

Il suono e le grandezze acustiche

Sorgente sonora e mezzo elastico

Il suono è caratterizzato dalla propagazione di onde di pressione in un mezzo elastico dovute alla rapida successione di compressioni ed espansioni del mezzo stesso.

Affinché il fenomeno nasca e si propaghi è necessaria la presenza di una sorgente sonora e di un mezzo elastico che ne consenta la propagazione e proprio per quest'ultimo motivo il suono non può diffondersi nel vuoto.

La sorgente sonora è costituita da un elemento vibrante che trasmette il suo movimento alle particelle del mezzo circostante, le quali oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio.

Uno dei parametri che caratterizza il suono è la **frequenza f** , cioè il numero di oscillazioni effettuate in un secondo. Si parla di fenomeno sonoro quando la frequenza è compresa nell'intervallo:

$$20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ KHz}$$

ovvero l'intervallo in cui si assume convenzionalmente che l'orecchio umano sia sensibile.

I segnali aventi frequenze inferiori e superiori sono detti rispettivamente infrasuoni ed ultrasuoni.

Generalmente un suono non corrisponde ad un tono puro, caratterizzato da una sola frequenza di emissione, ma ad un segnale complesso costituito da un gran numero di frequenze che danno origine ad uno spettro continuo.

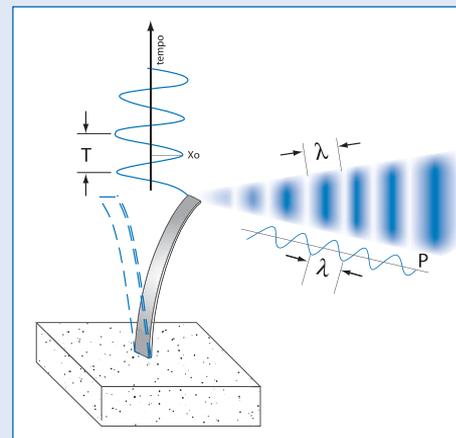
Il fenomeno sonoro, oltre alla frequenza, può essere descritto da altri parametri, quali il **periodo T** e la **lunghezza d'onda λ** , cioè il tempo e lo spazio richiesti per una oscillazione completa.

Le relazioni che intercorrono tra i suddetti parametri sono:

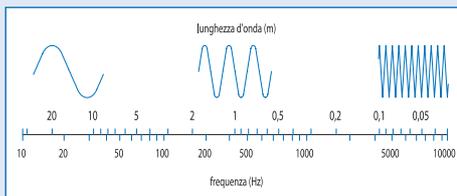
$$f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = cT$$

dove $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione e c la velocità del suono nel mezzo.

Elemento vibrante con visualizzazione dell'oscillazione delle particelle d'aria e indicazione delle grandezze lunghezza d'onda λ , periodo T e ampiezza dell'oscillazione x_0 .



Relazione tra frequenza e lunghezza d'onda.



Nel grafico a lato e nella tabella seguente si possono confrontare i valori di frequenza con i corrispondenti valori di lunghezza d'onda per un suono che si propaga in aria.

Relazione tra frequenza e lunghezza d'onda

f (Hz)	λ (m)
20	17
1000	0.34
10000	0.034
20000	0.017

La velocità del suono non dipende dalla frequenza ma dalle sole condizioni termodinamiche del mezzo in cui la perturbazione si propaga.

Nel caso dell'aria si può calcolare la velocità del suono in funzione della temperatura con la seguente espressione:

$$c \cong 331.6 + 0.6 t \quad (\text{con } t \text{ temperatura in } ^\circ\text{C})$$

valida per temperature che vanno da -10°C a 40°C .

Pressione acustica p

Si definisce **pressione acustica** lo scostamento della pressione attorno al suo valore di equilibrio che generalmente è rappresentato dalla pressione atmosferica. Tale scostamento può assumere sia valori positivi che negativi. Essendo la pressione acustica una grandezza oscillante, andrebbe descritta mediante l'ampiezza e la fase o con una rappresentazione complessa (parte reale e parte immaginaria). Per semplificare la trattazione viene introdotto il valore efficace della pressione sonora, grandezza misurabile strumentalmente e rappresentativa del fenomeno sonoro per quanto riguarda la capacità di percezione umana.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}$$

Impedenza acustica Z

Si definisce **impedenza acustica specifica**, in un punto, il rapporto tra la rappresentazione complessa della pressione acustica e la rappresentazione complessa della velocità delle particelle:

$$Z = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} \quad [Kg / m^2 s] = [rayl]$$

dove:

$p(x,t)$ pressione acustica
 $u(x,t)$ velocità delle particelle

L'impedenza acustica è, quindi, una grandezza complessa. E' utile mantenere tale notazione in quanto in alcuni casi fornisce una descrizione più accurata del fenomeno.

Questa grandezza quantifica la resistenza che il mezzo in cui l'onda si propaga oppone alla sollecitazione di una forza quale può essere quella di pressione del suono.

In presenza di propagazione di onde piane nell'aria (o qualsiasi onda in campo lontano) l'espressione dell'impedenza si riduce a $Z = \rho c$ (**impedenza acustica caratteristica**) dove ρ è la densità del mezzo.

Intensità acustica I

L'intensità acustica è l'energia che nell'unità di tempo attraversa in direzione normale una superficie unitaria. Nel caso di onde piane (o qualsiasi onda in campo lontano) in un mezzo elastico non viscoso, si ottiene:

$$I = \frac{P_{eff}^2}{\rho \cdot c}$$

Si osservi che poiché I dipende dalla direzione della superficie considerata, allora questa risulta essere una grandezza vettoriale.

Densità di energia sonora D

È l'energia acustica per unità di volume che caratterizza lo stato del mezzo acustico in un certo istante.

$$D(t) = \frac{E(t)}{V} \quad [J / m^3]$$

Per onde piane (o qualsiasi onda in campo lontano) in un mezzo elastico non viscoso :

$$D = \frac{P_{eff}^2}{\rho c^2} = \frac{I}{c}$$

Potenza sonora W

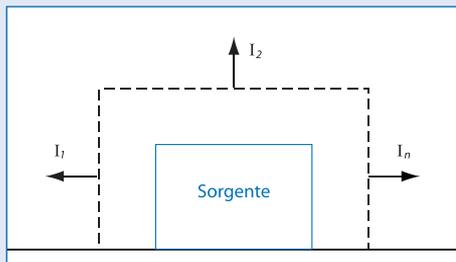
È la potenza trasmessa dalla sorgente acustica al mezzo elastico. Per onde piane in mezzi in quiete non viscosi vale:

$$W = IS = DcS \quad [W]$$

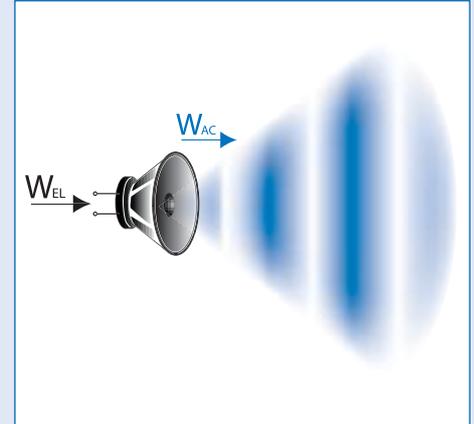
La relazione tra l'intensità acustica e la potenza sonora è quella su cui si basano alcuni dei metodi di misura della potenza sonora delle sorgenti. Tali metodi sono descritti nelle normative della serie ISO 3740 [1] e nelle normative UNI EN ISO 9614 [2].

$$W = \sum_{i=1}^n (I_i \cdot S_i) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_{eff}^2}{\rho \cdot c} \right)_i \cdot S_i \right] \cong S_{tot} \cdot \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{eff}^2}{\rho \cdot c} \right)_i \right]$$

Schema di misura della potenza sonora



Trasformazione di potenza elettrica in potenza acustica mediante altoparlanti



Nel caso di sorgenti elettroacustiche:

si definisce rendimento di un altoparlante il rapporto tra la potenza acustica e la potenza elettrica:

$$\eta = \frac{W_{AC}}{W_{EL}}$$

Tale rendimento è generalmente basso. Per altoparlanti HI-FI vale 1 o 2% mentre per altoparlanti a tromba può arrivare al 15%. Per fare un esempio numerico se un altoparlante di tipo commerciale ha 50W di potenza elettrica e un rendimento di 2%, la potenza acustica trasmessa al mezzo è di 1 W. Si consideri che la potenza acustica della voce non amplificata è pari a circa 0.05 W.

Livelli sonori

Le grandezze acustiche caratteristiche hanno un ampio campo di variabilità e per tale motivo è nata l'esigenza di fare uso di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere il logaritmo del rapporto tra quello stesso valore ed un prefissato valore di riferimento (scala dei Bel). Più comunemente, però, la grandezza acustica viene espressa in decibel (dB) ossia dieci volte il logaritmo in base dieci del suddetto rapporto.

In generale, dunque, data una grandezza G il corrispondente livello L_G , vale:

$$L_G = 10 \log \frac{G}{G_{rif}}$$

In particolare per le grandezze prima definite si ha:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p_{eff}^2}{P_{rif}^2} = 20 \cdot \log \frac{p_{eff}}{P_{rif}} \quad \text{livello di pressione}$$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{rif}} \quad \text{livello di intensità}$$

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{rif}} \quad \text{livello di potenza}$$

$$L_D = 10 \cdot \log \frac{D}{D_{rif}} \quad \text{livello di densità}$$

Si osservi che i rapporti G/G_{rif} sono adimensionali e proporzionali all'energia del segnale sonoro; proprio per quest'ultimo aspetto nell'espressione di L_p le pressioni compaiono elevate al quadrato.

I valori di riferimento, riportati nella normativa UNI EN 21683 [3], sono stati scelti in maniera tale che in campo libero il livello di pressione risulta uguale a quello di intensità. In particolare si ha che :

$$P_{rif} = 2 \cdot 10^{-5} Pa \quad I_{rif} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

$$W_{rif} = 10^{-12} W \quad D_{rif} = 10^{-12} \frac{J}{m^3}$$

Per dare un'idea dell'ordine di grandezza del fenomeno acustico e dei rispettivi livelli si riporta la seguente tabella:

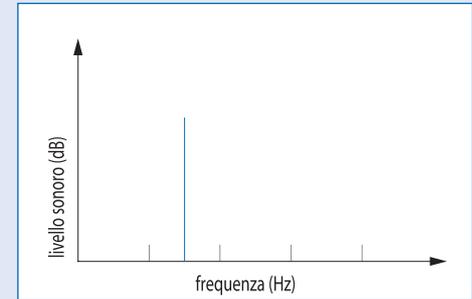
Intensità sonora (W/m^2)	Pressione sonora (Pa)	Livello sonoro (dB)	Esempi
10^2	200	140	Soglia del dolore
1	20	120	Vicino motore aereo
10^{-2}	2	100	Vicino martello pneumatico, urlo
10^{-4}	0.2	80	Ciglio autostrada trafficata, voce alta
10^{-6}	0.02	60	Parlato normale
10^{-8}	0.002	40	Voce bassa, sussurro
10^{-10}	0.0002	20	Respiro
10^{-12}	0.00002	0	Soglia udibile (1-4 kHz)

Composizione ed analisi in frequenza

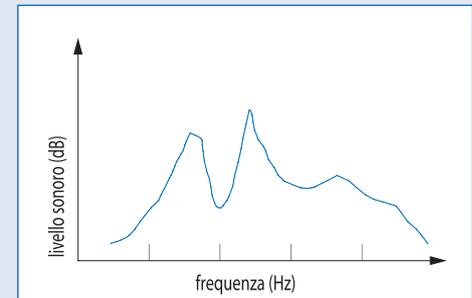
Un suono può essere costituito da un tono puro, cioè da un segnale di una sola frequenza (monocromatico), da più toni puri (policromatico), da suoni complessi (armonici, periodici, segnale su una sola banda di frequenze), da rumori, cioè costituiti da tutte le frequenze con diversi livelli.

L'analisi della composizione in frequenza dei suoni può essere effettuata con diversi metodi basati sulla suddivisione del contenuto di energia sonora in **bande**, cioè in prefissati intervalli di frequenza. Ciascuna banda è caratterizzata dalla frequenza nominale di centro banda f_c e dalle frequenze di taglio superiore f_s e inferiore f_i . L'ampiezza di banda, definita dalla differenza tra la frequenza di taglio superiore e inferiore $\Delta f = f_s - f_i$, può essere costante o variabile al variare della frequenza nominale di centro banda. L'analisi ad ampiezza di banda costante viene utilizzata per analisi approfondite sulla composizione in

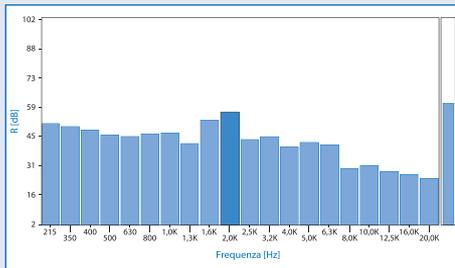
Spettro di un "tono puro".



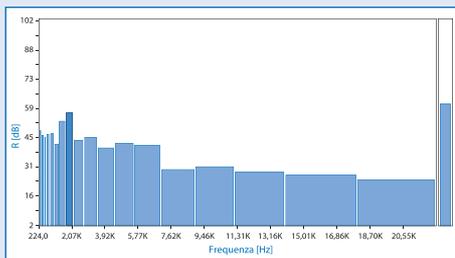
Spettro continuo di un rumore.



Esempio di spettro sonoro in bande di 1/3 di ottava con scala logaritmica delle ascisse.



Esempio di spettro sonoro in bande di 1/3 di ottava con scala lineare delle ascisse.



frequenza di rumori generati da sorgenti e macchine, sulla diagnostica e sulle cause generatrici delle emissioni sonore. L'analisi in bande di ampiezza percentuale costante, in particolare la cosiddetta analisi in ottave o terzi di ottava, viene solitamente utilizzata in acustica ambientale ed architettonica. Questa analisi si basa sulla costanza del rapporto tra la larghezza di banda Δf e la frequenza nominale di centro banda che caratterizza la

banda stessa: $\frac{\Delta f}{f_c} = \text{costante}$.

La frequenza nominale di centro banda si ottiene con la seguente espressione:

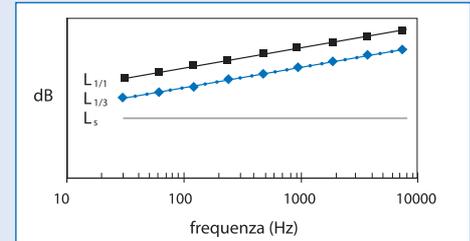
$$f_c = \sqrt{f_s \cdot f_i}$$

Per l'analisi in bande di ottava si ha $\Delta f / f_c = 0.707$ mentre per l'analisi in terzi di ottava si ha $\Delta f / f_c = 0.232$.

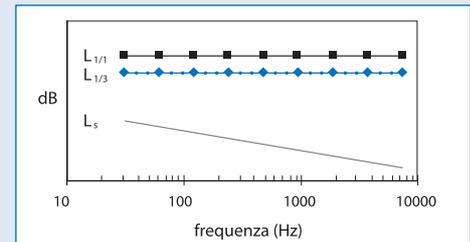
Le frequenze nominali per l'analisi in bande di ottava o frazioni di ottava sono definite dalla normativa UNI EN ISO 266 [4]. Le frequenze inferiori, centrali o superiori delle bande sono normalizzate in modo tale che all'interno di una banda di ottava ricada esattamente un numero intero di bande dell'analisi per frazioni di ottava. La definizione dei filtri per le bande di ottava e terzi di ottava da implementare negli analizzatori di spettro è riportata nella normativa IEC R 225 [5].

Nell'analisi in bande di ampiezza percentuale costante, per definizione, l'ampiezza di banda cresce all'aumentare della frequenza nominale di centro banda. La rappresentazione grafica degli spettri ottenuti con questa analisi avviene normalmente utilizzando una scala logaritmica sull'asse delle ascisse (frequenze). Ne risulta un istogramma in cui graficamente ciascuna banda ha la stessa ampiezza. Se invece si rappresenta la scala delle ascisse in lineare si può apprezzare l'effettiva larghezza di banda delle varie frequenze.

Andamento del livello spettrale e dello spettro in ottave e terzi di ottava per un rumore bianco



Andamento del livello spettrale e dello spettro in ottave e terzi di ottava per un rumore rosa



Rumore bianco

Il rumore bianco è definito come quel rumore che ha una densità spettrale costante, cioè lo stesso contenuto energetico ad ogni frequenza. In una analisi in banda stretta il livello di un rumore bianco (livello spettrale L_s) è costante al variare della frequenza.

Se si analizza tale rumore in bande di ottava (banda di ampiezza percentuale costante), considerato che l'ampiezza Δf di ciascuna banda è 2 volte quella della banda precedente e che l'energia per ogni frequenza è costante, allora per ogni banda si avrà un contenuto energetico doppio della banda precedente con il conseguente aumento del livello di 3 dB. Nel caso dell'analisi in terzi di ottava, considerazioni simili portano al risultato che l'aumento di livello per ciascuna banda rispetto alla precedente è pari ad 1 dB.

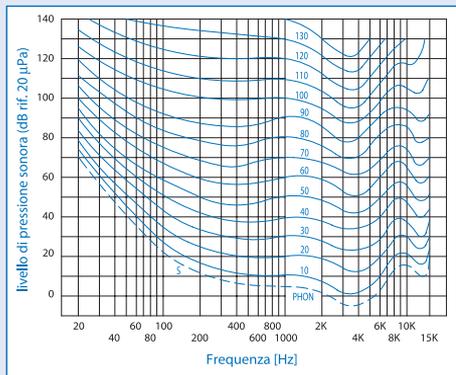
Il rumore bianco trova applicazione in molti tipi di misurazioni, in particolare per le misure di isolamento acustico e per la qualificazione acustica degli ambienti chiusi.

Rumore rosa

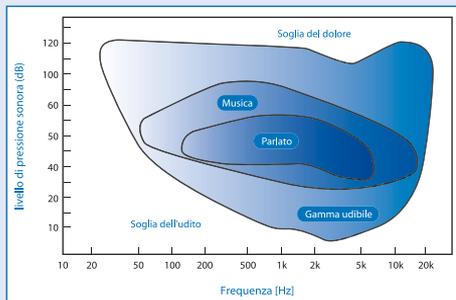
Il rumore rosa è caratterizzato dal fatto di mantenere lo stesso livello energetico in ciascuna banda nella rappresentazione in bande di ampiezza percentuale costante. Ciò implica che l'andamento del livello spettrale in banda stretta tende a decrescere all'aumentare della frequenza e di conseguenza dell'ampiezza di banda.

Questo tipo di rumore viene usato spesso in acustica poiché si adatta a vari tipi di misurazioni. Per il tempo di riverberazione, ad esempio, si hanno solitamente problemi ad avere sufficiente energia a bassa frequenza. Gli altoparlanti comunemente usati come sorgenti, infatti, hanno una capacità di emettere energia che decresce rapidamente al diminuire della frequenza. In questi casi l'utilizzo di un rumore rosa favorisce la linearizzazione della risposta del sistema.

Audiogramma normale



Visualizzazione delle aree frequenza-livello per tutto il campo udibile, per la musica e per il parlato.



Audiogramma normale e curve di ponderazione in frequenza

L'orecchio umano non è sensibile in eguale modo alle diverse frequenze. La sensibilità è generalmente maggiore alle frequenze medio-alte e diminuisce progressivamente verso quelle basse e quelle molto alte. L'andamento della sensibilità dell'orecchio umano al variare dei livelli e della frequenza è stato studiato e rappresentato su un diagramma chiamato **audiogramma normale**. La figura mostra l'audiogramma normale proposto dalla UNI ISO 226 [6] per ascolto binaurale, in campo acustico libero, sorgente sonora disposta di fronte all'ascoltatore e suoni puri. Nel diagramma sono riportate le **curve isofoniche** che rappresentano, al variare della frequenza, i livelli di pressione sonora in grado di produrre la stessa sensazione sonora. Ciascuna curva è caratterizzata da un valore di *livello di sensazione sonora*, espresso in *phon*, numericamente uguale al valore di pressione sonora, espressa in dB, del suono a 1000Hz che ha prodotto la sensazione sonora.

Nella seguente figura, estratta dall'audiogramma, sono riportati i livelli e le frequenze udibili per un individuo di udito normale (dai 20Hz ai 20000Hz). Le aree interne rappresentano il campo del parlato che va dai 100Hz ai 5000Hz e il campo della musica che si estende dai 10+50Hz agli 11000Hz.

Per tenere conto della diversa sensibilità dell'orecchio nella valutazione del disturbo o danno da rumore si sono affermati metodi semplici basati sull'impiego delle **curve di ponderazione in frequenza** (grafico a pagina successiva) direttamente selezionabili negli strumenti di misura [7]. A livello normativo sono state definite 4 curve di ponderazione "A", "B", "C" e "D" ispirate alla forma dell'audiogramma normale. Ciascuna di queste curve era stata inizialmente predisposta per applicazioni specifiche: curva "A" sotto i 60 dB, curva "B" (ormai in disuso), tra 60 e 100 dB, curva "C" oltre 100 dB (usata per misurazioni in discoteca), curva "D" per disturbo prodotto da rumore di aerei. Attualmente la curva di ponderazione più usata nelle misure che si propongono di valutare gli effetti del rumore sull'uomo (disturbo o danno) è la curva "A", qualunque sia il valore del livello sonoro totale.

Assorbimento, riflessione e trasmissione del suono

Quando il fronte di un'onda sonora urta contro una parete, generalmente si assiste al verificarsi di tre fenomeni che contribuiscono in maniera diversa alla redistribuzione dell'energia trasportata dall'onda stessa: una parte di questa energia viene riflessa secondo le leggi della meccanica classica; una parte viene dissipata all'interno del materiale di cui è costituita la parete, ed una terza parte attraversa il materiale e procede liberamente oltre.

Se chiamiamo W_i l'energia totale che nell'unità di tempo (potenza) incide sulla parete e W_a , W_r , W_t le quote di potenza rispettivamente assorbita dalla parete, riflessa e trasmessa, si può scrivere:

$$W_i = W_a + W_r + W_t$$

Ora, dividendo entrambi i membri dell'equazione per la potenza totale W_i incidente sulla parete, possiamo riscrivere l'equazione come:

$$1 = a + r + t$$

dove "a" (coeff. di assorbimento), "r" (coeff. di riflessione) e "t" (coeff. di trasmissione) sono dei coefficienti adimensionali che esprimono rispettivamente le quote di potenza sonora assorbita, riflessa e trasmessa:

$$a = \frac{W_a}{W_i} \quad r = \frac{W_r}{W_i} \quad t = \frac{W_t}{W_i}$$

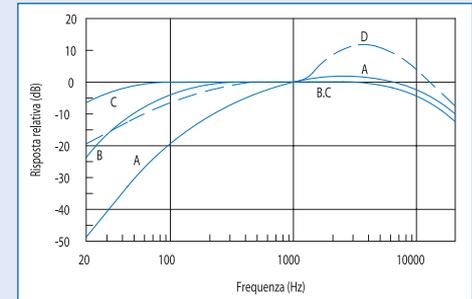
Dai coefficienti r e t sono state definite le grandezze fisiche che caratterizzano le prestazioni acustiche di una struttura: *il coefficiente di assorbimento acustico apparente α* , che indica la capacità di una struttura di non riflettere energia verso la sorgente sonora e *il potere fonoisolante R* , che quantifica la capacità di isolare l'ambiente ricevente dai rumori provenienti dall'ambiente sorgente.

