



APPUNTI DI TEORIA

7. PROPRIETA' ACUSTICHE DEI MATERIALI

7.1 Proprietà acustiche dei materiali: fonoassorbimento e fonoisolamento

Nel precedente capitolo si è sottolineato che l'energia associata ad un'onda sonora incidente su una parete viene da essa parzialmente trasmessa e parzialmente dissipata in calore per effetto di fenomeni d'attrito interno. In ambito tecnico, i fenomeni connessi con la dissipazione e la trasmissione di energia acustica sono identificati, a seconda del contesto, con i termini *fonoassorbimento* e *fonoisolamento*, termini su cui è essenziale formulare alcune precisazioni.

Il ruolo del fonoassorbimento è stato già ampiamente discusso nel capitolo precedente per quanto riguarda l'influenza che l'assorbimento e la riflessione del suono esercita nel determinare la risposta acustica di uno spazio chiuso. In tale sede si è solo accennato al problema della trasmissione del suono tra l'ambiente in cui opera una sorgente acustica e gli spazi confinanti. Poiché la trasmissione di suono tra un ambiente emettente ed uno ricevente è generalmente fatto indesiderato per quest'ultimo, sorge la necessità di *isolare acusticamente* l'ambiente disturbato da quello disturbante.

L'effetto complessivo del processo di trasmissione e ricezione del suono è peraltro influenzato non solo dalle proprietà di fonoisolamento degli elementi che separano i due spazi, ma anche dalle proprietà di fonoassorbimento di entrambi gli ambienti: di qui la necessità di chiarire con il dovuto grado di dettaglio la natura dei meccanismi fisici che determinano la complessa interazione tra onde sonore e materiali.

A titolo di esempio si consideri il problema della riduzione del livello sonoro in uno stabilimento industriale in cui operano macchinari o impianti rumorosi: il risultato può essere ottenuto con un insieme di provvedimenti che possono riguardare sia la riduzione della potenza sonora trasmessa dal macchinario all'ambiente (interventi di fonoisolamento della sorgente), sia l'incremento del potere fonoassorbente dell'ambiente in cui è situato il macchinario o dell'ambiente ricevente in cui si trovano i lavoratori (interventi di fonoassorbimento, o di "trattamento acustico", ambientale). Ovviamente le caratteristiche costruttive dei dispositivi utilizzati variano notevolmente a seconda delle applicazioni. Ad esempio: le *cabine silenziose* sono costituite da un involucro chiuso che racchiude completamente la sorgente; per insonorizzare scarichi fluidi (ad esempio, il condotto di scarico dei prodotti di combustione emessi da un motore o da una caldaia o lo scarico della valvola di sicurezza di un impianto a vapore) si utilizzano *silenziatori* di tipo dissipativo o reattivo; per ridurre la trasmissione delle vibrazioni per via solida, il macchinario viene vincolato attraverso un *supporti elastici antivibranti*.



Un'ulteriore precisazione deve essere fatta per chiarire analogie e differenze tra fenomeni di trasmissione di energia acustica e di energia termica, sui quali spesso viene ingenerata confusione dall'uso, evocativo quanto ambiguo, del termine "*materiale isolante termoacustico*". Questo termine deriva la sua origine dal fatto che, in campo edilizio, è parimenti necessario controllare e minimizzare la trasmissione del rumore e la trasmissione del calore attraverso l'involucro dell'edificio, al fine di limitare il disturbo acustico alle persone ed il costo energetico e monetario del riscaldamento degli edifici. In molti casi tale risultato può in effetti essere ottenuto con soluzioni integrate, efficaci su entrambi i fronti, ma tale circostanza non deve essere generalizzata: in effetti, soluzioni ottime sotto il profilo termico possono risultare totalmente inadatte sotto quello dell'isolamento acustico; inoltre non sempre i materiali che esibiscono buone proprietà di isolamento termico risultano efficaci nei confronti dell'assorbimento acustico.

In questo capitolo verranno inizialmente discusse le proprietà di assorbimento acustico dei materiali, per passare poi all'esame della trasmissione del suono attraverso le pareti e attraverso i dispositivi, comunemente detti silenziatori, utilizzati per ridurre l'emissione sonora di determinate tipologie di macchine e impianti.

7.2 Caratteristiche dei materiali fonoassorbenti

I materiali da costruzione normalmente utilizzati in edilizia (laterizi, intonaci, calcestruzzi, marmi, ecc.) hanno coefficienti di assorbimento molto ridotti, per cui gli ambienti rivestiti esclusivamente con materiali di questo tipo risultano inevitabilmente troppo riverberanti: di qui la necessità di effettuare una *correzione acustica* dell'ambiente, introducendo un'opportuna quantità di materiali fonoassorbenti.

