

ACUSTICA EDILIZIA

A cura di: Patrizio Fausti

Premessa

Lo studio della trasmissione del rumore negli edifici e la caratterizzazione dei materiali con cui vengono realizzati ha assunto una notevole importanza negli ultimi tempi, sia per l'emanazione di una nuova legislazione cogente che per la cresciuta sensibilità al problema dell'inquinamento acustico.

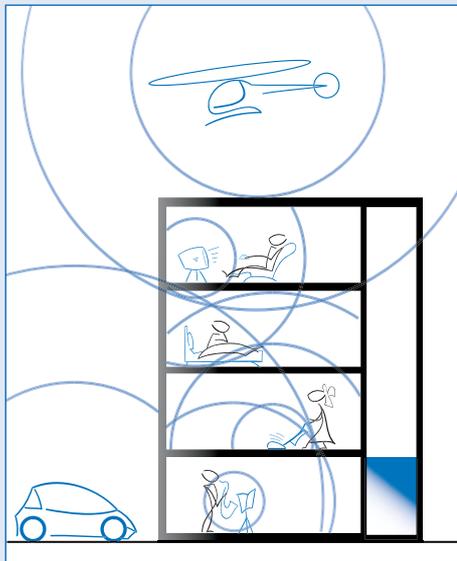
Trattare di acustica edilizia significa prendere in considerazione tutti quegli aspetti che influenzano la qualità acustica all'interno degli ambienti abitativi. Si devono considerare innanzitutto le sorgenti di rumore che possono essere percepite all'interno degli edifici; queste possono essere esterne o interne. Va poi valutato il tipo di rumore prodotto dalle sorgenti (continuo, intermittente, tonale, impattivo, etc) e le modalità con cui si propaga all'interno dell'edificio (propagazione aerea o strutturale). Risulta fondamentale, infine, considerare le modalità di attenuazione del rumore, dalla riduzione del rumore aereo mediante materiali isolanti e assorbenti allo smorzamento di rumori impattivi e vibrazioni strutturali mediante materiali anticalpestio, antivibranti, desolidarizzanti, etc.

Tutto questo processo va seguito partendo dalla fase di progettazione fino alla fase di realizzazione e di gestione. L'obiettivo deve essere quello di rispettare la legislazione vigente che, pur essendo a volte controversa, ha creato stimoli al settore delle costruzioni e ha sensibilizzato sugli aspetti qualitativi.

Tipologie di rumore nel contesto edilizio

Le sorgenti di rumore, come detto, possono essere esterne o interne all'edificio stesso. Le principali fonti di rumore nell'ambiente esterno sono costituite dal traffico, da attività produttive, da centrali termiche ed elettriche, da attività commerciali e ricreative di ogni genere. All'interno delle unità abitative il rumore può essere generato dagli impianti e dalle attività delle persone. Gli impianti da considerare come potenziali sorgenti di rumore sono

Sorgenti di rumore esterne ed interne all'edificio



quelli di climatizzazione (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione), inclusa la produzione dell'energia nella centrale termica (se interna), quelli idraulici (trasporto di fluidi, scarichi, autoclavi, etc), quelli di trasporto di persone e cose (ascensori, montacarichi, nastri trasportatori, etc). La legislazione vigente, attraverso il decreto sui "limiti delle sorgenti sonore" del 14-11-97 e il decreto sui "requisiti acustici passivi degli edifici" del 5-12-97, impone il controllo e la limitazione delle emissioni di tutte queste sorgenti. Ovviamente si devono considerare i rispettivi ambiti di applicazione e il fatto che il DPCM 5-12-97 si applica solo agli edifici di nuova costruzione o alle ristrutturazioni. Il rispetto di questi decreti dovrebbe quindi garantire l'assenza o la riduzione del disturbo connesso con la presenza di tutte queste sorgenti.

Per quanto riguarda le sorgenti di rumore interne causate dalle attività delle persone, queste possono essere dovute ad innumerevoli situazioni, anche imprevedibili, contro le quali non sempre la legislazione vigente può creare limitazioni. Ascoltare musica o la televisione, parlare, camminare, spostare sedie o altri oggetti, aprire le tapparelle, persino dormire, sono alcune delle innumerevoli situazioni che possono determinare rumori disturbanti. L'unica soluzione è avere degli edifici accuratamente realizzati in grado essi stessi, per le loro proprietà acustiche, di rendere minimo il disturbo di questo tipo di sorgenti.

Comportamento dei materiali nei confronti dell'assorbimento acustico

I materiali fonoassorbenti sono impiegati nei trattamenti acustici degli ambienti per controllare le riflessioni indesiderate, la riverberazione e il rumore. Vengono inoltre utilizzati all'interno delle strutture divisorie per fornire smorzamento ed evitare risonanze, negative per l'isolamento acustico.

A seconda del loro principio di funzionamento si possono suddividere in tre categorie:

- a) materiali porosi (sfruttano la dissipazione viscosa)
- b) risuonatori acustici o di Helmholtz (sfruttano la risonanza delle cavità)
- c) pannelli o membrane vibranti (sfruttano la risonanza del pannello).

Come si può osservare dalla figura della pagina seguente, ciascuno di questi meccanismi di assorbimento acustico è maggiormente efficiente in un determinato campo di frequenza.

Soltanto dalla combinazione di più meccanismi di assorbimento si riesce ad avere materiali che assorbono su tutto il campo di frequenza udibile.

Materiali porosi

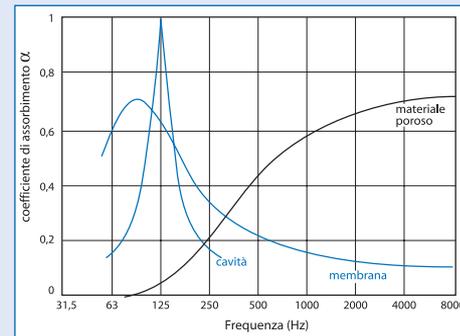
L'assorbimento acustico dei materiali porosi è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente attraverso fenomeni di attrito che si sviluppano all'interno delle micro-cavità aperte all'aria. L'onda acustica incidente fa oscillare l'aria interna ai pori che dissipa energia per attrito viscoso determinando un lieve aumento di temperatura (non percettibile dall'uomo). Esempi di materiali fonoassorbenti porosi sono le fibre minerali, i poliuretani espansi a cellule aperte, le fibre vegetali, le schiume melamminiche, le fibre di poliestere, etc.

Le caratteristiche di assorbimento acustico di questi materiali sono legate alla frequenza del suono incidente e allo spessore del materiale stesso e aumentano al crescere di entrambe.

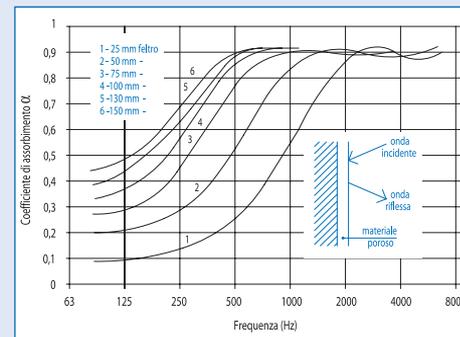
Si può notare che valori elevati di α si raggiungono alle alte frequenze, mentre alle medie e basse frequenze l'assorbimento acustico aumenta con lo spessore dei pannelli. Per avere valori elevati di assorbimento in un campo di frequenze sufficientemente esteso verso le basse frequenze occorre, pertanto, impiegare spessori adeguati di materiali fonoassorbenti porosi.

Un assorbimento selettivo a frequenze specifiche, anche nel campo delle medie e basse, si può ottenere utilizzando spessori ridotti di materiale collocato ad una certa distanza dalla parete rigida da trattare. Questo effetto può essere spiegato ricordando che l'assorbimento acustico dei materiali fonoassorbenti porosi è dovuto alla dissipazione dell'energia vibrazionale posseduta dalle molecole d'aria per attrito con le superfici della cavità, fenomeno che è massimo laddove si verificano le velocità delle particelle d'aria più elevate. Supponendo che la parete da trattare possa essere considerata perfettamente rigida, in corrispondenza di questa la velocità delle particelle d'aria sarà nulla e quindi l'efficienza del materiale fonoassorbente poroso minima. Allontanandosi dalla parete la velocità delle particelle d'aria aumenta e con essa l'efficienza del materiale fonoassorbente poroso.

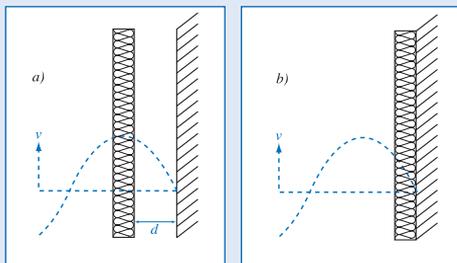
Visualizzazione dei diversi meccanismi di assorbimento acustico



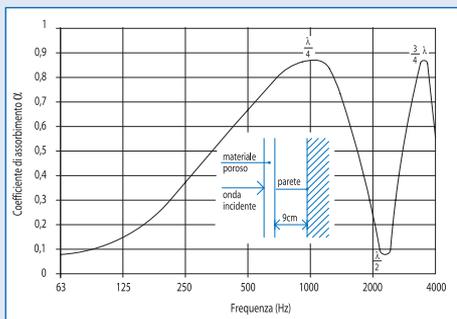
Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza e dello spessore del materiale.



Maggiore a) e minore b) efficienza nella installazione di un materiale fonoassorbente poroso su una parete rigida.



Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza per una prefissata distanza del materiale dalla parete.



Per una prefissata distanza, quindi, l'assorbimento acustico del materiale varia al variare della frequenza: nel caso di onda sinusoidale la velocità delle particelle e la dissipazione viscosa diventano massime ad una distanza "d" dalla parete pari a $\lambda/4$ o a $3/4\lambda$.

La scelta del materiale poroso dipende dal tipo di applicazione, dall'assorbimento, dalla facilità di lavorazione, dal comportamento al fuoco etc.

Nelle camere anecoiche, ad esempio, per avere elevati valori di assorbimento si usano cunei a base quadrata di dimensioni elevate costruiti solitamente con materiali fonoassorbenti porosi. Lo scopo della particolare forma a cuneo è quello di aumentare la superficie assorbente e far sì che l'onda incidente subisca una serie di riflessioni tra i cunei tali da impedire un ritorno di energia verso l'ambiente. Ciò risulta tanto più efficace quanto più le frequenze sono elevate.

Risunatori acustici

Un risunatore di Helmholtz, è costituito da una cavità di volume V definita da pareti rigide e collegata all'esterno da una apertura detta "collo" di lunghezza l e di sezione S (vedi figura pagina seguente). Il suono incidente fa vibrare l'aria contenuta nel collo del risunatore, che si comporta come una massa vibrante collegata a una molla costituita dall'aria contenuta nella cavità. Tale risunatore è in grado di dissipare energia acustica in calore per effetto dell'attrito viscoso che si verifica a causa delle oscillazioni dell'aria contenuta nel collo. La dissipazione si verifica in particolare in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza del sistema massa-molla generato per effetto dell'onda sonora incidente sulla bocca del risunatore.

La frequenza fondamentale di risonanza del risunatore di Helmholtz può essere calcolata con la relazione :

$$f_o = \frac{c_o}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{V(l + 1.6r)}} \quad [\text{Hz}]$$

dove c_0 è la velocità di propagazione del suono nel mezzo [m/s], r ed l il raggio e la lunghezza del collo del risuonatore [m], V il volume della cavità [m³].

Quando la cavità del risuonatore è vuota il sistema ha uno smorzamento piccolo, per cui l'assorbimento acustico presenta un picco netto in corrispondenza della frequenza di risonanza, l'unica in grado di penetrare all'interno della cavità. Per le caratteristiche dei risuonatori normalmente usati la frequenza di risonanza si trova nel campo delle frequenze medio-basse.

Per rendere meno selettivi i risuonatori acustici si può inserire del materiale poroso all'interno della cavità. Si ottiene un allargamento dello spettro di assorbimento ma una conseguente riduzione del picco in corrispondenza della frequenza di risonanza.

In genere è possibile realizzare dei risuonatori con frequenze di risonanza abbastanza basse, per cui essi trovano impiego come elementi complementari dei materiali porosi.

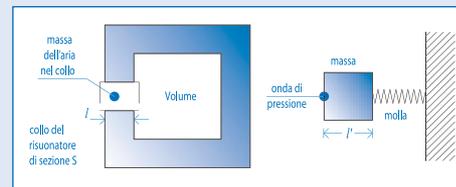
In questo campo di frequenze, agendo sullo spessore del pannello, sulle dimensioni dei fori e sulla percentuale di foratura nonché sulla distanza di montaggio dalla parete, si può rendere massimo l'assorbimento nella banda di frequenze desiderata.

Il calcolo della frequenza di risonanza di un risuonatore di Helmholtz risulta semplice utilizzando la formula di previsione. Risulta invece più complesso il calcolo del coefficiente di assorbimento acustico alla frequenza di risonanza e nel suo intorno. Esistono modelli di calcolo semplificato ma generalmente non riescono a tenere conto di tutti i fenomeni dissipativi che si possono verificare in un pannello fonoassorbente forato riempito o meno di materiale fonoassorbente.