Il coefficiente di assorbimento acustico apparente α è dato da:

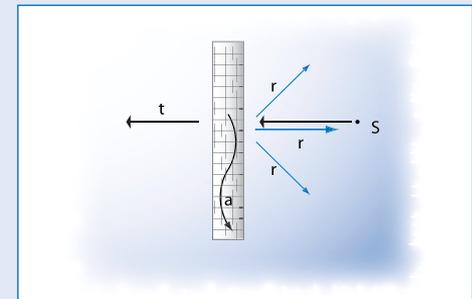
$$\alpha = 1 - r = a + t = 1 - \frac{W_r}{W_i}$$

mentre il potere fonoisolante R è definito come:

Curve di ponderazione in frequenza



Assorbimento, riflessione e trasmissione del suono



$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{t}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{W_i}{W_r}\right) \quad [\text{dB}]$$

Le due grandezze hanno un significato fisico diverso: α rappresenta le caratteristiche fonoassorbenti di un materiale mentre R quelle fonoisolanti.

I materiali che forniscono le migliori prestazioni fonoassorbenti presentano bassa massa, alta porosità, superficie cedevole; viceversa i materiali che danno le migliori garanzie di fonoisolamento hanno massa elevata, superficie continua, sono rigidi e non porosi. Solo accoppiando opportunamente materiali dei due tipi è possibile contemporaneamente ottenere un buon grado di isolamento e di assorbimento acustico.

Coefficiente di assorbimento, riflessione e impedenza acustica superficiale

(paragrafo di approfondimento)

Il coefficiente di riflessione può essere espresso come $r = 1 - \alpha$ dove il coefficiente $\alpha = (a+t)$. La riflessione del suono sulla superficie della parete può a sua volta avvenire con un diverso grado di diffusione in base alla presenza e alle dimensioni di irregolarità superficiali.

Il coefficiente di riflessione, dal punto di vista energetico, può essere espresso come rapporto tra l'energia riflessa e l'energia incidente. Il coefficiente di riflessione può anche essere espresso come rapporto tra la pressione acustica riflessa e la pressione acustica incidente. Se si considera che il suono ha una natura ondulatoria, si verificherà che l'onda sonora riflessa avrà una ampiezza ed una fase diverse da quelle dell'onda sonora incidente. Per esprimere correttamente il coefficiente di riflessione come rapporto tra la pressione riflessa e la pressione incidente, è necessario introdurre la notazione complessa che tiene conto dell'ampiezza e della fase.

$$r_p = \frac{P_r}{P_i} = |r_p| e^{j\varphi}$$

Il coefficiente di riflessione della pressione " r_p ", detto anche coefficiente di riflessione complesso, è quindi concettualmente diverso dal coefficiente di riflessione energetico " r ".

Tra i due modi di esprimere il coefficiente di riflessione esiste la seguente uguaglianza:

$$r = |r_p|^2$$

Di conseguenza il coefficiente di assorbimento acustico apparente può essere espresso in funzione del coefficiente di riflessione complesso essendo, per definizione, $\alpha = 1 - r$:

$$\alpha = 1 - |r_p|^2$$

Questa formula è importante perché è quella su cui si basa la misura del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale nel tubo ad onde stazionarie.

Un'altra grandezza importante per lo studio del comportamento acustico all'interfaccia parete-aria è l'impedenza acustica superficiale "Z", esprimibile anche come impedenza acustica superficiale specifica "ζ", cioè come rapporto tra Z e l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.

$$Z = \left(\frac{p}{u} \right)_{\text{superficie}} \quad \zeta = \frac{Z}{\rho_0 c}$$

Anche queste due grandezze, entrambe complesse, possono essere calcolate in funzione del coefficiente di riflessione complesso.

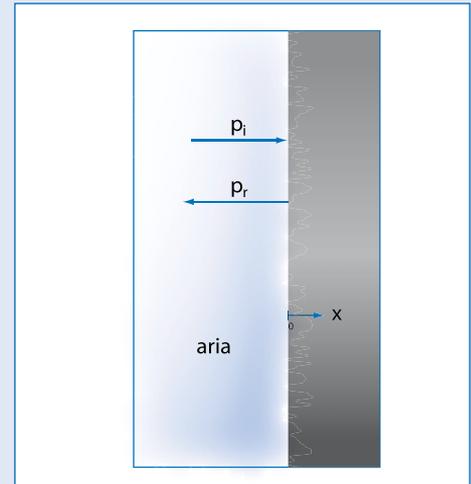
Per onde piane con incidenza normale si ottengono le espressioni di seguito riportate.

$$Z_{x=0} = \rho_0 c \cdot \frac{1 + r_p}{1 - r_p} \quad \zeta_{x=0} = \frac{Z_{x=0}}{\rho_0 c} = \frac{1 + r_p}{1 - r_p} = \zeta_R + j\zeta_I$$

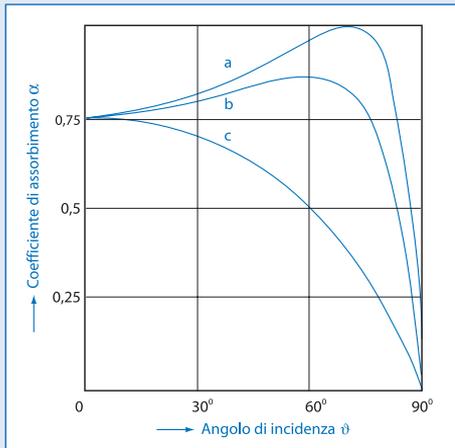
Attraverso la misura del coefficiente di riflessione complesso nel tubo ad onde stazionarie, è possibile calcolare sia il coefficiente di assorbimento acustico che l'impedenza acustica superficiale del materiale.

Alcuni casi limite forniscono i seguenti valori delle suddette grandezze:

- superficie completamente assorbente: $r_p = 0$ da cui segue $Z = \rho_0 c$ e $\alpha_n = 1$
- parete rigida: $r_p = 1$ da cui segue $Z = \infty$ e $\alpha_n = 0$
- superficie completamente "cedevole": $r_p = 1e^{j\pi} = -1$ da cui segue $Z = 0$ e $\alpha_n = 0$



Assorbimento acustico al variare dell'angolo di incidenza, per tre diversi materiali aventi diversa impedenza acustica specifica superficiale
 a) $\zeta=3$; b) $\zeta=1,5+j1,323$; c) $\zeta=1/3$.



Il coefficiente di assorbimento acustico dipende inoltre dall'angolo di incidenza dell'onda sonora rispetto alla parete oltre che dall'impedenza acustica superficiale della parete. L'impedenza acustica superficiale può essere considerata indipendente dall'angolo di incidenza per i materiali cosiddetti "localmente reagenti", cioè quei materiali per i quali l'effetto di una sollecitazione puntuale non influenza le parti di materiale non sollecitate. I materiali porosi possono essere considerati, con buona approssimazione, "localmente reagenti".

Nella figura a lato si può osservare come varia il coefficiente di assorbimento acustico al variare dell'angolo di incidenza, per tre diversi materiali aventi diversa impedenza acustica superficiale, ma lo stesso assorbimento per incidenza normale. Si può osservare che, quando ζ è reale e più grande di 1, c'è un angolo di incidenza che fornisce assorbimento totale. Per incidenza radente l'assorbimento tende a zero.

Nel caso di incidenza diffusa il coefficiente di assorbimento è il risultato della media spaziale degli assorbimenti nelle diverse direzioni di incidenza dell'onda acustica. Generalmente i materiali hanno un coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa maggiore di quello per incidenza normale ($\alpha_d > \alpha_n$). Il passaggio dai valori per incidenza normale ai valori per incidenza diffusa può essere effettuato, per i materiali localmente reagenti, con formule di calcolo teorico. La misura del coefficiente di assorbimento acustico in campo diffuso viene effettuato in camera riverberante mediante calcolo indiretto da misure di tempo di riverberazione (normativa ISO 354 [8]).

Non è raro il caso in cui, per materiali altamente fonoassorbenti, la tecnica di misura prevista dalla normativa suddetta fornisca, ad alcune frequenze, valori di assorbimento acustico anche superiori all'unità. Tale risultato è ovviamente un artefatto della tecnica di misura visto che non è possibile assorbire una quantità di energia superiore a quella incidente. Tale artefatto può avvenire poiché la tecnica di misura si basa sull'ipotesi di campo acustico perfettamente diffuso sia in assenza di materiale fonoassorbente che in presenza di materiale fonoassorbente. Evidentemente le condizioni di campo perfettamente diffuso, pur ottenibili in assenza di materiale fonoassorbente, sicuramente sono difficilmente raggiungibili in presenza del materiale.

Il potere fonoisolante "R" di pareti omogenee e "sottili"

Come detto precedentemente, la grandezza utilizzata per valutare le proprietà isolanti di una parete è il potere fonoisolante R, che rappresenta la sua attitudine a ridurre la trasmissione del suono incidente su di essa. Il potere fonoisolante R varia al variare della frequenza oltre che delle proprietà fisiche, delle dimensioni e delle condizioni di vincolo della parete.

Per pareti omogenee e sottili, l'andamento teorico del potere fonoisolante, in funzione della frequenza, è quello rappresentato in figura dove si individuano diverse zone in ciascuna delle quali prevale un certo fattore.

Si può notare innanzitutto che il potere fonoisolante assume un valore minimo in corrispondenza della frequenza naturale di risonanza del sistema.

Il valore della frequenza naturale dipende dalla massa per unità di superficie e dalla sua costante elastica. Questa ultima, a sua volta, è funzione di proprietà meccaniche (modulo di elasticità E e coefficiente di Poisson ν) e geometriche (spessore h , larghezza a , altezza b).

Semplificando e inserendo anche gli ordini superiori delle frequenze di risonanza, si ottiene la seguente formula:

$$f_{r(i,j)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{h^2}{12} \left[\left(\frac{i\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{j\pi}{b} \right)^2 \right]}$$

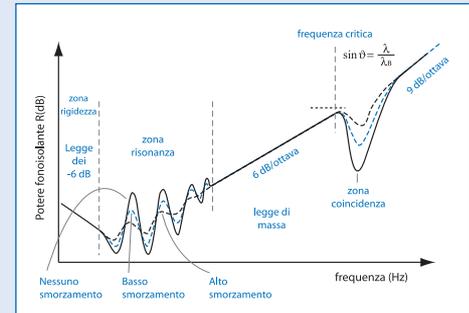
dove ρ è la densità del materiale e i - j sono numeri interi per il calcolo delle frequenze di ordine superiore.

Il valore del potere fonoisolante R nella zona delle frequenze naturali di risonanza oscilla in maniera irregolare con picchi e valli, rimanendo però sempre su valori piuttosto bassi.

Dalla figura si può osservare come i valori elevati dello smorzamento tendono a ridurre le valli di isolamento causate dai fenomeni di risonanza e di coincidenza. Il fattore di smorzamento η indica quale frazione di energia meccanica vibratoria viene persa in calore in un ciclo della vibrazione. Il fattore di smorzamento per i materiali normalmente usati in edilizia varia tra 0,05 e 0,01 circa.

Per valori della frequenza inferiori alla frequenza di risonanza naturale ($f < f_r$) la trasmissione

Andamento del potere fonoisolante al variare della frequenza e dello smorzamento.



sonora dipende essenzialmente dalla rigidità (o elasticità) della struttura e quindi gli effetti della massa e dello smorzamento sono poco importanti. Si ha una diminuzione di 6 dB per ogni raddoppio della frequenza.

Per valori della frequenza superiori alla frequenza naturale ma comunque inferiori ad un limite superiore fissato dalla cosiddetta "coincidenza" ($f_r < f < f_c$), il potere fonoisolante è governato dalla legge di massa. Si ha una crescita di R di 6 dB per raddoppio della frequenza e il comportamento della struttura è indipendente dalla sua rigidità.

In questa zona si può utilizzare la seguente formula di previsione:

$$R_{\theta_i} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{m \pi f \cos \theta_i}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}]$$

Dove m è la massa superficiale, f è la frequenza, θ_i è l'angolo di incidenza, $\rho_0 c$ è l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.

Nel caso di incidenza normale ($\theta_i=0$), la formula si può riscrivere nel seguente modo:

$$R_0 \cong 20 \log_{10} (mf) - 42.5 \quad [\text{dB}]$$

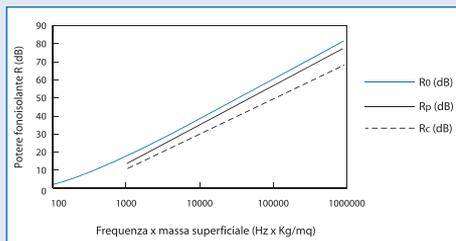
Le formule viste valgono in un campo sonoro di onde piane che arrivano sulla parete con un certo angolo di incidenza. Solitamente il campo sonoro in un ambiente chiuso è più vicino ad un campo sonoro diffuso. In queste condizioni il potere fonoisolante, detto per incidenza casuale, può essere ottenuto integrando su una semisfera (per θ_i da 0° a 90°) il potere fonoisolante R_{θ_i} . In queste condizioni, con angolo di incidenza fino a 90° , si ottiene:

$$R_c \cong R_0 - 10 \log_{10} (0.23 \cdot R_0) \quad [\text{dB}]$$

Secondo diversi autori il valore del potere fonoisolante per incidenza diffusa così calcolato è sottostimato. Una migliore interpretazione del fenomeno reale si ottiene limitando gli angoli di incidenza tra $\theta=0^\circ$ e $\theta=78^\circ$ anziché 90° e ciò perché un'incidenza radente negli ambienti usuali è poco probabile. Il valore più pratico che si ottiene, valido per incidenza mediamente diffusa, è il seguente:

$$R_p = R_0 - c \quad \text{con } c = 5 - 6 \text{ [dB]}$$

Potere fonoisolante per incidenza normale R_0 , in campo mediamente diffuso R_p ed in campo perfettamente diffuso R_c .



Nella figura della pagina precedente, a titolo comparativo, sono riportati gli andamenti del potere fonoisolante per incidenza normale, per incidenza mediamente casuale e perfettamente casuale, in funzione del prodotto mf .

La validità della legge della massa è limitata superiormente dal fenomeno della coincidenza. La velocità del suono nell'aria è costante al variare della frequenza mentre la velocità delle onde flessionali nelle strutture varia al variare della frequenza. Esisterà quindi un punto di incrocio in cui le due velocità coincidono.

Le onde sonore piane che incidono con un certo angolo su una parete sottile infinita originano nella parete un'onda flessionale forzata di lunghezza d'onda λ_{tr} pari alla lunghezza d'onda di traccia dell'onda sonora incidente ($\lambda_i / \sin \theta$) ossia:

$$\lambda_{tr} = \lambda_i / \sin \theta \quad \text{dove } \lambda_i = \text{lunghezza d'onda dell'onda incidente.}$$

Il fenomeno, noto con il nome di coincidenza, si verifica quando, per un determinato angolo d'incidenza, la lunghezza d'onda di traccia dell'onda sonora piana incidente eguaglia la lunghezza d'onda λ_B dell'onda flessionale libera ossia:

$$\lambda_B = \frac{\lambda_i}{\sin \theta}$$

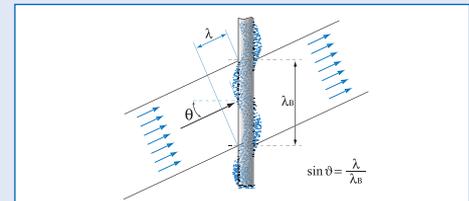
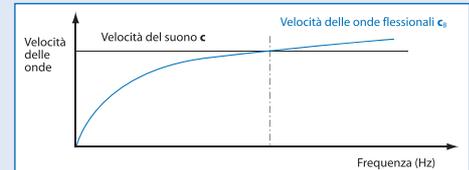
In queste condizioni l'onda di pressione acustica viene accompagnata nel suo movimento di compressione e rarefazione dall'onda flessionale sulla struttura e la stessa viene irradiata dalla parte opposta della parete senza subire attenuazioni.

Poiché il $\sin \theta$ non può eccedere l'unità, si ha che la frequenza più bassa per cui si verifica il fenomeno di coincidenza si ottiene per $\theta = 90^\circ$ (incidenza radente); questa frequenza è chiamata frequenza critica ed è pari a:

$$f_c = \frac{c^2}{\pi s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

dove E è il modulo di Young, ν è il coefficiente di Poisson, ρ è la densità, s è lo spessore del

Visualizzazione della coincidenza della velocità del suono con la velocità delle onde flessionali



pannello. Essa si verifica nel caso particolare in cui $\lambda_i = \lambda_B$ o in modo equivalente quando $c_B = c$.

In campo diffuso le onde incidono sulla parete da tutte le direzioni. Il fenomeno di coincidenza in questo caso interessa un intervallo di frequenze, infatti per ogni angolo d'incidenza esiste una corrispondente frequenza di coincidenza.

Il fenomeno della coincidenza è particolarmente importante quando si ha incidenza di onde piane con un certo angolo di inclinazione. In un campo diffuso il fenomeno della coincidenza è attenuato dal fatto che la quantità di energia trasportata dall'onda che subisce il fenomeno della coincidenza, per una certa frequenza e per uno specifico angolo, è piccola rispetto a tutta quella che incide con angoli diversi alla stessa frequenza.

Nella tabella seguente sono riportati alcuni valori indicativi della frequenza critica di alcuni materiali da costruzione.

<i>Materiale</i>	<i>Spessore (mm)</i>	<i>Frequenza critica (Hz)</i>
Vetro	3	4800
Cartongesso	13	3150
Compensato	13	2000
Cemento	50	630
Cemento	150	200

Al di sopra della frequenza critica e della zona dove si verifica il fenomeno della coincidenza, il potere fonoisolante R torna ad aumentare con una pendenza teorica di 9 dB per raddoppio di frequenza e quindi superiore a quella che si verifica nel campo di validità della legge di massa. In campo diffuso si può calcolare il potere fonoisolante sopra la frequenza critica con la seguente espressione:

$$R_d = 20 \log(mf) + 10 \lg \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) + 10 \lg \eta - 44 \quad (\text{dB})$$

dove f_c è la frequenza critica della parete (Hz) e η è il fattore di smorzamento totale della parete. Questo termine sintetizza i meccanismi di smorzamento all'interno della parete

eccitata indicando quale frazione dell'energia meccanica vibratoria viene convertita in calore in un ciclo della vibrazione.

Poiché lo smorzamento dipende non solo dal materiale, ma anche dalle condizioni al contorno, la previsione di R sopra la frequenza critica ha una affidabilità limitata.

Il suono in ambiente esterno: modalità di propagazione ed effetti di attenuazione

La propagazione in campo libero

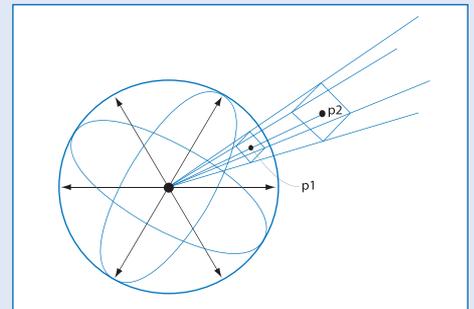
Quando il suono si propaga senza incontrare nessun ostacolo che possa causare fenomeni di assorbimento, diffrazione o riflessione, si ha la condizione di campo libero. Le onde sonore si allontanano dalla sorgente subendo il solo fenomeno della divergenza geometrica, cioè dell'attenuazione dovuta al fatto che aumentando la distanza aumenta la superficie di propagazione. In natura esistono innumerevoli tipologie di sorgenti sonore, ciascuna caratterizzata da una certa forma, dimensione, direttività, spettro di emissione, variabilità nel tempo. Le modalità con cui il suono emesso da queste sorgenti si propaga in campo libero possono essere diverse da sorgente a sorgente. Per semplificare lo studio della propagazione del suono in campo libero è possibile schematizzare le sorgenti sonore in tre tipologie di sorgenti ideali che, in certe condizioni, possono approssimare correttamente il comportamento delle sorgenti reali. Le tipologie considerate sono le seguenti:

- sorgente puntiforme (la propagazione del suono avviene con una divergenza sferica)
- sorgente lineare (la propagazione del suono avviene con una divergenza cilindrica)
- sorgente piana guidata (le onde rimangono piane al variare della distanza)

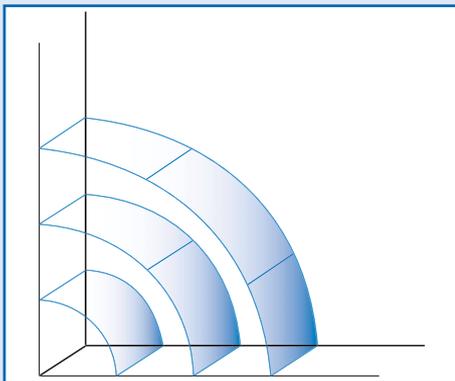
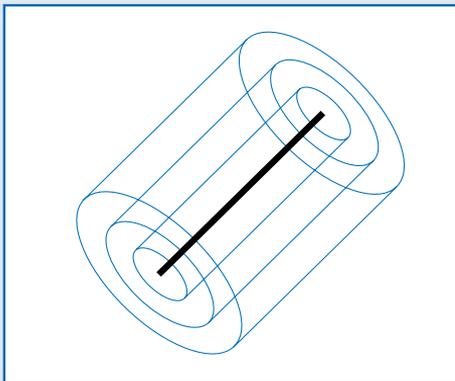
Il fatto che una sorgente sonora sia considerata puntiforme, lineare o piana non dipende solo dalla sua forma, ma anche dalla dimensione e dalla distanza relativa sorgente-ricevitore. Nella trattazione seguente si considera solo la condizione $d > 1.6 \lambda$, relativa al campo acustico lontano.

Una **sorgente puntiforme** in campo libero produce onde acustiche sferiche, ovvero emette con eguale intensità in tutte le direzioni. In campo lontano, siccome possiamo considerare piana

Propagazione per onde sferiche di una sorgente puntiforme



Propagazione per onde cilindriche di una sorgente lineare



la curvatura della superficie di un fronte d'onda, si ottiene

$$L_p \cong L_I = L_W - 11 - 20 \cdot \log d \quad [dB]$$

L'uguaglianza tra il livello di intensità e quello di pressione si verifica soltanto nelle ipotesi di campo libero (assenza di qualsiasi riflessione).

