. Se, invece, la frequenza dell'onda incidente è diversa da quella di risonanza, l'onda non esercita alcuna influenza sul risonatore, che diventa quindi un assorbitore molto selettivo.

- **Pannelli vibranti:** sono composti da pannelli rigidi piani disposti in modo parallelo a una certa distanza dalla parete. Questo sistema può anche essere pensato come una massa oscillante accoppiata a un elemento elastico con un certo smorzamento.

La frequenza di risonanza di un pannello vibrante vale:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{d \cdot \sigma}}$$

dove d indica la distanza del pannello dalla parete, mentre σ indica la densità superficiale del pannello espressa in kg/m^2 .

- **Sistemi misti:** sono costituiti da lastre rigide posizionate a una certa distanza dalla parete (a seconda dell'effetto che si vuole ottenere). Sulla superficie delle lastre vengono praticati dei fori di diverse dimensioni. L'intercapedine che si viene a creare posizionando le lastre può essere riempita con del materiale poroso in modo da aumentare il livello di assorbimento complessivo.

2.6 TRATTAMENTO ACUSTICO DELLE SALE DI PICCOLE DIMENSIONI

A differenza dei grandi ambienti, in cui il problema maggiore è realizzare una struttura diffusiva in grado di far sì che la resa acustica sia accettabile in ogni singolo punto, nei piccoli ambienti bisogna cercare di limitare tutti i fenomeni in grado di compromettere la qualità del suono riprodotto, come ad esempio la creazione di onde stazionarie o un'eccessiva riflessione. Per questo motivo, risulta fondamentale agire in modo opportuno su qualsiasi elemento architettonico della stanza: pavimento, soffitto, pareti, porte e, eventualmente, finestre.

È necessario, inoltre, tener sempre conto del tipo di applicazione per cui si realizza un ambiente e soprattutto del tipo di suono che verrà riprodotto al suo interno. Quindi, l'uso ai fini acustici di una superficie può essere effettuato privilegiando, per ciascuna superficie, una o più modalità di interazione:

- l'**assorbimento** è utile quando si deve estrarre energia sonora in eccesso dal campo sonoro, in modo da controllare il riverbero complessivo;
- la **riflessione speculare** si utilizza quando è necessario indirizzare un'onda secondo una direzione particolare in modo da rafforzare la percezione del suono diretto in un certo punto della sala;
- la **riflessione diffusa** è, invece, utile quando è necessario ridurre le riflessioni speculari senza utilizzare materiali fonoassorbenti aggiuntivi che impoverirebbero il campo sonoro.

È da notare, inoltre, come la gestione di pavimento e soffitto sia la più complessa, sia per il fatto che difficilmente si possono fare correzioni acustiche

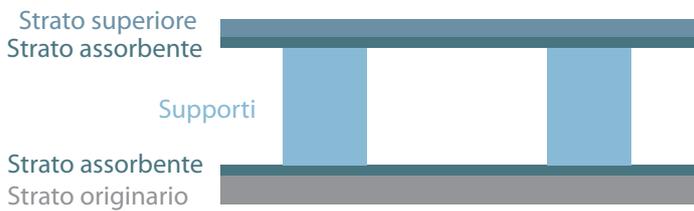


Fig. 14 - Possibile realizzazione del pavimento.



Fig. 15 - Ammortizzatore.



Fig. 16 - Soluzione alternativa per il pavimento.



Fig. 17 - Finestra per uno studio di registrazione.

successive alla loro realizzazione, cosa che è possibile invece fare con le pareti aggiungendo diversi tipi di componenti, ma anche perchè è molto difficile spezzare in modo efficace la simmetria e il loro parallelismo.

Di seguito vengono evidenziate alcune possibili soluzioni per le varie parti di una stanza.

✓ **Pavimento:** ha il compito fondamentale di ridurre al minimo le vibrazioni prodotte dal calpestio e dalla strumentazione presente nella stanza, oltre ovviamente a contribuire all'assorbimento acustico. Nel caso in cui sia possibile agire a livello strutturale (modificando quindi la conformazione vera e propria del pavimento) esistono due tecniche che si differenziano principalmente per costo e versatilità, in caso contrario è necessario concentrarsi sui materiali e sulle loro capacità di assorbire le onde sonore.

La prima soluzione consiste nel realizzare una struttura "a strati" (figura 14), ovvero partendo dal pavimento originario si colloca uno strato di materiale in grado di assorbire le vibrazioni trasmesse dal pavimento base (come ad esempio il neoprene).

Successivamente si collocano delle strutture di sostegno in modo da creare un'intercapedine vuota tra lo strato inferiore e quello superiore; queste strutture possono essere semplici assi di legno o meglio ancora elementi ammortizzatori (figura 15) i quali contribuiscono sia alla realizzazione dell'intercapedine sia alla gestione delle vibrazioni compressive.