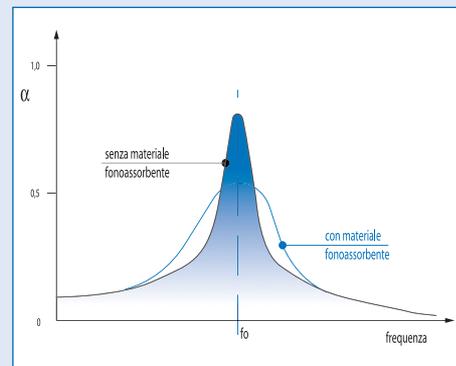
Il pannello forato risonante assorbente costituisce un'estensione del singolo risuonatore acustico; infatti, montato a una certa distanza dalla superficie da trattare, si comporta come un insieme di risuonatori di Helmholtz ciascuno costituito da un collo, corrispondente al foro del pannello, e da una cavità, costituita da una parte del volume compreso tra pannello e parete.

Il volume associato ad ogni foro si ottiene dividendo il volume totale della cavità per il numero totale di fori. Non è necessario separare fisicamente i volumi associati ad ogni foro. Il comportamento di un pannello forato si discosta di molto rispetto al comportamento di un

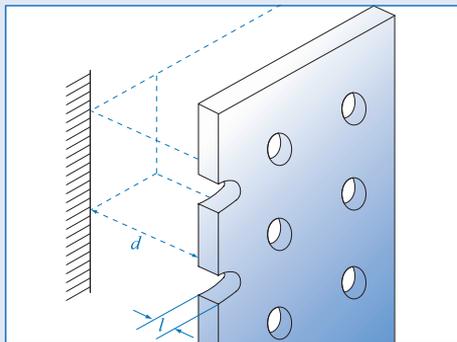
Schema e principio di funzionamento di un risuonatore.



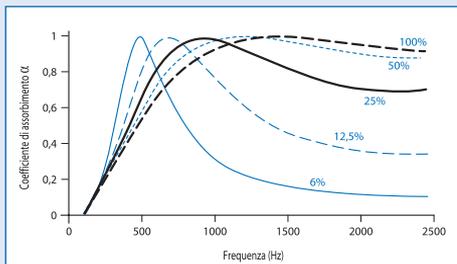
Assorbimento di un risuonatore al variare della frequenza con e senza materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità.



Schema di pannello forato risonante assorbente.



Coefficiente di assorbimento di un risonatore di Helmholtz al variare della percentuale di foratura. Raggio dei fori 2.5mm; resistività al flusso 20000 rayl/m; spessore materiale fonoassorbente 2.5 cm; spessore cavità d'aria 2.5cm; spessore pannello forato 6.3mm.



risonatore singolo. In presenza della cavità di un risonatore le particelle di aria subiscono delle variazioni di direzione che le portano a confluire maggiormente verso il foro. In presenza di più fori la mutua interazione tra essi determina la comparsa di fenomeni dissipativi anche a frequenze diverse dalla frequenza di risonanza. Per questo motivo i pannelli forati hanno uno spettro di assorbimento più ampio rispetto a quello che si ottiene con risonatori singoli. Utilizzando fori di dimensioni diverse si può contribuire all'allargamento dello spettro di assorbimento anche se l'efficienza alle singole frequenze diminuisce. Questi fenomeni, unitamente all'effetto del materiale poroso all'interno della cavità, permettono di realizzare pannelli fonoassorbenti ad ampio spettro.

Pannelli vibranti

I pannelli vibranti sono costituiti da lastre di materiale non poroso, quale ad esempio il legno compensato, montate su apposito telaio che le mantiene distanziate dalla superficie da trattare fornendo una intercapedine d'aria. Colpiti dall'onda sonora questi materiali fonoassorbenti vibrano come un diaframma su di un cuscino d'aria e assorbono l'energia acustica alle basse frequenze per effetto della dissipazione viscosa determinata dalle vibrazioni flessionali del pannello, in particolare lungo i bordi vincolati (vedi figura pagina seguente).

Il sistema può essere ancora assimilato ad una massa oscillante (il pannello) accoppiata ad un elemento elastico dotato di un certo smorzamento (l'aria racchiusa nell'intercapedine). Anche per questi pannelli è possibile definire la frequenza fondamentale di risonanza che dipende dalla sua massa per unità di superficie, dalla sua rigidità in relazione anche al suo supporto e dalla rigidità dell'intercapedine d'aria. All'aumentare della massa del pannello vibrante, e dello spessore dell'intercapedine d'aria diminuisce il valore della frequenza di risonanza, come mostrato dalla seguente relazione:

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

dove σ è la densità superficiale del pannello [Kg/m^2] e d la distanza del pannello dalla parete [m].

Per i pannelli vibranti l'assorbimento risulta essere molto selettivo nell'intorno della frequenza fondamentale di risonanza e può essere notevole alle basse frequenze. I modi propri di vibrazione del pannello di ordine superiore a quello fondamentale determinano un assorbimento inferiore rispetto a quello che si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale.

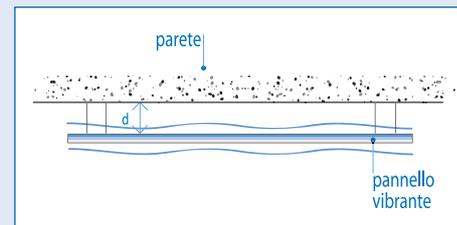
La previsione teorica del grado di assorbimento alle varie frequenze risulta particolarmente difficile perché è difficile conoscere il grado di smorzamento meccanico del pannello e perché l'assorbimento dipende anche dal campo acustico presente nell'ambiente in cui il materiale è collocato. Per questi motivi si fa solitamente riferimento a risultati sperimentali.

La presenza di pannelli leggeri o grosse superfici vetrate sulle pareti determina un elevato grado di assorbimento a bassa frequenza con conseguente basso valore del tempo di riverberazione degli ambienti.

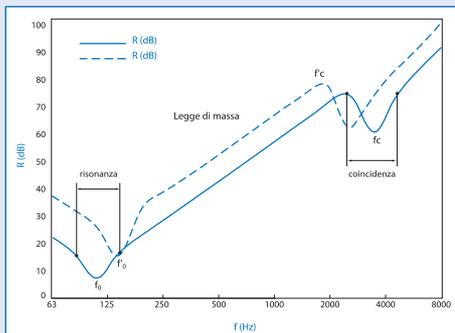
Sistemi misti

Considerando le caratteristiche di assorbimento delle tre differenti tipologie di materiali fonoassorbenti descritte, si può osservare che ciascun materiale fonoassorbente ha un campo di applicazione ben definito, per cui, per ottenere buoni valori di assorbimento acustico alle alte frequenze si adoperano materiali fonoassorbenti porosi, alle frequenze intermedie i risuonatori acustici e alle basse frequenze i pannelli vibranti. Per assorbire uno spettro di frequenze ampio si possono usare *sistemi misti* costituiti da lastre rigide (metallo, legno, gesso, ecc.) sulla cui superficie vengono praticati fori di diversa forma e dimensione, fissate ad una certa distanza dalla parete. L'intercapedine che costituisce la cavità di una molteplicità di risuonatori tra loro comunicanti, può essere o meno riempita con materiale poroso.

Schema di un pannello vibrante.



Effetto dell'aumento dello spessore sui valori della frequenza naturale di risonanza e della frequenza critica. Spessore di R > spessore di R'.



Comportamento dei materiali nei confronti dell'isolamento acustico

L'isolamento acustico è direttamente legato alla trasmissione del suono tra due ambienti differenti, in uno dei quali è presente la sorgente sonora e nell'altro il ricevitore.

Il suono, emesso dalla sorgente, si propaga nell'aria sino ad incontrare l'elemento di separazione tra i due ambienti, che entrando in vibrazione invia energia sonora verso il ricevitore. In questa schematizzazione della trasmissione del suono per via aerea la struttura di separazione si comporta come elemento passivo e condiziona, attraverso le sue caratteristiche, la trasmissione stessa.

Pareti monostrato

Si è visto precedentemente che l'andamento teorico del potere fonoisolante al variare della frequenza, per pareti sottili omogenee e isotrope, ha l'andamento schematizzato nella figura a lato dove si distinguono diverse zone in ognuna delle quali il risultato è determinato da un fattore prevalente. Si individua infatti la zona governata dalla rigidezza (-6 dB oct), la zona delle risonanze causate dalle frequenze naturali, la zona in cui vale la legge della massa (+6 dB oct), la zona della coincidenza e la zona governata da massa e smorzamento (+9 dB oct). Innanzitutto si deve osservare che per le comuni partizioni usate in edilizia la frequenza naturale si trova generalmente al di sotto dei valori di pratico interesse ($f_0 < 100$ Hz).

I valori della frequenza critica e la relativa zona della coincidenza dipendono invece dallo spessore e dalle altre caratteristiche del materiale. Per molte pareti pesanti la coincidenza si verifica intorno a 100-300 Hz.

Dalle formule di calcolo delle due frequenze si osserva che la rigidezza della struttura è direttamente proporzionale alla frequenza naturale ed inversamente proporzionale alla frequenza critica. Essendo la rigidezza funzione del modulo di Young E e dello spessore, si osserva che aumentando uno di questi due parametri aumenta la frequenza naturale e diminuisce la frequenza critica.

Nella progettazione dei pannelli si cerca di massimizzare R nel campo di frequenze di interesse nell'edilizia civile, tale campo è compreso tra 100 e 5000 Hz circa. È quindi

desiderabile garantire che sia f_0 che f_c siano situati fuori da questo campo di frequenze. Questo potrebbe accadere o con rigidità molto basse ma a scapito della resistenza della struttura, ottenendo $f_0 < 100\text{ Hz}$ e $f_c > 5000\text{ Hz}$, oppure con rigidità piuttosto alte tali da portare sia f_0 che f_c sotto o comunque prossimi a 100 Hz .

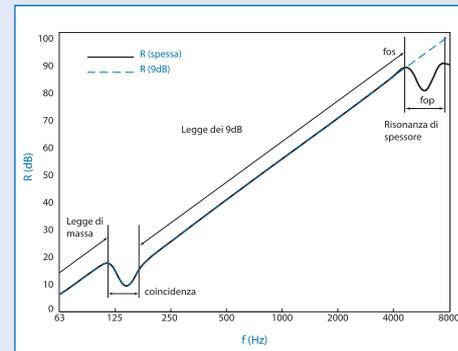
Aumentando ad esempio lo spessore, si ha un locale aumento di R (tra f_0 e f_c) per effetto del conseguente aumento della massa ma, la legge di massa, risulta valida in un campo più ristretto. In linea generale si può affermare che il potere fonoisolante di un singolo pannello è determinato dalla sua massa: tanto maggiore è la massa e/o lo spessore del pannello tanto maggiore risulta il suo potere fonoisolante, ma essendo la frequenza critica inversamente proporzionale allo spessore del pannello, ogni tentativo di aumentare il potere fonoisolante tramite un aumento dello spessore comporta come risultato anche una diminuzione della frequenza critica.

L'aumento di spessore permette comunque di aumentare l'isolamento alle frequenze medio basse dove è più difficile solitamente avere buoni risultati.

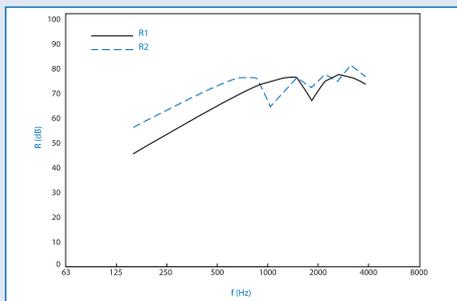
Quando lo spessore è elevato si innescano fenomeni di "risonanza di spessore" alle alte frequenze dovuti alle onde longitudinali e di taglio che si creano all'interno del muro. Il percorso chiuso compiuto dalle onde è in questo caso pari allo spessore della parete. La teoria della "parete sottile" non è in grado di spiegare questo fenomeno dato che non tiene conto delle onde longitudinali e trasversali che, per pareti spesse e ad alte frequenze, assumono invece un ruolo importante. L'insorgenza di risonanze di spessore determina una forte riduzione del potere fonoisolante ad alta frequenza. L'effetto delle risonanze di spessore si manifesta per spessori superiori a circa $15\text{--}20\text{ cm}$ in base alle altre caratteristiche della parete. Al di sotto di tale spessore le risonanze si verificano con frequenze superiori a 5000 Hz .

Nella figura a lato si può osservare l'andamento del potere fonoisolante per una parete tipo di $15\text{--}20\text{ cm}$ di spessore. Si vede, in questo caso, che la coincidenza si verifica intorno ai 100 Hz e che insorgono le risonanze di spessore intorno a 5000 Hz .

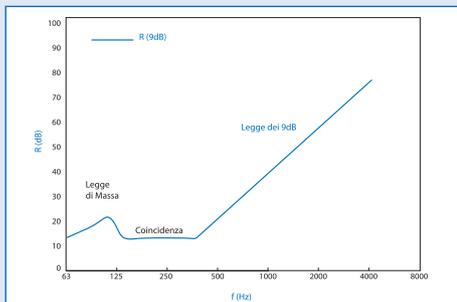
Andamento del potere fonoisolante per pareti spesse: visualizzazione dell'effetto dell'insorgenza delle risonanze di spessore alle alte frequenze.



Potere fonoisolante calcolato con la teoria delle pareti arbitrariamente spesse nei casi di pareti con $h=20\text{cm}$ (R1) e $h=40\text{cm}$ (R2). In entrambi i casi $E=1.36 \times 10^{10}\text{Pa}$, $\rho=2300\text{kg/m}^3$, $\nu=0.3$, $\eta=0.02$.



Andamento del potere fonoisolante per pareti spesse e non omogenee: visualizzazione dell'effetto dell'ampliamento della zona di coincidenza.



A titolo di esempio si riportano nella tabella sottostante i valori delle frequenze critiche e delle frequenze di risonanza di spessore (trasversali f_{OS} e longitudinali f_{Op}) per pareti dello stesso tipo ma di diverso spessore.