I materiali fonoassorbenti vengono classificati in tre gruppi, sulla base del meccanismo di dissipazione dell'energia acustica in essi prevalente, secondo il seguente schema:

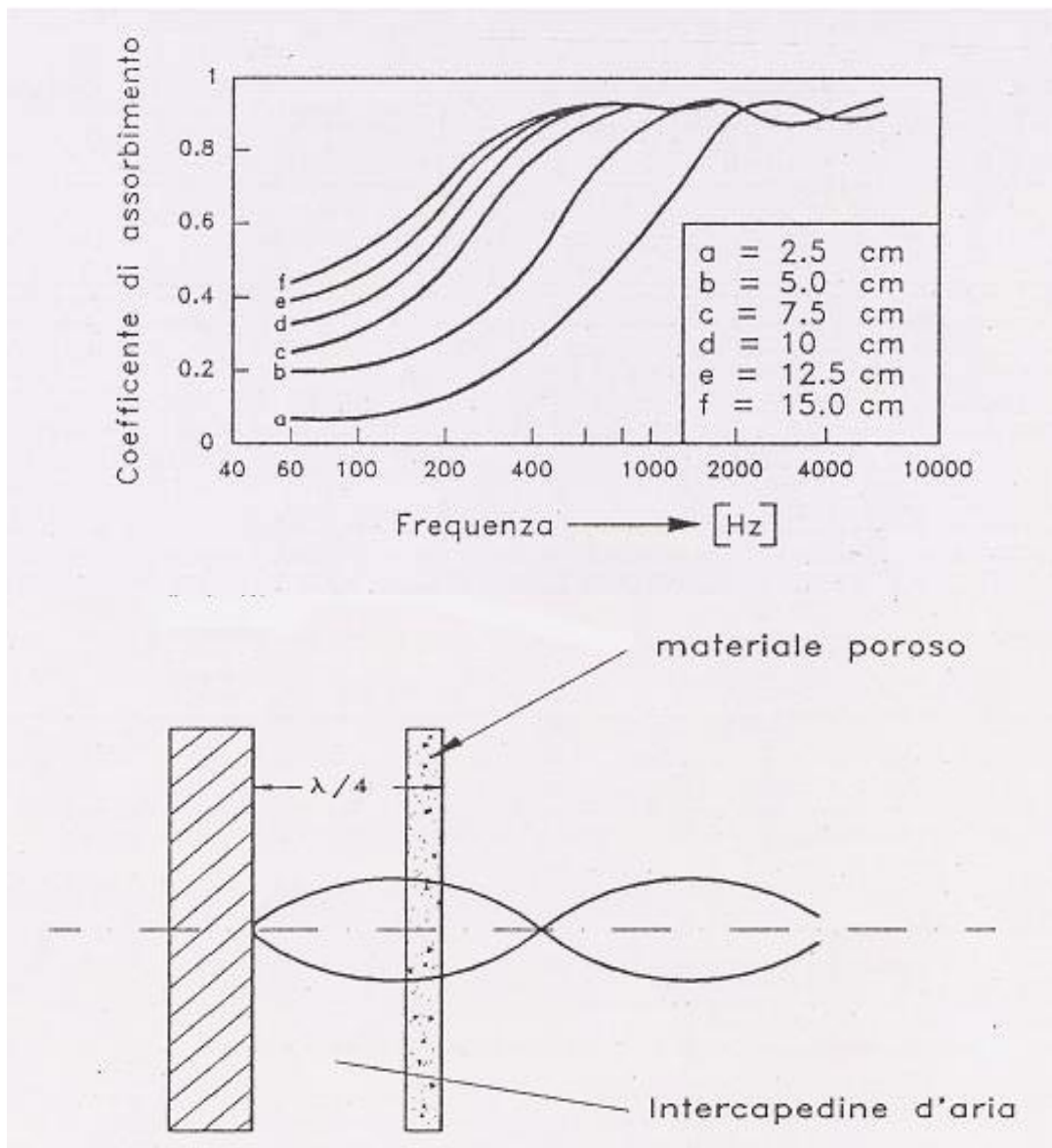
Meccanismo di dissipazione	Tipo di materiale
- Assorbimento per porosità	- Materiali porosi a struttura cellulare o fibrosa
- Assorbimento per risonanza di membrana	- Pannelli vibranti
- Assorbimento per risonanza di cavità	- Pannelli forati

7.2.1 Materiali porosi

I materiali porosi presentano una struttura eterogenea, costituita da una matrice solida che racchiude piccole celle piene d'aria, aperte verso l'ambiente. Le onde sonore che incidono sul materiale mettono in vibrazione l'aria contenuta entro le celle: la dissipazione dell'energia di vibrazione causata dai fenomeni di attrito viscoso determina l'effetto di fonoassorbimento per *porosità* che si manifesta alle frequenze medio-alte.

Le prestazioni dei materiali fonoassorbenti porosi dipendono dalla struttura della matrice solida. Il coefficiente di assorbimento presenta un'ottima correlazione con la *resistenza al flusso d'aria* del materiale, che si può determinare sperimentalmente misurando la portata d'aria che attraversa un campione di materiale di geometria nota in funzione della differenza di pressione ad esso applicata.

L'assorbimento è legato alla velocità di spostamento delle particelle d'aria, che è nulla in corrispondenza della superficie riflettente e massima ad una distanza pari a $\lambda/4$: in pratica aumentando lo spessore s dello strato di materiale il fonoassorbimento si estende progressivamente verso valori minori di frequenza, come appare evidente dal seguente grafico:



Il coefficiente di assorbimento risulta praticamente costante per $s \geq \lambda/4 \div \lambda/8$.

