

ANIT - Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico

www.anit.it

Manualetto di acustica edilizia

Indice

PARTE 1: CONCETTI GENERALI	4
Tipi di rumore	4
I rumori nelle strutture edilizie	4
Come si trasmette il rumore nelle strutture	4
La riverberazione	4
PARTE 2: GRANDEZZE CARATTERISTICHE	5
Come viene indicata la capacità di una struttura di abbattere il rumore aereo: isolamento acustico e potere fonoisolante.	5
Come viene indicata la capacità di una struttura di ridurre il rumore di calpestio: livello di rumore da calpestio	5
Indici di valutazione.	5
Grandezze “normalizzate”	6
Misure in opera e misure in laboratorio - Grandezze apparenti	6
Tempo di riverberazione (T_{60})	7
Tempo di riverberazione ottimale ($T_{60\text{ ott}}$)	7
Resistenza specifica al passaggio dell’aria.	8
Rigidità dinamica	8
PARTE 3: INTERVENTI DI FONOISOLAMENTO E DI FONOASSORBIMENTO	9
Interventi di fonoisolamento	9
Come le strutture isolano dai rumori aerei: i concetti di “legge della massa” e di “sistema massa-molla-massa”.	9
Come minimizzare le trasmissioni laterali (pavimento galleggiante)	9
Interventi di fonoassorbimento	10
PARTE 4: METODI DI CALCOLO	11
Isolamento acustico	11
Isolamento acustico normalizzato rispetto all’assorbimento equivalente D_n	11
Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione D_{nT}	11
Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT,w}$	11
Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto all’assorbimento equivalente $D_{2m,n,w11}$	11
Potere fonoisolante	12
Indice di potere fonoisolante di una partizione (R_w)	12
Formule proposte da rapporto tecnico UNI (settembre 2004)	13
Altre formule	13
Potere fonoisolante composto	15
Incremento dell’indice di valutazione del potere fonoisolante mediante l’aggiunta di strati addizionali (DR_w)	15
Indice di potere fonoisolante apparente (in opera) R'_w di una partizione	17
Calcolo di R_{wij}	17
Calcolo di DR_{wij}	18

Calcolo di K_{ij}	19
Calcolo indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di facciata, R'_{w}	20
Correlazione tra isolamento acustico e potere fonoisolante	20
Correlazione tra indice di isolamento acustico normalizzato e indice di potere fonoisolante	21
Rumore di calpestio	24
Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto all’assorbimento acustico	24
Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto al tempo di riverbero	24
Indice del livello di rumore di calpestio L'_{nw}	25
Calcolo di K	26
Calcolo della resistenza al flusso d’aria	28
Tempo di riverberazione	29
Tempo di riverberazione ottimale (T_{60} ott)	30
<i>PARTE 5: LEGISLAZIONE E NORME TECNICHE</i>	<i>31</i>
Legislazione	31
Legislazione Comunitaria	31
Legislazione nazionale	32
Norme tecniche	35
Norme per la progettazione	35
Norme per la verifica in opera o in laboratorio dei requisiti acustici	35

PARTE 1: CONCETTI GENERALI

Tipi di rumore

In edilizia si possono distinguere differenti tipi di rumori:

- rumori aerei (vociare dei vicini, rumori provenienti dall’esterno ecc.)
- rumori di calpestio (generati dal calpestio delle persone al piano superiore ecc.)
- rumori prodotti dagli impianti tecnici (ascensore, impianto di condizionamento, scarico ecc.)

I rumori nelle strutture edilizie

Come si trasmette il rumore nelle strutture

I rumori possono trasmettersi sia per via aerea che per via solida. Quindi negli edifici il rumore non si trasmette solo attraverso la struttura di separazione tra gli ambienti considerati, la propagazione del suono avviene anche tramite le strutture laterali.

Se consideriamo ad esempio la propagazione del suono tra due locali confinanti possiamo individuare tredici percorsi di trasmissione di cui uno diretto (attraverso il divisorio in esame) e dodici di trasmissione laterale (tre per ogni lato della parete).

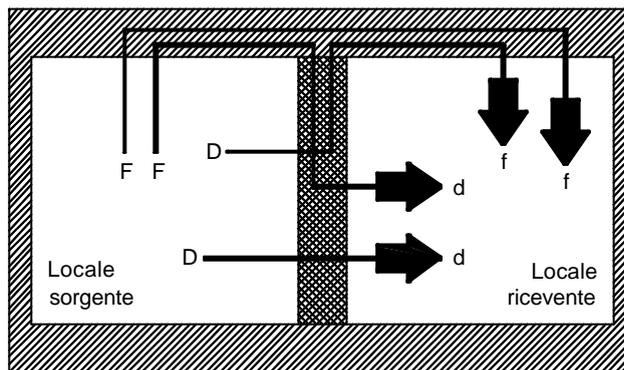
Nella figura seguente vengono raffigurati il percorso diretto (Dd) e i tre percorsi laterali (Ff, Fd, Df) per uno dei lati dell’elemento divisorio dove:

D: elemento divisorio lato locale sorgente

d: elemento divisorio lato locale ricevente

F: struttura laterale lato locale sorgente

f: struttura laterale lato locale ricevente



Lo stesso tipo di considerazione ovviamente può essere fatto per la trasmissione dei rumori di calpestio. I suoni si propagano sia attraverso il solaio in esame che attraverso le pareti laterali.

La riverberazione

Quando una sorgente di rumore attiva in un locale viene spenta, il livello di pressione sonora presente all’interno della stanza non si annulla istantaneamente.

Questo fenomeno è causato dal fatto che le superfici delimitanti l’ambiente, riflettendo parzialmente le onde sonore ancora presenti nella stanza, generano una “coda sonora”.

Tale fenomeno è noto con il nome riverberazione.

La capacità di una sala di risultare più o meno riverberante dipende principalmente dalle sue dimensioni (e quindi dal suo volume) e dalla capacità delle superfici delimitanti di assorbire o meno i suoni.

Visto che le superfici assorbono i suoni alle varie frequenze in maniera differente, i locali possono risultare molto riverberanti a certe frequenze e poco ad altre.

Locali troppo riverberanti non sono adatti per l’ascolto del parlato, in quanto la coda sonora non permette di distinguere chiaramente le sillabe che compongono le parole, ma potrebbero risultare adeguati per l’ascolto di determinati tipi di musica come ad esempio la musica d’organo.

PARTE 2: GRANDEZZE CARATTERISTICHE

Come viene indicata la capacità di una struttura di abbattere il rumore aereo: isolamento acustico e potere fonoisolante.

Esistono due grandezze che, in maniera differente, definiscono la capacità di una struttura di abbattere il rumore aereo, l’isolamento acustico e il potere fonoisolante.

L’isolamento acustico (D) (in inglese Noise Reduction - NR) rappresenta la differenza in decibel dei livelli di rumore misurati nella stanza sorgente e nella stanza ricevente. Questa grandezza quindi dipende dalle caratteristiche delle stanze dove vengono effettuate le misure, quali le loro dimensioni e la loro capacità di assorbire i suoni.

Il potere fonoisolante (R) (in inglese Transmission Loss – TL) invece è una caratteristica intrinseca della struttura, indipendente dalle dimensioni e dalle caratteristiche dei locali. Tale grandezza quindi risulta utile qualora si volessero confrontare direttamente le caratteristiche di varie pareti.

Per entrambe le grandezze più il loro valore è alto meglio le strutture considerate isolano dal rumore.

Isolamento acustico e potere fonoisolante sono legati tra loro da relazioni matematiche

Come viene indicata la capacità di una struttura di ridurre il rumore di calpestio: livello di rumore da calpestio

Per definire quanto una struttura isola dal rumore di calpestio è stato definito il livello di rumore di calpestio (L). Tale grandezza caratterizza il rumore percepito al piano sottostante una volta che viene attivata la macchina per il calpestio sul solaio in esame. Tale indice è quindi da intendersi come un valore “massimo” nel senso che più basso è, maggiore sarà la capacità del solaio di smorzare il rumore.

Indici di valutazione.

Tutti i parametri che definiscono le proprietà acustiche di una partizione (D, R, L) vengono calcolati, o misurati, per specifiche bande di frequenza.

Si hanno quindi, ad esempio, diversi valori di potere fonoisolante per una certa partizione in base alla frequenza che si sceglie di considerare (un divisorio può “isolare bene” il rumore alle alte frequenze, ma dare prestazioni scadenti alle basse frequenze).