Spessore h (cm)	Frequenza critica f_c (Hz)	Risonanza f_{OS} (Hz)	Risonanza f_{Op} (Hz)
5	500	15100	28200
10	250	7550	14100
20	125	3775	7050
30	83	2515	4700
40	63	1890	3525

Frequenze critiche e di risonanza per pareti di diverso spessore con $E=1.36 \times 10^{10}\text{Pa}$, $\rho=2300\text{kg/m}^3$, $\eta=0.02$ e $\nu=0.3$.

Nella figura a lato sono riportati gli andamenti del potere fonoisolante sopra la frequenza critica per due pareti di spessore pari a 20 e 40 cm. Si può osservare come il raddoppio dello spessore, e di conseguenza della massa superficiale, determinino un aumento del potere fonoisolante soltanto fino ad una certa frequenza. Per frequenze superiori le due pareti forniscono valori abbastanza simili anche se oscillanti a causa delle risonanze. Per un certo materiale, indipendentemente dal suo spessore, sussiste quindi una sorta di limite superiore (altipiano) del valore del potere fonoisolante a tutte le frequenze.

Per i materiali non omogenei, come ad esempio i laterizi e i blocchi di argilla, la teoria delle pareti sottili omogenee diventa sempre meno applicabile. Questo è dovuto al fatto che le proprietà meccaniche dei materiali, non essendo costanti lungo la parete, determinano valori incerti della frequenza critica e delle frequenze di risonanza. Molto spesso, inoltre, queste pareti vengono realizzate con uno spessore piuttosto elevato determinando anche fenomeni di risonanza di spessore alle alte frequenze.

La non omogeneità della parete determina l'ampliamento della zona di coincidenza. L'effetto si può schematizzare ipotizzando una zona di coincidenza compresa tra una frequenza critica

inferiore e una frequenza critica superiore ottenute rispettivamente dalla rigidità flessionale massima e minima della parete.

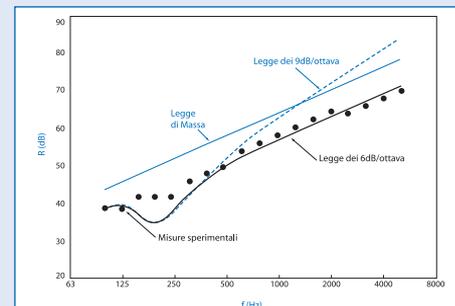
Al di sopra della frequenza critica superiore l'andamento teorico del potere fonoisolante R non sembra essere influenzato dalla non omogeneità e può essere ancora ipotizzata la validità della legge dei 9dB del caso isotropo, almeno fino ad eventuali fenomeni di risonanza di spessore. Confronti tra curve teoriche e sperimentali hanno comunque mostrato come al di sopra della frequenza critica sia più attendibile una crescita del potere fonoisolante secondo la legge dei 6 dB per ottava piuttosto che quella dei 9 dB per ottava (vedi figura a lato).

Pareti doppie

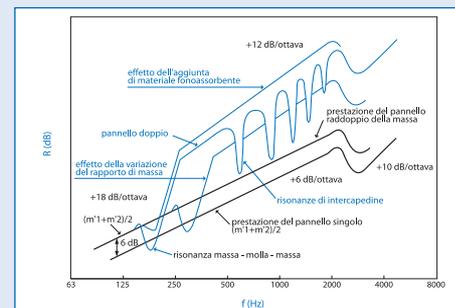
L'andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti doppie in cartongesso è quello riportato nella figura a lato. Come si può osservare, per questi materiali la zona di interesse rientra in quella in cui è valida la legge della massa. Nella figura si osservano innanzitutto le curve relative al potere fonoisolante del pannello singolo e del pannello di massa uguale alla somma dei due pannelli. Nel caso di pareti doppie si osserva come l'andamento del potere fonoisolante varia al variare della frequenza ed è influenzata dalla presenza o meno di materiale fonoassorbente all'interno della cavità. Si distinguono due frequenze nelle quali si verifica una modifica netta delle proprietà isolanti. La prima è la frequenza del sistema massa-molla-massa costituito dalle due pareti e dalla cavità. Al di sotto di tale frequenza le due pareti sono completamente accoppiate e il comportamento è quello di una parete di massa uguale alla somma delle masse dei due pannelli. In corrispondenza della frequenza di risonanza il potere fonoisolante diminuisce. La diminuzione è tanto maggiore quanto minore è lo smorzamento. In presenza di materiale fonoassorbente all'interno della cavità la diminuzione è piccola.

La seconda è la frequenza di risonanza della cavità. A tale frequenza la lunghezza d'onda è comparabile con le dimensioni della cavità e, andando verso le basse frequenze, iniziano risonanze in direzione perpendicolare ai pannelli. Al di sopra della frequenza di risonanza della cavità i due pannelli sono completamente disaccoppiati e il potere fonoisolante corrisponde

Confronto tra valori teorici (linee continue e tratteggiate) e sperimentali (punti) per un pannello di cemento di 15 cm.



Andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti doppie in cartongesso: visualizzazione degli effetti del raddoppio della massa, delle masse separate con e senza materiale fonoassorbente in cavità e della variazione del rapporto delle masse.



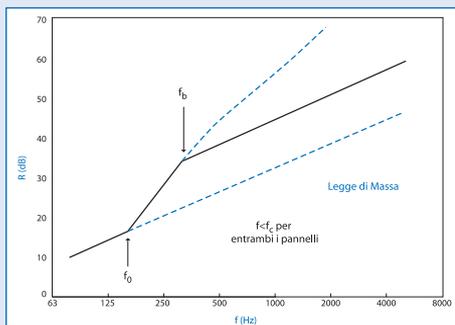
all'incirca alla somma dei poteri fonoisolanti dei singoli pannelli, con una pendenza di circa 6 dB/ottava. Tra le due frequenze si ha una pendenza molto ripida (circa 18 dB/ottava). La presenza del materiale fonoassorbente determina la riduzione o l'eliminazione delle risonanze di intercapedine che altrimenti provocano dei buchi nel potere fonoisolante al variare della frequenza. Alle alte frequenze (circa 2500-3150 Hz) si osserva il fenomeno della coincidenza che rimane presente sia nel pannello singolo che nel pannello doppio.

La variazione del rapporto delle masse superficiali dei due pannelli determina un innalzamento della frequenza di risonanza del sistema massa-molla-massa e una conseguente riduzione del potere fonoisolante.

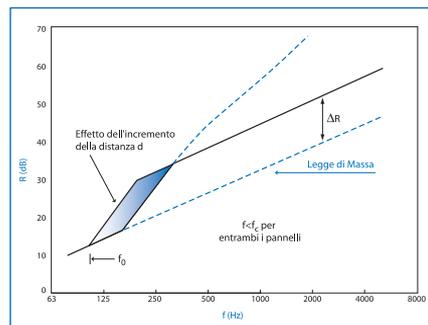
Solitamente le strutture leggere sono sorrette da un telaio metallico. Questa struttura determina dei punti di connessione tra i pannelli che fa diminuire il potere fonoisolante, in particolare verso le alte frequenze.

Poiché in corrispondenza della frequenza di risonanza massa-molla-massa il valore del potere fonoisolante è molto piccolo, è importante che tale frequenza cada al di fuori del campo di interesse. Lo spostamento verso il basso di questa frequenza si può ottenere sia aumentando la distanza tra i pannelli che aumentando la massa dei pannelli.

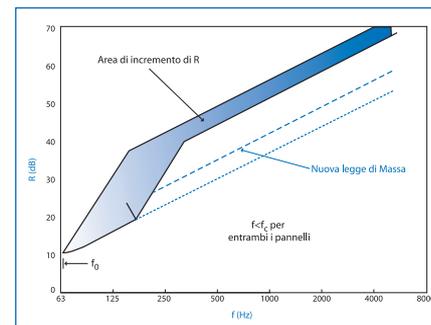
Effetto delle connessioni sul potere fonoisolante di una parete doppia in cartongesso



Effetto dell'aumento della distanza tra i pannelli



Effetto dell'aumento della massa dei pannelli



Per le pareti doppie in laterocemento (cosiddette pesanti), il principio di funzionamento è analogo anche se, come visto precedentemente, il campo di frequenze di interesse è quasi tutto fuori dalla validità della legge di massa. A causa delle risonanze che si verificano all'interno dello spessore dei pannelli pesanti, la pendenza della curva di ciascun pannello rimane all'incirca di 6 dB/ottava anche nella zona al di sopra della coincidenza. Nel caso dei pannelli pesanti si verifica un maggiore effetto dovuto all'energia trasmessa al bordo del pannello. Questo perché i singoli pannelli sono più pesanti e più rigidi e sono maggiormente accoppiati alla struttura laterale.

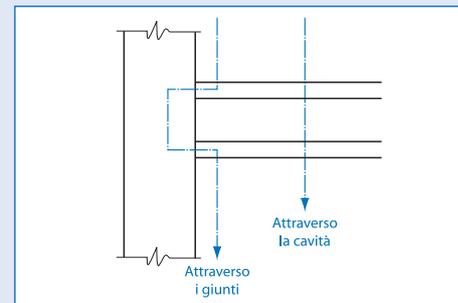
Come i materiali fibrosi modificano le prestazioni acustiche delle pareti multistrato

Nella figura a lato, in basso, è riportato l'andamento teorico del potere fonoisolante di pareti doppie leggere in funzione delle proprietà fonoassorbenti del materiale utilizzato all'interno della cavità. Le proprietà assorbenti sono in questo caso espresse in termini di resistività al flusso dell'aria. Per materiali porosi si può supporre un incremento dell'assorbimento acustico all'aumentare della resistività.

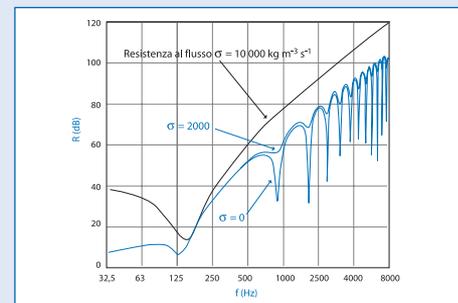
L'effetto del riempimento parziale della cavità con materiale fibroso è stato studiato sperimentalmente (figura a pagina seguente). Si è visto che l'introduzione di una strato di materiale fibroso, rispetto all'assenza di materiale, introduce un beneficio notevole. La percentuale di riempimento della cavità fa migliorare ulteriormente le prestazioni acustiche anche se con benefici meno evidenti.

Nel caso di pareti doppie in latero-cemento l'effetto del materiale fonoassorbente all'interno della cavità è minore rispetto a quello che si verifica con le pareti leggere in cartongesso.

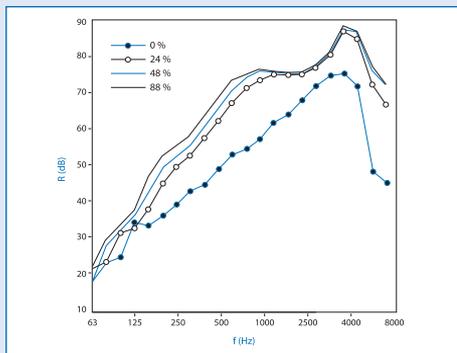
Visualizzazione della trasmissione laterale per una parete doppia



Andamento teorico del potere fonoisolante per incidenza normale di una parete doppia al variare delle proprietà assorbenti del materiale posto nella cavità ($m_1=m_2= 3 \text{ kg/m}^2$; $d=0.2 \text{ m}$) (Fahy)



Influenza del riempimento della cavità in una parete doppia disaccoppiata.



Esempio di trasmissione di rumore impattivo.



Comportamento dei materiali nei confronti dei rumori impattivi

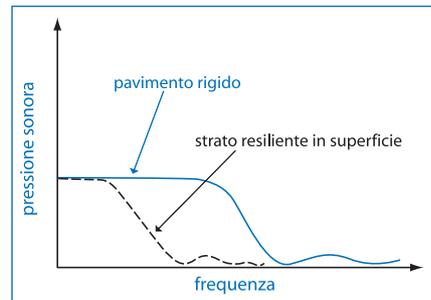
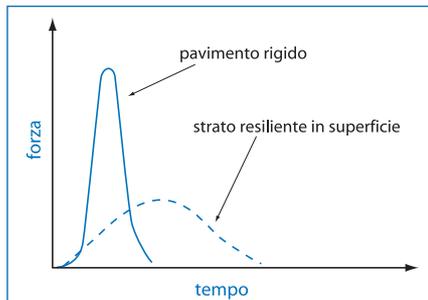
I rumori impattivi negli edifici, sono quelli causati dai passi, dalla caduta di oggetti, dallo spostamento di tavoli e sedie, da lavorazioni effettuate su pavimenti e pareti (trapano, martellate, ...), etc. La maggior parte di questi rumori interessano il complesso pavimento-solaio.

I rumori impattivi o gli urti che si verificano contro i pavimenti, le pareti e le strutture si propagano all'interno degli edifici e vengono poi reirradiati negli ambienti, vicini e lontani, purché collegati rigidamente con il punto in cui è stato innescato il rumore.

La propagazione e la reirradiazione del rumore si verificano allo stesso modo con cui si propaga e viene reirradiato il rumore aereo: quello che cambia è la modalità e la quantità di energia che viene trasferita dalla sorgente alle strutture.

Quando un materiale rigido urta contro un altro materiale rigido la forza impattiva viene trasferita con un picco elevato e in breve tempo. L'urto determina la generazione di rumore e vibrazioni ad ampio spettro. Se invece uno dei due materiali tra i quali avviene l'impatto (o anche entrambi) ha caratteristiche resilienti, la forza impattiva viene trasferita con un picco più basso ma in un tempo più lungo, dovuto alla deformazione del materiale resiliente.