I rivestimenti fonoassorbenti porosi possono essere realizzati con diverse modalità:

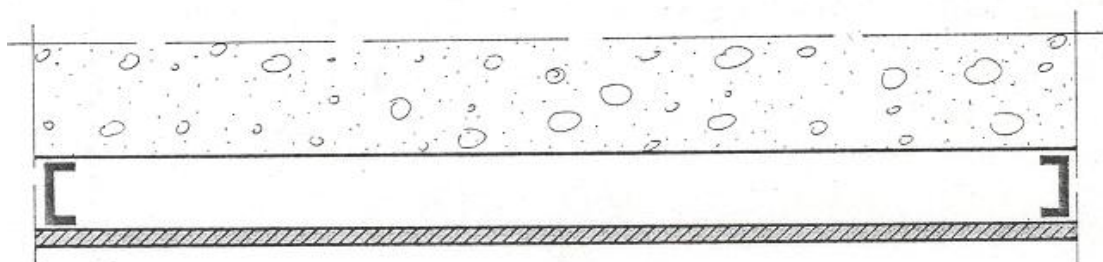
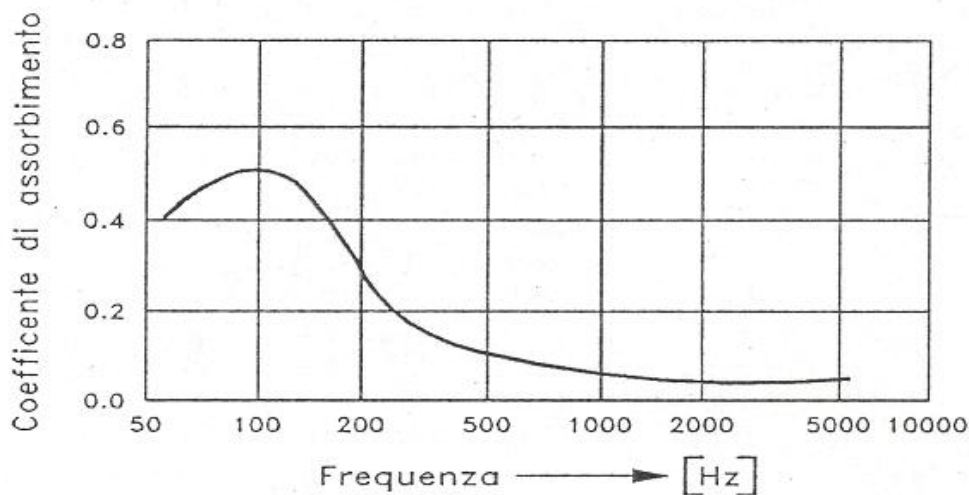
- stendendo sulla parete di base un rivestimento continuo, ad es. un intonaco realizzato miscelando ad un opportuno legante dei “fiocchi” di materiale poroso;
- applicando direttamente sulla parete di base pannelli in materiale fibroso o poroso;
- realizzando, con pannelli in materiale fibroso o poroso, un controsoffitto o una controparete con interposta intercapedine d’aria tra pannello e parete di base.

Dal punto di vista merceologico i materiali fonoassorbenti porosi possono essere classificati in:

- materiali cellulari di origine minerale: vetro cellulare
- materiali cellulari sintetici: poliuretano espanso
- materiali fibrosi di origine vegetale: fibre in legno mineralizzato
- materiali fibrosi di origine minerale: lana di vetro, lana di roccia
- materiali fibrosi sintetici: fibre poliestere

7.2.2 Pannelli vibranti

I pannelli vibranti sono costituiti da lastre sottili (tipicamente in legno o gesso) fissate alla parete di base con una struttura di sostegno che le vincola perimetralmente; tra pannello e parete di base si realizza un’intercapedine di spessore pari ad alcune decine di millimetri.





Le onde sonore incidenti mettono in vibrazione il pannello, che reagisce per *risonanza di membrana*; l'effetto di fonoassorbimento è determinato dalla dissipazione dell'energia di vibrazione dovuta sia allo smorzamento del materiale del pannello, sia all'attrito viscoso nell'intercapedine d'aria.

La frequenza di risonanza del pannello, f_r , si calcola con le seguenti equazioni:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}}$$

dove:

M = massa del pannello (kg)

C = cedevolezza del pannello (m/N)

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{M_s H}}$$

dove:

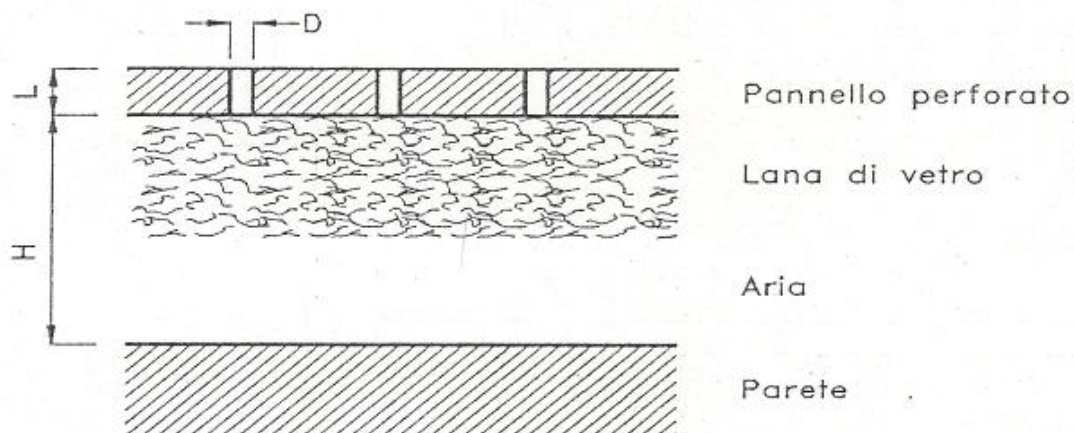
M_s = massa per unità di superficie (kg/m^2)

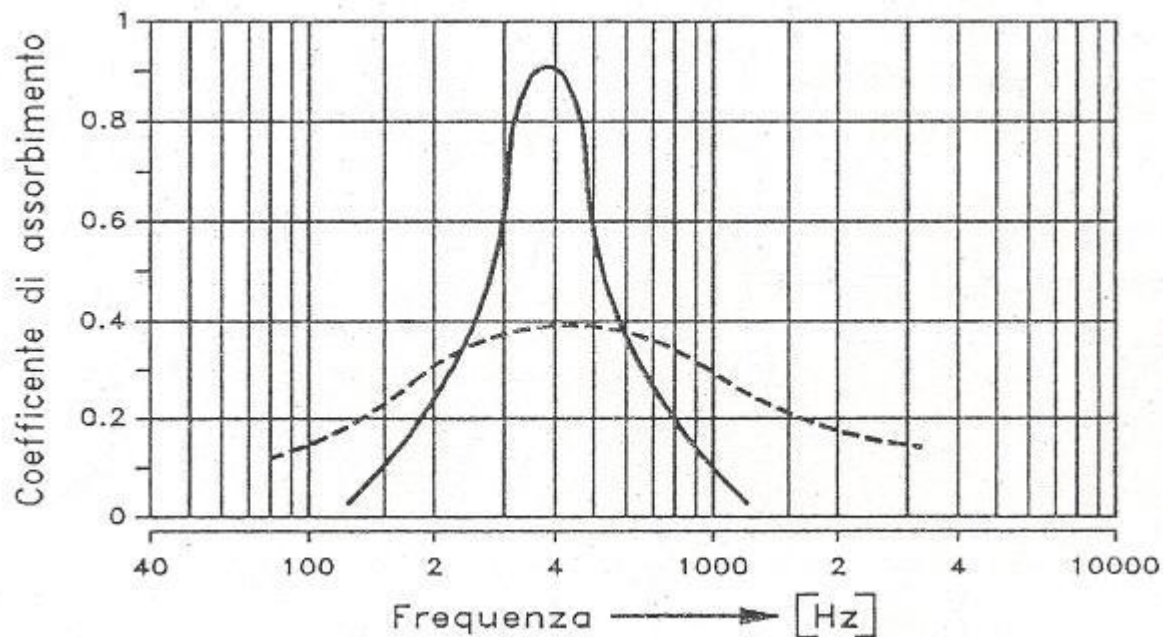
H = spessore dell'intercapedine (m)

Date le dimensioni caratteristiche dei pannelli, tipicamente dell'ordine del metro, le frequenze proprie di vibrazione del pannello si situano nella parte inferiore del campo dell'udibile. Pertanto i pannelli vibranti sono efficaci nella correzione acustica alle basse frequenze, come appare evidente dal seguente grafico:

7.2.3 Pannelli forati

I pannelli forati sono costituiti da lastre sottili, dotate di opportuna foratura, posate ad una distanza pari ad alcune decine di millimetri dalla parete di base, in modo da realizzare un insieme di risonatori di Helmholtz.





Le onde sonore incidenti mettono in vibrazione i volumetti d'aria retrostanti i fori, per cui il pannello reagisce per *risonanza di cavità*; l'effetto di fonoassorbimento è determinato dalla dissipazione dell'energia di vibrazione per attrito viscoso nell'aria.

I pannelli forati determinano un assorbimento selettivo, che si localizza alla frequenza propria del risonatore, f_r (cfr. par. 3.3.):

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL_e}} \quad L_e = L + 0,8D$$

dove:

D = diametro del foro

S = area del foro

V = volume d'aria retrostante il foro

L = spessore del pannello

La frequenza di risonanza può anche essere espressa in funzione dell'area complessiva e della percentuale di foratura del pannello attraverso l'equazione:

$$f_r = 5,4 \sqrt{\frac{P}{HL_e}} \quad P = 100 \frac{nS}{S_p} \quad (\%)$$

dove:

H = spessore dell'intercapedine

P = percentuale di foratura



S_p = area complessiva del pannello

n = numero di fori

La curva di fonoassorbimento viene modificata come indicato in figura inserendo nell'intercapedine un materassino di materiale fibroso: il valore massimo del coefficiente di assorbimento si riduce, rispetto al caso di intercapedine piena di sola aria, ma si ottiene in compenso un miglioramento del fonoassorbimento alle frequenze adiacenti a quella di risonanza.