L'attenuazione per divergenza sferica ΔL tra i punti p_1 e p_2 si può calcolare nel modo seguente:

$$L_{p_1} \cong L_{I_1} = L_W - 11 - 20 \cdot \log d_1$$

$$L_{p_2} \cong L_{I_2} = L_W - 11 - 20 \cdot \log d_2$$

$$\Delta L = L_{I_1} - L_{I_2} = -20 \cdot \log d_1 + 20 \cdot \log d_2 = 20 \cdot \log \frac{d_2}{d_1}$$

Nel caso particolare in cui $d_2 = 2 \cdot d_1$ l'attenuazione per divergenza sferica fornisce $\Delta L = 6$ dB, cioè una diminuzione di 6 dB dei livelli di intensità e pressione sonora per ogni raddoppio della distanza sorgente-ricevitore. Questo comportamento rispetta la regola dei 3 dB (ad un dimezzamento dell'energia corrisponde un calo del livello di 3 dB): raddoppiare la distanza dalla sorgente equivale a quadruplicare la superficie e quindi a ridurre ad un quarto l'energia ovvero ad un calo di 6 dB.

Una **sorgente lineare** produce delle onde cilindriche; se essa è costante lungo tutta la sua lunghezza le onde sono equidistanti dalla sorgente. Considerando una sorgente sonora di lunghezza unitaria, si ottiene:

$$L_p \cong L_I = L_W - 10 \cdot \log 2\pi - 10 \cdot \log d = L_W - 8 - 10 \cdot \log d \quad [dB]$$

L'attenuazione per divergenza cilindrica ΔL tra due punti p_1 e p_2 a distanza crescente dalla sorgente, si può calcolare nel modo seguente:

$$L_{p_1} \cong L_{I_1} = L_W - 8 - 10 \cdot \log d_1$$

$$L_{p_2} \cong L_{I_2} = L_W - 8 - 10 \cdot \log d_2$$

$$\Delta L = L_{I_1} - L_{I_2} = -10 \cdot \log d_1 + 10 \cdot \log d_2 = 10 \cdot \log \frac{d_2}{d_1}$$

Nel caso particolare in cui $d_2 = 2 \cdot d_1$ si ottiene $\Delta L = 3$ dB, ciò corrisponde ad una diminuzione di 3 dB dei livelli di intensità e pressione sonora per ogni raddoppio della distanza sorgente-ricevitore. Anche in questo caso viene rispettata la regola dei 3 dB.

Una sorgente sonora lineare può essere costituita da un emettitore continuo come un tubo in cui scorre un fluido in moto turbolento oppure da un insieme di sorgenti puntiformi ravvicinate, come ad esempio una strada con flusso di traffico continuo.

Una **sorgente piana** genera onde acustiche piane. Nell'ambito delle normali sorgenti reali, solitamente non si ha a che fare con tale tipo di propagazione. In laboratorio si può costruire un modello di una guida d'onda utilizzando un tubo, liscio all'interno, avente da un lato un pistone vibrante.

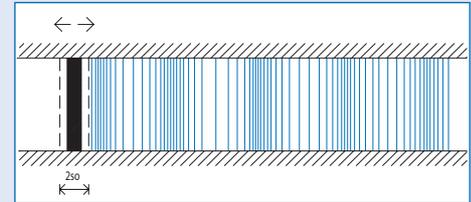
Nelle condizioni in cui le onde risultino perfettamente piane ed in assenza di altri fenomeni dissipativi si verifica che l'intensità acustica rimane costante al variare della distanza tra la sorgente ed il ricevitore. Si vede infatti come:

$$I_1 = \frac{W}{S_1} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{W}{S_2}$$

Poiché $S_1 = S_2$ risulta $I_1 = I_2$ dunque l'attenuazione è nulla.

Onde piane si possono verificare anche in prossimità di grandi lastre vibranti, come ad esempio le facciate dei capannoni industriali. La condizione di onda piana viene però persa facilmente in prossimità dei bordi ed all'aumentare della distanza dal piano vibrante.

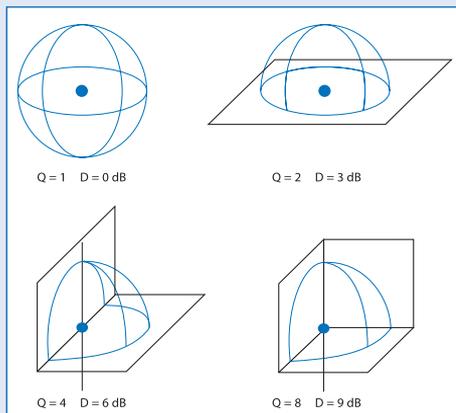
Propagazione per onde piane di sorgenti sonore piane



Effetto della variazione della distanza relativa sorgente - fronte d'onda.



Fattori e indici di direttività per diverse situazioni



In realtà a distanze molto grandi la sorgente piana può essere vista come una sorgente puntiforme.

Quando una sorgente sonora è appoggiata ad un pavimento riflettente o ad una parete allora è vincolata ad irradiare solo in una porzione di spazio. Questo comporta che la quantità di energia irradiata in una certa direzione è maggiore che nel caso di radiazione uniforme. Per tenere conto di questa caratteristica, ed in generale per tener conto di una non uniforme irradiazione di energia nello spazio circostante, si introduce il **fattore di direttività** Q , cioè il rapporto tra l'intensità sonora nella direzione θ (I_θ) e l'intensità sonora (I_0) che avrebbe il campo acustico in quel punto se la sorgente fosse omnidirezionale:

$$Q = \frac{I_\theta}{I_0}$$

Per sorgenti puntiformi appoggiate su pareti perfettamente riflettenti il volume a disposizione per la propagazione si dimezza e quindi $Q=2$. Per sorgenti collocate lungo uno spigolo tra due pareti il volume diventa la quarta parte e quindi $Q=4$. In un vertice diventa $Q=8$. Per applicare questo fenomeno alla propagazione in campo libero si può scrivere:

$$L_p \cong L_I = L_W - 11 - 20 \cdot \log d + 10 \cdot \log Q$$

Il termine $D = 10 \cdot \log Q$ viene invece chiamato *indice di direttività*.

Effetti di attenuazione sonora nella propagazione

L'attenuazione che il suono subisce propagandosi dalla sorgente al ricevitore dipende, oltre che dalla divergenza geometrica dovuta alla distanza, anche da altri fenomeni dissipativi dovuti all'assorbimento dell'aria o delle superfici con cui l'onda di pressione viene in contatto (diversi tipi di terreno, alberi e vegetazione), dalle condizioni meteorologiche (velocità del vento e gradiente di temperatura) dalla presenza di barriere acustiche. Per sorgenti puntiformi si può scrivere:

$$L_p \cong L_I = L_W - 11 - 20 \cdot \log d + 10 \cdot \log Q - \Delta L$$

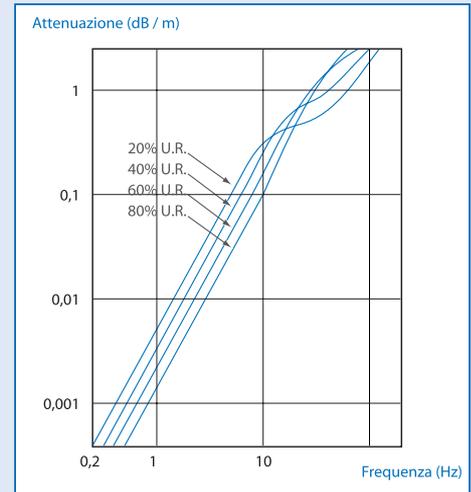
dove ΔL è una somma algebrica di

$$\Delta L = \Delta L_{aria} + \Delta L_{suolo} + \Delta L_{vegetazione} + \Delta L_{temperatura} + \Delta L_{vento} + \Delta L_{barriere}$$

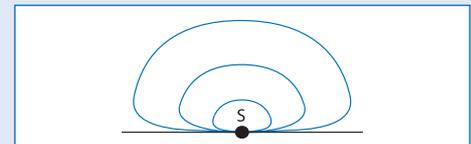
Le modalità di calcolo di alcuni termini sono riportati nelle norme ISO 9613 parti 1-2 [9, 10]. L'**assorbimento dell'aria** è associato a diversi processi irreversibili che convertono parte dell'energia dell'onda acustica in calore. Questo effetto diventa rilevante solo quando si considera la propagazione a distanze pari a diverse lunghezze d'onda. L'assorbimento cresce all'aumentare della frequenza secondo un andamento che risente della presenza di umidità. A bassa frequenza, tanto maggiore è l'umidità tanto minore è l'assorbimento. A frequenze molto alte l'andamento è opposto. Sotto i 100Hz l'assorbimento è molto basso dell'ordine di 1dB/kM mentre oltre i 12-13 KHz c'è un'attenuazione altissima. Gli ultrasuoni, infatti, dopo pochi metri vengono attenuati completamente.

Un altro fenomeno di attenuazione che si verifica sempre è il cosiddetto **effetto suolo**. Quando un'onda sonora si propaga in prossimità del terreno, si verifica una attenuazione per effetto radente superiore a quella che si verifica lontano dal terreno. Il risultato è che a livello del terreno si hanno livelli sonori più bassi rispetto a quelli che si verificano ad una certa altezza. Il fenomeno è causato sia dall'assorbimento del terreno ma anche dall'interferenza distruttiva tra le onde sonore dirette e quelle che si riflettono sul terreno.

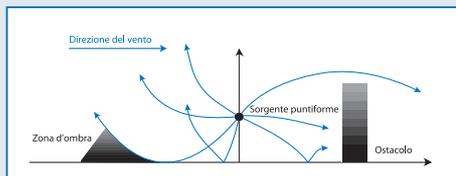
Andamento dell'assorbimento dell'aria al variare della frequenza e dell'umidità



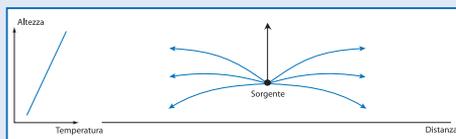
Visualizzazione di curve isolivello con effetto suolo



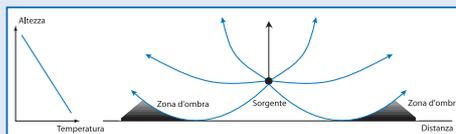
Andamento della direzione dei raggi sonori per effetto del vento



Andamento della direzione dei raggi sonori in presenza di gradiente positivo



Andamento della direzione dei raggi sonori in presenza di gradiente negativo



L'attenuazione dovuta alla **vegetazione** è solitamente trascurabile a meno che non si sia in presenza di bosco e sottobosco fitto e profondo. A titolo indicativo, uno spessore di circa 30 metri di alberi con sottobosco fitto produce un'attenuazione di circa 5 dB.

Benché una zona di vegetazione non riduca significativamente i livelli di rumore, serve però ad isolare visivamente e per questo determina un effetto soggettivo positivo.

Il **vento** interagisce con l'onda sonora in modo differente in funzione della direzione e del verso. La velocità del suono e quella del vento si sommano vettorialmente generando una disposizione dei raggi sonori secondo l'andamento riportato nella figura a lato.

Tale deviazione può provocare, a grande distanza dalla sorgente, delle zone d'ombra oppure può permettere ai raggi sonori di scavalcare degli ostacoli.

Il **gradiente di temperatura** è sempre presente ed è dovuto allo scambio di calore fra la superficie terrestre e l'atmosfera. La presenza del gradiente di temperatura porta ad una variazione della velocità del suono in funzione dell'altezza da terra poiché la temperatura influenza la densità delle particelle che a sua volta influenza la velocità.

Anche per quanto riguarda l'effetto dovuto al gradiente di temperatura, le velocità si sommano vettorialmente. In presenza di un gradiente positivo di temperatura (temperatura che aumenta con l'altezza, generalmente di notte), al crescere dell'altezza da terra si ha un aumento della velocità del suono; un'onda che viaggia nell'aria, quindi, avrà una velocità leggermente maggiore nella parte più alta e sarà lievemente deviata verso il basso. Analogamente, in presenza di un gradiente negativo (temperatura che cala con l'altezza, generalmente di giorno) si avrà una leggera deviazione dell'onda verso l'alto. Il gradiente di temperatura, come il vento, può determinare scavalco di ostacoli o zone d'ombra.

Un ultimo effetto da considerare, ma molto importante a livello pratico, è l'attenuazione dovuta alle **barriere acustiche**.

Le barriere acustiche sono costituite da ostacoli interposti tra sorgente e ricevitore e possono determinare una attenuazione acustica che in certi casi può arrivare anche a 20 dB. L'attenuazione delle barriere acustiche è l'unico fenomeno, tra quelli riscontrabili nella propagazione del suono all'esterno, che può essere tecnicamente controllata e per questa

ragione svolgono un ruolo importantissimo nel controllo della propagazione dei suoni e dei rumori.

Quando un'onda incontra un ostacolo finito, il bordo dell'ostacolo (o un eventuale foro presente su di esso) diviene esso stesso una sorgente di onde. Si verifica il cosiddetto fenomeno di diffrazione.

La capacità di emettere del punto di contatto dipende in gran parte dalla frequenza delle onde. Le alte frequenze subiscono una limitata diffrazione, mentre per le basse frequenze il fenomeno è molto marcato e tendono a scavalcare di più l'ostacolo.

Il suono interagisce con la barriera per riflessione sulla sua superficie, per trasmissione attraverso la barriera stessa e per diffrazione ai bordi. Per essere efficace deve essere resa trascurabile la parte di energia sonora che attraversa la barriera. Per questo motivo la massa superficiale della barriera non dovrebbe essere inferiore a 20 kg/m². In queste condizioni l'energia che raggiunge l'ascoltatore è quella trasmessa per diffrazione sulla parte superiore o ai lati della barriera. Per una barriera sufficientemente lunga da trascurare la diffrazione ai lati l'attenuazione può essere valutata attraverso la relazione di Maekawa:

$$\Delta L = 10 \cdot \log(3 + 20N) \quad [\text{dB}]$$

dove N rappresenta il numero di Fresnel definito dalla relazione

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

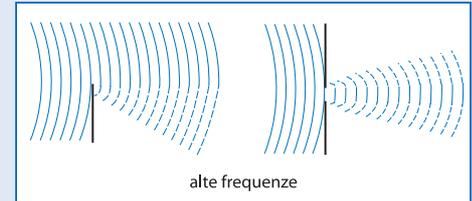
essendo la differenza di cammino tra onda diretta e diffratta (in figura $\delta = SB + BR - SR$) e $\lambda = c/f =$ lunghezza d'onda della perturbazione sonora.

Considerando anche la diffrazione attraverso i bordi laterali della barriera (N_1, N_2) si può scrivere

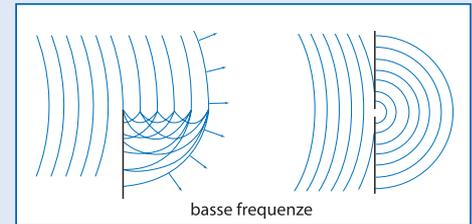
$$\Delta L = 10 \cdot \log(3 + 20N) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2}\right) \quad [\text{dB}]$$

valida per valori di N, N_1 , $N_2 > 1$. Per ridurre l'influenza della diffrazione laterale (<2 dB),

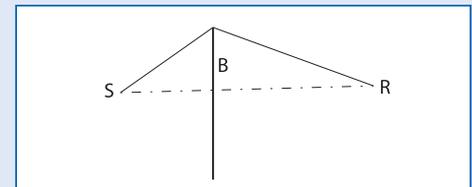
Effetto di diffrazione ad alta frequenza



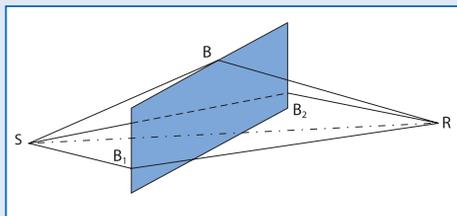
Effetto di diffrazione a bassa frequenza



Visualizzazione dei raggi diretto e diffratto



Visualizzazione dei raggi diretto e diffratti superiormente e lateralmente



occorre che la larghezza della barriera sia almeno uguale a 4 o 5 volte la sua altezza.

Il livello di pressione sonora di una barriera viene pertanto calcolato come:

$$L_{\text{con barriera}} = L_{\text{senza barriera}} - \Delta L$$

Da notare che si tratta di una differenza aritmetica in dB (es. $L_{\text{con barriera}} = 100 - 20 = 80$).

Se N è molto piccolo la formula di Maekawa non è molto precisa, allora si utilizzano altre formule.

Acustica degli ambienti chiusi

Quando un'onda sonora urta contro una parete, l'energia trasportata (incidente), si ridistribuisce nelle tre componenti riflessa, assorbita e trasmessa.

Per lo studio dell'acustica in un ambiente chiuso si considera l'energia che viene riflessa dalle pareti poiché sia la parte assorbita che la parte trasmessa sono irrilevanti ai fini del campo acustico interno. I coefficienti di assorbimento a e trasmissione t vengono quindi generalmente accorpati in un unico valore chiamato *coefficiente di assorbimento acustico apparente* $\alpha = (a + t)$ senza perdere le informazioni necessarie al campo acustico interno.

Il coefficiente di riflessione viene quindi espresso come $r = 1 - \alpha$.

La riflessione del suono avviene in parte in maniera speculare e in parte in maniera diffusa influenzando parzialmente la qualità del campo acustico all'interno dell'ambiente ma non l'energia che complessivamente entra in gioco nella riflessione.

Densità di energia sonora e tempo di riverberazione

Quando in un ambiente chiuso, in cui sono contenuti una sorgente sonora S ed un ricevitore R , viene accesa la sorgente S il primo fronte d'onda a raggiungere R sarà quello diretto senza riflessioni sulle pareti, con potenza W_S e caratterizzato da un'intensità di

modulo $I_D = \frac{W_S}{4\pi d^2}$ e da una densità $D_D = \frac{W_S}{4\pi d^2 c}$.

In seguito si avrà la prima riflessione dell'onda sonora contro la parete più vicina alla sorgente S.

La potenza che raggiungerà il ricevitore a causa della riflessione sarà $W_{S'} = W_S (1 - \alpha)$ che si può anche immaginare come la potenza emessa dalla *sorgente immagine* S' situata simmetricamente a S rispetto alla parete riflettente. Con questo procedimento grafico si ottiene facilmente l'uguaglianza degli angoli di incidenza e riflessione.

L'intensità e la densità avranno invece ampiezza rispettivamente:

$$I_{S'} = \frac{W_{S'}}{4\pi d_r^2} = \frac{W_S(1-\alpha)}{4\pi d_r^2} \quad \text{e} \quad D_{S'} = \frac{W_{S'}}{4\pi d_r^2 c} = \frac{W_S(1-\alpha)}{4\pi d_r^2 c}$$

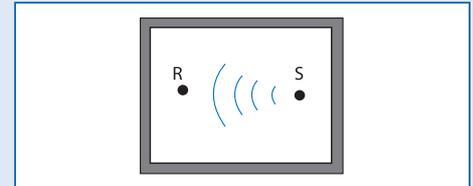
dove la distanza d_r sarà la distanza fra la sorgente immagine S' e il ricevitore. Dopo la prima riflessione si verificheranno le cosiddette riflessioni del II ordine, III ordine e così via. Tutte le grandezze relative alle suddette riflessioni si possono ancora una volta calcolare con il metodo delle sorgenti immagine di cui si riporta un esempio grafico fino al II ordine.

Mano a mano che si verificano le successive riflessioni, si assiste contemporaneamente alla diminuzione della potenza sonora che raggiunge il ricevitore e all'aumento della distanza percorsa dall'onda prima di arrivare al ricevitore R. Per l'insieme di questi fenomeni si raggiunge ben presto una situazione di regime in cui R rileva una densità costante, a causa dell'equivalenza che si instaura fra l'energia emessa dalla sorgente e quella assorbita dalle pareti. A regime, la densità di energia sonora nell'ambiente vale:

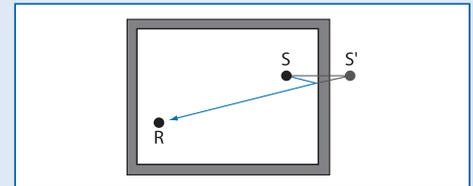
$$D_{reg} = \frac{4W_S}{\alpha \cdot S \cdot c}$$

Gli stessi ragionamenti fatti per la fase di salita della densità di energia in un ambiente chiuso

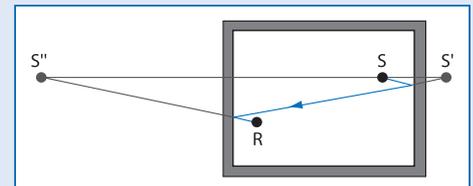
Propagazione dell'onda diretta



Visualizzazione dei raggi diretto e riflesso e della sorgente immagine



Visualizzazione dei raggi diretto e riflessi e delle sorgenti immagine del I° e del II° ordine



possono essere ripetuti in maniera opposta per la fase di discesa che si verifica una volta che la sorgente sonora viene spenta. Nel momento in cui la sorgente smette di emettere l'onda sonora si verifica la cosiddetta *coda sonora*, cioè il permanere per un breve periodo del campo riflesso che si attenua progressivamente fino a scomparire del tutto. Per valutare questo fenomeno è stato introdotto da Sabine **il tempo di riverberazione** cioè l'intervallo di tempo che trascorre dal momento in cui la sorgente viene spenta al momento in cui la densità di energia si riduce ad un valore pari ad un milionesimo della densità di energia sonora di regime $D_T = 10^{-6} D_{reg}$ (o in maniera equivalente, riferendosi ai livelli, $L_{D|T} = L_{D_{reg}} - 60dB$).

Il tempo di riverberazione, che è ricavabile da misure sperimentali, è correlato con il volume e con l'assorbimento dell'ambiente attraverso la formula di Sabine:

$$\tau_0 = 0,161 \frac{V}{\sum \alpha_i s_i + \sum A_i}$$

dove:

- τ_0 è il tempo di riverberazione,
- A_i = area equivalente di assorbimento acustico [m²];
- s_i = superficie i-esima;
- α_i = coefficiente di assorbimento acustico apparente;
- V = volume.

Nella formula si può osservare che la costante 0.161 non è adimensionale ma risulta pari a $0.161 = \frac{55.2}{c}$ [s/m] quando la velocità del suono si considera pari a $c=343$ m/s,

cioè alla temperatura ambiente di circa 20 °C. A temperature diverse da quelle ambiente, cambiando la velocità c , può cambiare anche il valore numerico della costante.