Andamento della forza impattiva e del rumore generato dall'urto nel caso di materiali rigidi o resilienti.



L'impulso complessivamente fornito alla struttura è lo stesso del caso precedente ma il rumore e le vibrazioni che si generano hanno uno spettro maggiormente spostato verso le basse frequenze. Il rumore reirradiato avrà quindi un livello complessivo in dB(A) inferiore.

Lo spettro di rumore reirradiato dipenderà anche dalla capacità di smorzamento delle vibrazioni posseduta dalla struttura. Lo smorzamento dipende dalle caratteristiche intrinseche del materiale (smorzamento interno), dalle caratteristiche di radiazione della struttura (smorzamento per radiazione acustica) e dalle caratteristiche di vincolo strutturale (smorzamento per accoppiamento ai bordi).

Proprietà fisiche dei materiali correlate con le prestazioni acustiche

Resistenza al flusso

La resistenza al flusso d'aria di materiali porosi è una proprietà che permette di valutare indirettamente alcune proprietà acustiche come l'assorbimento e l'attenuazione.

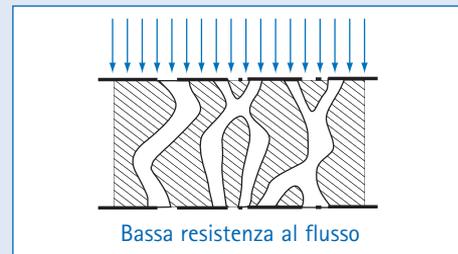
La resistenza al flusso si definisce nel seguente modo:

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3]$$

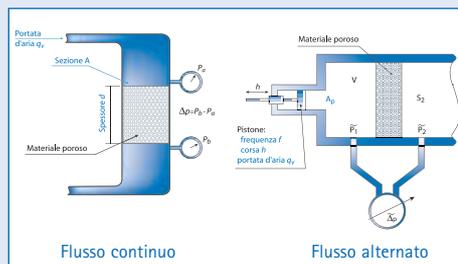
dove Δp è il gradiente di pressione [Pa] misurato prima e dopo il passaggio di un flusso di aria Q_v (m^3/s) attraverso il provino.

La resistenza al flusso specifica si ottiene moltiplicando la resistenza al flusso per la superficie del campione:

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}]$$



Misura della resistenza al flusso - UNI EN 29053



La resistività al flusso si ottiene dividendo la resistenza al flusso specifica per lo spessore del campione:

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{v \cdot d} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s/m}^2]$$

La resistività è una proprietà intrinseca del materiale e non dipende dalle sue dimensioni e dal suo spessore.

La misura della resistenza al flusso può essere effettuata mediante un flusso continuo o un flusso alternato di aria. Entrambe le tecniche sono descritte nella normativa UNI EN 29053.

Rigidità dinamica

La rigidità dinamica di un materiale resiliente è il rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico. Nel caso dei pavimenti galleggianti si usa la rigidità dinamica per unità di superficie che è espressa in N/m^3 .

$$s' = \frac{F / A}{\Delta L}$$

con "F" forza dinamica applicata sul campione, "A" area del campione e "ΔL" variazione di lunghezza dovuta alla forza applicata.

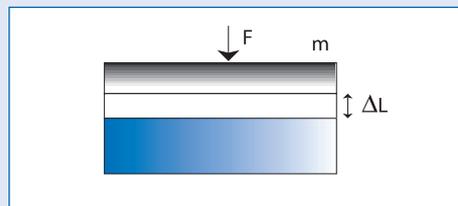
La rigidità dinamica è una proprietà intrinseca del materiale ed è correlata con il modulo di elasticità "E" (o modulo di Young) e lo spessore iniziale secondo la seguente formula:

$$s' = \frac{E}{L_0}$$

essendo "E" definito come il rapporto tra la tensione normale e la deformazione:

$$E = \frac{F L_0}{A \Delta L}$$

Spostamento dovuto all'applicazione di una forza dinamica



La misura della rigidità dinamica di materiali utilizzati per i pavimenti galleggianti si effettua secondo la normativa UNI EN 29052.

Un carico appoggiato per lungo tempo sul materiale può cambiare le sue proprietà fisiche, quindi la rigidità dinamica del materiale cambia e di conseguenza anche la sua capacità di ridurre il rumore di calpestio.

La rigidità dinamica cambia poiché la variazione permanente di spessore del materiale dovuta al carico statico fa variare la frequenza di risonanza secondo la seguente equazione:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}}$$

dove "g" è l'accelerazione di gravità e " δ_{st} " è la variazione permanente di spessore dovuta al carico statico.

L'influenza del carico statico viene valutata attraverso la misura della comprimibilità del materiale resiliente. La comprimibilità è un valore che esprime il sovraccarico sul pavimento a cui il materiale isolante è in grado di resistere mantenendo inalterato, nel tempo, il valore di rigidità dinamica. La misura della comprimibilità viene effettuata secondo la normativa UNI EN 12431.

La misura sperimentale dell'isolamento acustico (potere fonoisolante, potere fonoisolante apparente e isolamento di facciata) e del rumore di calpestio

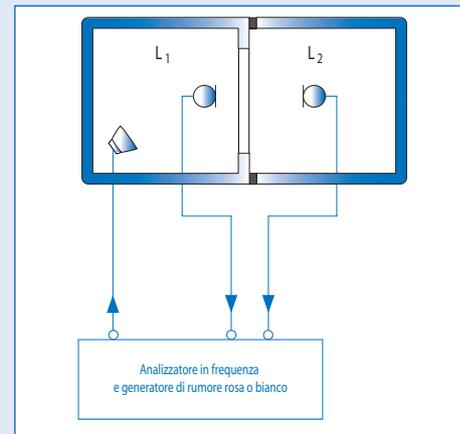
Misura sperimentale del potere fonoisolante

La determinazione sperimentale del potere fonoisolante R di una parete viene effettuata in laboratorio secondo la normativa UNI EN ISO 140-3. I due ambienti sono separati da giunti elastici e poggiano su fondazioni distinte. In questo modo le trasmissioni laterali di energia sono ridotte al minimo.

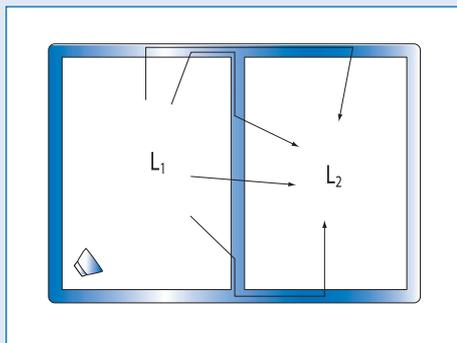
Per ciascuna frequenza si misurano i livelli di pressione sonora nell'ambiente disturbante L_1 e nell'ambiente ricevente L_2 , e il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente. Il potere fonoisolante R si ottiene dalla seguente espressione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

Schema di misura del potere fonoisolante in laboratorio.



Misura potere fonoisolante apparente R' in opera.



in cui S è la superficie del divisorio ed A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente [m^2].

Misura sperimentale del potere fonoisolante apparente

La misura del potere fonoisolante apparente R' in opera si effettua secondo la norma UNI EN ISO 140-4. Il potere fonoisolante apparente si esprime con la seguente espressione, del tutto simile a quella del potere fonoisolante di laboratorio:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

In questo caso la misurazione tiene conto, oltre che della trasmissione diretta, anche della trasmissione laterale.

La valutazione dell'isolamento acustico di un divisorio in opera si può effettuare anche attraverso la determinazione dell'isolamento acustico normalizzato D_n o dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione D_{nT} .

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{A}{A_0} \quad [\text{dB}]$$

dove A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente e A_0 l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento, pari a 10 m^2 .

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e $T_0 = 0.5 \text{ s}$ è il tempo di riverberazione di riferimento.

Misura sperimentale dell'isolamento acustico di facciata

La determinazione sperimentale dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate viene eseguita secondo il procedimento prescritto dalla norma UNI EN ISO 140-5. La norma descrive diverse procedure di misura dell'isolamento acustico di facciata, basate sia sull'utilizzo di un altoparlante come sorgente sonora esterna, sia sull'uso del rumore da traffico. Vengono inoltre definiti diversi parametri acustici. Il DPCM 5-12-97 sui requisiti acustici passivi degli edifici richiede la verifica dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT}$. Il parametro è misurabile sia con un altoparlante ($D_{ls,2m,nT}$) che con il rumore da traffico ($D_{tr,2m,nT}$), e viene calcolato con la seguente espressione:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \cdot \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora all'esterno, 2 m davanti alla facciata; L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente, $T_0=0.5\text{s}$.

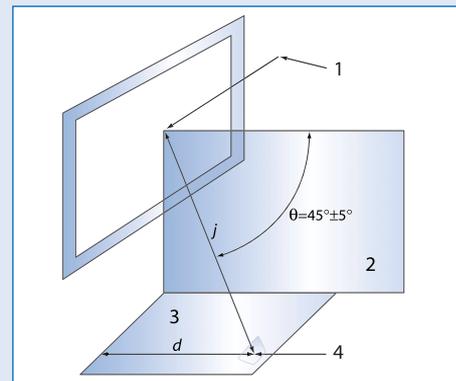
Se la misura di $D_{2m,nT}$ viene effettuata con un altoparlante, questo va posizionato preferibilmente su terreno, rivolto verso la facciata in prova, con un angolo di $45^\circ \pm 5^\circ$ rispetto la normale alla facciata, ad una distanza minima in orizzontale di 5 m dal piano più esterno che individua la facciata in prova. Il microfono esterno va posizionato a metà della facciata, ad una distanza di 2 m dal piano più esterno che individua la facciata in prova, ad una altezza di 1.5 m dal piano del pavimento.

Misura sperimentale del rumore di calpestio

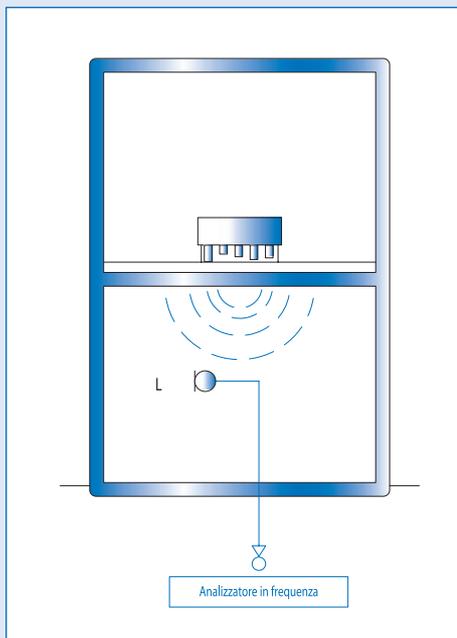
Il requisito acustico che caratterizza il comportamento dei pavimenti e dei solai nei confronti dei rumori impattivi è il *livello di rumore di calpestio*.

La prestazione viene valutata attraverso la misura del livello di pressione sonora nell'ambiente sottostante quando sul pavimento agisce una macchina normalizzata generatrice di rumori impattivi.

Schema per il posizionamento della sorgente sonora nella misura dell'isolamento di facciata.



Schema di misura del livello di rumore di calpestio



La misura in laboratorio del rumore di calpestio è descritta nella norma UNI EN ISO 140-6 mentre per la misura in opera si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 140-7. La norma UNI EN ISO 140-8 descrive invece la misura in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato.

Le misure in opera vengono eseguite in edifici finiti e riguardano l'intero solaio. Dalle misure di livello sonoro e tempo di riverberazione per ciascuna frequenza si calcolano i livelli di rumore di calpestio normalizzato L'_n (a cui fa riferimento il DPCM 5-12-97) o normalizzato secondo il tempo di riverberazione L'_{nT} :

$$L'_n = L - 10 \log \frac{A_0}{A} \quad [\text{dB}]$$

$$L'_{nT} = L - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove L è il valore medio della pressione sonora misurato nell'ambiente ricevente quando sul pavimento in prova è in funzione il generatore; A è l'area equivalente di assorbimento acustico dello stesso ambiente; A_0 è l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento, pari a 10 m^2 ; T è il tempo di riverberazione della camera ricevente; T_0 il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0.5 s .

Indici di valutazione

Le misurazioni dei requisiti acustici passivi degli edifici in opera e quelle delle proprietà dei materiali in laboratorio vengono eseguite in funzione della frequenza in bande di $1/3$ di ottava, nel campo compreso tra 100 e 3150 Hz per le misure in opera e tra 100 e 5000 Hz in laboratorio. La rappresentazione in frequenza è molto utile per la valutazione qualitativa del comportamento del campione in prova. Per la valutazione complessiva di tale comportamento e anche per la necessità di esprimere in maniera sintetica i valori limite dei requisiti acustici, si utilizza generalmente un unico parametro denominato *indice di valutazione*. Tale indice viene impiegato per classificare le curve del potere fonoisolante (R_w), del potere fonoisolante

apparente (R'_w), dell'isolamento acustico standardizzato di facciata ($D_{2m,nT,w}$) e del livello di rumore di calpestio (L_{nw} e L_{nTw}). I metodi di calcolo utilizzati per determinare i valori degli indici di valutazione sono riportati nelle normative UNI EN ISO 717 parti 1 e 2. Le normative riportano le curve di riferimento per il calcolo degli indici di valutazione in bande di terzi di ottava e in ottave. Nei capitolati e nella legislazione si fa riferimento, solitamente, ai terzi di ottava.