7.3 Misura del coefficiente di assorbimento dei materiali

Il valore del coefficiente di assorbimento dei materiali dipende, oltre che dalla frequenza, anche dall'*angolo di incidenza delle onde sonore*. Per misure a incidenza normale si utilizza uno strumento denominato *Tube a Onde Stazionarie* o *Tube di Kundt*. Lo strumento consiste in un tubo, di diametro e lunghezza variabili a seconda del campo di frequenze che si intende esaminare, alle cui estremità sono rispettivamente posti:

- un altoparlante che genera un segnale acustico di frequenza nota
- un campione del materiale in esame

All'interno del tubo si stabilisce un campo di onde stazionarie, le cui caratteristiche sono influenzate dalla presenza del campione di materiale; esse vengono determinate elaborando i segnali rilevati da una coppia di microfoni situati in opportune posizioni all'interno del tubo. Prerogativa dello strumento è di fornire risultati in modulo e fase, per cui esso si presta a misurare l'impedenza (complessa) del materiale, ancorché solo ad incidenza normale.

Le proprietà di assorbimento a incidenza normale non sono però rappresentative del comportamento dei materiali all'interno di ambienti chiusi, in cui essi sono esposti ad un campo semiriverberante: più utili è quindi, ai fini di calcoli di acustica architettonica, la conoscenza del coefficiente di assorbimento a *incidenza diffusa*, ovvero per angoli di incidenza delle onde sonore variabili casualmente fra 0° e 90° . La misura del coefficiente di assorbimento a incidenza diffusa si effettua in *Camera riverberante*, ovvero in un ambiente di prova che realizza condizioni prossime a quelle di un campo sonoro diffuso.

La misura in camera riverberante, descritta dalla norma ISO 354, comporta la determinazione del tempo di riverberazione a pavimento nudo e posando sul medesimo almeno 10 m^2 di materiale in prova: dalla differenza fra i due valori di T_{60} si può facilmente risalire al potere fonoassorbente del materiale.

7.4 Trasmissione del suono attraverso le pareti

Per introdurre il concetto di fonoisolamento consideriamo due ambienti adiacenti, 1 e 2, separati da una parete divisoria di area S . Si supponga che nell'ambiente 1 ("ambiente disturbante") sia attiva una sorgente sonora che vi determina un livello di pressione sonora L_{p1} ; il livello di pressione sonora L_{p2} nell'ambiente 2 ("ambiente disturbato") dipende sia dalla trasmissione di energia acustica da 1 a 2, sia dalla risposta acustica dell'ambiente medesimo.

Si definisce isolamento acustico D la differenza fra i livelli di pressione sonora, L_{p1} ed L_{p2} , nei due ambienti:

$$D = L_{p1} - L_{p2}$$



Il comportamento della parete nei confronti della trasmissione del suono è definito quantitativamente attraverso il suo potere fonoisolante (o attenuazione acustica) R , la cui definizione è:

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

dove:

W_i = potenza sonora incidente sulla parete, lato ambiente disturbante

W_t = potenza sonora trasmessa all'ambiente disturbato

t = coefficiente di trasmissione

Il potere fonoisolante è dunque una proprietà intrinseca della parete. Esso può essere misurato in laboratorio utilizzando due camere riverberanti affiancate e separate da un divisorio in cui viene inserita una sezione nota della parete in prova.

Noto, per via sperimentale, l'isolamento acustico D fra i due ambienti, si calcola il potere fonoisolante del divisorio "depurando" il risultato dell'effetto di assorbimento dell'ambiente 2 tramite l'equazione:

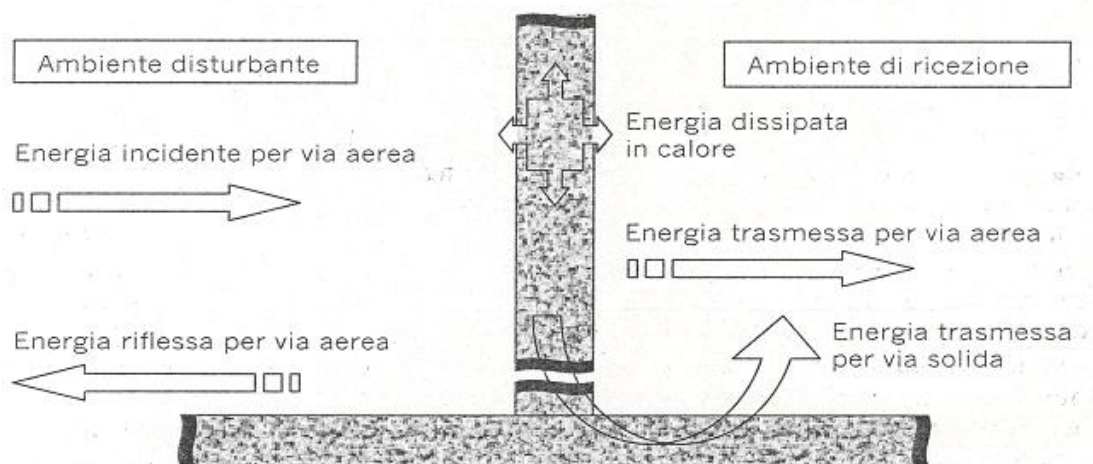
$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2}$$

dove:

S = area della parete divisoria (m^2)

A_2 = area di assorbimento equivalente dell'ambiente disturbato (m^2)

La trasmissione del suono fra gli ambienti 1 e 2 avviene nella realtà con modalità più complesse di quanto sopra ipotizzato: oltre alla trasmissione per via aerea (che avviene direttamente attraverso la superficie S) si verifica infatti anche una trasmissione per via strutturale attraverso i punti di collegamento tra il divisorio e le altre strutture adiacenti (v. figura).