Per poter definire con un unico numero la prestazione acustica complessiva di un componente edilizio sono stati introdotti gli “indici di valutazione”.

Tali indici si calcolano “mediando”, con una apposita procedura, i valori definiti alle singole frequenze.

Il pedice “w” definisce se una certa grandezza riguarda una specifica frequenza oppure se si tratta di un indice di valutazione; ad esempio:

R = potere fonoisolante

R_w = indice del potere fonoisolante

È importante sottolineare che l’impiego degli indici di valutazione comporta quindi una perdita di informazioni riguardo l’andamento in frequenza della grandezza considerata. Per cui questi parametri possono essere utilizzati per confrontare tra loro o con valori di legge le prestazioni di una struttura, ma non possono essere utilizzati per calcolare dei livelli come, per esempio, quelli previsti in una previsione di clima acustico.

I metodi per calcolare gli indici di valutazione partendo dai valori “per frequenza” sono descritti nelle norme UNI EN ISO 717 – 1 e UNI EN ISO 717 – 2.

Grandezze “normalizzate”

Le grandezze isolamento acustico (D) e livello di rumore di calpestio (L) indicano delle caratteristiche della partizione esaminata dipendenti dal contesto in cui è inserita. Ad esempio se si analizzano due pareti identiche inserite in due differenti appartamenti, le due partizioni daranno due diversi valori di isolamento acustico. Per poter paragonare le grandezze è quindi necessario renderle tra loro omogenee o meglio “normalizzarle”.

Esistono 2 tipi di normalizzazione. È possibile calcolare l’isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione del locale ricevente (DnT) (per la definizione di tempo di riverberazione vedere i paragrafi successivi) oppure l’isolamento acustico normalizzato rispetto all’assorbimento acustico del locale ricevente (Dn).

La normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione serve per ricondurre il dato calcolato ad un appartamento campione avente un tempo di riverberazione di 0,5 s.

La normalizzazione rispetto all’assorbimento acustico serve per ricondurre il dato calcolato ad un appartamento campione avente una superficie di assorbimento equivalente pari a 10 m².

Misure in opera e misure in laboratorio - Grandezze apparenti

La misurazione delle caratteristiche acustiche di un elemento divisorio posto in opera forniscono generalmente dati sensibilmente differenti rispetto alle misurazioni in laboratorio. Ciò avviene a causa del fatto che in laboratorio si cerca di eliminare completamente le trasmissioni laterali (descritte precedentemente). Altre differenze sono dovute all’accortezza della posa tra laboratorio e cantiere, alla geometria del provino, oltre che alla assenza di impianti nella parete di laboratorio. Differenze sostanziali possono essere riscontrate anche considerando i tempi di asciugatura delle malte.

Quindi una partizione posta in opera presenta in generale un potere fonoisolante decisamente inferiore rispetto alla stessa struttura misurata in laboratorio.

Per differenziare questi due tipi di misure viene utilizzato un apice, inoltre le grandezze relative alle misurazioni in opera vengono anche definite con il termine “apparente”, quindi ad esempio:

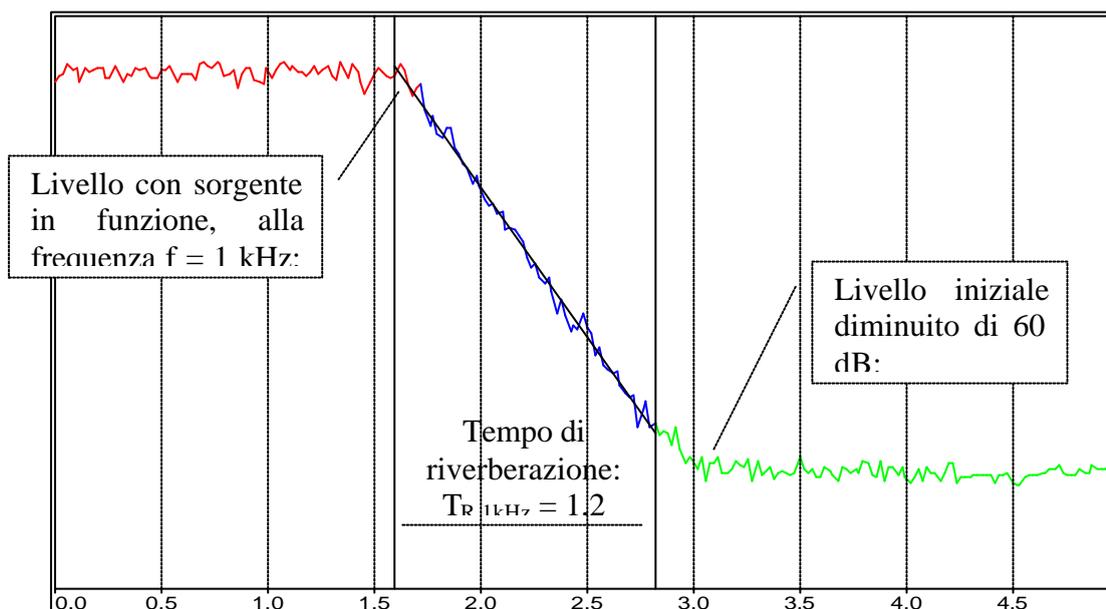
R_w = indice del potere fonoisolante di un elemento (misurato in laboratorio)

R'_w = indice del potere fonoisolante apparente di un elemento (misurato in opera)

Generalmente: $R_w > R'_w$

Tempo di riverberazione (T_{60})

Considerato un ambiente chiuso e in condizioni di saturazione acustica (tramite l’attivazione di una sorgente sonora per un discreto intervallo temporale), si definisce tempo di riverberazione, relativo ad una specifica frequenza, il tempo necessario affinché, dopo lo spegnimento della sorgente sonora, il livello di pressione sonora relativo a quella frequenza si riduca di 60 dB rispetto al livello presente nell’ambiente con la sorgente in funzione.



Solitamente, considerata la difficoltà che si riscontra nel generare livelli sonori almeno 60 dB più elevati del livello sonoro preesistente nell’ambiente di prova, si considera come tempo di riverberazione il doppio del tempo impiegato per ottenere un decadimento limitato a 30 dB.

Tempo di riverberazione ottimale ($T_{60 \text{ ott}}$)

Il tempo di riverberazione rappresenta in sostanza la lunghezza temporale della coda sonora (eco) all’interno di un ambiente: maggiore è il tempo di riverbero, maggiore è l’eco all’interno di quell’ambiente.

Il tempo di riverberazione deve assumere pertanto dei valori idonei al tipo di destinazione d’uso dell’ambiente stesso: in genere deve essere contenuto in 1-2 secondi, ma non è detto che un tempo di riverberazione particolarmente basso (ad esempio 0,5 secondi) sia sempre da preferire ad uno più alto (come ad esempio 3 secondi).

Valori bassi del tempo di riverberazione sono adeguati per locali con permanenza di persone, cinema e ristoranti. Tempi di riverberazione elevati invece sono adeguati per chiese e ambienti di ascolto.

Per quanto riguarda l’edilizia scolastica, i valori ottimali relativi ai tempi di riverberazione delle aule e delle palestre sono stati stabiliti dal Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975, che ne stabilisce l’andamento:

- in funzione della frequenza
- in funzione del volume dell’ambiente, prevedendo una variazione direttamente (ma non linearmente) proporzionale all’aumento dello stesso.

Una precedente circolare ministeriale del 1967 (circolare 3150) prevedeva invece dei valori massimi applicabili alla media dei tempi di riverberazione relativi alle frequenze di 250 – 500 – 1000 – 2000 Hz e fissati in:

- 1,2 secondi per le aule arredate;
- 2,2 secondi per le palestre;

tali tempi erano fissati indipendentemente dalle dimensioni delle stesse.

Il D.P.C.M. 5-12-1997 “Requisiti acustici passivi degli edifici ” richiama esplicitamente questi limiti per gli ambienti scolastici.

Resistenza specifica al passaggio dell’aria.