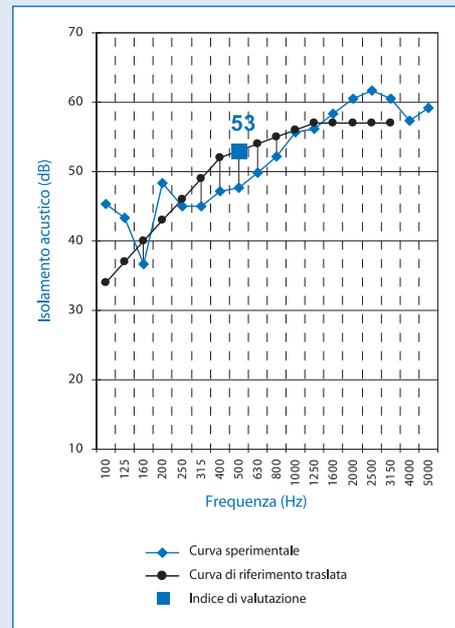
Indice di valutazione dell'isolamento acustico

Il valore dell'indice di valutazione è ottenuto facendo scorrere la curva di riferimento, per passi di 1 dB, in alto e in basso rispetto alla curva sperimentale (di R , R' , $D_{2m,nT}$, etc.), in modo tale che la somma algebrica degli scostamenti sfavorevoli (tratti in cui la curva sperimentale si trova al di sotto della curva di riferimento), diviso il numero totale di bande di frequenza considerate (16 per i terzi di ottava, 5 per le ottave), sia inferiore o uguale, ma il più possibile vicino, a 2 dB. Quando questa condizione è verificata si legge il valore dell'indice di valutazione sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz (vedi figura a lato).

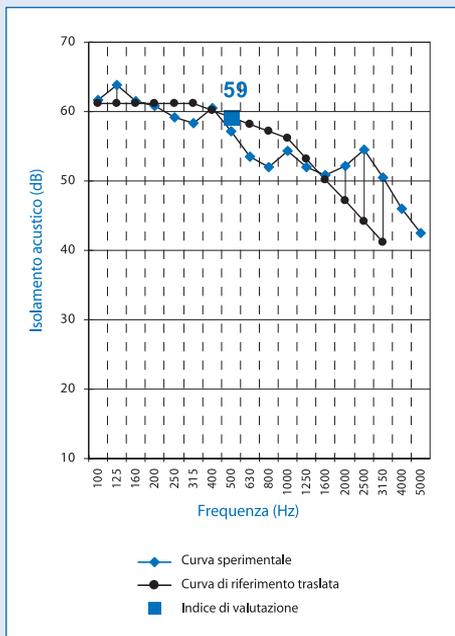
Indice di valutazione del livello di rumore di calpestio

Il valore dell'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio (L_{nw} , L_{nTw} , etc) si ottiene sovrapponendo la curva di riferimento riportata nella normativa UNI EN ISO 717-2 alla curva sperimentale, trasladando la curva di riferimento per passi di 1 dB in modo che la somma degli scostamenti sfavorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento (curva sperimentale sopra alla curva di riferimento) diviso il numero totale di bande sia inferiore o uguale, ma comunque più vicino possibile, al valore di 2 dB. Il valore della curva di riferimento a 500 Hz rappresenta l'indice di valutazione del livello di calpestio (vedi figura pagina seguente).

Determinazione dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico



Determinazione dell'indice di valutazione per il rumore di calpestio



Termini di adattamento spettrale per l'isolamento al rumore aereo

L'utilizzo degli indici di valutazione (singolo numero) determina una perdita di informazione rispetto ai dati in frequenza. Il metodo utilizzato, inoltre, fa sì che il risultato finale sia particolarmente influenzato da quelle bande in cui si ha una grossa differenza tra curva sperimentale e curva di riferimento e soltanto nel caso sfavorevole. Valori molto alti di isolamento in alcune bande di frequenza possono essere del tutto influenti ai fini del calcolo dell'indice di valutazione. Valori molto bassi su una singola banda, invece, possono influenzare fortemente l'indice di valutazione. L'utilizzo dei termini di adattamento spettrale, previsto dalla normativa UNI EN ISO 717-1 all'appendice A, tende a compensare parzialmente questa perdita di informazione e permette di confrontare meglio i risultati di misurazione senza utilizzare i dati di frequenza. L'uso dei termini di adattamento dello spettro (C , C_{tr}) è stato introdotto per correggere il valore dell'indice di valutazione quando il divisorio si riferisce a situazioni pratiche in cui è prevista una sorgente di rumore riconducibile al rumore rosa (C) o al rumore da traffico (C_{tr}).

Il termine di adattamento allo spettro C è calcolato nel modo seguente:

$$C = X_{A,1} - X_w \quad [\text{dB}]$$

dove $X_{A,1}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore rosa, X_w è l'indice di valutazione tradizionale.

Il termine di adattamento allo spettro C_{tr} è calcolato nel modo seguente:

$$C_{tr} = X_{A,2} - X_w \quad [\text{dB}]$$

dove $X_{A,2}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore da traffico, X_w è l'indice di valutazione tradizionale.

Gli spettri del rumore rosa (1) e del rumore da traffico (2) sono forniti dalla norma al punto 4.3 e all'appendice B per i campi di frequenze estese tra 50 Hz e 5000 Hz.

Nell'appendice A.3 vengono indicate le applicazioni dei termini di adattamento spettrale per altri tipi di rumore. Il termine C calcolato con lo spettro 1 del rumore rosa, può essere

utilizzato per attività umane, traffico ferroviario e autostradale a velocità medie o alte, altre sorgenti che emettono rumore principalmente a frequenze medie e alte. Il termine C_{tr} calcolato con lo spettro 2 del rumore da traffico, può essere utilizzato per traffico stradale urbano, traffico ferroviario a bassa velocità, altre sorgenti che emettono rumore principalmente a frequenze basse e medie.

Termini di adattamento spettrale per il livello di rumore di calpestio

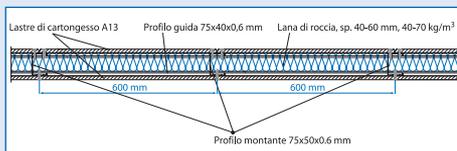
Anche per il livello di rumore di calpestio, l'utilizzo degli indici di valutazione (singolo numero) determina una perdita di informazione rispetto ai dati in frequenza. L'utilizzo della curva di riferimento per il rumore di calpestio si è rivelata molto appropriata per i solai dotati di rivestimento resiliente o pavimento galleggiante. La curva di riferimento, invece, non penalizza adeguatamente quei solai con forti componenti a bassa frequenza, come quelli con struttura in legno o quelli per i quali la risonanza del pavimento galleggiante determina un incremento del livello sonoro a bassa frequenza. Scostamenti sfavorevoli alle alte frequenze sono inoltre determinanti ai fini dell'indice di valutazione poiché alle alte frequenze la curva di riferimento assume valori molto bassi. In questi casi, come per esempio i solai grezzi, la curva di riferimento penalizza fortemente il risultato. Per dare la possibilità di tenere conto di tali effetti è stato introdotto un termine di adattamento dello spettro per il rumore di calpestio che fornisce valori penalizzanti (positivi) per elevate componenti a bassa frequenza mentre fornisce correzioni favorevoli (valori negativi) nel caso di elevate componenti ad alta frequenza, ad esempio per solai grezzi. La definizione e le modalità d'uso del termine di adattamento C_1 per il livello di rumore di calpestio è riportata nell'appendice A della normativa UNI EN ISO 717-2.

Il termine di adattamento allo spettro C_I , con riferimento ad esempio al livello normalizzato di rumore di calpestio, è calcolato nel modo seguente:

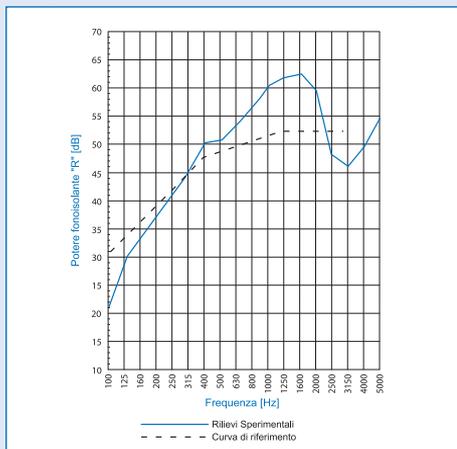
$$C_I = L_{n,sum} - 15 - L_{n,w} \quad [\text{dB}]$$

dove $L_{n,sum}$ è la somma su base energetica dei livelli normalizzati di rumore di calpestio tra 100 e 2500 Hz.

Schematizzazione di una parete leggera in cartongesso con una lastra per ciascun lato e pannelli in lana di roccia.



Andamento del potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso con una lastra per ciascun lato e pannelli in lana di roccia ($R_w = 45-47$ dB; $C = -3, -5$; $C_{tr} = -9, -11$).



Comportamento dei diversi tipi di pareti nei confronti dell'isolamento acustico

Pareti leggere in lastre di gesso rivestite

Si tratta di pareti divisorie interne realizzate con lastre di cartongesso e struttura portante di montanti in lamiera piegata. All'interno della cavità è inserito solitamente un pannello di lana minerale.

Nei casi pratici i valori del potere fonoisolante sono influenzati dal tipo e forma dei telai utilizzati, dallo spessore della cavità, dal grado di riempimento e dal tipo di materiale fonoassorbente, dalle modalità di posa in opera, etc.

Le figure seguenti illustrano alcune tipiche tipologie di pareti leggere realizzate con singola o doppia lastra di cartongesso per ciascun lato della struttura metallica, con unica struttura o due strutture indipendenti. Le tipologie di pareti leggere possono essere anche molto più complesse ed articolate, con più ossature portanti e lastre anche all'interno.

L'andamento del potere fonoisolante di queste pareti cresce con una pendenza molto ripida al variare della frequenza. Alle alte frequenze si osserva solitamente una brusca diminuzione del potere fonoisolante dovuta al fenomeno della coincidenza. Pannelli sottili (lastre di vetro o cartongesso) hanno valori della frequenza critica nell'ordine di 2500 - 3150 Hz. Alle basse frequenze i valori del potere fonoisolante risultano solitamente piuttosto bassi. Con queste tipologie di pareti interne è possibile ottenere dei valori dell'indice di valutazione elevati con delle masse relativamente piccole. La massa non supera solitamente il valore di 70-80 kg/m^2 .

Le caratteristiche costruttive delle pareti leggere rendono i risultati acustici particolarmente sensibili a fattori geometrici e costruttivi, come ad esempio il montaggio, le caratteristiche del provino, le dimensioni e la forma dei laboratori e dell'apertura di prova, etc.

La stima dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di queste pareti viene solitamente effettuata con formule empiriche ricavate dall'elaborazione di dati sperimentali ottenuti in laboratorio. Di seguito si riportano quelle proposte dall'IEN Galileo Ferraris e dalla Norma DIN 4109:

Singola struttura: $R_w = 20 \lg m' + 20 \lg d + e - 6$ [dB] (fonte IEN)

Singola struttura: $R_w = 20 \lg m' + 10 \lg d + e + 6$ [dB] (fonte IEN)

Doppia struttura: $R_w = 20 \lg m' + 10 \lg d + e + 12$ [dB] (fonte DIN)

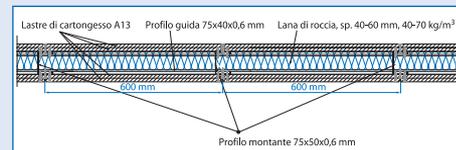
valide per $M < 70-80$ (kg/m^2) e $d < 25-30$ cm.

In tali relazioni M è la massa areica totale (kg/m^2), d è lo spessore dell'intercapedine (cm), e è lo spessore delle fibre minerali (cm).

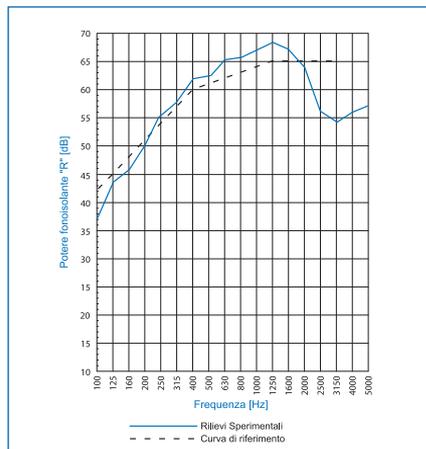
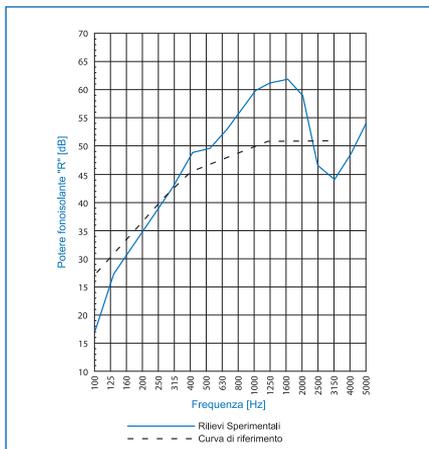
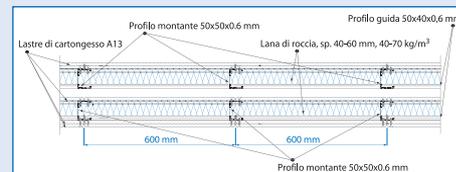
Andamento del potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso con un telaio, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia ($R_w=52-55$ dB; $C=-2, -4$; $C_{tr}=-6, -8$).

Andamento del potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso con due telai, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia ($R_w=58-61$ dB; $C=-2, -4$; $C_{tr}=-6, -8$).