Nel caso in cui nell'ambiente considerato siano presenti esclusivamente delle pareti o delle superfici, l'area equivalente di assorbimento acustico si ricava semplicemente come $\sum \alpha_i s_i$,

mentre nel caso più generale in cui si debba tenere conto anche della presenza di oggetti o di persone andrà calcolata come $\sum \alpha_i s_i + \sum A_i$, dove la seconda sommatoria tiene conto dell'assorbimento equivalente di oggetti o persone. Si può scrivere:

$$\tau_0 = 0.161 \frac{V}{A} \quad \text{dove risulta: } A = \sum \alpha_i s_i + \sum A_i$$

considerando A pari al totale delle aree equivalenti dell'ambiente in analisi.

La validità di questa formula è strettamente correlata con le caratteristiche geometriche ed acustiche dell'ambiente. Il campo acustico deve essere sufficientemente diffuso; le dimensioni devono essere confrontabili; l'assorbimento dei vari elementi e delle pareti deve essere abbastanza omogeneo e sufficientemente basso.

Nelle tre figure sono riportati rispettivamente: l'andamento della potenza sonora emessa dalla sorgente nel tempo, l'andamento della densità di energia sonora nell'ambiente nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta; lo stesso grafico ma utilizzando i livelli sonori anziché la densità di energia. Il diagramma semilogaritmico rappresenta i livelli di densità [dB] in funzione del tempo [s]; si vede chiaramente come i due transitori in scala logaritmica siano delle rette.

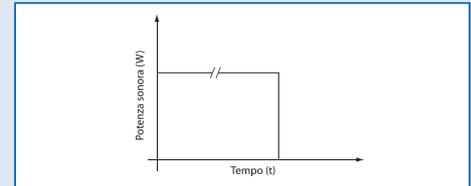
Campo sonoro semiriverberante e riverberante in regime stazionario.

In un ambiente chiuso in cui è in funzione una sorgente sonora, il livello sonoro che si instaura nelle diverse posizioni è influenzato dalle caratteristiche riverberanti dell'ambiente (o dall'assorbimento delle pareti) e dalla distanza sorgente ricevitore. Essendo in un campo acustico diffuso o parzialmente diffuso, le grandezze che si considerano per il calcolo dei livelli sonori sono la densità di energia e la pressione acustica. In un campo diffuso, infatti, l'intensità acustica che è una grandezza vettoriale tende ad essere nulla.

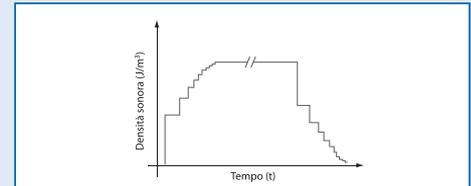
Il livello sonoro ad una certa distanza dal ricevitore si può calcolare con la seguente espressione

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

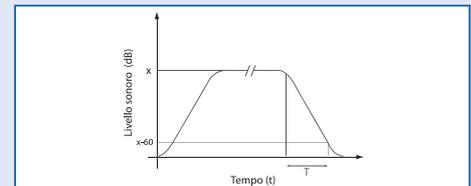
a) andamento della potenza sonora emessa dalla sorgente nel tempo;



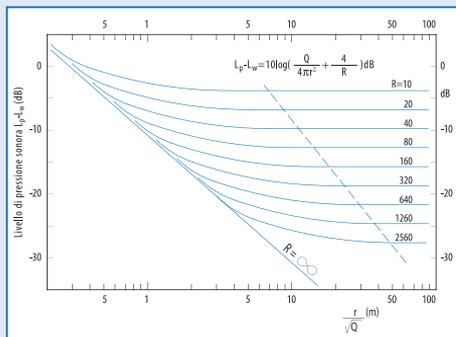
b) andamento della densità di energia nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta;



c) andamento del livello sonoro nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta.



$L_p - L_w$ per una sorgente sonora con fattore di direttività Q , in campo semiriverberante ad una certa distanza r , al variare della costante dell'ambiente R .



dove R è chiamata *costante dell'ambiente* e vale $R = \frac{\bar{\alpha} S_{TOT}}{(1-\bar{\alpha})}$, Q è il fattore di

direttività dovuto alla posizione della sorgente rispetto alle pareti riflettenti. Questa formula del campo acustico semiriverberante tiene conto separatamente sia del campo riflesso che del campo diretto. Essa considera il fatto che in un qualsiasi ambiente in cui sia presente una sorgente nei punti abbastanza vicini ad essa il livello di energia è sempre più elevato rispetto a quello misurato in punti più lontani.

Se si assume valida l'ipotesi di densità di energia sonora costante in tutto l'ambiente, allora si può definire un altro campo acustico, detto campo acustico riverberante, nel quale il livello sonoro si può calcolare con la seguente espressione, indipendente dalla distanza sorgente ricevitore e dalla posizione della sorgente rispetto alle pareti:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{4}{A}$$

Questa ultima formula permette di calcolare il valore del livello sonoro in campo riverberante in funzione della potenza sonora della sorgente e delle caratteristiche acustiche dell'ambiente.

Essa andrà usata soltanto nei casi in cui si possa considerare valida o in qualche modo approssimabile l'ipotesi di livello costante di energia sonora (ad esempio se le posizioni in cui voglio calcolare il livello sono abbastanza lontane dalla sorgente e se il coefficiente non è grande). In caso contrario, ovvero se si vuole valutare un livello vicino alla sorgente, si dovrà fare riferimento alla formula del campo semiriverberante che tiene conto della presenza preponderante del campo acustico diretto. Nella figura è riportato l'andamento del termine $L_p - L_w$ della formula del campo semiriverberante al variare della distanza dalla sorgente, normalizzata rispetto al fattore di direttività Q , e della costante d'ambiente R .

La retta più a sinistra ($R = \infty$) rappresenta il caso limite in cui tutta l'energia incidente viene assorbita dalle pareti; questo equivale ad una situazione di campo libero con una diminuzione di 6dB per ogni raddoppio della distanza.

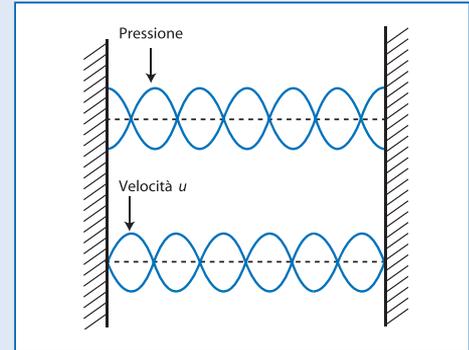
Se R è finito, si può notare una influenza notevole sia del campo libero che di quello riflesso (le curve hanno una pendenza molto elevata) fino a valori che si trovano sulla retta obliqua tratteggiata. Da quel punto in poi le curve sono praticamente orizzontali, cioè il livello non cambia al variare della distanza; in queste condizioni il campo acustico è uniforme e quindi riverberante.

Modi propri di risonanza

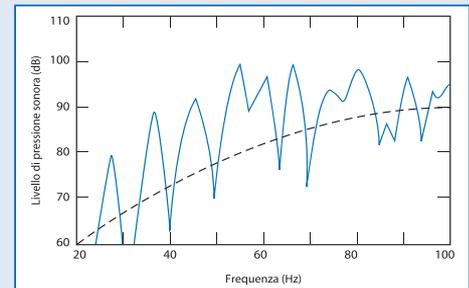
Quando un'onda sonora viene emessa all'interno di un ambiente chiuso e iniziano le riflessioni a causa degli urti con le pareti si generano delle risonanze dell'onda stessa cosiddette frequenze proprie di risonanza o modi propri di risonanza. In corrispondenza di questi modi si ha che la distanza fra due o più riflessioni successive è esattamente uguale ad un numero intero di lunghezze d'onda. Per tale motivo si genera un'onda stazionaria che urta la parete e viene quindi riflessa con segno opposto, generando delle interferenze costruttive e distruttive che danno origine ad un'onda del tipo mostrato in figura.

In un ambiente reale, nel quale è praticamente impossibile raggiungere una situazione di campo completamente diffuso, in genere si vengono a creare un numero finito di onde stazionarie le quali, proprio a causa del loro numero limitato, diventano critiche per l'acustica dell'ambiente. Questo fenomeno è tuttavia presente soprattutto a bassa frequenza. Si può infatti osservare come i picchi dei livelli di pressione (cui corrisponde un modo proprio) diminuiscano all'aumentare della frequenza fino a diventare trascurabili alle alte frequenze.

Onda stazionaria



Andamento dei modi propri a bassa frequenza all'interno di un ambiente chiuso



Bibliografia

Riferimenti normativi

- [1] ISO 3740-2000, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Guidelines for the use of basic standards.
- [2] UNI EN ISO 9614-1997, Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico.
- [3] UNI EN 21683-1995, Acustica - Grandezze di riferimento preferite per i livelli acustici.
- [4] UNI EN ISO 266-1998, Acustica - Frequenze preferibili.
- [5] IEC R 225-1966, Specifications for Octave, Half-Octave and Third-Octave Band Filters, Intended for the analysis of sounds and vibrations.
- [6] UNI ISO 226-1994, Acustica - Curve isolivello di sensazione sonora per i toni puri.
- [7] CEI 29-1, Misuratori di livello sonoro (fonometri) - Dicembre 1982.
- [8] ISO 354-2003, Acoustics -Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [9] ISO 9613-1, 1996, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- [10] ISO 9613-2, 1996, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. A general method of calculation.

Riferimenti scientifici

- [11] I. Barducci, Acustica Applicata (Esa Editrice).
- [12] L.L.Beranek, Noise and vibration control, Mac Graw Hill-New York (1971).
- [13] Bruel & Kjaer, Technical documentation.
- [14] E. Cirillo, Acustica Applicata (McGraw Hill, Milano, 1997).
- [15] F. Fahy, Foundation of Engineering Acoustics, Academic Press (2001).
- [16] A. Farina, Appunti del corso di Fisica Tecnica, Parma, a.a. 2000-2001.
- [17] R. Spagnolo, a cura di, Manuale di Acustica, UTET (2001).

- [18] R.Pompoli, P.Fausti, G.L.Morini, Il fenomeno sonoro, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.
- [19] R.Pompoli, P.Fausti, Cenni sull'analisi in frequenza dei segnali sonori, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.
- [20] R.Pompoli, Il sistema uditivo dell'uomo, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.
- [21] R.Pompoli, P.Fausti, Propagazione del suono in ambiente esterno, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, 2003.

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.

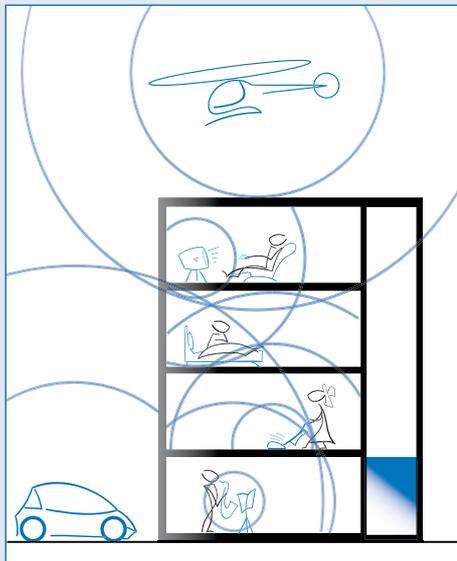
Trattare di acustica edilizia significa prendere in considerazione tutti quegli aspetti che influenzano la qualità acustica all'interno degli ambienti abitativi. Si devono considerare innanzitutto le sorgenti di rumore che possono essere percepite all'interno degli edifici; queste possono essere esterne 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

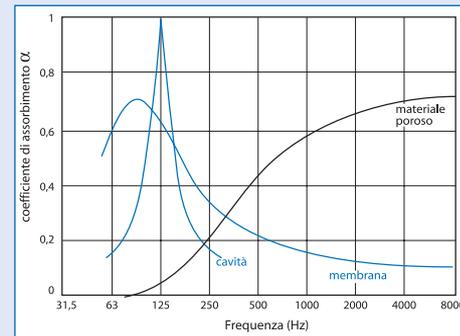
L'assorbimento acustico dei materiali porosi è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente attraverso fenomeni di attrito che si sviluppano all'interno delle micro-cavità aperte all'aria. L'onda acustica incidente fa oscillare l'aria interna ai pori 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.

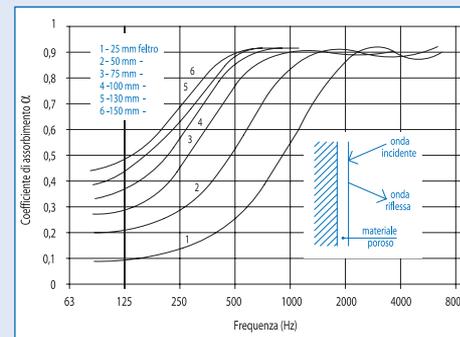
Si può notare che valori elevati di α si raggiungono alle alte frequenze, mentre alle medie e basse frequenze l'assorbimento acustico aumenta con lo spessore dei pannelli. Per avere valori elevati di assorbimento in un campo di frequenze sufficientemente esteso verso le basse frequenze occorre, pertanto,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

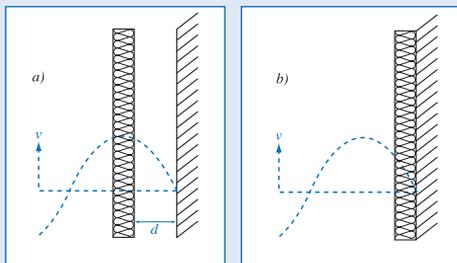
Visualizzazione dei diversi meccanismi di assorbimento acustico



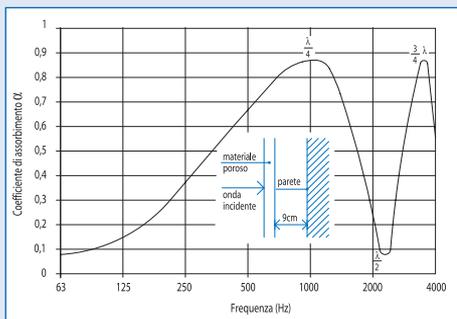
Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza e dello spessore del materiale.



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.

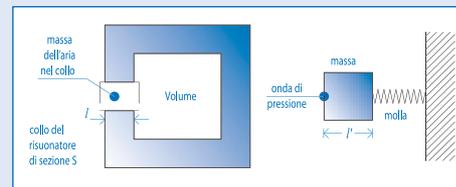
In questo campo di frequenze, agendo sullo spessore del pannello, sulle dimensioni dei fori e sulla percentuale di foratura nonché sulla distanza di montaggio dalla parete, si può rendere massimo l'assorbimento nella banda di frequenze desiderata.

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.

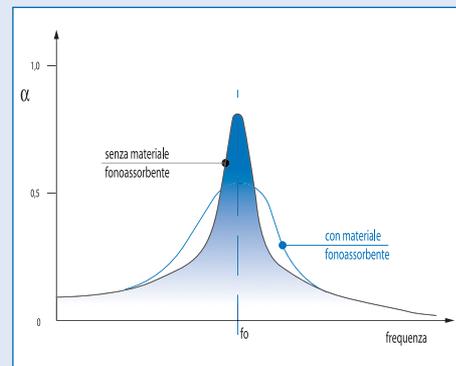
Il pannello forato risonante assorbente costituisce un'estensione del singolo risuonatore acustico; infatti, montato a una certa distanza dalla superficie da trattare, si comporta come un insieme di risuonatori di Helmholtz ciascuno costituito da un collo, corrispondente al foro del pannello, e da una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

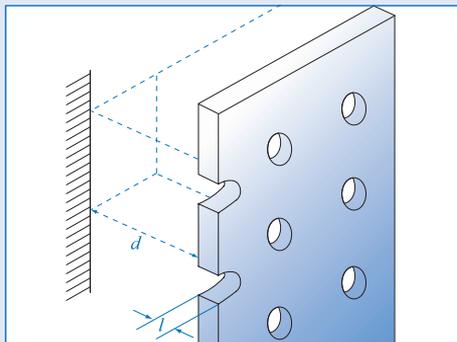
Schema e principio di funzionamento di un risuonatore.



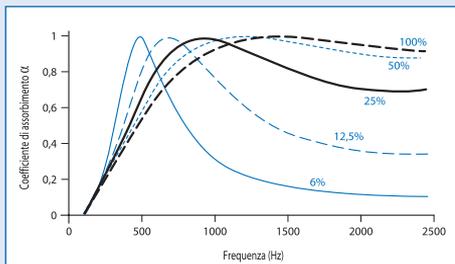
Assorbimento di un risuonatore al variare della frequenza con e senza materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità.



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.

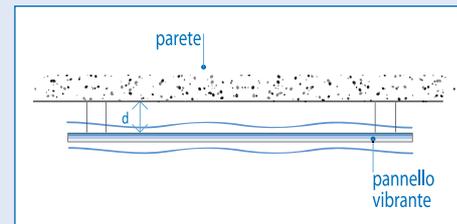
La previsione teorica del grado di assorbimento alle varie frequenze risulta particolarmente difficile perché è difficile conoscere il grado di smorzamento meccanico del pannello e perché l'assorbimento dipende anche dal campo acustico presente nell'ambiente in cui il materiale è collocato. Per questi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

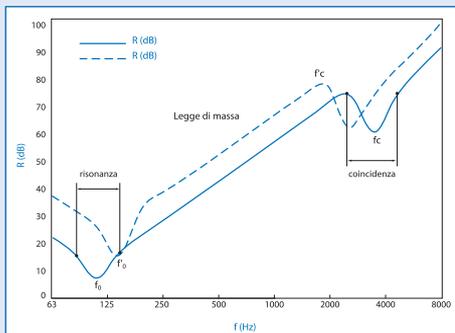
Sistemi misti

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.

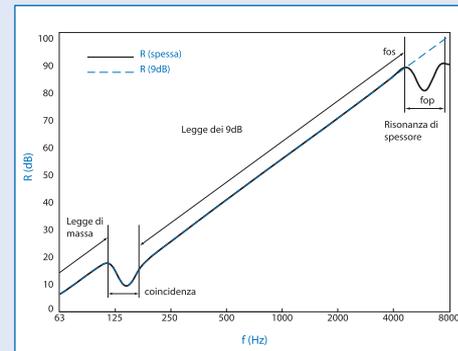
Aumentando ad esempio lo spessore, si ha un locale aumento di R (tra f_0 e f_c) per effetto del conseguente aumento della massa ma, la legge di massa, risulta valida in un campo più ristretto. In linea generale si può affermare che il potere fonoisolante di un singolo pannello è determinato dalla sua 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.

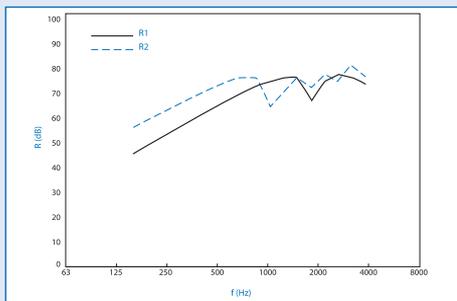
Quando lo spessore è elevato si innescano fenomeni di "risonanza di spessore" alle alte frequenze dovuti alle onde longitudinali e di taglio che si creano all'interno del muro. Il percorso chiuso compiuto dalle onde è in questo caso pari allo spessore della parete. La teoria della "parete sottile" non 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 15-20 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 15-20 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.

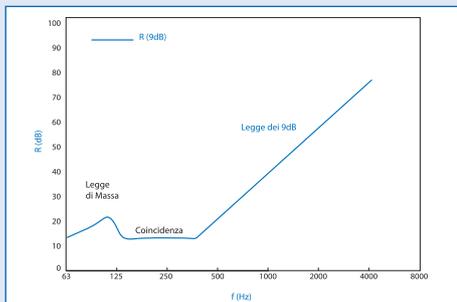
Andamento del potere fonoisolante per pareti spesse: visualizzazione dell'effetto dell'insorgenza delle risonanze di spessore alle alte frequenze.



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.

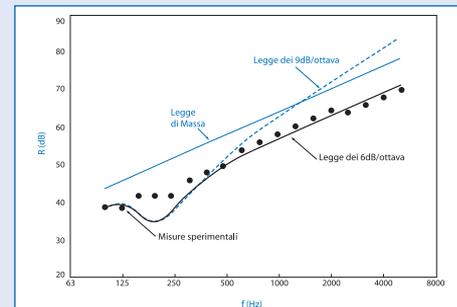
Al di sopra della frequenza critica superiore l'andamento teorico del potere fonoisolante R non sembra essere influenzato dalla non omogeneità e può essere ancora ipotizzata la validità della legge dei 9dB del caso isotropo, almeno fino ad eventuali fenomeni di risonanza di spessore. Confronti tra curve 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

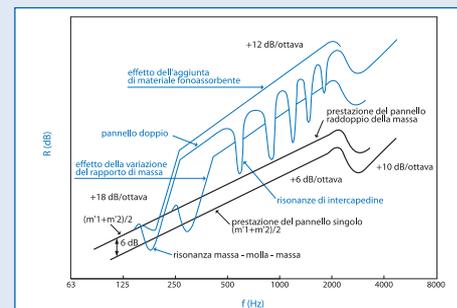
L'andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti doppie in cartongesso è quello riportato nella figura a lato. Come si può osservare, per questi materiali la zona di interesse rientra in quella in cui è valida la legge della massa. Nella figura si osservano innanzitutto 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.



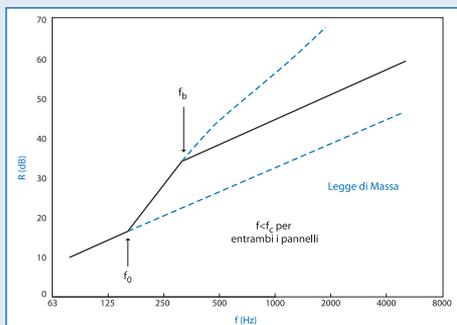
all'incirca alla somma dei poteri fonoisolanti dei singoli pannelli, con una pendenza di circa 6 dB/ottava. Tra le due frequenze si ha una pendenza molto ripida (circa 18 dB/ottava). La presenza del materiale fonoassorbente determina la riduzione o l'eliminazione delle risonanze di intercapedine che 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.

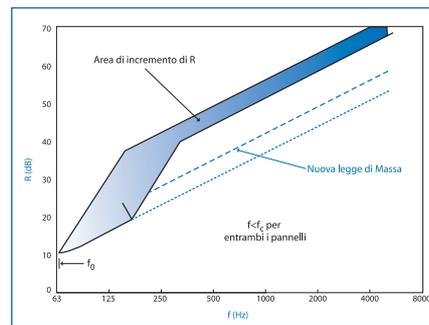
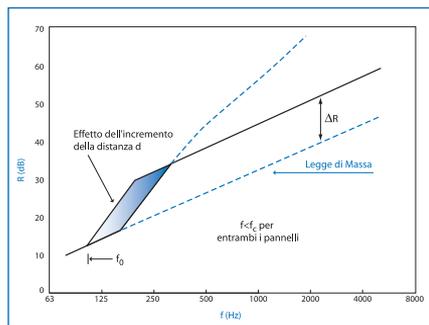
Solitamente le strutture leggere sono sorrette da un telaio metallico. Questa struttura determina dei punti di connessione tra i pannelli che fa diminuire il potere fonoisolante, in particolare verso le alte frequenze.