La resistenza al passaggio dell’aria “r” di uno strato poroso, è definita come il rapporto tra la differenza di pressione originata sulle sue facce da un flusso d’aria che lo attraversa e la velocità di attraversamento stessa .

$$r = \frac{\Delta p}{v}$$

dove :

Δp = differenza di pressione tra i due lati dello strato [N/m^2]

v = velocità di passaggio dell’aria [m/s]

Questa può essere misurata con vari dispositivi, il più semplice o intuitivo dei quali è quello in cui con un rotometro si misura la portata del flusso d’aria, originata mettendo in depressione il materiale, e con un manometro si misura la differenza di pressione originata sul campione in prova. La misura viene ripetuta per diverse velocità di attraversamento ed i risultati sono estrapolati alla velocità di 5×10^{-4} [m/s].

La resistenza al passaggio dell’aria dipende dallo spessore del materiale per cui una caratterizzazione di questo indipendente dal suo spessore, si ha considerando la resistenza specifica al passaggio dell’aria “r1”, che corrisponde a quella di uno strato dello spessore di 1 m .

$$r1 = r/s$$

con s = spessore del materiale [m]

Rigidità dinamica

La rigidità dinamica (s') di un materiale, definita come rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico, è una grandezza che ha particolare importanza nella definizione delle caratteristiche acustiche di certi materiali utilizzati in edilizia e viene testata in laboratorio basandosi su quanto prescritto dalla norma UNI EN 29052 – Parte 1.

I valori di s' ricavati con i metodi descritti in tale normativa possono essere utilizzati solo per materiali resilienti utilizzati sotto a massetti aventi un peso compreso tra 40 e 400 kg/mq .

Il metodo di prova descritto nella norma consente di ricavare la rigidità dinamica apparente ($s't$) del materiale testato. Per passare da $s't$ a s' è necessario conoscere la resistenza al flusso d’aria (r) in direzione laterale del materiale analizzato.

Se $r \geq 100 \text{ kPa s /mq}$ allora $s' = s't$

Se $100 \text{ kPa s /mq} > r \geq 10 \text{ kPa s /mq}$ allora $s' = s't + s'a$ (dove $s'a$ è la rigidità dinamica apparente per unità di superficie del gas contenuto nel materiale)

Se $r < 10 \text{ kPa s /mq}$ allora $s' = s't$ solo se $s'a$ è trascurabile rispetto a $s't$

La resistenza al flusso d’aria (r) deve essere valutata in base alla norma UNI EN 29053 (applicabile ai materiali porosi).

PARTE 3: INTERVENTI DI FONOISOLAMENTO E DI FONOASSORBIMENTO

Interventi di fonoisolamento

Gli interventi di fonoisolamento hanno lo scopo di minimizzare la trasmissione del rumore tra due ambienti, (e quindi fare in modo che il rumore prodotto in un locale non si senta nel locale adiacente).

Per ottenere un efficace intervento di fonoisolamento è quindi necessario:

- utilizzare una partizione dotata di sufficiente capacità di abbattere i rumori aerei
- minimizzare i percorsi di trasmissione laterale dei suoni

Come le strutture isolano dai rumori aerei: i concetti di “legge della massa” e di “sistema massa-molla-massa”.

La capacità di una partizione di isolare dai rumori aerei si basa sui due seguenti concetti, descritti in estrema sintesi.

- Più aumenta la massa di una partizione più la partizione isola dal rumore (Legge della massa).
- A parità di massa una parete composta da differenti strati (strati massivi e strati porosi) isola meglio di una parete monolitica (Concetto di massa-molla-massa).

In particolare quest’ultima affermazione permette di capire come anche le pareti leggere, realizzate con lastre di gesso rivestito e materiale fibroso nell’intercapedine, riescano a garantire elevate prestazioni di fonoisolamento, pur avendo una massa limitata.

In buona sostanza il materiale fibroso contenuto nell’intercapedine si comporta come uno smorzatore che dissipa l’energia acustica che si propaga attraverso la parete. Occorre comunque tenere presente che la legge della massa varia su scala logaritmica, per cui risulta limitata superiormente; per cui inizialmente modesti incrementi della massa comportano elevati incrementi del potere fonoisolante, mentre in presenza di elevate masse, anche un suo sostanziale aumento comporta un minimo incremento del potere fonoisolante. Per esempio per incrementare di 3 dB il potere fonoisolante di una parete in forati da 80 mm basta raddoppiarne la massa (da 60 a 120 kg/mq) mentre per incrementare di 3 dB il potere fonoisolante di una parete in cemento armato da 100 mm occorre raddoppiare la massa da 200 a 400 kg/mq.

Come minimizzare le trasmissioni laterali (pavimento galleggiante)

Per limitare le trasmissioni laterali del rumore è necessario desolidarizzare la struttura in esame dalle partizioni laterali. È quindi opportuno interporre tra le strutture appositi strati di materiale resiliente che “funzionando come una molla” minimizzino la trasmissione delle vibrazioni.

Un tipico esempio di intervento di questo tipo è la realizzazione del “pavimento galleggiante”.

Tale sistema prevede:

- La realizzazione di un piano di posa sul solaio,
- La posa senza soluzione di continuità di uno strato di materiale elastico-smorzante. Tale materiale dovrà essere risvoltato sui bordi del pavimento in modo da realizzare una “vasca” che disgiunga in ogni punto lo strato di posa dal massetto soprastante. Particolare attenzione andrà posta nella realizzazione del risvolto in corrispondenza delle soglie di ingresso e delle soglie dei balconi
- La gettata di un massetto di calcestruzzo di spessore adeguato ai carichi previsti, e comunque non inferiore ai 4 cm, eventualmente armato e munito di giunti di

dilatazione che costituisca una massa liberamente galleggiante sulla molla costituita dal materiale isolante.

È infine necessario che nessuna canalizzazione attraversi verticalmente il massetto, forando lo strato resiliente.

Interventi di fonoassorbimento

Gli interventi di fonoassorbimento hanno lo scopo di controllare la riflessione dei suoni sulle pareti di un locale (e quindi adattare in base alle proprie esigenze il riverbero all’interno del locale in cui si genera il rumore)

Un intervento di fonoassorbimento generalmente si attua mediante:

- l’applicazione (o l’eliminazione) di materiale fonoassorbente sulle superfici che compongono il locale.
- la modificazione della forma del locale stesso e quindi del suo volume. Tali modifiche generalmente comportano interventi sul soffitto e sulla conformazione delle pareti laterali, oppure l’interruzione della regolarità delle superfici laterali (ad esempio mediante motivi decorativi riflettenti) al fine di ottenere una migliore diffusione del suono nel locale

PARTE 4: METODI DI CALCOLO

Isolamento acustico

L’isolamento acustico (D) rappresenta il livello di attenuazione al rumore fornito da un elemento di edificio inserito tra due ambienti.

Banalmente il valore si calcola misurando la differenza tra i livello di rumore presenti nei due locali dopo aver attivato una sorgente di rumore.

$$D = L_1 - L_2$$

Dove:

L₁ è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente, in dB;

L₂ è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente, in dB;

Isolamento acustico normalizzato rispetto all’assorbimento equivalente D_n

$$D_n = D - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) [\text{dB}]$$

dove:

A è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, in m²;

A₀ è l'area di assorbimento equivalente di riferimento per appartamenti, assunta pari a 10 m²

Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione D_{nT}

$$D_{nT} = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) [\text{dB}]$$

dove:

T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi;

T₀ è il tempo di riverberazione di riferimento per appartamenti, assunto pari a 0,5 s.

Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione D_{2m,nT,w}

La misurazione viene effettuata utilizzando come sorgente sonora il traffico o un altoparlante con angolo di incidenza di 45°

$$D_{2mT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) [\text{dB}]$$

dove:

L_{1,2m} è il livello medio di pressione sonora a 2 m di distanza dal fronte della facciata, in dB;

L₂ è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente, in dB;

T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi;

T₀ è il tempo di riverberazione di riferimento per appartamenti, assunto pari a 0,5 s.

Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto all’assorbimento equivalente D_{2m,n,w}

La misurazione viene effettuata utilizzando come sorgente sonora il traffico o un altoparlante con angolo di incidenza di 45°

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) [\text{dB}]$$

dove:

$L_{1,2m}$ è il livello medio di pressione sonora a 2 m di distanza dal fronte della facciata, in dB;

L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente, in dB;

A è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, in m²;

A_0 è l'area di assorbimento equivalente di riferimento per appartamenti, assunta pari a 10 m²

Potere fonoisolante

Il potere fonoisolante di una struttura rappresenta la sua attitudine a ridurre la trasmissione del suono incidente su di essa; questa viene espressa dalla relazione

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Il parametro τ rappresenta il coefficiente di trasmissione acustica di una struttura ed è dato dal rapporto tra potenza sonora trasmessa e potenza sonora incidente sulla struttura.