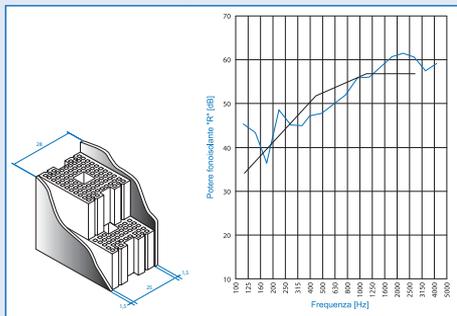
Schematizzazione di una parete leggera in cartongesso con un telaio, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia.



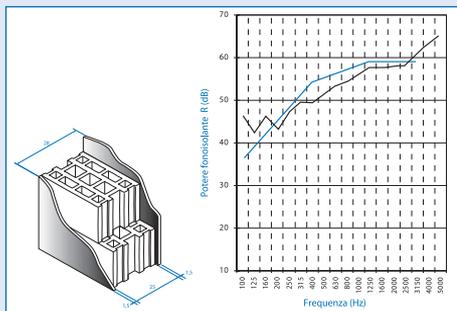
Schematizzazione di una parete leggera in cartongesso con due telai, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia.



Parete realizzata con blocchi ad "H"di laterizio, alleggeriti in pasta, con fori riempiti di malta (25x30x19 cm); intonacata su entrambi i lati (spessore intonaco 1.5 cm); spessore complessivo 28cm; massa superficiale circa 350 kg/m² ($R_w=53$ -54 dB; $C=0$, -2; $C_w=-3$, -5)



Parete realizzata con blocchi di calcestruzzo e argilla espansa (25x25x20 cm), massa volumica dell'impasto pari a 1400 kg/m³; intonaco tradizionale spessore circa 1.5 cm da entrambi i lati; massa superficiale circa 350 kg/m²; ($R_w=55$ -56 dB; $C=0$, -2; $C_w=-3$, -5)



Pareti pesanti monostrato

Le pareti pesanti monostrato sono realizzate generalmente con blocchi di laterizio o blocchi di calcestruzzo e argilla espansa. I blocchi possono essere di diverso spessore e diversa geometria. La foratura può essere verticale o orizzontale. I blocchi sono generalmente fissati sia in orizzontale che in verticale mediante uno strato di malta. I giunti verticali possono a volte essere ad incastro senza l'utilizzo della malta. Le pareti sono generalmente intonacate da entrambi i lati. In alcuni casi vengono utilizzati blocchi faccia a vista per pareti esterne. Alcune tipologie presentano grosse forature riempite di malta. Le strutture realizzate con blocchi di laterizio o argilla espansa (figure a lato) possono essere portanti o utilizzate solo come tamponamento.

Per i divisori in muratura comunemente utilizzati in edilizia, date le masse e gli spessori in gioco, i valori tipici della frequenza critica sono nell'ordine di 150 - 250 Hz.

Per questi materiali la previsione delle prestazioni acustiche al variare della frequenza è molto incerta poiché non si riesce a tenere conto in maniera affidabile delle diverse proprietà dei materiali, della geometria e tipologie e delle tecniche costruttive. Anche in questo caso le verifiche previsionali vengono effettuate sulla base di dati sperimentali ottenuti in laboratorio. Dall'elaborazione di questi dati sono state proposte diverse leggi empiriche per la previsione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante. Tali leggi, basate sulla massa superficiale (m' in kg/m²), forniscono risultati non sempre congruenti e quindi vanno utilizzate con cautela.

Fonte:

UNI EN ISO 12354 parte 1 ($m' > 150$ kg/m²)

IEN Galileo Ferraris ($50 < m' < 400$ kg/m²)

Università di Parma per le pareti ($100 < m' < 700$ kg/m²)

Università di Parma per i solai

Istituto normativo austriaco Önorm ($m' > 150$ kg/m²)

$$R_w = 37.5 \cdot \lg m' - 42 \quad [\text{dB}]$$

$$R_w = 20 \cdot \lg m' \quad [\text{dB}]$$

$$R_w = 15.4 \cdot \lg m' + 8 \quad [\text{dB}]$$

$$R_w = 22.4 \cdot \lg m' - 6.5 \quad [\text{dB}]$$

$$R_w = 32.4 \cdot \lg m' - 26 \quad [\text{dB}]$$

Pareti pesanti multistrato

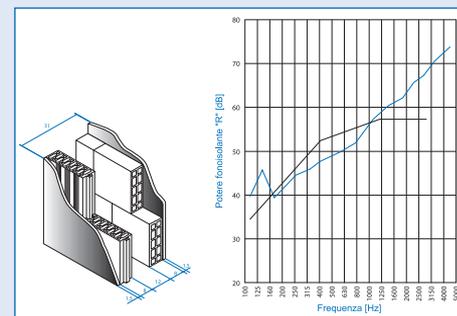
Le pareti pesanti multistrato vengono realizzate generalmente in laterizio ed in piccola parte in calcestruzzo e argilla espansa. Dal punto di vista delle prestazioni acustiche si ha il vantaggio di avere buoni risultati con delle masse relativamente contenute. L'ottimizzazione delle prestazioni acustiche ottenibile con una intercapedine di elevate dimensioni contrasta con l'esigenza di contenere al minimo lo spessore complessivo delle pareti.

Le tipologie di pareti doppie tradizionalmente utilizzate nell'edilizia italiana sono le seguenti:

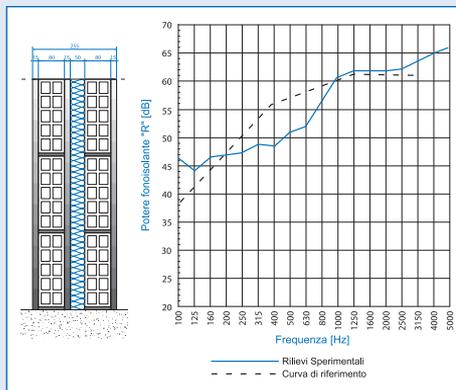
- parete doppia realizzata con uno strato in tramezze normali 25x25x8, intonacato con 1.5 cm di malta tradizionale sul lato esterno, intercapedine di 8-12 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60kg/m³, secondo strato in tramezze normali 25x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in tramezze normali 25x25x12, intonacato con 1.5 cm di malta tradizionale sul lato esterno, intercapedine di 4-6 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60kg/m³, secondo strato in tramezze normali 25x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in bimattoni semipieni 12x25x12 intonacato con 1.5 cm di malta sul lato esterno; intercapedine di 6 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60kg/m³, secondo strato in bimattoni semipieni 12x25x12 con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in laterizio alleggerito in pasta semipieno, spessore da 8 a 20 cm, intonacato con 1.5 cm di malta sul lato esterno; intercapedine con spessore da 2 a 8 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60kg/m³; secondo strato in tramezze semipiene in laterizio alleggerito in pasta 45x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno.

Negli ultimi anni, l'esigenza di garantire in opera adeguati valori del potere fonoisolante tra unità immobiliari distinte, ha spinto le imprese e le associazioni ad effettuare sperimentazione alla ricerca delle migliori soluzioni che garantiscono adeguate prestazioni

Parete realizzata con tavolato in tramezze normali a 10 fori (8x25x25 cm) ed intonaco sul lato esterno (spessore intonaco 1.5 cm); intercapedine di 12 cm; tavolato in tramezze semipiene ad incastro, alleggerite in pasta, (8x50x24,5 cm) ed intonaco sul lato esterno (spessore intonaco 1.5 cm). ($R_w=52-54$ dB; $C=0, -2$; $C_{tr}=-3, -5$)



Schematizzazione di una parete doppia realizzata con due tramezze in laterizio forato a 10 fori (8x25x25 cm) di cui una intonacata da entrambi i lati e l'altra intonacata solo sul lato esterno (intonaco tradizionale a base di malta cementizia spessore 15 mm); intercapedine di 5-6 cm; strato di lana di roccia spessore 40-50mm, densità 40-70 kg/m³; (R_w=54-57 dB; C=0, -2; C_r=-3, -5).



acustiche mantenendo contenuti il costo e lo spessore. A tale scopo sono state rivalutate alcune regole del buon costruire come il riempimento adeguato con malta sia dei giunti orizzontali che verticali, l'introduzione dell'intonaco anche sul lato interno della prima parete, l'ottimizzazione della geometria e degli impasti, la scelta di idonei materiali da inserire nell'intercapedine. Su alcune tipologie di pareti doppie, apparentemente simili a quelle utilizzate alcuni anni fa, sono stati ottenuti miglioramenti di diversi decibel sul valore dell'indice di valutazione.

Anche per le pareti doppie si è visto che miglioramenti si possono ottenere aumentando la massa dei singoli strati piuttosto che il loro spessore. L'aumento di spessore favorisce infatti la trasmissione dell'energia agli elementi strutturali laterali.

Se per le pareti monostrato è difficile stimare con precisione il valore dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, per le pareti doppie pesanti l'incertezza è ancora più elevata. I fattori che possono influenzare il valore della prestazione acustica, come visto precedentemente, dipendono dalle caratteristiche delle singole pareti, dalla presenza dell'intonaco anche su un lato interno, dalla loro distanza, dalla presenza di materiale fonoassorbente all'interno della cavità.

Quando la dimensione della cavità è inferiore a 5 cm ed in assenza di materiale fonoassorbente e di intonaco su una delle pareti interne, le due pareti sono praticamente accoppiate. Ne consegue che il potere fonoisolante presenta un andamento che nella maggior parte dei casi è simile a quello di una parete semplice di massa superficiale pari alla somma delle singole masse superficiali delle due pareti. In questi casi l'indice di valutazione può essere stimato con la semplice relazione della legge di massa empirica:

$$R_w = 20 \log m' \quad [\text{dB}]$$

Questa espressione può essere considerata quella più cautelativa utilizzabile per le pareti doppie, almeno in assenza di particolari difetti di costruzione.

Per tenere conto dell'effetto della dimensione della cavità si può calcolare il valore dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w con la seguente relazione:

$$R_w = 20 \log m' + 20 \log d - 10 \quad [\text{dB}]$$

dove "d" è espresso in cm.

Pareti con placcaggi

L'applicazione di uno strato addizionale su una parete esistente mediante un supporto elastico (sistema placcante) viene effettuato per aumentare le prestazioni acustiche di divisori esistenti e di pareti in nuove costruzioni. Il meccanismo che caratterizza l'isolamento delle pareti con placcaggio è diverso da quello delle pareti semplici o doppie in cui si osserva una proporzionalità diretta tra proprietà fonoisolanti e massa superficiale della parete stessa. Il miglioramento del potere fonoisolante complessivo di una parete con placcaggio è dovuto al fatto che esso costituisce un sistema risonante. Condizione essenziale per la sua efficacia è che il collegamento fra le due strutture avvenga con il minor numero possibile di punti rigidi.

L'entità del miglioramento dipende essenzialmente dal potere fonoisolante della struttura di base, dalla frequenza di risonanza del sistema e dalle caratteristiche del supporto elastico posto nell'intercapedine.

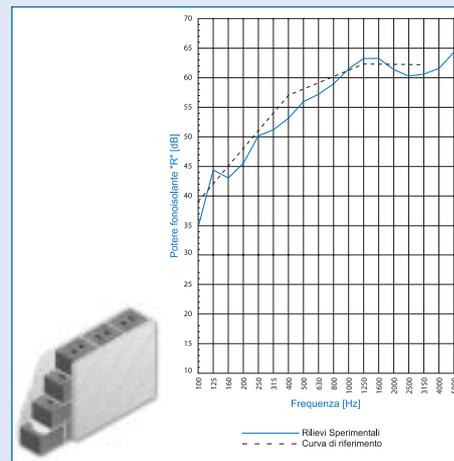
I sistemi placcanti vengono generalmente realizzati con lastre di cartongesso da 13 mm preincollate ad uno strato di lana di roccia di spessore 4-8 cm, densità 70-90 kg/m³. L'applicazione alla parete avviene di norma per incollaggio mediante adesivi o mucchietti di malta adesiva. I giunti tra le varie lastre vengono stuccati con gesso. L'incremento di potere fonoisolante ottenibile con un sistema placcante così realizzato può variare da 10 a 20 dB, anche in funzione della struttura di base su cui viene applicato. L'incremento ottenibile con un placcaggio è, infatti, tanto minore quanto maggiore è il potere fonoisolante della parete di base.

Le lastre di gesso possono essere anche di spessori superiori (ad esempio 19 mm) o con doppio strato da 13 mm.

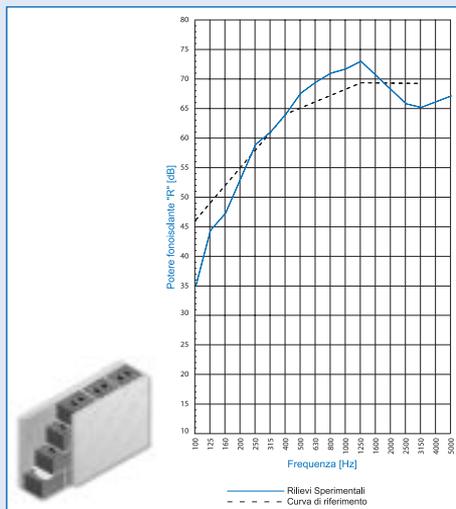
Risultati sperimentali hanno mostrato che l'incremento della massa superficiale del gesso comporta miglioramenti dell'ordine di 1-2 dB mentre nel passaggio da singolo placcaggio a doppio placcaggio si può avere un incremento di R_w superiore a 10 dB.