Al di sopra si colloca un ulteriore strato di materiale assorbente per gestire le vibrazioni prodotte dalla superficie calpestabile, che può ad esempio essere di legno (parquet). Grazie a questa struttura, l'aria contenuta nell'intercapedine svolge il ruolo di isolante.

Una soluzione più complessa e costosa da realizzare, ma allo stesso tempo migliore di quella appena descritta, consiste nel realizzare un pavimento sospeso (figura 16), ma con un procedimento differente. Infatti, sopra al pavimento originario viene collocato quello calpestabile con delle grosse viti

all'interno. In questo modo è possibile alzare o abbassare il pavimento a piacere, offrendo anche la possibilità di aumentare o diminuire la quantità d'aria nell'intercapedine.

Nel caso in cui non sia possibile agire a livello strutturale è necessario scegliere in modo adeguato i materiali con i quali rivestire la superficie di base.

Una possibile soluzione consiste nello stendere uno strato di materiale fonoisolante, come il feltro di poliestere e i materassini in polietilene direttamente sul pavimento, in modo da assorbire le vibrazioni da calpestio. Al di sopra la scelta dei materiali può essere duplice. Una soluzione consiste nell'utilizzare una moquette di spessore di circa 8 mm costituita da poliammide al 100%, con un coefficiente di assorbimento sotto a 0,5 alle alte frequenze; questa soluzione ha il vantaggio di evitare le riflessioni accoppiate tra soffitto e pavimento, ma ha il problema di assorbire prevalentemente le frequenze medio-alte, con la necessità di utilizzare soluzioni nella stanza per catturare le basse frequenze. La seconda soluzione consiste, invece, nell'utilizzo di un materiale simile a quello di un tappeto cordato con massa superficiale di circa 5÷8 mm e superficie inferiore in gomma, in modo da assorbire almeno in parte le basse frequenze. Il parametro legato allo spessore del materiale non è da sottovalutare, in quanto in base allo spessore si può scegliere il grado di assorbimento.

- ✓ **Soffitto:** come per il pavimento, la soluzione migliore consiste nella creazione di un'intercapedine d'aria tramite la sospensione di un secondo strato attraverso dei ganci. Volendo aumentare il grado di assorbimento è sufficiente aggiungere del materiale fonoassorbente all'interno della cavità.
- ✓ **Pareti:** è fondamentale cercare di ridurre il più possibile il parallelismo e la regolarità tra i lati, in modo da evitare la presenza di modi assiali con conseguente generazione di onde stazionarie che comporterebbero un peggioramento della resa sonora complessiva. Anche in questo caso è possibile agire in diversi modi più o meno "invasivi". A livello strutturale, si può agire in modo

simile a quanto detto per soffitto e pavimento, isolando le pareti esterne dagli altri elementi architettonici, inserendo del materiale fonoassorbente tra la superficie di base e quella aggiunta. In caso non sia possibile, per quanto riguarda l'assorbimento basta ricoprire la parete con un materiale fonoassorbente avente un coefficiente di assorbimento più o meno elevato, a seconda dell'effetto che si vuole ottenere, mentre per quanto riguarda la riduzione della regolarità e la gestione delle riflessioni si possono utilizzare componenti come bass traps e diffusori (che verranno trattati in seguito), che oltre ad agire a livello geometrico spezzando il parallelismo, consentono anche di gestire le basse frequenze e controllare i percorsi delle onde sonore.

- ✓ **Porte:** anche sulle porte è possibile agire in modo da isolare l'interno dell'ambiente dall'esterno. Una possibile soluzione consiste nel creare una doppia porta in modo da interrompere la trasmissione del suono sigillando ogni fessura con delle guide di gomma.
- ✓ **Finestre:** sono elementi che possono incidere molto sulla scena sonora in quanto favoriscono le riflessioni. Per questo motivo o si ricopre il vetro con un materiale fonoassorbente, oppure si realizza un sistema formato da due vetri di un certo spessore, in modo da creare all'interno l'isolamento acustico, inclinando uno dei due (figura 17) per evitare il parallelismo e quindi un effetto di risonanza. Quest'ultima soluzione viene impiegata soprattutto in ambienti come studi di registrazione in cui è necessario inserire una finestra per comunicare visivamente tra la sala da registrazione e la regia audio.

BIBLIOGRAFIA

- 📖 A. Farina, "Caratteristiche acustiche dei materiali".
- 📖 Everest F. Alton: "Manuale di acustica", Milano, Hoepli, 1996.
- 📖 S. Cingolani, R. Spagnolo, *Acustica musicale e architettonica*, Milano, Città degli studi, 2007.
- 📖 R. Spagnolo: "Manuale di acustica applicata", Milano, Città degli studi, 2008.