L'applicazione dei valori di potere fonoisolante misurati in laboratorio (ovvero in una condizione in cui è possibile eliminare le trasmissioni laterali) a situazioni in opera deve dunque essere effettuata con le dovute cautele.

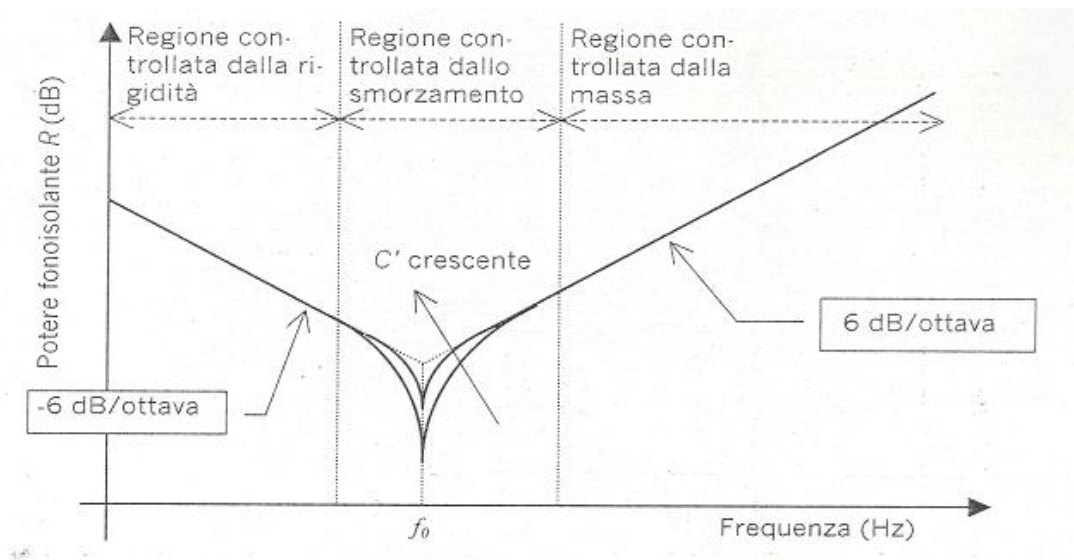
7.5 Potere fonoisolante di pareti omogenee

Consideriamo il caso semplice di trasmissione attraverso una parete omogenea monostrato, che può essere schematizzata, in prima approssimazione, come un sistema meccanico vibrante (cfr. par. 3.1) la cui frequenza fondamentale di risonanza è f_0 ; la propagazione dell'onda elastica nella parete coinvolge tre tipi di interazioni energetiche:

- l'energia cinetica di vibrazione della parete (funzione della *massa*)
- l'energia di deformazione della parete (funzione della *cedevolezza*)
- la dissipazione di energia nella parete (funzione dello *smorzamento* / resistenza meccanica)

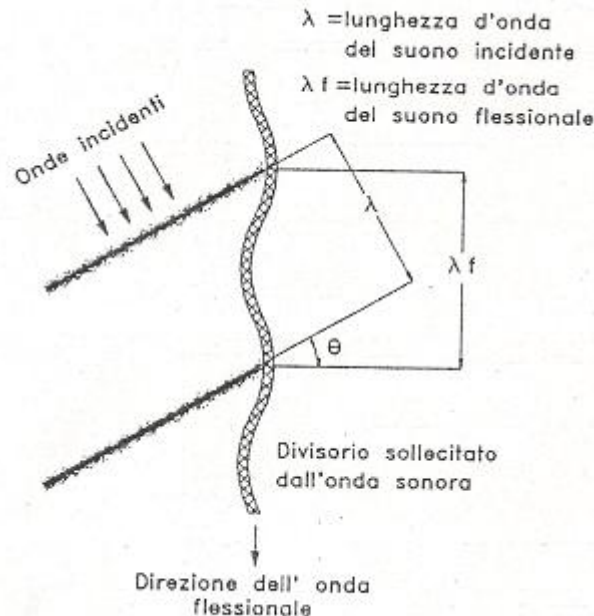
Nella propagazione di onde piane in una parete bidimensionale infinitamente estesa si evidenziano situazioni nettamente distinte (v. figura) in relazione alla frequenza della forzante, rappresentata in questo caso dall'onda sonora che incide perpendicolarmente alla parete:

- la *trasmissione non risonante*, che si verifica quando il moto forzato della struttura non va ad eccitarne i modi propri di vibrazione, è dominata dalla MASSA per $f > f_0$ e dalla RIGIDEZZA per $f < f_0$;
- la *trasmissione risonante*, che si verifica quando viene eccitato il modo proprio fondamentale di vibrazione della struttura alla frequenza di risonanza f_0 , è dominato dallo SMORZAMENTO.