Negli ultimi anni sono stati sperimentati anche altri tipi di sistemi placcanti utilizzando

Schematizzazione di una parete monostrato con placcaggio realizzata con blocchi semipieni di laterizio alleggerito in pasta, intonaco solo sul lato non placcato, placcaggio con lana di roccia spessore 4-5 cm densità 70-90 kg/m³ preaccoppiata con lastre di cartongesso spessore 13 mm, fissaggio con malta adesiva ($R_w=57-59$ dB; $C=-1, -3$; $C_{tr}=-5, -7$).



Schematizzazione di una parete monostrato con placcaggio realizzata con blocchi semipieni di laterizio alleggerito in pasta, placcaggio da entrambi i lati con lana di roccia spessore 4-5 cm densità 70-90 kg/m³ preaccoppiata con lastre di cartongesso spessore 13 mm, fissaggio con malta adesiva ($R_w=64-66$ dB; $C=-3, -5$; $C_{tr}=-9, -11$).



meccanismi e materiali diversi. Una tipologia molto comune è quella di realizzare una controparte in lastre di cartongesso fissate ad una struttura portante in lamiera piegata o in legno. All'interno della cavità determinata dalla struttura portante viene inserito uno strato di lane minerali o di altri materiali smorzanti. La struttura portante in lamiera piegata viene a volte realizzata con forme specifiche in grado di ottimizzare, in accoppiamento con il materiale fonoassorbente, lo smorzamento della struttura.

Dalla documentazione ISO/CEN e dall'elaborazione di materiale sperimentale è stata dedotta la seguente relazione per la valutazione dell'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di una parete con placcaggio:

$$\Delta R_w = 73 - \frac{R_{w,m1}}{2} - 20 \log_{10} f_0$$

ove $R_{w,m1}$ è l'indice di valutazione del potere fonoisolante della parete di base ($R_w=20-50$ dB) e f_0 è la frequenza di risonanza del sistema placcante ($f_0 = 40-200$ Hz). La frequenza di risonanza del sistema placcante può essere calcolata, considerando che sul materiale non grava un carico statico come per i pavimenti galleggianti, con la seguente formula:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0.1 \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)}{d}} = 50 \sqrt{\frac{1 \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)}{d}}$$

dove m'_1 è la massa superficiale del solaio, in kg/m²; m'_2 è la massa superficiale del pavimento galleggiante, in kg/m²; d è lo spessore del materiale, in m. Si deve fare attenzione al fatto che sistemi placcanti con frequenze di risonanza elevate, superiori a 200 Hz, possono dare valori negativi di ΔR_w con un peggioramento delle prestazioni acustiche conseguente all'applicazione di tale strato aggiuntivo.

Comportamento acustico delle facciate

L'isolamento acustico di una facciata dipende dalle proprietà acustiche di tutti gli elementi che la costituiscono ma il risultato finale è influenzato dagli elementi più deboli e cioè dalle finestre, porte, cassonetti ed eventuali prese d'aria. La muratura opaca, infatti, essendo normalmente a doppio strato o di elevato spessore, ha proprietà acustiche adeguate.

L'isolamento acustico di facciata si misura normalmente utilizzando un altoparlante collocato all'esterno con un certo angolo rispetto alla parete principale. Poiché il campo acustico risultante non è diffuso ma diretto, viene particolarmente evidenziato il fenomeno della coincidenza, sia delle vetrate che delle pareti opache. L'isolamento acustico al variare della frequenza risulta generalmente molto variabile con valori minimi e massimi spesso ravvicinati. Nella figura è illustrato il confronto tra tre diverse configurazioni di facciata di un edificio sperimentale, la prima costituita da sola muratura opaca, la seconda costituita da muratura e da una finestra e la terza costituita da muratura e da quattro finestre. Si può osservare il fenomeno della coincidenza della muratura opaca alla frequenza di circa 200 Hz presente in tutte le prove sperimentali e il fenomeno della coincidenza delle vetrate alle alte frequenze presente soltanto nelle pareti con finestre.

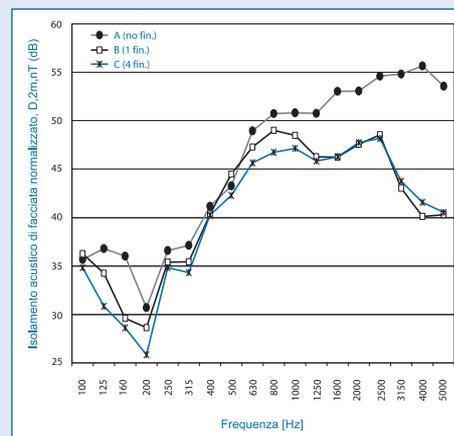
Per la stima dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, si può fare riferimento al metodo descritto nella normativa UNI EN ISO 12354-3. L'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ può essere calcolato a partire dal potere fonoisolante apparente di facciata R' , in base alla seguente relazione:

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \lg \left(\frac{V}{6T_0 S} \right) \quad [\text{dB}]$$

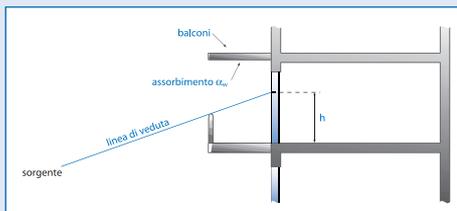
dove ΔL_{fs} è la differenza di livello sonoro in facciata [dB], V è il volume dell'ambiente ricevente [m^3], T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 s e S è la superficie della facciata, come vista dall'interno [m^2].

Il termine ΔL_{fs} (differenza di livello per forma della facciata), dipende dalla forma della facciata, dall'assorbimento acustico delle superfici aggettanti (balconi) e dalla direzione del

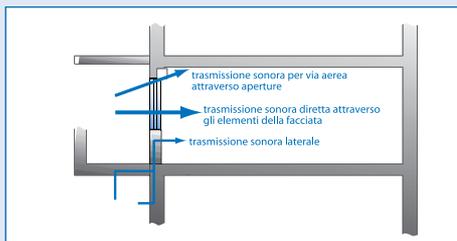
Andamento dell'isolamento acustico di facciata di un edificio sperimentale ottenuto con tre diverse configurazioni: A – senza finestre; B – con una finestra; C – con quattro finestre.



Individuazione di alcune grandezze da impiegare per il calcolo di ΔL_{fs}



Diversi percorsi di trasmissione del suono (per via aerea e strutturale) in una facciata.



campo sonoro. Il potere fonoisolante apparente di facciata R' può infatti aumentare per l'effetto schermante determinato dai balconi e altre parti aggettanti o diminuire per effetto dell'aumento di livello sonoro esterno causato da riflessioni multiple tra superfici riflettenti di facciata o dalla riverberazioni nelle loggie.

Nella normativa UNI EN ISO 12354-3 sono riportati gli schemi per il calcolo di ΔL_{fs} in funzione della forma della facciata, dell'assorbimento di parapetti e balconi e dell'altezza tra il piano del pavimento e la congiungente della linea di vista della sorgente sonora sul piano di facciata.

Il potere fonoisolante apparente di facciata R' può essere calcolato sulla base del potere fonoisolante dei singoli elementi costituenti la facciata e della trasmissione laterale utilizzando il metodo della media ponderata dei coefficienti di trasmissione. Si ottiene la seguente relazione:

$$R' = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{-\frac{R_i}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^n 10^{-\frac{D_{n,i}}{10}} \right) - K \quad [\text{dB}]$$

dove:

R_i è il potere fonoisolante dell'elemento "normale" di facciata i [dB];

S_i è la superficie dell'elemento "normale" di facciata i [m²];

A_0 è l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento pari a 10 m²;

$D_{n,i}$ è l'isolamento acustico normalizzato del "piccolo" elemento di facciata i (ad esempio prese d'aria, ventilatori, condotti elettrici, etc), calcolato o risultante da misure di laboratorio effettuate secondo la ISO 140-10;

S è la superficie complessiva della facciata [m²], vista dall'interno (corrispondente alla somma della superficie di tutti gli elementi che compongono la facciata);

K è la correzione relativa al contributo globale della trasmissione laterale; tale termine può essere assunto pari a 0 per elementi di facciata non connessi e pari a 2 per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi.

La valutazione più accurata della trasmissione può essere effettuata seguendo il metodo descritto nella normativa UNI EN ISO 12354-1.

Per il calcolo di R' è necessario quindi conoscere i valori dei poteri fonoisolanti R degli elementi normali di facciata (pareti opache, finestre, cassonetti, porte, etc) e degli eventuali valori di isolamento acustico D_n dei piccoli elementi di facciata. Per alcuni di questi valori, in assenza di dati specifici, si può fare riferimento alle indicazioni riportate nella normativa UNI EN ISO 12354-3.

Comportamento acustico dei pavimenti galleggianti

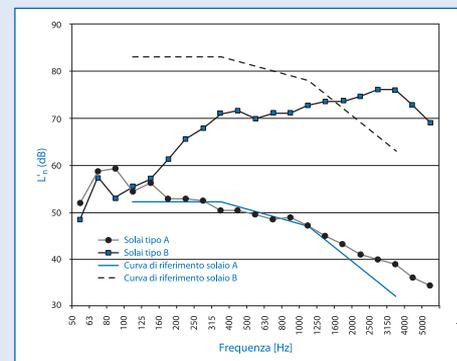
L'uso dei pavimenti galleggianti è la soluzione più frequentemente utilizzata per la riduzione del rumore di calpestio. L'efficacia dei pavimenti galleggianti è fortemente correlata con le proprietà meccaniche dei materiali resilienti utilizzati, in particolare con la loro rigidità dinamica.

Lo strato elastico, perchè sia efficace, deve essere posto in opera in modo accurato. Il piano di posa deve essere livellato e privo di rugosità che potrebbero danneggiare il materiale e creare dei ponti acustici. La soletta deve essere separata dalle pareti laterali e dai pilastri mediante l'interposizione di una striscia elastica perimetrale. Durante il getto del massetto è necessario evitare che l'impasto realizzi dei collegamenti tra il massetto stesso e la soletta sottostante o le pareti del locale e che lo strato isolante venga lesionato. Occorre pertanto proteggere il materiale isolante mediante una pellicola di polietilene o di altro materiale.

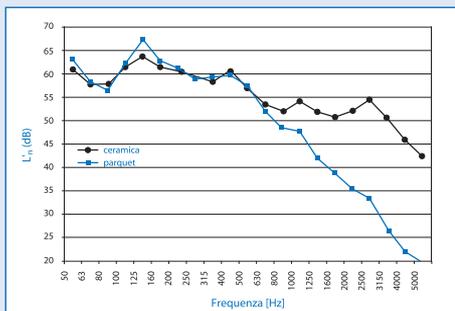
Gli eventuali impianti tecnologici devono essere rivestiti con guaine elastiche che impediscano il contatto diretto con la struttura galleggiante, con il solaio, e con le pareti degli ambienti così da non trasmettere vibrazioni agli elementi strutturali.

Se il pavimento galleggiante viene montato a regola d'arte la riduzione del rumore di calpestio ΔL_W può arrivare anche a 30 dB. Nella figura a lato sono riportati i risultati di misurazioni eseguite in due solai uguali di un edificio sperimentale, aventi la stessa struttura e la stessa finitura superficiale, in uno dei quali è stato realizzato un pavimento galleggiante realizzato a regola d'arte e nell'altro un solaio tradizionale con massetto sabbia cemento. La differenza ottenuta in termini di indice di valutazione è stata di 31 dB. L'andamento in frequenza mostra che l'attenuazione cresce notevolmente all'aumentare della frequenza. Alla frequenza di 80 Hz, invece, la presenza del pavimento galleggiante fa aumentare il rumore di

Confronto risultati ottenuti con due solai uguali, uno con pavimento galleggiante e uno senza



Confronto risultati ottenuti con lo stesso solaio ma con diverse finiture superficiali: parquet e ceramica



calpestio. Tale frequenza è la frequenza di risonanza del sistema vibrante costituito dal materiale elastico e dal massetto. In corrispondenza della frequenza di risonanza si ha un massimo nella trasmissione di rumore. Al di sopra della frequenza di risonanza l'attenuazione è progressivamente crescente.

Nella figura a lato sono riportati i risultati di due misurazioni eseguite nello stesso solaio di un edificio sperimentale, dove la pavimentazione era stata realizzata parte in parquet e parte in ceramica. Si può osservare una sostanziale coincidenza dei risultati alle basse e medie frequenze fino a 500 Hz. Alle alte frequenze, invece, si hanno notevoli differenze progressivamente crescenti all'aumentare della frequenza. Ciò è dovuto alla diversa modalità di trasmissione della forza di impatto sulle due superfici. Il pavimento in parquet determina uno smorzamento maggiore della ceramica con un conseguente taglio alle alte frequenze. In termini di indice di valutazione la differenza è risultata di 3 dB.

La stima teorica del livello di rumore di calpestio può essere effettuata sulla base dei metodi di calcolo riportati nella norma UNI EN 12354-2. La norma prevede metodi aventi diversi livelli di approssimazione: più accurato che tiene conto dell'andamento in frequenza o semplificato che si basa soltanto sul calcolo degli indici di valutazione.

Considerando il metodo semplificato si può stimare direttamente l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato di un solaio omogeneo, senza pavimento galleggiante, mediante la seguente formula empirica:

$$L_{mW} = 164 - 35 \log(m') \quad [\text{dB}]$$

dove m' è la massa superficiale del solaio.