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.

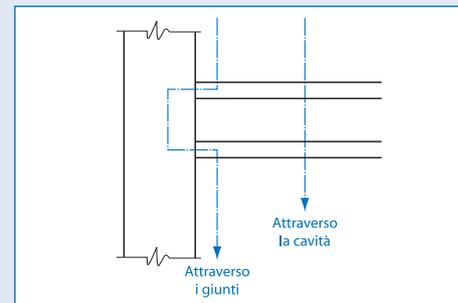
Come i materiali fibrosi modificano le prestazioni acustiche delle pareti multistrato

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.

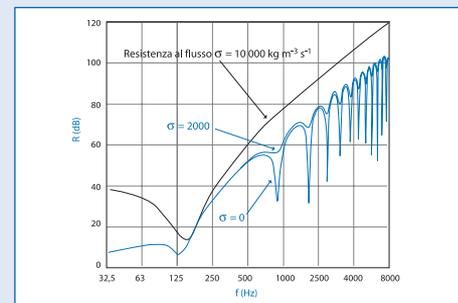
L'effetto del riempimento parziale della cavità con materiale fibroso è stato studiato sperimentalmente (figura a pagina seguente). Si è visto che l'introduzione di una strato di materiale fibroso, rispetto all'assenza di materiale, introduce un beneficio notevole. La percentuale di riempimento della 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.

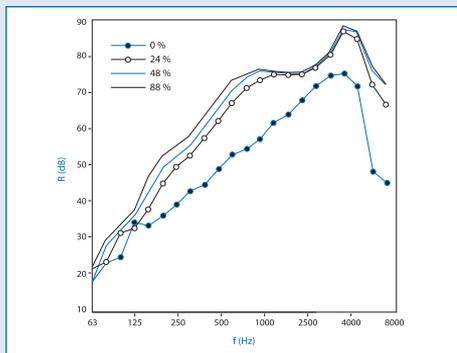
Visualizzazione della trasmissione laterale per una parete doppia



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

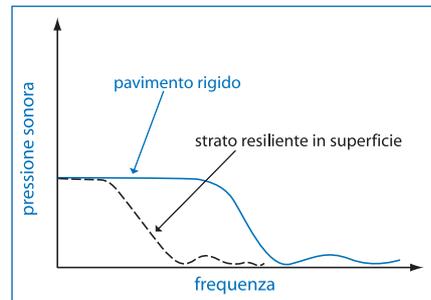
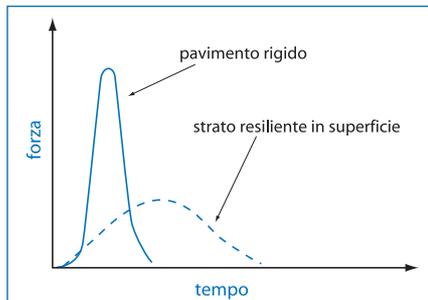
I rumori impattivi negli edifici, sono quelli causati dai passi, dalla caduta di oggetti, dallo spostamento di tavoli e sedie, da lavorazioni effettuate su pavimenti e pareti (trapano, martellate, ...), etc. La maggior parte di questi rumori interessano il complesso pavimento-solaio.

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.

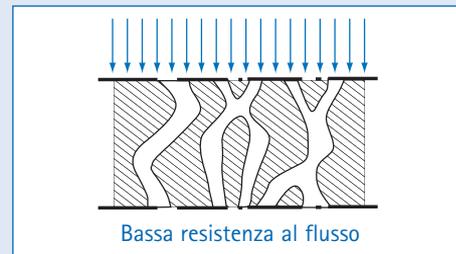
La resistenza al flusso si definisce nel seguente modo:

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

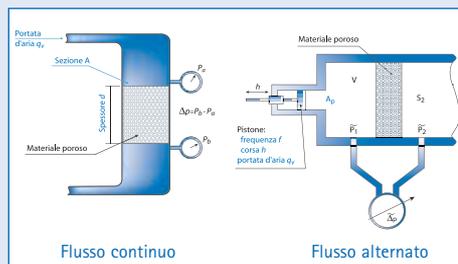
dove Δp è il gradiente di pressione [Pa] misurato prima e dopo il passaggio di un flusso di aria Q_v (m^3/s) attraverso il provino.

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:

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

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/m³.

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

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

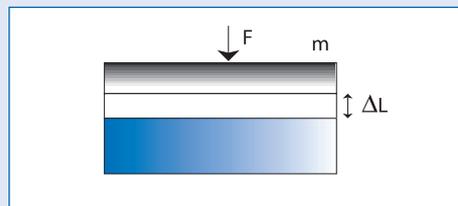
La rigidità dinamica è una proprietà intrinseca del materiale ed è correlata con il modulo di elasticità "E" (o modulo di Young) e lo spessore iniziale secondo la seguente formula:

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

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

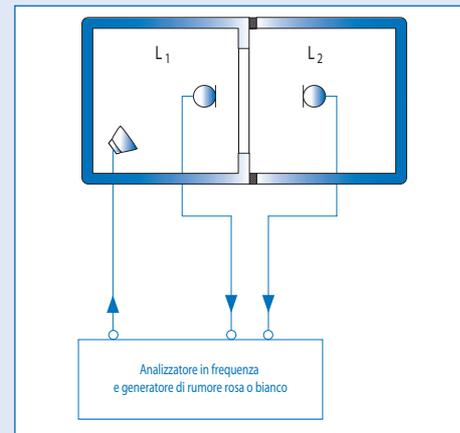
Misura sperimentale del potere fonoisolante

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.



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} .

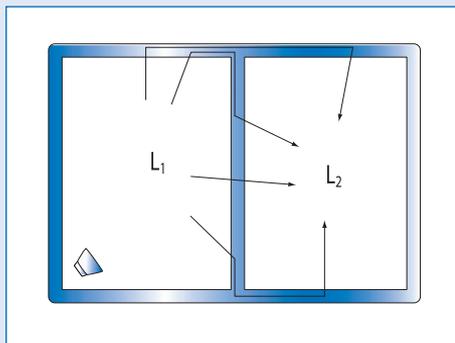
$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{A}{A_0} \quad [\text{dB}]$$

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 .

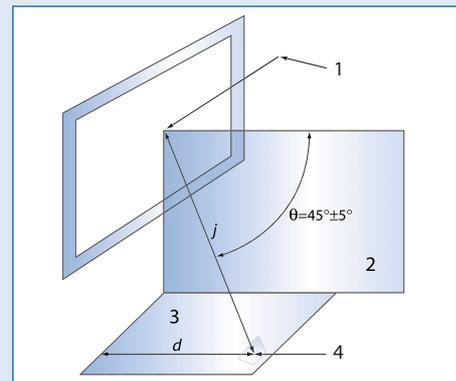
$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

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 potere fonoisolante apparente R' in opera.



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



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, $T_0=0.5\text{s}$.

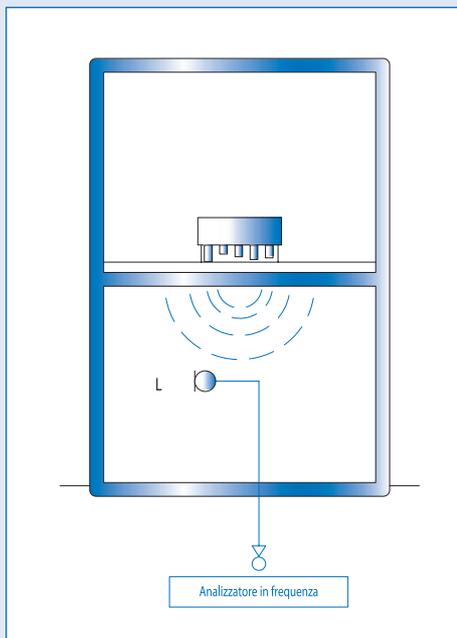
Se la misura di $D_{2m,nT}$ viene effettuata con un altoparlante, questo va posizionato preferibilmente su terreno, rivolto verso la facciata in prova, con un angolo di $45^\circ \pm 5$ rispetto la normale alla facciata, ad una distanza minima in orizzontale di 5 m dal piano più esterno che individua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

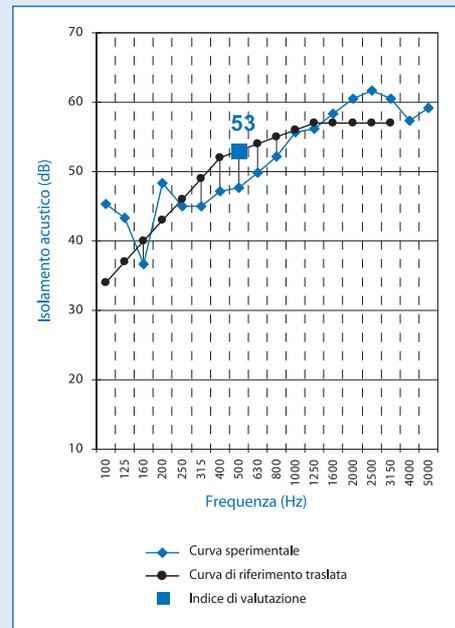
Indice di valutazione dell'isolamento acustico

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).

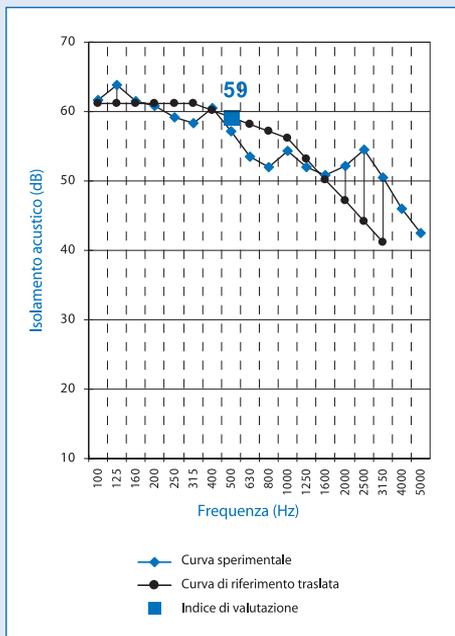
Indice di valutazione del livello di rumore di calpestio

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 ininfluenti 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

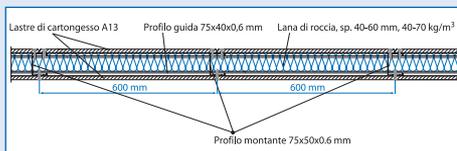
Anche per il livello di rumore di calpestio, l'utilizzo degli indici di valutazione (singolo numero) determina una perdita di informazione rispetto ai dati in frequenza. L'utilizzo della curva di riferimento per il rumore di calpestio si è rivelata molto appropriata per i solai dotati di rivestimento 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:

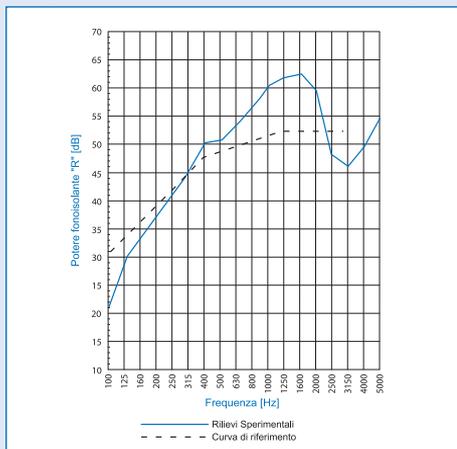
$$C_I = L_{n,sum} - 15 - L_{n,w} \quad [\text{dB}]$$

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'EN 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)

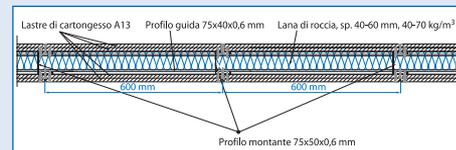
valide per $M < 70-80$ (kg/m²) e $d < 25-30$ cm.

In tali relazioni M è la massa areica totale (kg/m²), d è lo spessore dell'intercapedine (cm), e è lo spessore delle fibre minerali (cm).

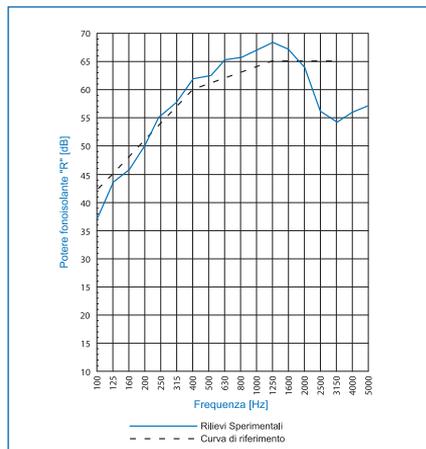
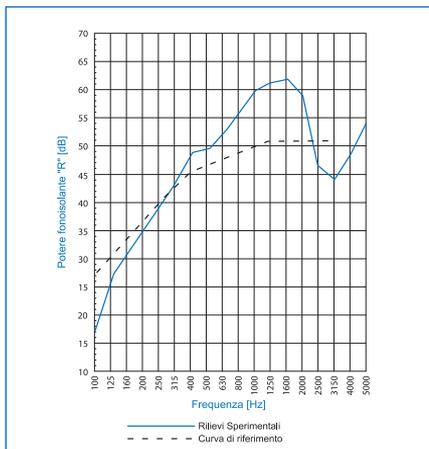
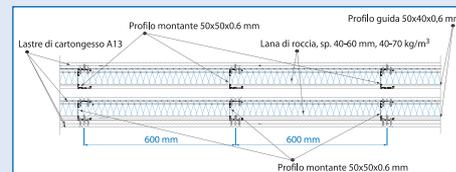
Andamento del potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso con un telaio, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia ($R_w=52-55$ dB; $C=-2, -4$; $C_{tr}=-6, -8$).

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; $C=-2, -4$; $C_{tr}=-6, -8$).

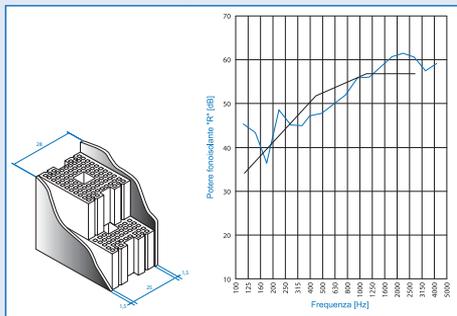
Schematizzazione di una parete leggera in cartongesso con un telaio, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia.



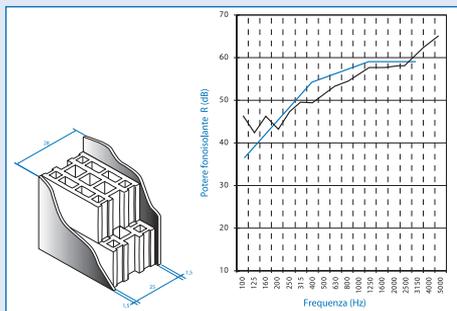
Schematizzazione di una parete leggera in cartongesso con due telai, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia.



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

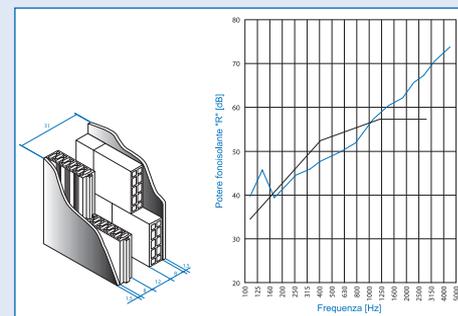
Le pareti pesanti multistrato vengono realizzate generalmente in laterizio ed in piccola parte in calcestruzzo e argilla espansa. Dal punto di vista delle prestazioni acustiche si ha il vantaggio di avere buoni risultati con delle masse relativamente contenute. L'ottimizzazione delle prestazioni acustiche 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:

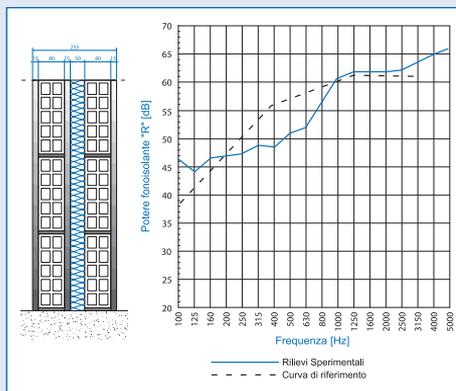
- parete doppia realizzata con uno strato in tramezze normali 25x25x8, intonacato con 1.5 cm di malta tradizionale sul lato esterno, intercapedine di 8-12 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60kg/m³, secondo strato in tramezze normali 25x25x8, con 1.5 cm di intonacato 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.

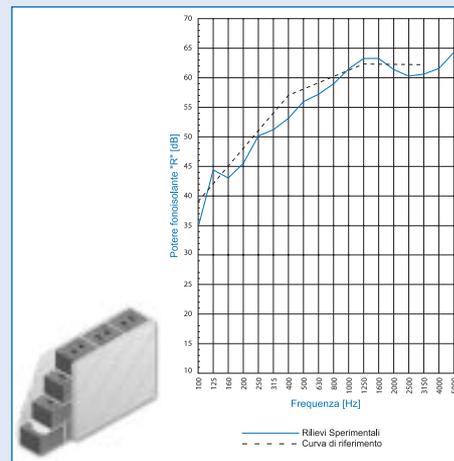
I sistemi placcanti vengono generalmente realizzati con lastre di cartongesso da 13 mm preincollate ad uno strato di lana di roccia di spessore 4-8 cm, densità 70-90 kg/m³. L'applicazione alla parete avviene di norma per incollaggio mediante adesivi o mucchietti di malta adesiva. I giunti tra le varie 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.

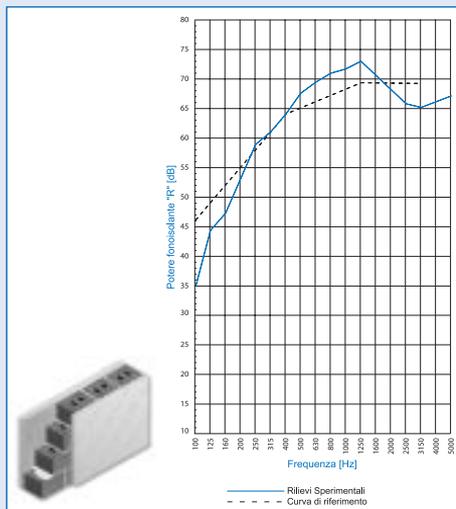
Risultati sperimentali hanno mostrato che l'incremento della massa superficiale del gesso comporta miglioramenti dell'ordine di 1-2 dB mentre nel passaggio da singolo placcaggio a doppio placcaggio si può avere un incremento di R_w superiore a 10 dB.

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.

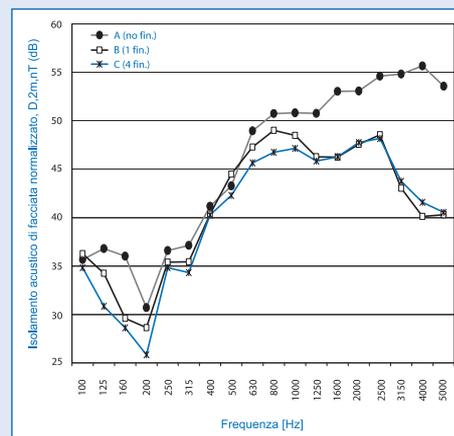
Per la stima dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, si può fare riferimento al metodo descritto nella normativa UNI EN ISO 12354-3. L'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ può essere calcolato a partire dal potere fonoisolante apparente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

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

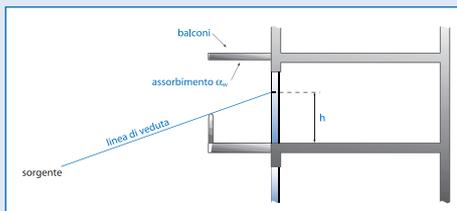
dove ΔL_{fs} è la differenza di livello sonoro in facciata [dB], V è il volume dell'ambiente ricevente [m^3], T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 s e S è la superficie della facciata, come vista dall'interno [m^2].

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

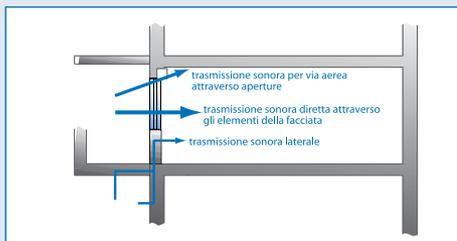
Andamento dell'isolamento acustico di facciata di un edificio sperimentale ottenuto con tre diverse configurazioni: A – senza finestre; B – con una finestra; C – con quattro finestre.



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

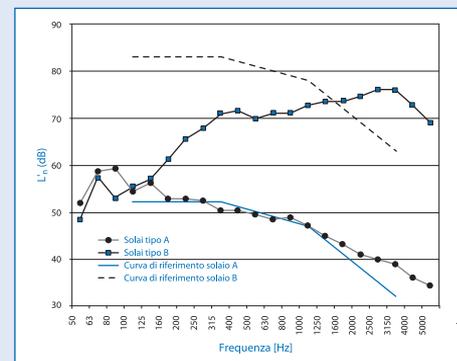
L'uso dei pavimenti galleggianti è la soluzione più frequentemente utilizzata per la riduzione del rumore di calpestio. L'efficacia dei pavimenti galleggianti è fortemente correlata con le proprietà meccaniche dei materiali resilienti utilizzati, in particolare con la loro rigidità dinamica.

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.

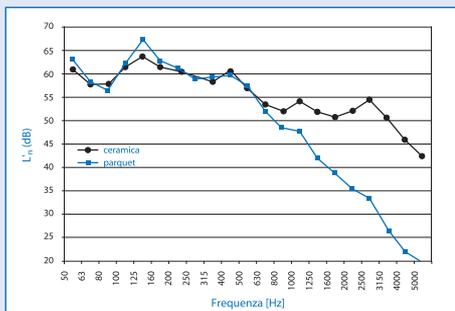
Gli eventuali impianti tecnologici devono essere rivestiti con guaine elastiche che impediscano il contatto diretto con la struttura galleggiante, con il solaio, e con le pareti degli ambienti così da non trasmettere vibrazioni agli elementi strutturali.

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:

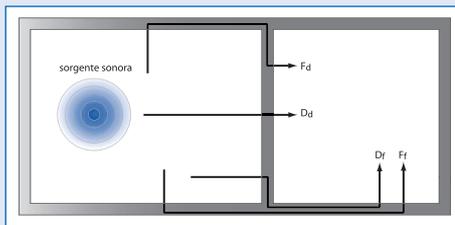
$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad [\text{Hz}]$$

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.