In condizioni reali l'andamento in frequenza del potere fonoisolante è reso più complesso dalla presenza di ulteriori fenomeni. Innanzitutto esistono più modi propri con le rispettive frequenze di risonanza, in corrispondenza delle quali si verificano minimi locali del potere fonoisolante. In secondo luogo, in presenza di un campo sonoro diffuso la direzione di incidenza delle onde sonore è casuale: questo fatto determina tra l'altro l'insorgere di *onde flessionali* che si propagano nel piano

della parete: alla frequenza f_c dell'onda sonora incidente, per la quale si verifica coincidenza con la lunghezza d'onda del modo flessionale, si verifica un ulteriore minimo locale del potere fonoisolante.



Esaminando un andamento tipico di R in funzione di f si individuano dunque le seguenti regioni:

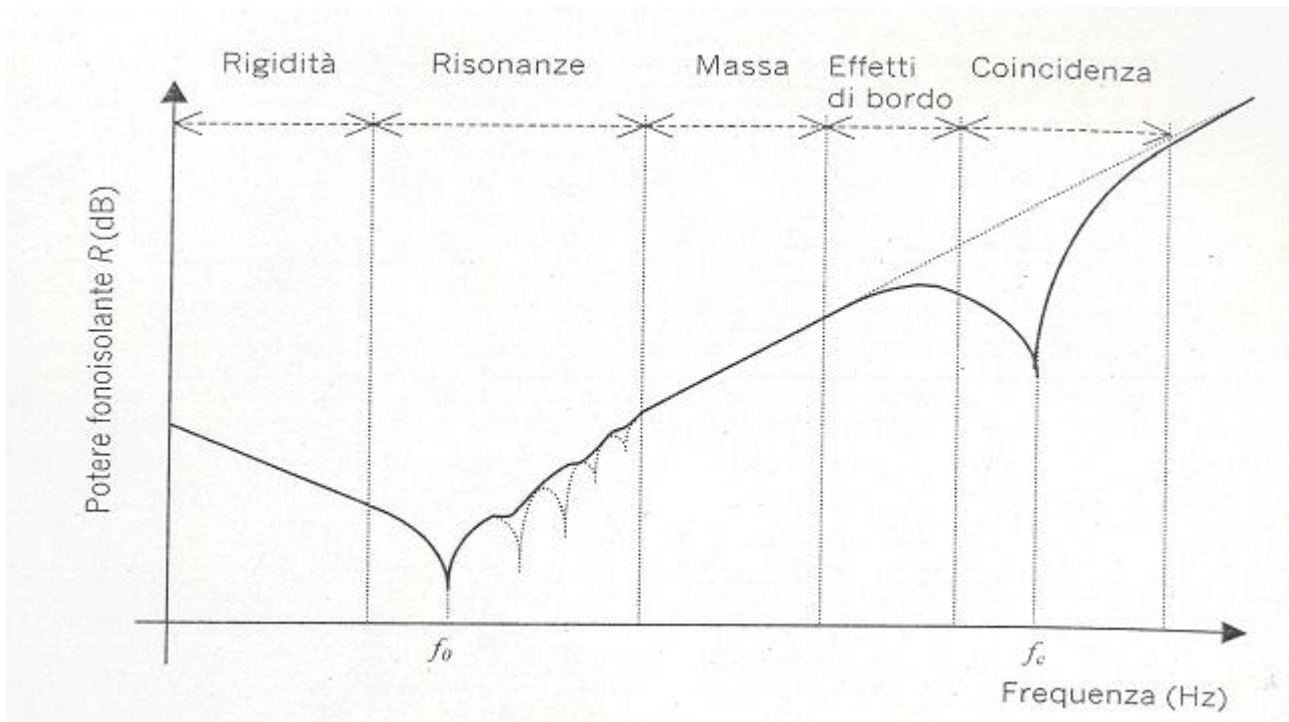
- all'estremo inferiore del campo di frequenza ($f < f_o$) il comportamento è dominato dalla RIGIDEZZA ed R presenta andamento decrescente
- la regione delle RISONANZE evidenzia l'effetto dei modi propri normali, di cui quello fondamentale è situato ad $f = f_o$
- nella regione in cui la trasmissione è dominata dalla MASSA ($f > f_o$) il potere fonoisolante aumenta con la frequenza secondo la legge della massa che, ad incidenza normale, assume la forma:

$$R_o = 20 \log (f M_s) - 42,3 \text{ (dB)}$$

dove M_s rappresenta la massa per unità di superficie della parete. Il potere fonoisolante ad incidenza diffusa può essere determinato con la relazione:

$$R_{diff} = R_o - 10 \log (0,23 R_o) \text{ (dB)}$$

- il potere fonoisolante presenta una riduzione sensibile in corrispondenza della frequenza di coincidenza f_c ; per $f > f_c$ l'andamento di R è analogo a quello descritto dalla legge di massa, da cui si discosta in misura più o meno marcata in ragione dello smorzamento della parete.