L'applicazione di questa formula è limitata agli ambienti perfettamente sovrapposti ed ai pavimenti omogenei di uso comune, nei quali gli elementi costruttivi laterali al solaio sono costituiti da solai omogenei. In questo caso la trasmissione laterale è considerata in modo globale in funzione della massa del solaio e delle strutture laterali. La stima può essere effettuata mediante una tabella fornita dalla normativa UNI EN ISO 12354-2, nella quale i

valori di trasmissione laterale sono stati ottenuti sulla base dei calcoli effettuati con il modello dettagliato. L'applicazione di questa formula a casi che si discostano dalle ipotesi previste, può determinare scostamenti anche notevoli. Nel caso di solai in latero-cemento, ad esempio, si è visto che questa formula sottostima notevolmente i valori dell'indice di valutazione sperimentali di solai grezzi.

L'attenuazione del livello di rumore di calpestio, ottenibile mediante pavimenti galleggianti costituiti da uno strato di massetto su sottofondo resiliente, si può calcolare sulla base della seguente relazione:

$$\Delta L = 30 \lg \frac{f}{f_0} \quad [\text{dB}]$$

dove f è la frequenza nominale delle varie bande di ottava o terzi di ottava e f_0 è la frequenza di risonanza del sistema pavimento galleggiante - strato resiliente. La frequenza di risonanza può essere calcolata con la seguente espressione:

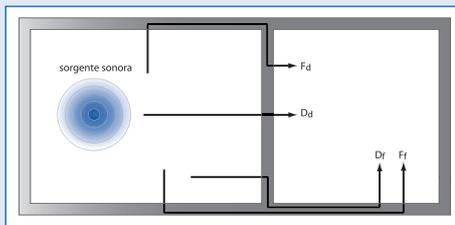
$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad [\text{Hz}]$$

dove s' è la rigidità dinamica dello strato elastico, espressa in MN/m^3 e m' è la massa superficiale dello strato di rivestimento in kg/m^2 .

La valutazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio che si ottiene inserendo un pavimento galleggiante su un solaio nudo, viene effettuata frequenza per frequenza. L'attenuazione può anche essere espressa in termini di indice di valutazione (ΔL_w) facendo la differenza tra l'indice di valutazione ottenuto con il solaio nudo e quello ottenuto con il pavimento galleggiante. L'indice di valutazione della stima dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio, effettuata con la formula precedente, si può ottenere direttamente da tabella (UNI EN ISO 12354-2).

Tale attenuazione cresce quanto più è bassa la frequenza di risonanza del sistema. La frequenza di risonanza è tanto più bassa quanto più è bassa la rigidità dinamica o quanto più è alta la massa superficiale del massetto soprastante. Non potendo aumentare eccessivamente la massa del massetto, sia per problemi di costi che per il rischio di schiacciamento del materiale resiliente oltre che per non aumentare eccessivamente lo

Rappresentazione dei percorsi di trasmissione diretti e laterali.



spessore della soletta, si deve lavorare con materiali che abbiano rigidità dinamica più bassa possibile. Solitamente si considera che un materiale per pavimenti galleggianti debba avere una rigidità dinamica non superiore a 50 MN/m^3 . La rigidità dinamica di un materiale, solitamente, diminuisce all'aumentare del suo spessore. Utilizzando uno dei metodi sopra esposti, si può quindi stimare l'indice di valutazione del livello normalizzato di rumore di calpestio in opera, con la seguente espressione:

$$L'_{nW} = L_{nW} - \Delta L_W + K$$

dove L_{nW} è l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato di un solaio senza pavimento galleggiante, ΔL_W è l'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio, K è il contributo peggiorativo della trasmissione laterale.

Comportamento acustico in opera delle strutture: la trasmissione laterale

Il DPCM 5-12-97 richiede che la verifica dei requisiti acustici passivi venga eseguita in opera. Le prestazioni acustiche in opera sono influenzate, oltre che dalle proprietà dei divisori e dei materiali, anche dalle condizioni al contorno in cui la struttura viene installata e dalle modalità di posa in opera.

Il potere fonoisolante apparente (R') di una partizione esprime la quantità di energia sonora trasmessa nelle condizioni reali di utilizzo prendendo in considerazione, oltre alla trasmissione diretta attraverso la parete, anche gli eventuali percorsi di trasmissione aerea e di trasmissione laterale strutturale dovuti alle strutture adiacenti la parete.

Il metodo di calcolo del potere fonoisolante apparente è definito nella normativa europea UNI EN ISO 12354-1.

Il metodo si basa sul calcolo del potere fonoisolante apparente R' di un divisorio a partire dai valori del potere fonoisolante del divisorio stesso (R_d , misurato in laboratorio senza trasmissioni laterali) e del potere fonoisolante relativo ai diversi percorsi di trasmissione strutturale laterale (R_{ij}).

$$R' = -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum 10^{-\frac{R_{ij}}{10}} \right)$$

Per il calcolo del potere fonoisolante apparente R' tra due ambienti adiacenti si deve, quindi, determinare il valore del potere fonoisolante per ogni singolo percorso di trasmissione sonora. Nei casi correnti, si verificano dodici percorsi di trasmissione laterale per ogni divisorio tra due ambienti (tre percorsi per ogni giunto laterale).

Il potere fonoisolante R_{ij} relativo ai diversi percorsi di trasmissione sonora laterale può essere ottenuto in funzione del potere fonoisolante delle due strutture interessate (R_i e R_j), dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} caratteristico del tipo di giunto, e delle dimensioni principali.

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S}{l_{ij}} \text{ [dB]}$$

L'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} , è una grandezza funzione della estensione del giunto (l_{ij}) e della differenza di livello medio di vibrazione che si viene a creare tra le due strutture esaminate quando una sola delle due è direttamente sollecitata:

$$K_{ij} = \frac{D_{vij} + D_{vji}}{2} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \text{ [dB]}$$

Nella formula, D_{vij} e D_{vji} sono rispettivamente la differenza tra i livelli medi di velocità di vibrazione che si stabiliscono nelle due strutture avendo sollecitato in un caso la struttura i e nell'altro la struttura j , l_{ij} è la lunghezza del giunto, a_i e a_j sono le lunghezze di assorbimento equivalenti delle strutture laterali i e j , date da:

$$a_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{si}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ [m]}$$

con T_{si} tempo di riverberazione strutturale della struttura i .

Il valore dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} può essere dedotto da misurazioni, sulla base delle formule riportate, oppure da stima empirica, in base al metodo descritto nell'appendice E della norma EN 12354-1.

La valutazione dell'indice di riduzione delle vibrazioni relativa ad uno specifico percorso di trasmissione sonora consiste nella rilevazione della differenza media di velocità di vibrazione delle due strutture (pareti o solai) coinvolte dal percorso di trasmissione, misurata sollecitando prima una struttura e poi l'altra. Per ogni struttura è inoltre necessario determinare il tempo di riverberazione strutturale secondo la metodologia descritta dalla appendice E della norma ISO 140-3 .

Bibliografia

Riferimenti legislativi

- [1] Legge quadro sull'inquinamento acustico n° 447 del 26 ottobre 1995, pubblicata sulla G.U. n°254 del 30-10-95.
- [2] D.P.C.M. del 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" pubblicato sulla G.U. n°297 del 22-12-97.
- [3] D.P.C.M. del 14 novembre 1997 "*Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*" pubblicato sulla G.U. n°280 del 1-12-97.

Riferimenti normativi

- [4] UNI EN ISO 140-3 1997, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edifici - Parte 3: misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio.
- [5] UNI EN ISO 140-4 2000, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edifici - Parte 4: misurazione in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti.
- [6] UNI EN ISO 140-5 2000, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 5: misurazioni in opera dell'isolamento acustico degli elementi di facciata e delle facciate.
- [7] UNI EN ISO 140-6 2000, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 6: misurazioni in laboratorio dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai.
- [8] UNI EN ISO 140-7 (2000), Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 7: misurazioni in opera dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai.
- [9] UNI EN ISO 140-8 (1999) Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e

di elementi di edificio. Misurazioni in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato.

- [10] ISO 140-10 (1991) Acoustics – Measurements of sound insulation in buildings and of building elements. Laboratory measurements of airborne sound insulation of small building elements.
- [11] UNI EN ISO 717-1 (1997), Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.
- [12] UNI EN ISO 717-2 (1997), Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Parte 2: Isolamento del rumore di calpestio.
- [13] UNI EN ISO 29052-1 1993. Determinazione della rigidità dinamica; materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.
- [14] UNI EN 29053, Acustica - Materiali per applicazioni acustiche - Determinazione della resistenza al flusso dell'aria, 1994.
- [15] UNI EN 12431-2000, Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore degli isolanti per pavimenti galleggianti.
- [16] UNI EN ISO 12354-1, Acustica edilizia, stima delle prestazioni acustiche degli edifici a partire dalle prestazioni dei componenti, parte 1, isolamento al rumore aereo tra ambienti.
- [17] UNI EN ISO 12354-2, Acustica edilizia, stima delle prestazioni acustiche degli edifici a partire dalle prestazioni dei componenti, parte 2, isolamento ai rumori impattivi tra ambienti.
- [18] UNI EN ISO 12354-3, Acustica edilizia, stima delle prestazioni acustiche degli edifici a partire dalle prestazioni dei componenti, parte 3: isolamento al rumore aereo contro il rumore esterno.
- [19] ISO/CD 10848, Acoustics - measurements of flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms, 1999.
- [20] DIN 4109 (1989), Sound insulation in buildings – Requirements and testing.

Riferimenti scientifici

- [21] F. Fahy, *Foundation of Engineering Acoustics*, Academic Press (2001)
- [22] R. Spagnolo, a cura di, *Manuale di Acustica*, UTET (2001)
- [23] L.L.Beranek, *Noise and vibration control*, Mac Graw Hill-New York (1971)
- [24] M. Garai, S. Secchi, G. Semprini, *Isolamento acustico degli edifici – metodi di calcolo*, Maggioli Editore, (2000)
- [25] E. Brosio, *Esempi di progettazione e realizzazione – Mezzi di previsione delle prestazioni acustiche di materiali e componenti*, *Rivista Italiana di Acustica*, Note Tecniche, vol X, N°4, Dicembre (1986) pp. 78-86.
- [26] E. Brosio, P. Brosio, *Prestazioni acustiche di componenti edilizi: mezzi empirici e semi-empirici di previsione*, *Scuola di acustica dell'Università di Ferrara – Dispense Corso per Tecnici in Acustica*.
- [27] G. Pagliarini, R. Pompoli, *Indice di valutazione del potere fonoisolante delle pareti doppie: influenza del rapporto delle masse superficiali*, *Rivista Italiana di Acustica*, vol. VIII, N°4, anno (1984).
- [28] Pinato M. "Potere fonoisolante di pareti di grande spessore", tesi di laurea, Università di Ferrara, 1997.
- [29] Nicosia G. "Potere fonoisolante di pareti divisorie: misure in laboratorio sull'influenza della trasmissione laterale", tesi di laurea, Università di Ferrara, 2000.
- [30] Cremer L., M. Heckl, Ungar E., *Structure-Borne Sound*. Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg New York 1973.
- [31] S. Ljunggren. "Airborne Sound insulation of thick walls". *J. Acoustical Soc. Am.* 89, May 1991.
- [32] Sharp. B.H. "Prediction methods for Sound Transmissions Loss of Masonry Constructions". *Noise Control Engng.* 11(1978).
- [33] R.D. Sullivan, B.M. Gibbs. "Field Measurement of Sound Transmissions Loss of Masonry Constructions by Acoustic Intensimetry". *Applied Acoustics* vol.49/1996 p.249.
- [34] Garai M., Secchi S., "Metodi di previsione delle prestazioni acustiche degli edifici: isolamento all'interno degli edifici", in *Atti del Convegno nazionale Edilizia ed Ambiente*, Trento, 18-20 febbraio 1998.

- [35] Fausti P., Semprini G., Secchi S., "Metodi di previsione delle prestazioni acustiche di edifici: isolamento degli edifici dai rumori esterni ed isolamento dell'esterno dai rumori prodotti all'interno degli edifici", in Atti del Convegno nazionale Edilizia ed Ambiente, Trento, 18-20 febbraio 1998.
- [36] Garai M., Secchi S., Semprini G., Prestazioni acustiche degli edifici - Calcolo a partire dalle prestazioni dei componenti secondo le nuove disposizioni legislative e normative, Maggioli editore, 2000.
- [37] Pompoli R., Secchi S., "Dalla prestazione acustica in laboratorio a quella in opera: confronto tra pareti in laterizio e pareti in lastre di gesso rivestito", in Costruire in laterizio, nov. dic. 1998.
- [38] Pompoli R., Fausti P., "Isolamento acustico di strutture divisorie in laterizio", in Costruire in laterizio, n° 52-53, 1996.
- [39] E. Brosio - Esempi di progettazione e realizzazione. Mezzi di previsione delle prestazioni acustiche di materiali e componenti - Rivista Italiana di Acustica - vol X, n° 4, Dicembre 1986.
- [40] R. Albatici, A. Di Bella, P. Fausti, A. Frattari, G. Nicosia, R. Pompoli, S. Secchi, M. Tosi, R. Zecchin, Isolamento acustico di pareti interne in laterizio: misure e metodi, Costruire in Laterizio, n° 83/2001, pp56-62.
- [41] P. Fausti, S. Secchi, "Verifica delle prestazioni acustiche di divisori interni", Costruire in Laterizio, 2002.
- [42] R. Pompoli, P. Fausti, Protezione acustica degli edifici, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.
- [43] E. Brosio, P. Brosio, Prestazioni acustiche di componenti edilizi: mezzi empirici e semiempirici di previsione, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.
- [44] Pompoli R., Secchi S., "Isolamento acustico delle facciate: confronto normativo, metodi di calcolo e verifiche sperimentali", in Costruire in laterizio, 2000.