Tralasciando formule teoriche più o meno laboriose è possibile affermare che generalmente il potere fonoisolante di una struttura dipende dalla sua massa areica espressa in kg/m², con alcune eccezioni costituite dalle pareti leggere (tipo cartongesso) e dalle strutture doppie (tipo muratura a cassetta); nel primo caso il potere fonoisolante dipende dallo smorzamento delle lastre, nel secondo caso il potere fonoisolante dipende dallo spessore dell’intercapedine d’aria lasciato tra i componenti e dalla eventuale presenza di un materiale fonoassorbente (con adeguata resistività specifica al flusso d’aria).

Indice di potere fonoisolante di una partizione (R_w)

La determinazione di R_w può essere effettuata basandosi su (in ordine di attendibilità):

- dati di laboratorio
- correlazioni specifiche
- relazioni generali

Come dati di laboratorio devono essere utilizzate informazioni riportate in rapporti di prova ottenuti mediante misurazioni conformi alla normativa europea di più recente approvazione.

Per quanto riguarda i dati di origine sperimentale occorre puntualizzare alcuni aspetti

- il campione di laboratorio sarà sicuramente diverso, in particolar modo per la cura durante la posa, dalla struttura realmente realizzata in cantiere;
- il campione di laboratorio non presenta normalmente disomogeneità dovute a componenti strutturali, impianti, ecc.
- il campione di laboratorio normalmente non è soggetto agli stessi periodi di stagionatura del cantiere;
- i rapporti di miscela delle malte utilizzate per realizzare il campione di prova normalmente non sono uguali a quelli utilizzati per realizzare la struttura in situ.

Per cui quando si utilizzano dati di laboratorio come dati di partenza per valutare l’isolamento acustico di una struttura da rumori aerei occorrerà sempre applicare un fattore cautelativo che tenga conto di queste difformità; l’entità di tale fattore non è quantizzabile analiticamente poiché dipende da fattori non computabili e quindi il suo valore potrà essere assegnato solo dall’esperienza del progettista.

Per correlazioni specifiche invece si intende l’utilizzo di prove di laboratorio effettuate su elementi costituiti dallo stesso materiale di quello in esame, aventi caratteristiche morfologiche analoghe ad esso.

Infine per relazioni generali si intendono opportuni algoritmi matematici.

In funzione della massa frontale della struttura (m') (Kg/mq) (definita come densità x spessore dell'elemento), ed eventualmente di altri parametri, si ricava il valore di R_w dell'elemento divisorio mediante una apposita equazione.

Esistono molte formule sviluppate da differenti laboratori, di seguito ne vengono elencate alcune.

Per ogni formula vengono indicati il paese di provenienza e i limiti di validità.

Formule proposte da rapporto tecnico UNI (settembre 2004)

Laboratori italiani: $R_w = 20 \log (m') - 2$

Tale formula è valida per partizioni orizzontali e verticali (singole o doppie) con $m' > 80$ kg/mq. Nel caso di pareti doppie l'intercapedine deve essere priva di riempimento e di spessore uguale o minore di 5 cm.

La formula sopra riportata fornisce risultati molto approssimativi per le strutture omogenee, mentre per le strutture doppie è perlopiù fallace.

Formula CEN: $R_w = 37,5 \log (m') - 44$

Tale formula è valida per strutture di base monolitiche con $m' > 150$ kg/mq.

Altre formule

Pareti monostrato:

Germania (valida per partizioni con $m' > 150$ kg/mq):

$$R_w = 32,1 \log (m') - 28,5$$

Austria (valida per partizioni con $m' > 150$ kg/mq):

$$R_w = 32,4 \log (m') - 26$$

Francia (valida per partizioni con $m' > 150$ kg/mq):

$$R_w = 40 \log (m') - 45$$

Francia (valida per partizioni con $m' < 150$ kg/mq):

$$R_w = 13,3 \log (m') + 12$$

Gran Bretagna (valida per partizioni con $m' > 100$ kg/mq):

$$R_w = 21,6 \log (m') - 2,3$$

Italia - pareti in laterizio alleggerito (valida per partizioni con $m' > 100$ kg/mq):

$$R_w = 16,9 \log (m') + 3,6$$

Italia - pareti in laterizio (valida per partizioni con $80 < m' < 400$ kg/mq):

$$R_w = 16 \log (m') + 7$$

Italia - pareti in blocchi di arg. esp. (valida per partizioni con $115 < m' < 400$ kg/mq):

$$R_w = 26 \log (m') - 11$$

Pareti doppie

Italia - pareti in laterizio, interc. > 5 cm con materiale fibroso

(valida per partizioni con $80 < m' < 400$ kg/mq): $R_w = 16 \log (m') + 10$

Italia - pareti in blocchi di argilla espansa, interc. senza materiale fibroso
(valida per partizioni con $115 < m' < 400$ kg/mq): $R_w = 26 \log (m') - 11$

Per questa tipologia strutturale inoltre si ottengono risultati veritieri, anche se approssimativi in quanto si tratta di un metodo di calcolo semplificato, utilizzando la seguente formula:

$$R_w = 20 \log (m'd) - 10$$

dove d lo spessore dell’intercapedine d’aria in cm.

Pareti in lastre di gesso rivestito

Germania –

Valida per partizioni realizzate con struttura singola:

$$R_w = 20 \log (m') + 10 \log (d) + e + 5$$

Valida per partizioni realizzate con struttura doppia:

$$R_w = 20 \log (m') + 10 \log (d) + e + 10$$

Dove:

d profondità dell’intercapedine in cm

e spessore del pannello in fibra minerale in cm

Solai

Italia – solai in laterocemento (valida per solai con $250 < m' < 500$ kg/mq):

$$R_w = 23 \log (m') - 8$$

Le formule sopra riportate sono basate su un approccio semplificato e quindi vanno utilizzate con cautela e solamente allo scopo di una verifica preliminare di massima del potere fonoisolante di un componente.

Potere fonoisolante composto

Nel caso si stia considerando una partizione “composta”, in quanto contenente diversi elementi (parete opaca, porte, finestre, cassonetti ecc.) il potere fonoisolante della struttura complessiva viene calcolato con la formula seguente:

$$R_w = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{i,w}}{10}} + \frac{A_0}{S_{tot}} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n,e,i}}{10}} \right)$$

dove:

$R_{i,w}$ è l’indice di valutazione del potere fonoisolante dell’elemento i -esimo costituente la partizione

S_i è la superficie dell’elemento i -esimo in m^2

S_{tot} è la superficie complessiva della partizione in m^2

A_0 sono le unità di assorbimento di riferimento, pari a $10 m^2$

$D_{n,e,i}$ è l’indice di valutazione dell’isolamento acustico normalizzato del piccolo elemento i -esimo

Per “piccoli elementi” si intendono gli elementi che costituiscono la parete (con l’eccezione di porte e finestre) aventi superficie minore di $1 m^2$ (bocchette di ventilazione, cassonetti ecc.)

Incremento dell’indice di valutazione del potere fonoisolante mediante l’aggiunta di strati addizionali (DR w)

L’incremento dell’indice di valutazione del potere fonoisolante, DR_w , ottenuto mediante l’applicazione di strati addizionali quali, per esempio, una controparete con interposto strato isolante, un pavimento galleggiante o un controsoffitto, si differenzia a seconda che venga coinvolta la trasmissione diretta o quella laterale e dipende inoltre dal tipo di struttura di base alla quale lo strato addizionale è applicato.

Nel metodo semplificato si assume che l’incremento non dipenda dalla tipologia di trasmissione del rumore e può essere valutato in due modi, sperimentalmente o analiticamente.

In laboratorio si ottiene col calcolo dalla differenza tra il valore dell’indice di valutazione del potere fonoisolante di una struttura base normalizzata costituita da un pannello omogeneo in calcestruzzo intonacato sulle due facce avente massa di $(250 \pm 50) kg/m^2$, al quale è stato aggiunto uno strato addizionale (pelle resiliente, soffitto sospeso, pavimento galleggiante) ed il valore dell’indice di valutazione del potere fonoisolante della medesima struttura base senza strato addizionale.

Analiticamente può anche essere calcolato in funzione della frequenza di risonanza, f_0 , del sistema “struttura di base - rivestimento” ed a seconda del suo valore l’indice può assumere valori sia positivi sia negativi.