CAPITOLO 3

ASSORBIMENTO ACUSTICO DEI MATERIALI IN LANA DI ROCCIA ROCKWOOL

A cura di: Francesco Pompoli

Premessa

Il comportamento acustico del materiale in lana di roccia Rockwool dipende essenzialmente da alcuni parametri fisici legati alla tipologia di fibre e alla densità apparente del pannello. Tali parametri sono stati esaminati in uno studio teorico-sperimentale condotto presso l'Università di Ferrara finalizzato alla definizione di un modello matematico per la previsione del comportamento acustico del materiale.

Nel seguito del capitolo saranno illustrati i risultati dello studio, in particolare il modello matematico per la previsione del comportamento acustico del materiale Rockwool ed alcune considerazioni sui risultati.

Parametri che influenzano l'assorbimento acustico

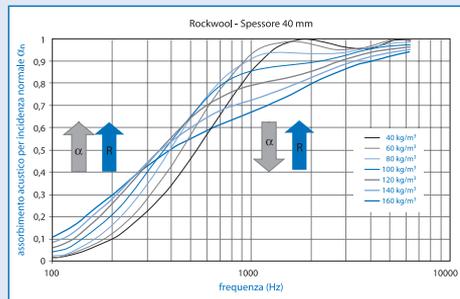
I principali parametri che influenzano l'assorbimento acustico di un pannello di materiale fibroso posto su fondo rigido sono:

- diametro delle fibre (per il materiale Rockwool il valor medio delle fibre è pari a 4,5 micron circa);
- orientamento delle fibre (per i materiali Rockwool di bassa e media densità la distribuzione è essenzialmente parallela alle superfici del pannello, per quelli a densità elevata la distribuzione ha anche una componente ortogonale alle superfici del pannello);
- densità del materiale (per il materiale Rockwool variabile tra 40 kg/m^3 e 160 kg/m^3);
- spessore del pannello.

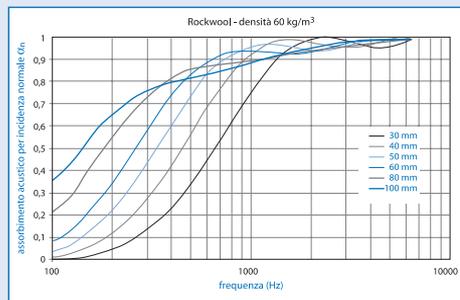
Tali parametri influenzano anche la resistenza al flusso d'aria del materiale; essa esprime la resistenza che un flusso d'aria incontra nel passaggio attraverso il materiale dovuta ad attrito viscoso sulle superfici delle fibre.

La correlazione tra la resistenza al flusso e l'assorbimento acustico è molto stretta ed è stata studiata da numerosi autori [1-16].

Influenza della resistenza al flusso su pannelli Rockwool a densità variabile (da 40 a 160 kg/m³) con spessore 40 mm.



Influenza dello spessore sull'assorbimento acustico di un pannello di materiale Rockwool con densità pari a 60 kg/m³.



In generale si ha che la resistenza al flusso aumenta con la densità e lo spessore del materiale, e con il diminuire del diametro delle fibre.

L'assorbimento acustico, che dipende dalla frequenza, presenta in generale ad ogni frequenza un aumento fino a valori di resistenza al flusso ottimali per poi calare per valori di resistenza al flusso troppo elevati. All'aumentare della resistenza al flusso si ha un significativo aumento di assorbimento alle basse frequenze ed una diminuzione alle alte frequenze, come si può vedere dalla figura a lato.

Per quanto riguarda lo spessore del pannello, come si può vedere dalla seconda figura, l'assorbimento acustico, all'aumento dello spessore, migliora sensibilmente alle basse frequenze mentre risulta praticamente inalterato (vicino a 1) per le alte frequenze.

Modello teorico-sperimentale per la previsione dell'assorbimento acustico del materiale Rockwool

A partire da modelli matematici sviluppati nello studio teorico-sperimentale svolto presso l'Università di Ferrara [17], è possibile determinare in funzione di densità apparente ρ_m e spessore del materiale l tutte le caratteristiche fisico-acustiche del materiale (resistività al flusso d'aria r , impedenza caratteristica Z_i , costante di propagazione γ , impedenza superficiale Z_s e coefficiente di assorbimento per incidenza normale α_n). Il sistema di formule semplificate, dipendente dai parametri ρ_0 (densità dell'aria), c_0 (velocità del suono nell'aria) ed f (frequenza) è il seguente:

$$r = 95.35 \cdot \rho_m^{1.37} \quad [\text{Ns/m}^4]$$

$$Z_R = \left[1 + 0.057 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.754} \right] \quad [-]$$

$$Z_I = - \left[0.087 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.732} \right] \quad [-]$$

$$\alpha' = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \cdot \left[0.189 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.595} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

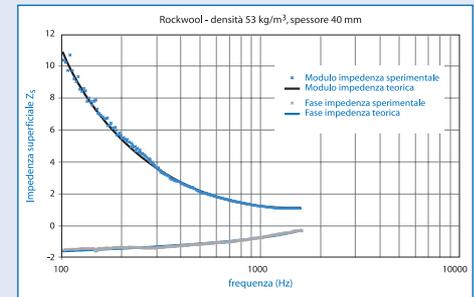
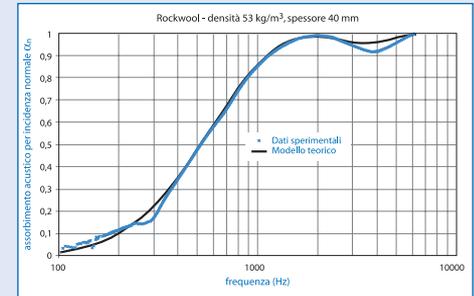
$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \cdot \left[1 + 0.098 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.700} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$Z_S = (Z_R + jZ_I) \cdot [\coth(\alpha' + j\beta) \cdot l] \quad [-]$$

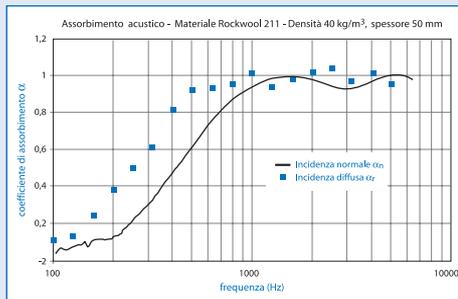
$$\alpha_n = \frac{4Z_{SR}}{|Z_S|^2 + 2Z_{SR} + 1} \quad [-]$$

La precisione del modello (che non richiede in ingresso alcun dato sperimentale se non la densità e lo spessore del materiale) risulta molto elevata, ed in particolare sulla previsione dell'assorbimento acustico per incidenza normale si trova uno scarto medio pari a 0.028. Sono inoltre forniti i valori complessi di impedenza superficiale, impedenza caratteristica e costante di propagazione, a volte richiesti da programmi di simulazione acustica.

Nei grafici a fianco si riporta un confronto tra i dati sperimentali e quelli calcolati con il modello matematico per un pannello di materiale Rockwool. Dal modello presentato si può anche ricavare la "costante di attenuazione" di un materiale, espressa in dB/m, corrisponde all'attenuazione in dB, per ogni metro di materiale, che un'onda acustica piana subisce nel passaggio in un mezzo omogeneo dissipativo.



Confronto tra dati sperimentali di assorbimento acustico per incidenza normale (ISO 10534-2) e per incidenza diffusa (ISO 354) per un pannello di materiale Rockwool 211 (densità 40 kg/m³ e spessore 50 mm)



Tale costante è ricavabile dall'espressione:

$$ATT = 20 \log \left(\frac{P(l)}{P(0)} \right)_{l=1m} = 20 \log \left(\frac{P_0 \cdot e^{-\alpha' l}}{P_0} \right)_{l=1m} = 20 \log \left(e^{-\alpha' l} \right) \quad [\text{dB/m}]$$

dove con α' si indica la parte reale della costante di propagazione acustica in un materiale omogeneo dissipativo.

A titolo di esempio per il materiale Rockwool con densità pari a 50kg/m³ si trova un valore di 120 dB/m a 500 Hz.

Assorbimento acustico per incidenza casuale

L'assorbimento acustico dipende anche dall'angolo di incidenza dell'onda acustica sul materiale. Mentre lo studio teorico-sperimentale è finalizzato al calcolo dell'assorbimento per incidenza normale, il dimensionamento di una applicazione di materiale fonoassorbente in ambienti chiusi necessita del dato di assorbimento acustico per incidenza diffusa.

La correlazione tra i dati sperimentali di assorbimento acustico ad incidenza normale e quelli ad incidenza diffusa è stata studiata in forma teorica e sperimentale da numerosi autori, ma con risultati non ancora soddisfacenti. La causa principale è dovuta alle condizioni di prova della misura in campo riverberante (ISO 354) e al passaggio dal campo reale, che si realizza nella camera riverberante, a quello teorico da cui calcolare l'assorbimento per incidenza normale.

In generale si può comunque affermare che nel passaggio tra "incidenza normale" ed "incidenza diffusa" si ha un aumento del coefficiente di assorbimento alle frequenze medio-basse, con uno spostamento verso di esse del primo picco massimo di assorbimento.

In camera riverberante si possono anche ottenere coefficienti di assorbimento per incidenza diffusa superiori a 1, che hanno comunque un senso fisico discutibile.

A titolo di esempio, si riporta nella figura a lato un confronto tra una misura eseguita in camera riverberante (in terzi di ottava) ed una eseguita con il metodo della funzione di trasferimento in un tubo ad onde stazionarie (in FFT) per la stessa tipologia di pannelli di materiale Rockwool.

Bibliografia

- [1] M.E. Delany, E.N. Bazley, *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, App.Acoust., 3, 1970, pp. 105-116 .
- [2] C. Zwikker, J. Eijk, *Physica VIII*, 1941, pp.141.
- [3] L. Beranek, *Acoustic impedance of porous materials*, J. Acoust. Soc. Am., 13, 1942, pp. 248.
- [4] J.W. Rayleigh, *Theory of sound*, Macmillan, 1929, II vol.
- [5] J.W. Strutt, J.W. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover Publications, 1945, vol. II, pp. 328-333.
- [6] C. Zwikker, C.W. Kosten, *Sound absorbing materials*, Elsevier Publishing Company, 1949.
- [7] M.A. Biot, *Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated-porous solid*, J. Acoust. Soc. Am., 28, 1956, pp. 168-191.
- [8] K. Attenborough, *Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials*, J. Acoust. Soc. Am., 73, 1983, pp. 758-799.
- [9] J.F. Allard, C. Depollier, J. Nicolas, W. Lauriks, A. Cops, *Propriétés acoustiques des matériaux poreux saturés d'air et théorie de Biot*, J. Acoust. Soc. Am., 3, 1990, pp. 28-38.
- [10] Y. Champoux, M.R. Stinson, *On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors*, J. Acoust. Soc. Am., 92, 1992, pp. 1120-1131.
- [11] J.F. Hamet, *Modélisation acoustique d'un enrobe drainant*, Rapport INRETS n.159, Ottobre 1992.
- [12] P. Morse, K. Ingard, *Theoretical acoustics*, McGraw Hill, 1968.
- [13] D.A.Bies, C.H. Hansen, *Flow resistance information for acoustical design*, App.Acoust. 13, 1980, pp. 357-391.
- [14] M. Garai, F.Pompoli, *A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements*, Acustica-Acta Acustica Vol 89 (2003) pp. 471-478.
- [15] I.P. Dunn, W.A. Davern, *Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers*, App.Acoust., 19, 1986, pp. 321-334.

- [16] Q. Wu, *Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam*, App.Acoust. 25, 1988, pp. 141-148.
- [17] F. Pompoli, *Studio di modelli di previsione delle proprietà fisico-acustiche, di materiali in lana di roccia Rockwool*, Relazione tecnica 2004.

D.P.C.M. 5/12/1997 SUI REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI

A cura di: Patrizio Fausti

Premessa

La legge Quadro sull'inquinamento acustico n° 447 del 24/10/95 [1] stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico. Nel settore delle costruzioni la legge quadro prevede un decreto sui requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici e sui requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti (art. 3, punto e, legge n° 447) ed un decreto sui criteri per la progettazione, l'esecuzione e la ristrutturazione delle costruzioni edilizie (art. 3, punto f, legge n° 447). In ottemperanza al primo punto di queste disposizioni è stato pubblicato il D.P.C.M. 5/12/97 [2] sulla "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", mentre in merito al secondo aspetto relativo ai criteri di progettazione ed esecuzione delle costruzioni edilizie, il relativo decreto non è stato ancora emanato.

L'emanazione del D.P.C.M. 5/12/97 sta avendo un impatto molto importante nel mondo delle costruzioni sia per l'impulso dato nella ricerca e sviluppo di materiali e tecnologie in grado di fare fronte alle richieste più restrittive determinate dai nuovi limiti, sia per l'incertezza relativa ad alcuni aspetti controversi e di difficile interpretazione. Su quest'ultimo aspetto, in particolare, si è molto dibattuto in vari incontri, seminari e convegni organizzati da enti e associazioni successivamente all'emanazione del decreto. In varie occasioni sono state anche formulate richieste di chiarimento ai vari ministeri coinvolti ma, a fronte di molte richieste, soltanto alcune risposte sono pervenute. Ad oggi tutti i soggetti coinvolti nell'applicazione del decreto, dai progettisti alle imprese di costruzione, dagli enti locali agli organi di controllo, auspicano che vengano al più presto emanate disposizioni che permettano di operare con minore incertezza.

Contenuti del D.P.C.M. 5/12/1997

Generalità

Il decreto è strutturato in 4 articoli e un allegato. L'allegato A descrive le grandezze di riferimento, fornisce alcune definizioni e riporta le tabelle con la classificazione degli edifici e i relativi valori limite. La struttura è la seguente:

- Campo di applicazione (art. 1)
- Classificazione degli ambienti abitativi (art.2 e tabella A)
- Definizione dei servizi a funzionamento continuo e discontinuo (art.2)
- Grandezze di riferimento: definizioni, metodi di calcolo e misure (art.2 e allegato A)
- Valori limite delle grandezze che determinano i requisiti acustici passivi dei componenti degli edifici in opera (art.3 e tabella B)
- Valori limite dei livelli di rumorosità indotti dalle sorgenti sonore interne agli edifici (art.3, tabella B e allegato A)

L'ambito di applicazione del decreto fa chiaramente riferimento alla situazione in opera. L'art. 1 cita, infatti, che "il decreto determina i requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti in opera, al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore".

Per quanto riguarda la classificazione degli ambienti abitativi (di cui all'art. 2, comma 1, lettera "b" della legge n. 447 del 26-10-95) si considerano le categorie della tabella A che viene di seguito riportata.

Categoria A : edifici adibiti a residenza o assimilabili

Categoria B : edifici adibiti ad uffici e assimilabili

Categoria C : edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili

Categoria D : edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili

Categoria E : edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili

Categoria F : edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili

Categoria G : edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

Tabella A: classificazione degli ambienti abitativi

All'articolo 2 vengono inoltre definiti i servizi a funzionamento continuo e discontinuo. I servizi a funzionamento continuo sono gli impianti di riscaldamento, di aerazione e di condizionamento. I servizi a funzionamento discontinuo sono gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria.

Le grandezze di riferimento da considerare per la valutazione dei requisiti (articolo 2 e allegato A del decreto) vengono di seguito elencate e definite.

- **Tempo di riverberazione (T):** è il tempo necessario affinché, in un determinato punto dell'ambiente, il livello di pressione sonora si riduca di 60 dB rispetto a quello che si ha nell'istante in cui la sorgente sonora cessa di funzionare. Varia al variare della frequenza.
- **Potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti (R'):** è una grandezza che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra due ambienti. Con il termine "apparente" si intende "misurato in opera" e quindi R' prende in considerazione tutta la potenza sonora che arriva nell'ambiente ricevente, non solo quella che attraversa la parete divisoria. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo **indice di valutazione (R'_w)**, indicato dal pedice w , che è un valore unico ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.
- **Isolamento acustico standardizzato di facciata ($D_{2m,nT}$):** è una grandezza che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra l'ambiente esterno (sorgente sonora) e l'ambiente interno (ricevente). Il pedice $2m$ significa che la misura all'esterno viene effettuata a 2 metri dalla facciata; il pedice nT significa che tale risultato viene normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo indice di valutazione (**$D_{2m,nT,w}$**) ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.
- **Livello di rumore di calpestio di solai normalizzato (L'_n):** è una grandezza che definisce il livello di rumore trasmesso essenzialmente per via strutturale e che interessa il complesso pavimento-solaio. Il pedice n indica che la misura viene normalizzata rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo indice di valutazione (**$L_{n,w}$**) ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.

- **Livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo slow (L_{ASmax}):** è il valore massimo del livello istantaneo di pressione sonora misurato durante l'evento sonoro causato da un impianto a ciclo discontinuo.
- **Livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A (L_{Aeq}):** è il valore medio energetico del livello di pressione sonora prodotto da un impianto a ciclo continuo.

Per quanto riguarda i valori limite dei parametri sopra citati si fa riferimento alla tabella B del decreto, di seguito riportata, e alle indicazioni inserite all'interno dell'allegato A.

Categorie di cui alla Tab. A	Parametri				
	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
D	55	45	58	35	25
A, C	50	40	63	35	35
E	50	48	58	35	25
B, F, G	50	42	55	35	35

Tabella B: valori limite

I primi tre parametri sono indici di valutazione (caratterizzati dalla lettera w), gli ultimi due sono valori riferiti al rumore prodotto dagli impianti tecnologici a funzionamento discontinuo (L_{ASmax}) e a funzionamento continuo (L_{Aeq}).

Per quanto riguarda l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente tra ambienti, nel decreto è precisato che questo va misurato tra unità immobiliari distinte.

Il decreto poi specifica che, per l'edilizia scolastica, è necessario determinare anche il tempo di riverberazione, i cui limiti sono quelli riportati nella circolare del Ministero dei lavori pubblici n.3150 del 22 maggio 1967 [3] recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici.

Nell'allegato A sono inoltre riportate due precisazioni in merito al rumore prodotto dagli impianti tecnologici di cui la prima contrasta parzialmente con i valori limite riportati in tabella B. Si dice infatti che, per gli impianti, devono essere rispettati i valori limite di 35 dB(A) L_{ASmax} per i servizi a funzionamento discontinuo e 25 dB(A) L_{Aeq} per servizi a

funzionamento continuo, quest'ultimo valore precedentemente differenziato nella tabella B. Le misure di livello sonoro prodotto dagli impianti devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato, e tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

Riferimenti normativi

Il decreto fa riferimento ad alcune normative per la definizione e la misurazione dei parametri che definiscono i requisiti acustici passivi. Tali riferimenti normativi sono risultati in alcuni casi errati, incompleti o non aggiornati. Inoltre, alcune normative sono state aggiornate dall'UNI anche successivamente all'approvazione del decreto e le vecchie versioni sono state ritirate.

Si riportano di seguito i diversi riferimenti normativi dati dal decreto e di fianco quelli corretti e aggiornati alle normative attualmente in vigore.

<i>Grandezze</i>	<i>Riferimenti normativi dati dal decreto</i>	<i>Riferimenti normativi corretti e aggiornati</i>
Tempo di riverberazione T	ISO 3382 del 1975	ISO 3382 - 1997 [4] e UNI ISO 354 - 1989 [5]
Potere fonoisolante apparente R'	EN ISO 140-5 del 1996 (errato)	UNI EN ISO 140-4 : 2000 [6]
Isolamento acustico standardizzato di facciata D_{2m,nT}	Nessun rifer. norm.	UNI EN ISO 140-5 : 2000 [7]
Livello normalizzato di rumore di calpestio L'_n	EN ISO 140-6 del 1996 (errato)	UNI EN ISO 140-7 : 2000 [8]
Indice di valutazione R'_w	UNI 8270-7 del 1987	UNI EN ISO 717-1 : 1997 [9]
Indice di valutazione D_{2m,nT,w}	Nessun rifer. norm.	UNI EN ISO 717-1 : 1997 [9]
Indice di valutazione L'_{n,w}	UNI 8270-7 del 1987	UNI EN ISO 717-2 : 1997 [10]

Osservazioni sul D.P.C.M. 5/12/1997

Generalità

L'applicazione del D.P.C.M. 5/12/1997 sta creando una serie di problemi riguardanti sia l'interpretazione che gli aspetti tecnici ed economici legati al soddisfacimento dei requisiti. In alcuni casi, a fronte di incertezze nell'applicazione del decreto, si può fare riferimento al buon senso. Ad esempio, con riferimento ai valori limite riportati nella tabella B, non è esplicito quali siano i limiti nel caso di edifici con diverse destinazioni d'uso (residenziale-terziario, residenziale-attività artigianali, etc). In questo caso il buon senso suggerisce di considerare i valori limite più restrittivi.

In altre situazioni sono stati forniti dei pareri da funzionari ministeriali. Ad esempio non è ben definita l'applicabilità del decreto o di parte del decreto nei casi di ristrutturazione di edifici e/o impianti. Per questo specifico aspetto è stato fornito un parere da un funzionario del Ministero dell'Ambiente, con lettera inviata p.c. al Comune di Genova in data 9-3-99. In questa lettera si dice di "assoggettare al totale rispetto del decreto tutti gli edifici per i quali debba essere rilasciata una concessione edilizia (oggi permesso di costruire) e/o siano soggetti agli adempimenti di cui all'art. 8 della L. 447/95". Si dice inoltre di assoggettare "al rispetto dei limiti tutti i nuovi impianti tecnologici, siano essi installati ex-novo od in sostituzione di altri già esistenti". Viene poi indicato che "non sono soggetti all'adeguamento delle caratteristiche passive delle pareti e dei solai gli edifici che non siano oggetto di totale ristrutturazione, in particolare l'accertato superamento dei limiti degli impianti tecnologici dovrà essere risolto con un intervento sull'impianto ma senza adeguare le caratteristiche passive degli impianti già esistenti". I pareri di funzionari non sono comunque considerati "giurisprudenza" e quindi i dubbi sulla corretta interpretazione del decreto potrebbero ancora permanere anche in questi casi.

Dubbi sulla applicabilità del DPCM 5/12/97 sono nati per effetto della mancata emanazione del D.M. sui criteri di progettazione, esecuzione e ristrutturazione degli edifici prevista al

punto f, art. 3 della legge 447. In realtà le attuali conoscenze tecniche e le tecnologie costruttive permettono di realizzare edifici a regola d'arte in grado di soddisfare i requisiti previsti dal DPCM 5/12/97 anche in assenza del citato D.M. Questo viene confermato anche dalla giurisprudenza che riporta già alcune sentenze orientate al riconoscimento dell'applicabilità del decreto. Ogni dubbio può essere escluso quando si è in presenza del regolamento edilizio comunale che ha recepito il DPCM dove allora è la stessa normativa locale ad essere cogente.