A titolo esemplificativo si riportano i valori della frequenza di risonanza fondamentale f_0 e della frequenza di coincidenza f_c per tre pareti omogenee:

Parete	f_0	f_c
Acciaio 6 mm	143 Hz	2000 Hz
Gesso 100 mm	$\ll 100$ Hz	192 Hz
Vetro 4 mm	214 Hz	3150 Hz

7.6 Potere fonoisolante di pareti composte

La legge della massa evidenzia che per ottenere un incremento del potere fonoisolante di una parete di 6 dB è necessario raddoppiarne la massa e quindi lo spessore: appare quindi evidente che tale soluzione si scontra con evidenti limiti di ingombro e di costo della parete.

Nelle applicazioni in cui è necessario realizzare pareti sottili ma piuttosto fonoisolanti, risultati soddisfacenti si possono ottenere con strutture composte dall'accoppiamento di strati in materiale rigido e pesante (ad es. lamine in piombo) con strati in materiale elastico e smorzante (ad es. strati in gomma o schiume sintetiche espanse). Un'applicazione tipica di tali strutture è la parete che separa il vano motore dall'abitacolo di un autoveicolo.



Risultati ancora migliori si possono ottenere con pareti doppie disaccoppiate. Per garantire un adeguato disaccoppiamento è importante che:

- le due pareti abbiano diverse caratteristiche e quindi valori differenti delle frequenze di risonanza e di coincidenza;
- le due pareti siano separate da un'intercapedine d'aria, possibilmente di spessore superiore a circa 80 mm e parzialmente riempita con un materassino di materiale fonoassorbente, in modo da ridurre la riverberazione acustica nell'intercapedine e quindi l'accoppiamento per via aerea;
- le pareti siano collegate alla soletta orizzontale con un giunto elastico, in modo da ridurre l'accoppiamento per via solida.

Nel caso di pareti in muratura è inoltre importante che entrambe le facce siano intonacate, in quanto l'intonaco presenta un duplice effetto positivo: elimina i ponti acustici dovuti alle fessure che possono esistere fra un mattone e l'altro e aumenta lo smorzamento della parete, migliorandone quindi il potere fonoisolante al di sopra della frequenza di coincidenza.

7.7 Isolamento del rumore da calpestio

Uno specifico aspetto del fonoisolamento di strutture edilizie orizzontali riguarda l'isolamento del rumore da calpestio, ovvero del rumore generato dall'impatto sulla superficie del pavimento che si propaga per via solida all'ambiente sottostante. Nel caso del rumore di calpestio si valutano le prestazioni complessive del sistema soletta + ambiente sollecitando la prima con una sorgente normalizzata di rumore impattivo, detta *macchina da calpestio*, e misurando il livello di pressione sonora nel locale disturbato sottostante.

La soluzione più efficace per ridurre il livello di rumore da calpestio consiste nel realizzare un pavimento galleggiante, ovvero nell'interporre tra struttura portante e sottofondo del pavimento uno strato in materiale elastico e smorzante (ad es. in gomma, lana di vetro, resine sintetiche espanse, sughero, ecc.) che deve essere tassativamente risvoltato lateralmente, in modo da evitare contatto diretto fra pavimento e muri verticali.

7.8 Silenziatori dissipativi e reattivi

L'isolamento acustico di condotti percorsi da fluidi allo stato aeriforme richiede l'inserimento di dispositivi, detti silenzianti, che possono operare secondo due distinte modalità.

I silenzianti reattivi agiscono sull'accoppiamento di impedenza fra condotto ed ambiente, in modo da minimizzare la quota di potenza sonora trasmessa. L'esempio più semplice di silenziatore reattivo è la cosiddetta camera di espansione (su questo principio si basa, ad esempio, la marmitta di scarico dei motori a combustione interna) che è sostanzialmente costituita da un tratto di sezione S_2 maggiorata rispetto alla sezione S_1 del condotto principale; il coefficiente di trasmissione t della camera di espansione risulta:

$$t = 4n / (n + 1)^2$$

dove $n = S_2 / S_1$.

Un'altra soluzione di risonatore reattivo consiste nel realizzare due condotti concentrici, separati da una parete in lamiera forata: l'accoppiamento tra lamiera forata e volume compreso tra cilindro



interno ed esterno agisce da risonatore di Helmholtz realizzando l'abbattimento della potenza sonora trasmessa attorno alla frequenza propria di risonanza.

I silenziatori dissipativi sono costituiti da tratti di condotto rivestiti di materiale fonoassorbente poroso: le onde sonore che si propagano entro al condotto interagiscono con il materiale che realizza una parziale dissipazione per porosità della potenza sonora trasportata. L'attenuazione acustica di un silenziatore dissipativo può essere stimata con l'espressione:

$$R = \frac{a^{1,4} PL}{0,08A}$$

dove:

A = area della sezione retta del silenziatore (m^2)

P = perimetro della sezione retta del silenziatore (m)

L = lunghezza del silenziatore (m)

a = coefficiente di assorbimento del materiale (-)