Per strati addizionali il cui strato resiliente è fissato direttamente alla struttura di base senza montanti o correnti la frequenza di risonanza, f_0 , si ottiene dalla equazione seguente:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

s' è la rigidità dinamica dello strato isolante, in MN/m^3 ,

m_1 è la massa areica della struttura di base, in kg/m^2

m_2 è la massa areica dello strato addizionale, kg/m^2

Per strati addizionali non direttamente collegati alla struttura di base e realizzati con montanti o correnti, metallici o in legno, e con la cavità riempita mediante materiale poroso avente resistenza al flusso di aria $r > 5 \text{ kPas/ m}^2$, la frequenza di risonanza si calcola da:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ [Hz]}$$

dove:

d è lo spessore della cavità, in m;

m_1 è la massa areica della struttura di base, in kg/m^2

m_2 è la massa areica dello strato addizionale, kg/m^2

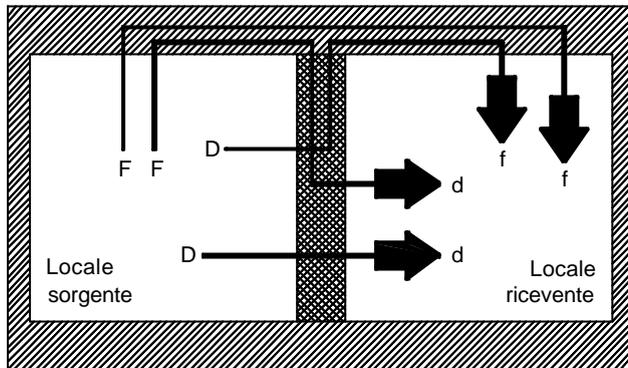
Dopo aver calcolato la frequenza di risonanza, l'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, DR_w , si ricava dalla seguente tabella, valida per strutture di base aventi l'indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w , compreso da 20 dB a 60 dB.

Frequenza di risonanza f_0	DR_w
$f_0 < 80$	$35 - R_w/2$
$80 < f_0 < 125$	$32 - R_w/2$
$125 < f_0 < 200$	$28 - R_w/2$
$200 < f_0 < 250$	-2
$250 < f_0 < 315$	-4
$315 < f_0 < 400$	-6
$400 < f_0 < 500$	-8
$500 < f_0 < 1600$	-10
$f_0 > 1600$	-5

NB: R_w è il valore riferito alla struttura di base.

Indice di potere fonoisolante apparente (in opera) R'_w di una partizione

Come già accennato, il potere fonoisolante apparente, al contrario di quello teorico, tiene conto delle trasmissioni per fiancheggiamento, ovvero della tipologia delle strutture connessa a quella in esame e come queste sono collegate.



Come si può vedere dall’immagine, valutare tutti i percorsi di trasmissione può risultare complesso; si tenga presente che normalmente sono 13, uno diretto e dodici laterali.

R'_w viene calcolato con la seguente formula, la quale considera separatamente i 13 percorsi di trasmissione sonora:

$$R'_w = -10 \log \left(10^{\frac{-R_{wDd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{wFf}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{wDf}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{wFd}}{10}} \right)$$

dove:

$R_{w,ij}$ è l’indice di valutazione del potere fonoisolante caratterizzante il percorso ij

n è il numero di lati dell’elemento divisorio (generalmente quattro)

Calcolo di $R_{w,ij}$

Ai fini del calcolo del potere fonoisolante apparente tra due ambienti adiacenti, si deve quindi determinare il valore dell’indice di valutazione di potere fonoisolante per ogni singolo percorso di trasmissione sonora, mediante la relazione:

$$R_{w,ij} = \frac{R_{w,i} + R_{w,j}}{2} + \Delta R_{w,ij} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S}{l_0 l_{ij}}$$

dove:

$R_{w,i}$ è l’indice di valutazione di potere fonoisolante della struttura “i” priva di elementi di rivestimento (pavimenti galleggianti, contropareti, controsoffitti) (dB)

$R_{w,j}$ è l’indice di valutazione di potere fonoisolante della struttura “j” priva di elementi di rivestimento (pavimenti galleggianti, contropareti, controsoffitti) (dB)

$\Delta R_{w,ij}$ è l’incremento dell’indice di valutazione di potere fonoisolante dovuto all’apposizione di strati di rivestimento lungo il percorso ij (pavimenti galleggianti, contropareti, controsoffitti)

K_{ij} è l’indice di riduzione delle vibrazioni del percorso $i-j$ (dB)

S è la superficie della partizione (m²)

l_0 è la lunghezza di riferimento pari a 1 m.

l_{ij} è la lunghezza del giunto tra le strutture ij considerate

Nel caso si stia analizzando il percorso diretto (Dd) la formula si riduce a:

$$R_{w,Dd} = R_{w,D} + \Delta R_{w,Dd}$$

Nota riguardante quali strutture laterali considerare

Nel caso di sfalsamenti di piano o non corrispondenza dei volumi dei locali in esame, la continuazione del divisorio in locali non direttamente investiti dal suono deve essere considerata come un elemento laterale.

Nota riguardante Rwi

Nel caso di strutture rivestite con strati addizionali, gli indici Rwi e Rwj da inserire nella formula per il calcolo di Rwij sono quelli propri delle strutture di base, privi di strati addizionali quali contropareti, controsoffitti o pavimenti galleggianti.

Nel caso di strutture laterali costituite da pareti doppie con intercapedine o da pareti con rivestimento leggero, gli indici Rwi e Rwj da inserire nella formula per il calcolo di Rwij sono quelli propri del solo strato interno.

Calcolo di DRw_{ij}

DRw_{ij} si calcola mediante la formula:

$$\Delta R_{w,ij} = \Delta R_{w,i} + \frac{\Delta R_{w,j}}{2} \quad \text{se } DR_{wi} < DR_{wj}$$

oppure

$$\Delta R_{w,ij} = \Delta R_{w,j} + \frac{\Delta R_{w,i}}{2} \quad \text{se } DR_{wi} > DR_{wj}$$

Dove:

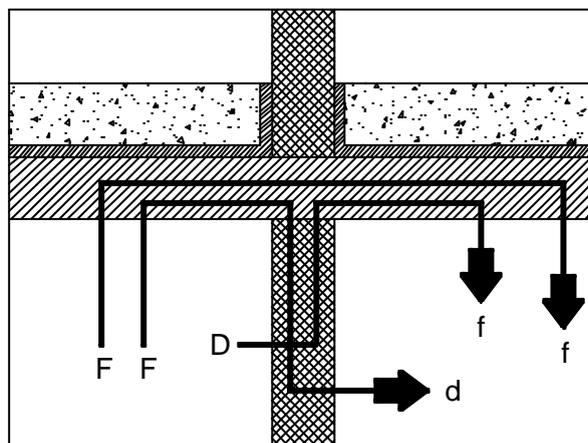
DRwi: incremento di Rw dovuto allo strato di rivestimento sul lato i

DRwj: incremento di Rw dovuto allo strato di rivestimento sul lato j

Ovviamente nel caso non sia presente alcuno strato di rivestimento DRw = 0

Nota riguardante DRw, ij

Gli strati di rivestimento da considerarsi nel calcolo di DRw, ij sono solo quelli che effettivamente vengono attraversati dal percorso del rumore preso in esame. Quindi ad esempio, nel caso si stiano considerando dei solai soprastanti a una parete divisoria, i pavimenti galleggianti del piano superiore non andranno considerati in quanto non influenti (v. figura).



Calcolo di Kij

L’indice di riduzione delle vibrazioni Kij, caratteristico del percorso i-j, può essere determinato dalla tabella seguente in funzione del tipo di giunto e del parametro M definito come:

$$M = \log \frac{m'_{li}}{m'_i}$$

dove:

m_{li} è la massa superficiale dell’elemento perpendicolare all’elemento “i” con esso connesso nel giunto considerato (kg/m²)

m'_i è la massa superficiale dell’elemento “i” nel percorso laterali i-j (kg/m²)

Nella tabella seguente sono riportati, in funzione di M, i valori di Kij in base al tipo di giunto ed al tipo di percorso considerati.