Si riportano di seguito altri commenti sui diversi requisiti acustici inerenti dubbi interpretativi e aspetti controversi che possono determinare notevoli incertezze e anche tensioni tra i diversi soggetti coinvolti.

Potere fonoisolante apparente

Per quanto riguarda l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, si fa riferimento ad unità immobiliari distinte. Tale precisazione non è sempre sufficiente a chiarire l'ambito di applicazione del decreto anche perché diversa può essere l'interpretazione sul significato di unità immobiliare. In molti contesti è stata adottata la definizione data dal D.M. 2 gennaio 1998 n°28 sul catasto dei fabbricati che all'art. 2 chiarisce che *"L'unità immobiliare è costituita da una porzione di fabbricato, o da un insieme di fabbricati ovvero da un'area che, nello stato in cui si trova e secondo l'uso locale, presenta potenzialità di autonomia funzionale e reddituale"*. La lettura di tale articolo escluderebbe dall'applicazione del decreto, ad esempio, le pareti divisorie tra appartamenti e vani scale, le pareti divisorie tra camere di ospedali (quantomeno all'interno dello stesso reparto), le pareti di separazione tra aule scolastiche della stessa scuola.

Isolamento acustico di facciata

I valori dei requisiti acustici passivi, in particolare dell'isolamento di facciata, non tengono conto della classificazione acustica del territorio imponendo dei limiti indifferenziati che in

alcuni casi potrebbero non essere adeguati rispetto al reale clima acustico del territorio circostante.

I valori proposti per l'isolamento delle facciate, in particolare per le scuole, sono piuttosto restrittivi e difficili da ottenere. Nel caso degli edifici scolastici è richiesta, in altre leggi, una superficie minima degli elementi finestrati per garantire una adeguata illuminazione naturale. In questi casi il requisito acustico è ottenibile soltanto con interventi molto onerosi quali i doppi infissi. Poiché i nuovi edifici scolastici dovrebbero essere realizzati soltanto in aree del territorio particolarmente protette, sembrerebbe inutilmente oneroso un requisito di facciata così elevato. Questo a fronte del fatto che molti edifici scolastici esistenti si trovano invece in situazioni di rumorosità molto elevata con una qualità degli infissi molto bassa.

Rumore di calpestio dei solai

Il livello di rumore di calpestio dei solai risulta tanto migliore quanto più è basso il valore numerico ottenuto. Osservando i limiti riportati nella tabella 2 del DPCM 5-12-97, si nota che le prestazioni migliori sono richieste per gli uffici, le attività ricreative e commerciali. Con molta probabilità il legislatore ha interpretato erroneamente il concetto di livello di rumore di calpestio pensando che bassi livelli corrispondessero a prestazioni peggiori.

I valori limite possono tuttavia essere interpretati in maniera diversa e cioè considerando che essi si riferiscono all'ambiente disturbante. In questo modo i limiti più restrittivi ($L'_{nW} < 55\text{dB}$) verrebbero applicati alle attività potenzialmente più disturbanti come gli uffici e le attività commerciali. Anche con questa seconda interpretazione si verificano comunque delle incongruenze in molti dei casi in cui si trovano sovrapposte due tipologie diverse di ambienti abitativi.

Per il rumore di calpestio, inoltre, il D.P.C.M. non specifica che i requisiti si riferiscono soltanto ai solai tra unità immobiliari distinte. La verifica potrebbe essere richiesta, quindi, anche all'interno della stessa abitazione. Questo sarebbe tecnicamente possibile soltanto nei casi in cui la trasmissione di rumore aereo tra i due locali, attraverso il vano scala, non sia compromettente per la misura di rumore di calpestio.

Rumore degli impianti

Relativamente agli impianti tecnologici c'è una contraddizione sui valori limite per i servizi a funzionamento continuo. Nella tabella B viene fissato un limite differenziato di L_{Aeq} pari a 35 dB(A) per gli edifici appartenenti alle categorie A, C, B, F e G e di 25 dB(A) per le categorie D ed E. Tale limite viene invece fissato indistintamente a 25 dB(A) all'interno delle definizioni riportate nell'allegato A. In attesa di un chiarimento definitivo su questo aspetto, spetta agli enti locali, nella definizione dei regolamenti edilizi comunali, interpretare e scegliere il criterio da adottare. A supporto del valore differenziato sta il fatto che la tabella B fa riferimento all'art. 3 del decreto sui valori limite mentre l'allegato A fa riferimento all'art. 2 sulle definizioni. Considerando però che il DPCM 14/11/97 [3] sui limiti delle sorgenti sonore, nell'applicazione del criterio differenziale, ammette che una sorgente possa essere disturbante se il suo livello a finestra chiusa e di notte supera il valore di 25 dB(A) al recettore, allora si dovrebbe considerare come valore limite quello indifferenziato di 25 dB(A). Il decreto specifica che la rumorosità degli impianti va rilevata nell'ambiente più rumoroso purché diverso da quello in cui il rumore viene generato. Innanzitutto sarebbe da intendere l'ambiente dove si verifica il massimo disturbo piuttosto che il massimo livello poiché il massimo livello si potrebbe verificare in locali non abitati. Tale precisazione chiarisce che il requisito non è da intendere soltanto come valore limite della sorgente sonora impianto, ma valore limite per l'impianto e la struttura. Vengono esclusi da questa verifica tutti quegli impianti, tipo ventil-convettori, aerotermi, canali con bocchette di immissione rumorose, dove la rumorosità si genera all'interno dell'ambiente considerato.

Tempo di riverberazione

La nota relativa ai tempi di riverberazione all'interno degli ambienti scolastici fa riferimento alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n.3150 del 22/5/1967 [4] invece che al più recente DM 18/12/1975 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica" [5].

Aspetti economici

L'applicazione del decreto sta trovando degli ostacoli anche per il fatto che molte imprese di costruzione ritengono che l'utilizzo di materiali e soluzioni tecnologiche idonee al rispetto dei requisiti richiesti, determini un incremento di costi che fa perdere competitività rispetto a chi costruisce con le soluzioni tradizionali.

A tale proposito si ritiene che le soluzioni tecnologiche idonee a garantire adeguati valori dei requisiti acustici debbano diventare le soluzioni "tradizionali". Da studi effettuati da più parti, dall'ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili) all'ANIT (Associazione Nazionale Isolanti Termo-acustici), si ritiene che l'aumento dei costi di costruzione di un immobile per passare a soluzioni che garantiscono mediamente un elevato standard acustico sia variabile dal 5 al 10% rispetto a soluzioni in cui le problematiche acustiche non vengono affrontate. Considerando che i costi di costruzione sono spesso molto inferiori al valore di mercato, questo si potrebbe ripercuotere con un aumento dei prezzi degli immobili con elevato standard acustico inferiore al 4-5% rispetto ai prezzi di mercato. Considerando che da studi e ricerche di mercato nel settore immobiliare emergono differenze di quotazione tra edifici silenziosi ed edifici rumorosi pari al 10 - 15 % a favore di quelli più silenziosi, dovrebbe risultare un incentivo, per le imprese, costruire edifici ad elevato standard acustico.

Tra i fattori che contribuiscono a creare una certa resistenza all'adozione di soluzioni acusticamente favorevoli si può considerare anche la perdita di volumetria utile. Gli spessori necessari a realizzare idonei isolamenti acustici contrastano, infatti, con la tendenza a sfruttare al massimo i volumi e gli spazi disponibili per realizzare superficie commercialmente vendibile. In alcune Regioni italiane (ad esempio Lombardia e Veneto), per incentivare l'utilizzo di spessori più elevati di materiali isolanti termici e acustici, sono state emanate leggi regionali specifiche ancora prima dell'entrata in vigore del DPCM 5-12-97. E' auspicabile che questo tipo di incentivo venga adottato a livello nazionale.

Procedure e controlli

Le procedure per la realizzazione di immobili conformi al DPCM 5-12-97 iniziano fin dalla progettazione e dalla successiva richiesta del *"permesso di costruire"*, che ha sostituito la *"concessione edilizia"*.

I responsabili degli uffici tecnici comunali, che rilasciano il *"permesso di costruire"*, devono verificare la congruenza del progetto con il regolamento edilizio e la legislazione in vigore, incluso il D.P.C.M. 5/12/97. Ci dovrebbe essere fin dall'inizio qualcosa che attesti che l'edificio sarà realizzato conformemente alla legge. I regolamenti edilizi dovrebbero quindi recepire o quantomeno menzionare il decreto. Per attestare il rispetto dei requisiti acustici in alcuni casi viene richiesto un progetto acustico, in altri un'autocertificazione o l'utilizzo di soluzioni conformi.

Una volta realizzato l'immobile viene chiesta l'agibilità. In questa fase può eventualmente essere richiesto il collaudo acustico. Solitamente questo viene eseguito solo per l'edilizia pubblica.

La responsabilità della conformità delle opere a quanto previsto in sede di progetto spetta al committente ed al costruttore oltre al direttore dei lavori.

Sanzioni

Il DPCM 5-12-97 non prevede sanzioni amministrative dirette nel caso di mancata verifica dei requisiti acustici previsti. Il comma 3 dell'art. 10 della legge 26 ottobre 1995 n. 447, tuttavia, prevede che *"La violazione delle disposizioni dettate in applicazione della presente legge dallo Stato, dalle regioni, dalle province e dai comuni, è punita con la sanzione amministrativa del pagamento di una somma da lire 500.000 a lire 20.000.000."*

Sembrerebbe, quindi, che il recepimento del DPCM 5-12-97 all'interno di leggi regionali o regolamenti edilizi possa introdurre anche lo strumento delle "sanzioni amministrative". Il mancato rispetto dei valori limite previsti dal decreto, in realtà, può determinare conseguenze molto superiori alla semplice sanzione amministrativa. Il mancato rispetto della legge può quindi determinare, in caso di contenzioso, il ripristino dei requisiti previsti o un risarcimento basato sulla diversa valutazione economica dell'immobile. Il ripristino dei requisiti previsti

attraverso l'esecuzione di opere correttive non è sempre attuabile sia per motivi tecnici sia per la mancata disponibilità di superfici o altezze in eccesso in cui collocare gli interventi. Solitamente si procede ad un risarcimento che viene stabilito, caso per caso, sulla base del danno subito e della tipologia e valore dell'immobile.

In caso di contenzioso, spetta al giudice stabilire le eventuali carenze di progettazione o di realizzazione dell'edificio, per individuare le responsabilità dei singoli soggetti coinvolti, dal committente al costruttore, dal progettista al direttore dei lavori.

Bibliografia

- [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.
- [4] Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3150 del 22/5/1967, "*Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici*".
- [5] D.M. 18/12/1975 "*Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*" pubblicato sulla G.U. n. 29 del 2-2-76.

APPENDICE

PROVE TECNICHE ACUSTICA

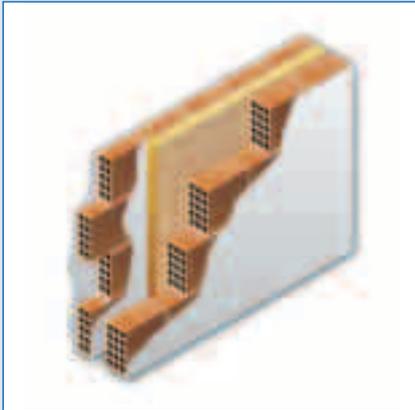
normativa ISO 140:1995 parte 3ª

normativa ISO 717:1996 parte 1ª

PARETE IN MURATURA – R _w 54	80 – 50 – 120	pag. 1.a
PARETE IN MURATURA – R _w 55	120 – 50 – 200	pag. 2.a
PARETE IN MURATURA – R _w 55	120 – 50 – 150	pag. 3.a
PARETE IN MURATURA – R _w 56	120 – 50 – 170	pag. 4.a
PARETE IN MURATURA – R _w 56	150 – 50 – 80	pag. 5.a
PARETE IN MURATURA – R _w 57	80 – 50 – 80	pag. 6.a
PARETE IN MURATURA – R _w 57	80 – 50 – 80	pag. 7.a
PARETE IN MURATURA – R _w 57	80 – 50 – 120	pag. 8.a
PARETE IN MURATURA – R _w 59	80 – 100 – 120	pag. 9.a
PLACCAGGIO – R _w 58	250 – 50	pag. 10.a
PLACCAGGIO – R _w 65	50 – 250 – 50	pag. 11.a
PARETE LEGGERA W111– R _w 46	13 – 75 – 13	pag. 12.a
PARETE LEGGERA W111– R _w 47	13 – 75 – 13	pag. 13.a
PARETE LEGGERA W112– R _w 54	13 – 13 – 75 – 13 – 13	pag. 14.a
PARETE LEGGERA W112– R _w 54	13 – 13 – 50 – 13 – 13	pag. 15.a
PARETE LEGGERA W112– R _w 55	13 – 13 – 75 – 13 – 13	pag. 16.a
PARETE LEGGERA W112– R _w 56	13 – 13 – 100 – 13 – 13	pag. 17.a
PARETE LEGGERA W115– R _w 61	13 – 13 – 50 – 50 – 50 – 13 – 13	pag. 18.a
PARETE LEGGERA W115 + 1 – R _w 62	13 – 13 – 75 – 13 – 37 – 75 – 13 – 13	pag. 19.a
PARETE LEGGERA W115 + 1 – R _w 63	13 – 13 – 75 – 13 – 37 – 75 – 13 – 13	pag. 20.a

PARETE IN MURATURA – $R_w=54$

80 – 50 – 120



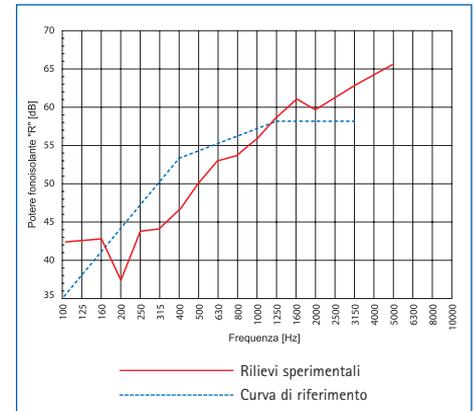
Massa dell'elemento in laterizio:
2,9 kg spessore 8 cm,
4,2 kg spessore 12 cm.
Spessore totale della parete: 30 cm.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio 8x25x25 cm, F/A=63% a fori orizzontali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 225, lana di roccia spessore 5 cm, densità 70 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Blocchi in laterizio 12x25x25 cm, F/A=64% a fori orizzontali, montati sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

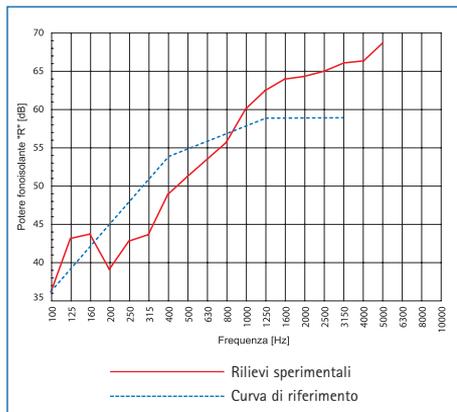
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=54$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -5 dB

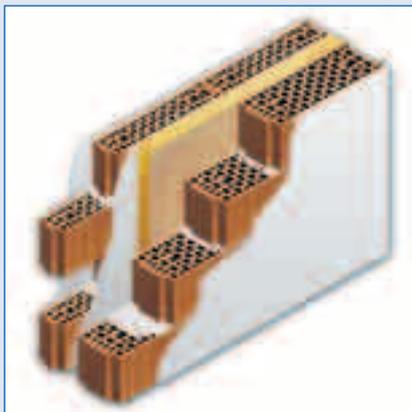


INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=55$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -6 dB

PARETE IN MURATURA – $R_w,55$

120 – 50 – 200



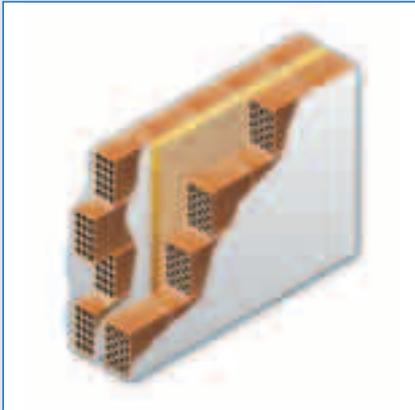
Massa dell'elemento in laterizio:
 11,6 kg spessore 12 cm
 18,2 kg spessore 20 cm
 Spessore totale della parete: 41 cm.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater®, 12x45x25 cm $F/A=45\%$ a fori verticali, montate sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Blocchi in laterizio alleggerito Alveolater® 20x50x22,5 cm $F/A=45\%$ a fori verticali, montati sullo spessore di 20 cm con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

PARETE IN MURATURA – R_w 55

120 – 50 – 150



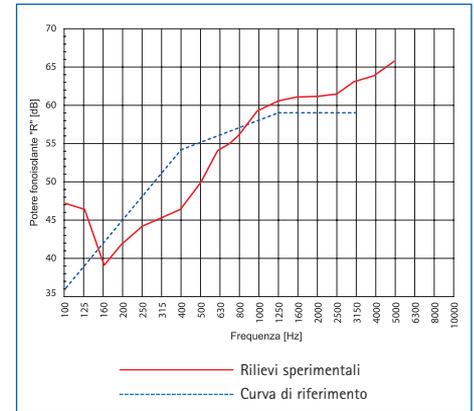
Massa dell'elemento in laterizio:
4,2 kg spessore 12 cm,
6,0 kg spessore 15 cm.
Spessore totale della parete: 37 cm.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio 12x25x25 cm, $F/A=64\%$ a fori orizzontali, montate sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Blocchi in laterizio 15x25x25 cm, $F/A=60\%$ a fori orizzontali, montati sullo spessore di 15 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

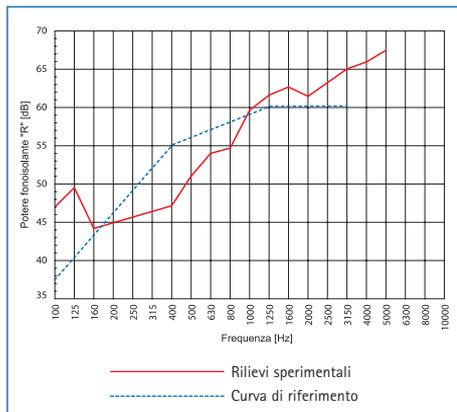
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=55$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -5 dB

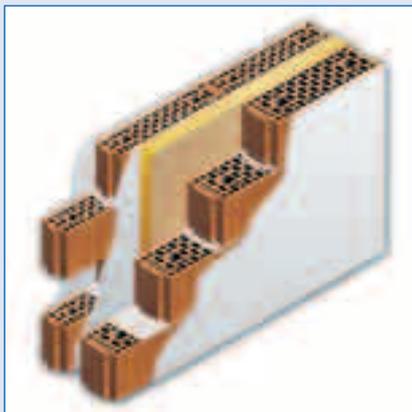


INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=56$ dB

Termini correttivi: C = -1 dB; Ctr = -4 dB

PARETE IN MURATURA - $R_w,56$

120 - 50 - 170



Massa dell'elemento in laterizio:
 11,6 Kg spessore 12 cm
 14,3 Kg spessore 17 cm
 Spessore totale della parete: 40 cm.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

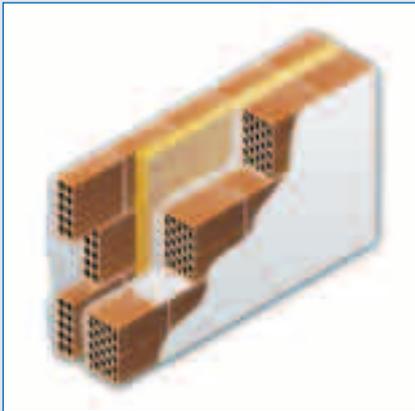
- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater®, 12x45x25 cm F/A=45% a fori verticali, montate sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui legati con malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Blocchi in laterizio alleggerito Alveolater® 17x50x22,5 cm F/A=45% a fori verticali, montati sullo spessore di cm 17, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

PARETE IN MURATURA – R_w 56

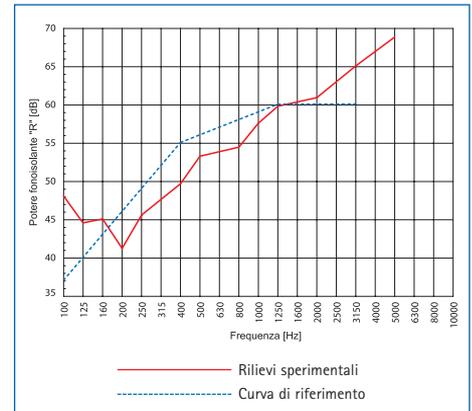
150 – 50 – 80

INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=56$ dB

Termini correttivi: C = -1 dB; Ctr = -4 dB



Massa dell'elemento in laterizio:
5,8 Kg spessore 15 cm,
3,1 Kg spessore 8 cm
Spessore totale della parete: 32 cm.

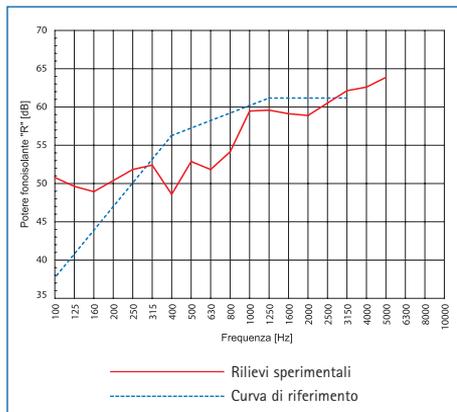


DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

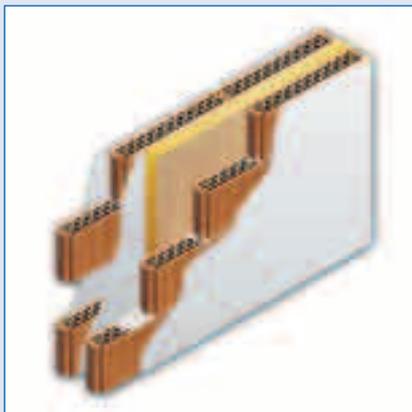
- Blocchi in laterizio alleggerito Alveolater®, 15x25x25 cm F/A=60% a fori orizzontali, montato sullo spessore di 15 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Tramezze in laterizio 8x25x25 cm F/A=60% a fori orizzontali, montate sullo spessore di 8 cm con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=57$ dB

Termini correttivi: C = -1 dB; Ctr = -3 dB

PARETE IN MURATURA - $R_w=57$

80 - 50 - 80



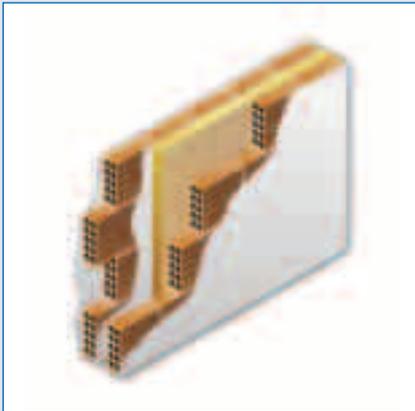
Massa dell'elemento in laterizio:
8,2 Kg spessore 8 cm
Spessore totale della parete: 25 cm.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 8x45x25 cm $F/A=45\%$ a fori verticali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 8x45x25 cm $F/A=45\%$ a fori verticali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

PARETE IN MURATURA – $R_w=57$

80 – 50 – 80



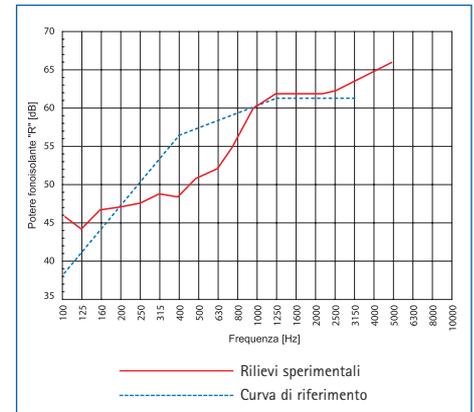
Massa dell'elemento in laterizio:
2,9 kg spessore 8 cm.
Spessore totale della parete: cm 26.