TIPO DI GIUNZIONE	TIPO DI TRASMISSIONE	Kij
Rigida a croce	Diritto	K13 = 8.7 + 17,1M + 5.7 M2
	Angolo	K12 = 8.7 + 5.7 M2
Rigida a t	Diritto	K13 = 5.7 + 14,1M + 5.7 M2
	Angolo	K12 = 5.7 + 5.7 M2
Struttura omogenea e facciata leggera	Diritto	K13= 5 + 10M K13 > 5 dB
	Angolo	K12 = 10 + 10 M
Strutture omogenee con strato desolidarizzante	Diritto su pareti con strato flessibile	K13 = 5.7 + 14,1M + 5.7 M2 + 12
	Diritto su parete omogenea	K24 = 3,7+14,1M+5,7M2 0 > K24 > -4 dB
	Angolo	K12 = 5.7 + 5.7 M2 + 6
Struttura omogenea con angolo	Angolo	K12= 15 M -3 K12 > -2 dB
Struttura omogenea con cambio di spessore	Diritto	K12= 5M2 - 5
Doppia parete leggera e struttura omogenea	Diritto su parete doppia	K13 = 10 + 20M K13 > 10 dB
	Diritto su parete omogenea	K24 = 3 + 14,1M + 5.7 M2 m'1/m'2 >3
	Angolo	K12 = 10 + 10 M
Pareti doppie leggere accoppiate	Diritto	K13 = 10 + 20M
	Angolo	K12 = 10 + 10 M

Il valore dell’indice Kij deve in ogni caso essere superiore o almeno uguale ad un valore minimo dato dalla:

$$K_{ij} = 10 \log \left[l_{ij} l_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right]$$

dove:

S_i è la superficie dell’elemento i nell’ambiente sorgente [mq]

S_j è la superficie dell’elemento j nell’ambiente ricevente [mq]

l_{ij} è la lunghezza del giunto ij [m]

l_0 è la lunghezza di riferimento pari a 1 m

Calcolo indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di facciata, R'_w

Il calcolo si esegue sostanzialmente valutando l’indice di potere fonoisolante di una partizione composta (parete opaca+serramenti), descritto nei paragrafi precedenti, corretto di un termine K che prende in considerazione le trasmissioni laterali.

$$R'_w = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{wi}}{10}} + \frac{A_0}{S_{tot}} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n,e,i}}{10}} \right) - K$$

dove:

R_{wi} è l'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento (i), (parete o serramento) in dB;

S_i è l'area dell'elemento (i), in m²;

$D_{n,e,i}$ è l'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente del "piccolo elemento"(i), in dB;

K è la correzione relativa al contributo della trasmissione laterale pari a 0, per elementi di facciata non connessi, e pari a 2 per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi.

Il contributo della trasmissione laterale è solitamente trascurabile. Se però elementi di facciata rigidi e pesanti (quali calcestruzzo o mattoni) sono collegati rigidamente ad altri elementi rigidi all'interno dell'ambiente ricevente, come pavimenti o pareti divisorie, la trasmissione laterale può contribuire alla trasmissione sonora totale. Ciò potrebbe diventare rilevante se sono richiesti elevati requisiti di isolamento dal rumore.

Di conseguenza, a favore di sicurezza, nei casi che comportano la presenza di elementi rigidi si può considerare la trasmissione laterale in maniera “globale” diminuendo il potere fonoisolante di 2 dB. ($K = 2$ dB). Altrimenti $K = 0$

Per quanto riguarda l'indice di valutazione del potere fonoisolante degli elementi di facciata o si assumono dati sperimentali disponibili in letteratura o si calcola con le modalità descritte per l'isolamento a rumori aerei. Attenzione a quest'ultimo metodo che può fornire dati molto approssimativi.

Correlazione tra isolamento acustico e potere fonoisolante

Potere fonoisolante (R) e isolamento acustico (D) sono legati dalla seguente formula matematica:

$$D = R + 10 \log \left(\frac{A_{ric}}{S} \right)$$

dove:

A_{ric} è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, in m²;

S è l'area del divisorio in esame in m²

Considerando la definizione di tempo di riverbero la formula è modificabile con:

$$D = R + 10 \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{S \cdot T_{60}} \right)$$

dove:

V è il volume dell'ambiente ricevente, in m³;

S è l'area del divisorio in esame in m²

T_{60} è il tempo di riverbero (alla frequenza considerata) dell'ambiente ricevente in secondi

Correlazione tra indice di isolamento acustico normalizzato e indice di potere fonoisolante

Dopo avere valutato, analiticamente o con dati sperimentali, i valori dell’indice del potere fonoisolante relativi ai singoli componenti, è possibile calcolare l’indice di valutazione dell’isolamento acustico per caratterizzare le prestazioni acustiche dell’edificio nella trasmissione per via aerea del suono tra ambienti adiacenti.

In particolare è possibile determinare l’indice di valutazione dell’isolamento acustico normalizzato rispetto all’assorbimento equivalente, $D_{n,w}$, oppure l’indice di valutazione dell’isolamento normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{nT,w}$, mediante le seguenti equazioni:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) \cong R'_w + 10 \log \left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S_s} \right)$$

$$D_{n,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{A_0}{S_s} \right) = R'_w + 10 \log \left(\frac{10}{S_s} \right)$$

dove:

V è il volume del locale ricevente, in m³;

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento per appartamenti, assunto pari a 0,5 s;

A_0 è l’area di assorbimento equivalente di riferimento per appartamenti, assunta pari a 10 m²;

S_s è l’area dell’elemento di separazione, in m².

Indice dell’isolamento acustico apparente di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverbero ($D_{2m,nT,w}$)

L’indice viene calcolato mediante la seguente relazione

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6 T_0 S_{tot}} \right)$$

dove:

R'_w è l’indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di facciata

ΔL_{fs} è il termine correttivo che quantifica l’influenza della forma della facciata

V è il volume interno del locale

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, assunto pari a 0,5 s

S_{tot} è la superficie di facciata vista dall’interno

L’influenza della forma della facciata nell’indice $D_{2m,nT,w}$, che può essere positiva o negativa, viene quantificata mediante il termine correttivo ΔL_{fs} , definito dalla seguente relazione:

$$\Delta L_{fs} = L_{1,2m} - L_{1,s} + 3 \text{ dB}$$

dove:

$L_{1,2m}$ è il livello medio di pressione sonora rilevato a 2 m dal piano di facciata;

$L_{1,s}$ è il livello medio di pressione sonora rilevato, effetto di riflessione incluso, sulla superficie esterna della facciata.

Nel seguente prospetto sono riportati alcuni esempi di ΔL_{fs} correlati alle caratteristiche di facciata, all’assorbimento acustico delle superfici di sottobalcone e al modo d’incidenza delle onde sonore.

La forma della facciata è definita dalla sua sezione verticale, in cui sono riportati solo gli schermi acustici significativi, ovvero, per esempio, i parapetti dei balconi a sezione piena, privi cioè di aperture rilevanti. L’assorbimento a_w si riferisce all’indice di valutazione dell’assorbimento acustico come definito dalla UNI EN ISO 11654.

Il valore massimo di $a_w = 0,9$ si applica anche qualora sia assente una superficie riflettente sopra la parte di facciata considerata.

	Facciata piana	Ballatoio			Ballatoio			Ballatoio			Ballatoio		
a_w	NSA	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9
$h < 1,5 \text{ m}$	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	NSA	1	NSA		
$1,5 \text{ m} = h = 2,5 \text{ m}$	0	NSA			-1	0	2	0	1	3	NSA		
$h > 2,5 \text{ m}$	0	NSA			1	1	2	2	2	3	3	4	6

	Balcone			Balcone			Balcone			Terrazza					
										Schermature aperte			Schermature chiuse		
a_w	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9	=0,3	0,6	=0,9
$h < 1,5 \text{ m}$	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	3	3	3
$1,5 \text{ m} = h = 2,5 \text{ m}$	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
$h > 2,5 \text{ m}$	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

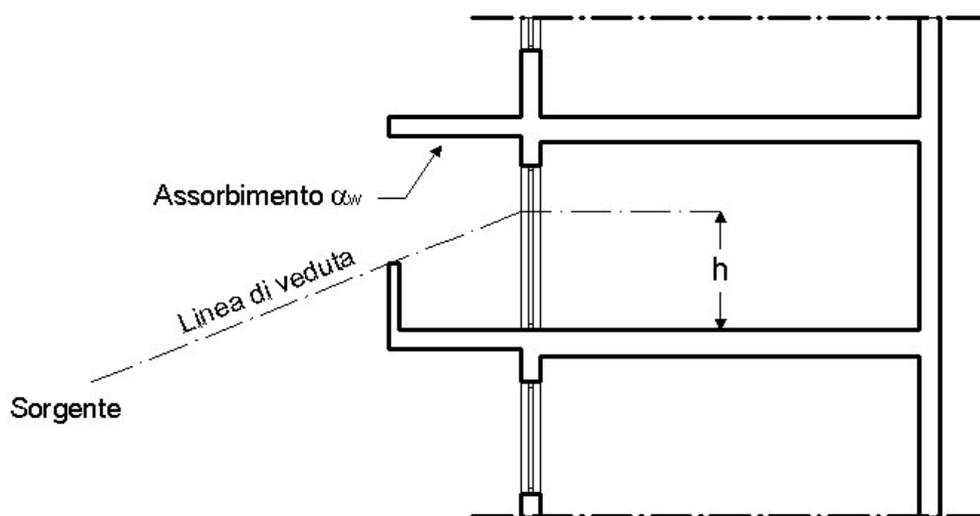
Legenda

Ballatoio: terrazza continua

Balcone: terrazza discontinua limitata lateralmente

NSA: Non si applica

La direzione dell’onda sonora incidente sulla facciata si caratterizza mediante l’altezza definita dalla intersezione tra la linea di veduta dalla sorgente ed il piano di facciata.



Rumore di calpestio

Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto all’assorbimento acustico

Il livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto all’assorbimento acustico (L_n) è calcolato nel seguente modo:

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0}$$

dove:

L_i è il livello medio di rumore misurato in più punti dell’ambiente ricevente quando nell’ambiente sovrastante è in funzione la macchina normalizzata di rumore di calpestio,

A è l’area equivalente di assorbimento acustico della camera ricevente

A_0 è l’area equivalente di riferimento pari a 10 mq.

Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto al tempo di riverbero

$$L_{nT} = L_i - 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

dove:

T è il tempo di riverberazione nell’ambiente ricevente

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0.5 s.

Indice del livello di rumore di calpestio L'_{nw}

L’indice L'_{nw} viene calcolato con la seguente formula

$$L'_{nw} = L_{nweq} - \Delta L_w + K$$

dove:

L_{nweq} è il livello di rumore da calpestio equivalente riferito al solaio “nudo”, privo dello strato di pavimento galleggiante [dB]

ΔL_w è l’indice di valutazione relativo alla riduzione dei rumori di calpestio dovuto alla presenza di pavimento galleggiante o rivestimento resiliente [dB]

K è la correzione da apportare per la presenza di trasmissione laterale di rumore. Il suo valore dipende dalla massa superficiale del solaio “nudo” e dalla massa superficiale delle strutture laterali [dB]

Il valore di L_{nweq} , relativo alla struttura priva di pavimento galleggiante, può essere ricavata da prove di laboratorio oppure calcolata con la seguente formula.

$$L_{nweq} = 164 - 35 \log \frac{m'}{m'_0}$$

dove:

m' è la massa superficiale del solaio “nudo” (kg/m^2)

m'_0 è la massa di riferimento pari a $1 \text{ kg}/\text{m}^2$

Tale formula è utilizzabile per solai di tipo “omogeneo” aventi massa per unità di area (m') compresa tra 100 e $600 \text{ kg}/\text{m}^2$.

I solai che vengono considerati come “omogenei” sono:

- Solai in calcestruzzo pieno gettati in opera
- Solai in calcestruzzo cellulare pieno, autoclavato
- Solai realizzati con mattoni forati
- Solai realizzati con “travetti e alveoli”
- Solai realizzati con “lastroni in calcestruzzo”
- Solai realizzati con travetti in calcestruzzo.

L’indice ΔL_w può essere ricavato da certificati di laboratorio conformi alle seguenti normative:

UNI EN ISO 140-6 nel caso di strati resilienti utilizzati sotto il massetto (pavimenti galleggianti). Si fa presente che per i “pavimenti galleggianti” si richiede che la prova venga effettuata su un campione di almeno 10 m^2 di massetto.

UNI EN ISO 140-8 nel caso di strati resilienti utilizzati come rivestimento (ad esempio rivestimenti in linoleum).

L’indice può anche essere ricavato analiticamente, per quanto riguarda i pavimenti galleggianti, mediante le seguenti formule.

$$\Delta L_w = 30 \log \frac{f}{f_0} + 3 \quad (\text{per pavimenti galleggianti realizzati con massetto in calcestruzzo})$$

$$\Delta L_w = 40 \log \frac{f}{f_0} - 3 \quad (\text{per pavimenti galleggianti realizzati con massetto a secco})$$

dove:

f è la frequenza di riferimento pari a 500 Hz

f_0 è la frequenza di risonanza del sistema massetto+strato resiliente, calcolata in base alla seguente relazione:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}}$$

dove:

s' è la rigidità dinamica dello strato resiliente interposto ottenuta secondo prove di laboratorio conformi alla UNI EN 29052-1; 1993 [MN/m³]

m' è la massa superficiale del massetto soprastante lo strato resiliente [kg/m²]

La rigidità dinamica, determinata ai sensi della UNI EN 29052, caratterizza il comportamento elastico di un materiale; minore è il suo valore, maggiori sono le prestazioni dell’isolante.

Questa dipende dalla tipologia di materiale, ed a parità di materiale dal suo spessore; maggiore è lo spessore dell’isolante, minore è la sua rigidità dinamica.

Nella scelta di un isolante anticalpestio, occorre prestare attenzione ad alcuni parametri, spesso cercandone un compromesso:

- rigidità dinamica (minore possibile)
- resistenza a compressione (maggiore possibile per sopportare i carichi distribuiti e concentrati a cui è sottoposto il massetto sovrastante)
- comprimibilità, ovvero l’attitudine di un materiale di perdere rigidità dinamica quando è sottoposto a carico (minore possibile)
- deflessione statica, ovvero riduzione di spessore (e rigidità dinamica) nel tempo, quando questo è costantemente caricato meccanicamente (come avviene in un solaio)
- impermeabilità all’acqua, al fine di evitare infiltrazioni della componente liquida del cemento durante il getto del massetto sovrastante; questa può essere tralasciata nel caso di adozione di massetti a secco.

Per quanto concerne i dati provenienti da laboratorio, ed in particolare quelli relativi a L_{nW} ed ΔL_{nW} , occorre prestare attenzione al loro utilizzo. Innanzitutto questi non rispecchieranno mai le prestazioni di un materiale in cantiere, in quanto il solaio di prova, in C.A. da 120 mm, è per la maggior parte diverso da quello effettivamente realizzato; come è diverso il massetto sovrastante. Per cui i dati certificati non dovranno essere utilizzati per la progettazione, ma esclusivamente per un primo confronto tra i materiali.

N.B. il confronto dovrà sempre tenere conto degli alti parametri prestazionali richiesti; per esempio un materiale con ΔL_{nW} elevato implica una sua rigidità dinamica bassissima; per cui occorrerà verificarne la resistenza a compressione e la comprimibilità, al fine di stabilire se le prestazioni in opera saranno effettivamente quelle certificate.

Calcolo di K

Il valore dell’indice K è ricavabile dalla seguente tabella. Esso dipende dalla massa superficiale del solaio “nudo”, privo di pavimento galleggiante e dalla massa superficiale media della pareti laterali.

La massa superficiale media delle pareti laterali si calcola facendo la media ponderata secondo la dimensione delle varie strutture, senza considerare le masse proprie di eventuali strati di rivestimento.

Indice K		Massa sup. media pareti laterali [kg/mq]								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
Massa sup. solaio nudo [kg/mq]	150	2	1	1	1	1	0	0	0	0
	200	2	1	1	1	1	0	0	0	0
	250	3	2	2	1	1	1	1	1	1
	300	3	2	2	1	1	1	1	1	1
	350	3	2	2	2	1	1	1	1	1
	400	3	3	2	2	2	1	1	1	1
	450	3	3	2	2	2	2	1	1	1
	500	3	3	2	2	2	2	1	1	1
	550	4	3	3	3	2	2	2	2	2
	600	4	3	3	3	2	2	2	2	2

E' opportuno ricordare che applicando il calcolo semplificato si ha una perdita di informazioni che possono portare a errori di valutazione anche notevoli; per cui questo metodo deve essere utilizzato con molta attenzione e per stimare, in prima analisi, il comportamento di una struttura.