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio 8x25x25 cm, $F/A=63\%$ a fori orizzontali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Tramezze in laterizio 8x25x25 cm, $F/A=63\%$ a fori orizzontali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

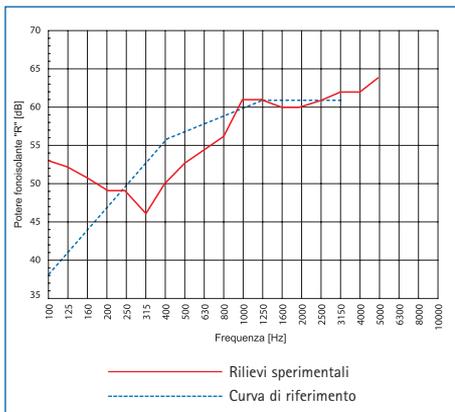
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=57$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -4 dB

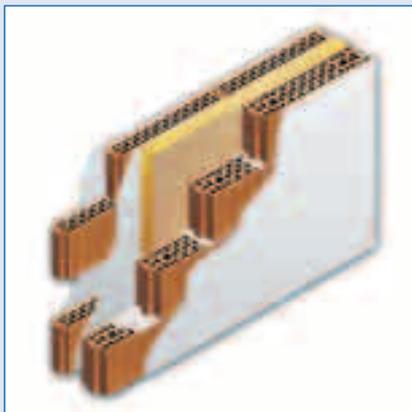


INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=57$ dB

Termini correttivi: C = -1 dB; Ctr = -3 dB

PARETE IN MURATURA - $R_w,57$

80 - 50 - 120



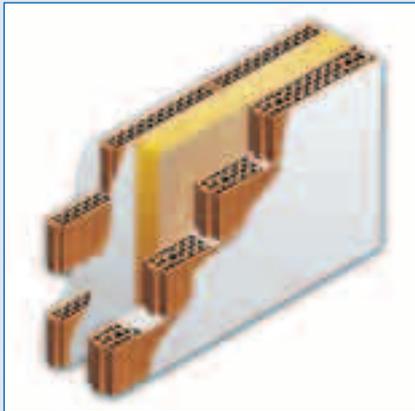
Massa dell'elemento in laterizio:
 Kg 8,2 spessore 8 cm
 Kg 11,6 spessore 12 cm
 Spessore totale della parete: 29 cm

DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 8x45x25 cm F/A=45% a fori verticali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 225, lana di roccia spessore 5 cm, densità 70 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 12x45x25 cm F/A=45% a fori verticali, montate sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

PARETE IN MURATURA – $R_w=59$

80 – 100 – 120



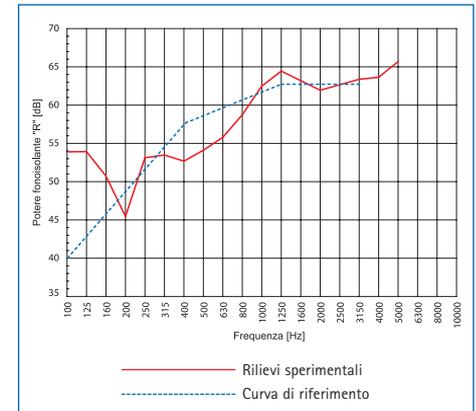
Massa dell'elemento in laterizio:
 Kg 8,2 spessore 8 cm
 Kg 11,6 spessore 12 cm
 Spessore totale della parete: 34 cm

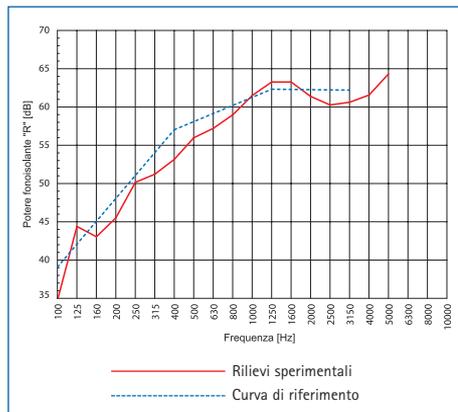
DOPPIA PARETE COSTITUITA DA:

- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 8x45x25 cm F/A=45% a fori verticali, montate sullo spessore di 8 cm con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte.
- Pannelli ROCKWOOL® 225, lana di roccia spessore cm 10, densità 70 kg/m³, a completo riempimento dell'intercapedine.
- Tramezze in laterizio alleggerito Alveolater® 12x45x25 cm F/A=45% a fori verticali, montate sullo spessore di 12 cm, con giunti verticali a incastro, giunti orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco di 1,5 cm sulla faccia esterna.

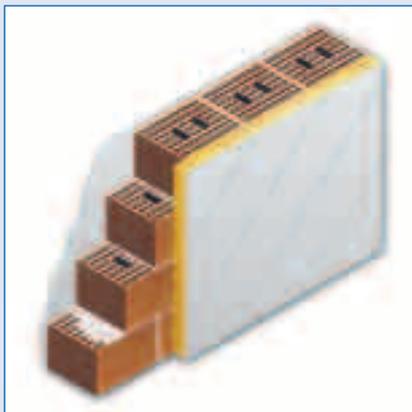
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=59$ dB

Termini correttivi: C = -1 dB; Ctr = -3 dB



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=58$ dBTermini correttivi $C=-2$ dB; $C_{tr}=-6$ dBPLACCAGGIO PARETE IN MURATURA – R_w58

250 – 50



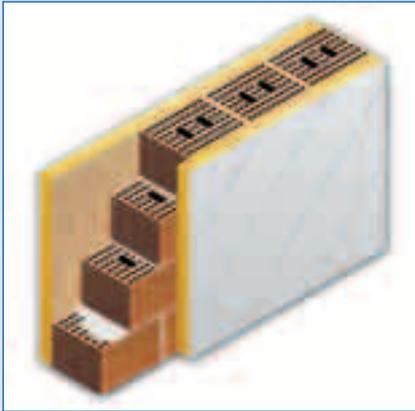
Massa dell'elemento in laterizio:
Kg 11,6 spessore 25 cm
Spessore totale della parete: 31 cm

PARETE SEMPLICE CON UN PLACCAGGIO COSTITUITA DA:

- Blocchi in laterizio alleggerito Alveolater® 25x30x19 cm F/A=45% a setti rettilinei e allineati, in opera a fori verticali e montati sullo spessore di 25 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia.
- Intonaco di 1,5 cm sul lato non placcato.
- Placcaggio con pannelli LabelRock® 406.113, lana di roccia spessore 4 cm, densità 85 kg/m³ pre accoppiata a lastra cartongesso spessore 13 mm, fissaggio con mucchietti di malta adesiva e sigillatura giunti con stucco di gesso.

PLACCAGGIO PARETE IN MURATURA – $R_w=65$

50 – 250 – 50



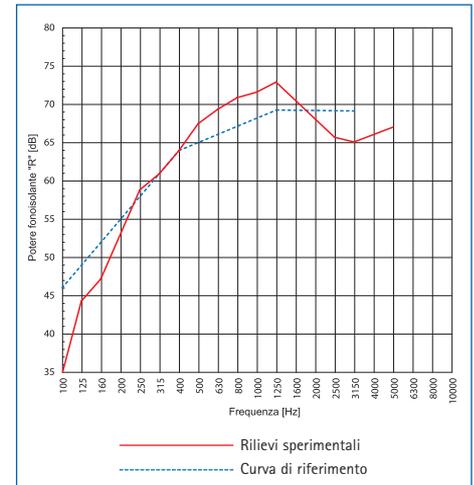
Massa dell'elemento in laterizio:
Kg 11,6 spessore 25 cm
Spessore totale della parete: 35 cm

PARETE SEMPLICE CON UN DOPPIO PLACCAGGIO COSTITUITA DA:

- Blocchi in laterizio alleggerito Alveolater®, 25x30x19 cm F/A=45% a setti rettilinei e allineati, in opera a fori verticali e montati sullo spessore di 25 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia.
- Placcaggi con pannelli LabelRock, 406.113, lana di roccia spessore 4 cm, densità 85 kg/m³ pre accoppiata a lastra cartongesso spessore 13 mm, fissaggio con mucchietti di malta adesiva e sigillatura giunti con stucco di gesso su entrambi i lati.

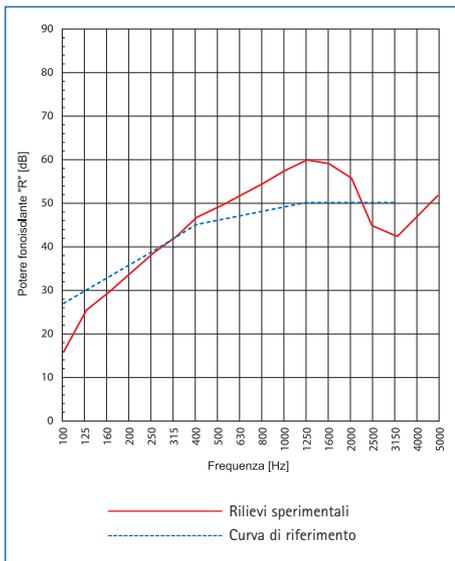
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=65$ dB

Termini correttivi: C = -4 dB; C_{tr} = -11 dB



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=46$ dB

Termini correttivi: C= -4 dB; Ctr= -10 dB

**PARETE LEGGERA W111- R_w46** **13 - 75 - 13**Peso della parete: 24 Kg/m².

Spessore totale della parete: 100 mm

PARETE A ORDITURA METALLICA E RIVESTIMENTO SINGOLO (W111):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 211, spessore 60 mm, densità 40 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

PARETE LEGGERA W111- $R_w=47$ **13 - 75 - 13**

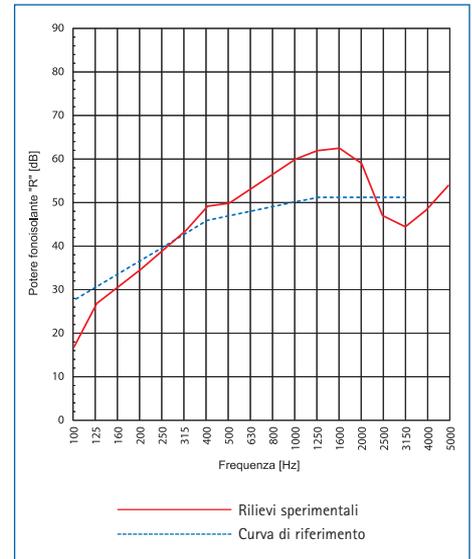
Peso della parete: 25 Kg/m².
Spessore totale della parete: 100 mm.

PARETE A ORDITURA METALLICA E RIVESTIMENTO SINGOLO (W111):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 225, spessore 60 mm, densità 70 kg/m³ posti nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

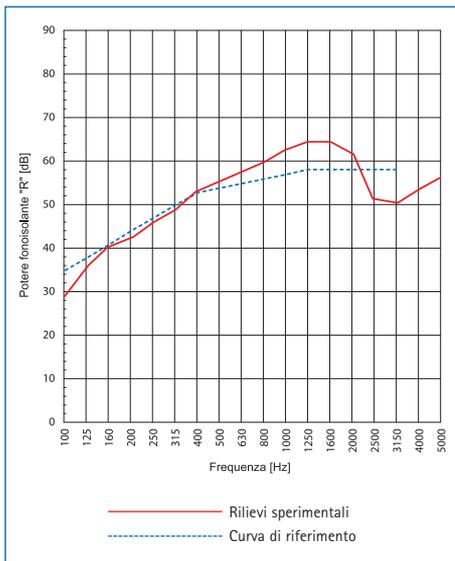
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=47$ dB

Termini correttivi: C= -4 dB; Ctr= -11 dB



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=54$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -7 dB

**PARETE LEGGERA W112- $R_w=54$** **13 - 13 - 75 - 13 - 13**Peso della parete: 43 Kg/m².

Spessore totale della parete: 125 mm

PARETE A ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO (W112):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 211, spessore 60 mm, densità 40 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in doppio strato di lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

PARETE LEGGERA W112- $R_w=54$

13 - 13 - 50 - 13 - 13



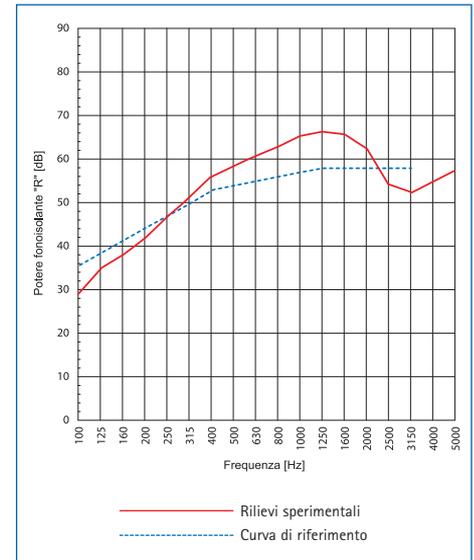
Peso della parete: 43 Kg/m².
Spessore totale della parete: 100 mm.

PARETE A ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO (W112):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 50x40 mm e montanti a C di dimensioni 50x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 225, spessore 40 mm, densità 70 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in doppio strato di lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

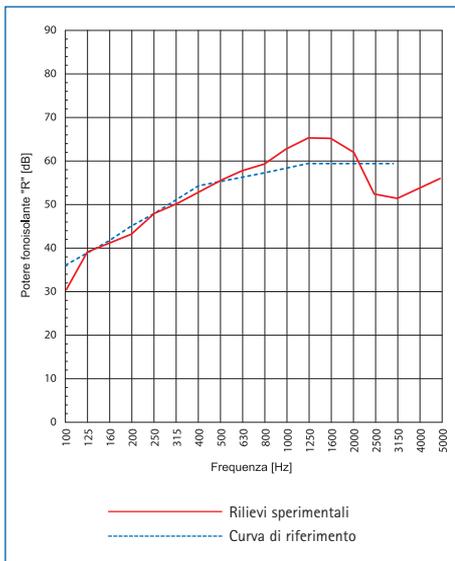
INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=54$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -8 dB



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=55$ dB

Termini correttivi: C= -2 dB; Ctr= -7 dB

**PARETE LEGGERA W112- $R_w=55$** **13 - 13 - 75 - 13 - 13**

Peso della parete: 44 Kg/m².
Spessore totale della parete: 125 mm.

PARETE A ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO (W112):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 225, spessore 60 mm, densità 70 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in doppio strato di lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

PARETE LEGGERA W112- R_w 56

13 - 13 - 100 - 13 - 13

INDICE DI VALUTAZIONE: R_w =56 dB

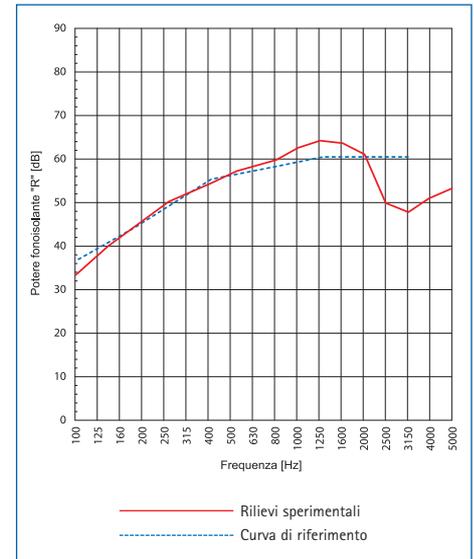
Termini correttivi: C= -4 dB; Ctr= -6 dB



Peso della parete: 44 Kg/m².
Spessore totale della parete: 150 mm.

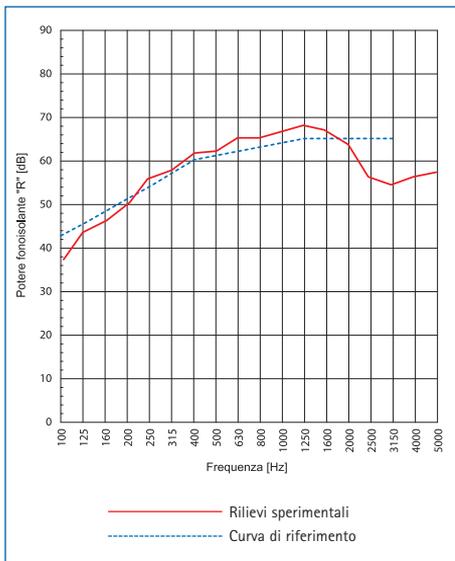
PARETE A ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO (W112):

- Orditura metallica Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 100x40 mm e montanti a C di dimensioni 100x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 211, spessore 40 mm, densità 40 kg/m³, posti in doppio strato a giunti sfalsati nell'intercapedine tra i montanti della struttura.
- Rivestimento in doppio strato in lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=61$ dB

Termini correttivi: C= -3 dB; Ctr= -7 dB

**PARETE LEGGERA W115- R_w61** **13 - 13 - 50 - 50 - 50 - 13 - 13**

Peso della parete: 45 Kg/m².
Spessore totale della parete: 200 mm.

PARETE A DOPPIA ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO (W115):

- Doppia orditura metallica parallela Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 50x40 mm e montanti a C di dimensioni 50x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 211, spessore 40 mm, densità 40 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti di entrambe le strutture.
- Rivestimento in doppio strato di lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

PARETE LEGGERA W115 + 1- R_w62 13 - 13 - 75 - 13 - 37 - 75 - 13 - 13



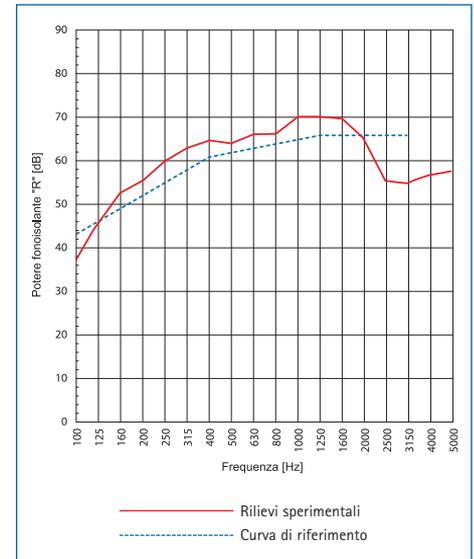
Peso della parete: 60 Kg/m².
Spessore totale della parete: 250 mm.

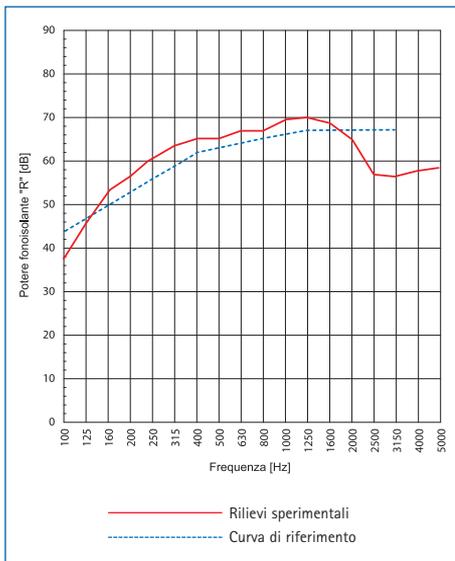
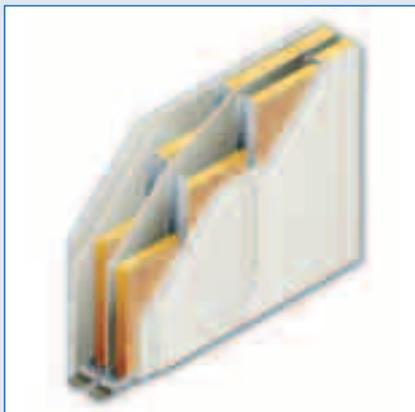
PARETE A DOPPIA ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO CON QUINTA LASTRA INTERPOSTA (W115+1) E SCATOLE ELETTRICHE CONTRAPPOSTE SULLE DUE FACCE:

- Doppia orditura metallica parallela Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Intercapedine da 50 mm di aria tra le strutture e singola lastra di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm avvitata alla prima orditura metallica.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 225, spessore 60 mm, densità 70 kg/m³, posti tra i montanti di entrambe le strutture.
- Rivestimento in doppio strato di lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.
- Installazione di due scatole elettriche posizionate in asse sulle due facce della parete.

INDICE DI VALUTAZIONE: R_w=62 dB

Termini correttivi: C= -3 dB; C_{tr}= -6 dB



INDICE DI VALUTAZIONE: $R_w=63$ dBTermini correttivi: $C= -3$ dB; $C_{tr}= -7$ dB**PARETE LEGGERA W115 + 1- R_w63 13 - 13 - 75 - 13 - 37 - 75 - 13 - 13**

Peso della parete: 60 Kg/m².
Spessore totale della parete: 250 mm.

PARETE A DOPPIA ORDITURA METALLICA E DOPPIO RIVESTIMENTO CON QUINTA LASTRA INTERPOSTA (W115+1):

- Doppia orditura metallica parallela Knauf in acciaio zincato sp. 0,6 mm con guide a U di dimensioni 75x40 mm e montanti a C di dimensioni 75x50 mm posti ad interasse di 600 mm. Isolata dalle strutture perimetrali con nastro vinilico monoadesivo Knauf dello spessore di 3,5 mm.
- Intercapedine da 50 mm di aria tra le strutture e singola lastra di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm avvitata alla prima orditura metallica.
- Pannelli in lana di roccia ROCKWOOL® 225, spessore 60 mm, densità 70 kg/m³, posti nell'intercapedine tra i montanti di entrambe le strutture.
- Rivestimento in lastre di gesso rivestito Knauf GKB (A), spessore 12,5 mm, avvitate all'orditura metallica e quindi stuccate sui giunti.