Calcolo della resistenza al flusso d’aria

Per quanto concerne i materiali fonoassorbenti fibrosi i fattori che ne caratterizzano la resistenza al passaggio dell’aria sono la densità, la natura, la forma e la disposizione delle fibre nonché ovviamente il loro diametro.

Il modello di Bies e Hansen, originariamente studiato per i materiali fibrosi in fibra di vetro, permette di calcolare la resistenza specifica al passaggio dell’aria a partire dalla densità apparente.

La relazione generale con cui esprimere tale modello ha la forma seguente

$$r_1 = \frac{K_1 \cdot r^{(1+K_2)}}{d^2}$$

d = diametro delle fibre in micron [10^{-6} m]

r = densità apparente del materiale [Kg/m^3]

K_1 e K_2 = fattori dipendenti dalla natura forma e disposizione delle fibre

Il fattore K_1 è compreso tra 0.3 e 1.0 con valori che generalmente si avvicinano all’unità se le fibre sono orientate in modo casuale, mentre tendono a 0.3 se le fibre sono orientate perpendicolarmente alla direzione del flusso d’aria.

K_2 dipende dalla natura e dalla forma della sezione delle fibre il cui diametro può essere più o meno uniforme a seconda del processo di fabbricazione che oltre a determinarne il valore medio ne determina anche la distribuzione statistica.

Il processo produttivo determina anche la possibile presenza di materiale non in fibra responsabile di un aumento di densità senza aumento conseguente la resistenza specifica al passaggio d’aria.

Nel novero dei materiali fonoassorbenti fibrosi stanno sempre più diffondendosi quelli basati su fibre di poliestere, questi sono impiegati in alternativa a quelli di lana di roccia o di vetro specialmente quando è richiesta l’assenza di fibre disperse nell’ambiente.

L’applicazione del modello di Bies e Hansen a questa tipologia di materiali, mantenendo inalterati i valori originali di K_1 e K_2 , porta a valori calcolati di “ r_1 ” fortemente sotto stimati rispetto a quelli sperimentali.

Ciò è probabilmente dovuto alla grande differenza tra il diametro delle fibre di poliestere (33 μm) e quello delle fibre di vetro (1- 10 μm) su cui si basa il modello originale.

Per i materiali fonoassorbenti a base di fibra poliestere sono stati recentemente proposti alcuni modelli che, mantenendo inalterata la struttura originale della relazione di Bies e Hansen, ne modificano i coefficienti K_1 e K_2 .

	K_1	$K_2 * 10^9$
Poliestere	0,404	28,302
Bies - Hansen	0,530	3,18

Sempre relativamente ai materiali fonoassorbenti a base di fibra poliestere, è necessario ricordare come la tecnologia di fabbricazione ne influenzi notevolmente la resistenza al passaggio dell’aria. Per esempio materia prima insufficientemente aperta ne abbassi il valore come pure un procedimento di agugliatura in quanto crea piccoli canali a debole resistenza proprio in direzione perpendicolare alla sezione del materiale.

Tempo di riverberazione

Il tempo di riverberazione può essere calcolato utilizzando la seguente relazione algebrica (formula di Sabine):

$$T_R = 0,16 \frac{V}{A}$$

dove:

T_R = tempo di riverberazione alla frequenza definita (espresso in secondi);

V = volume dell’ambiente (espresso in metri cubi);

A = Area equivalente di assorbimento acustico dell’ambiente (espresso in metri quadrati).

L’assorbimento acustico rappresenta la capacità di un materiale di convertire l’energia di un’onda sonora incidente in una forma di energia diversa da quella acustica (di solito in calore).

Solitamente i materiali acusticamente assorbenti sono caratterizzati da una massa non elevata e da una struttura porosa o fibrosa (ad esempio: lane minerali e vegetali, fibre poliestere, resine melamminiche, poliuretani a celle aperte). In altri casi le caratteristiche di fonoassorbimento possono essere ottenute sfruttando la risonanza, in corrispondenza di certe frequenze, della struttura realizzata (pannelli risonanti, cavità di Helmholtz).

Il valore dell’assorbimento acustico è espresso da un numero puro, chiamato coefficiente di assorbimento acustico e rappresentato dal simbolo a . Tale coefficiente rappresenta, per ciascuna frequenza, il rapporto tra l’energia assorbita dall’unità di superficie del materiale assorbente in esame e l’energia assorbita nelle stesse condizioni dall’unità di superficie di un materiale completamente assorbente.

In un ambiente, l’area equivalente di assorbimento acustico è data dalla somma delle aree delle diverse superfici presenti nell’ambiente, ciascuna moltiplicata per il proprio coefficiente di assorbimento acustico.

Ad esempio, ipotizzando le seguenti superfici aventi i seguenti coefficienti di assorbimento acustico alla frequenza di 1 kHz:

- pavimento in ceramica: $a_1 = 0.02$,
- superficie intonacata: $a_2 = 0.11$,
- porta in legno: $a_3 = 0.08$,
- finestra con vetri: $a_4 = 0.12$,

in una stanza con:

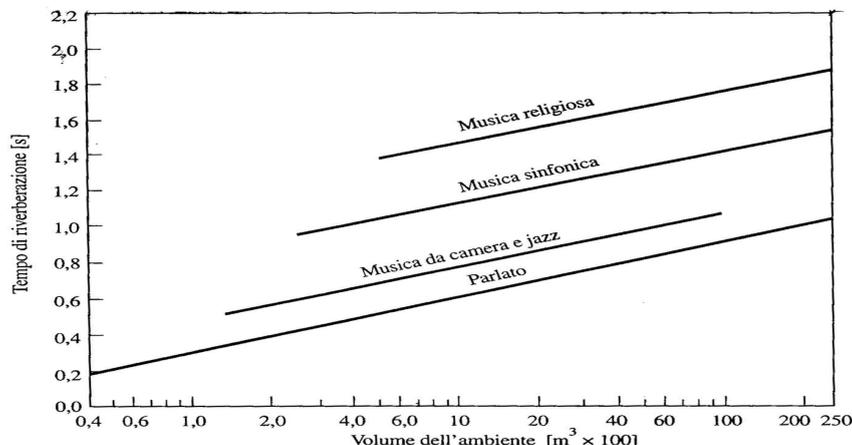
- 16 mq. di pavimento in ceramica,
- 53 mq. di superfici intonacate (pareti e soffitto, escluse porte e finestre),
- 2,2 mq. di porta in legno,
- 4 mq. di finestre

si avrà una superficie equivalente di assorbimento acustico alla frequenza di 1 kHz pari a:

$$A_{1 \text{ kHz}} = 16 \cdot 0.02 + 53 \cdot 0.11 + 2.2 \cdot 0.08 + 4 \cdot 0.12 = 0.32 + 5.83 + 0.18 + 0.48 = 6.81 \text{ mq.}$$

Tempo di riverberazione ottimale (T60 ott)

Il tempo di riverberazione ottimale per un locale può essere ipotizzato basandosi su diagrammi come quello riportato nella figura seguente, oppure utilizzando formule matematiche.



Tempi di riverberazione ottimale (500 Hz)

Per l’analisi di questa grandezza, la quale risulta essere comunque una caratteristica estremamente soggettiva, sono stati proposti vari algoritmi. Un possibile metodo di calcolo è il seguente.

Viene definito il T60 ottimale alla frequenza di 1000 Hz con la formula:

$$T_{60ott1000Hz} = k\sqrt[3]{V}$$

dove:

k coefficiente correttivo
V volume del locale [m3]

Il coefficiente “k” varia in base alla destinazione d’uso del locale:

Per locali destinati a conferenze (parlato) k = 0,30
Per locali destinati a cinema k = 0,40
Per locali destinati a rappresentazioni teatrali k = 0,50
Per locali destinati all’ascolto di musica (classica) k = 0,55

Si ricava il valore di T60 ottimale alle varie frequenze moltiplicando il valore a 1000 Hz con i seguenti coefficienti di proporzionalità.

Coefficienti di proporzionalità per il calcolo di T60 ottimale alle varie frequenze.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1,75	1,3	1,1	1	1,05	1,1

Considerato il fatto che l’adeguatezza del tempo di riverbero è una caratteristica molto soggettiva, i valori calcolati per il tempo di riverbero ottimale andranno utilizzati con le dovute cautele.

PARTE 5: LEGISLAZIONE E NORME TECNICHE

Legislazione

Di seguito viene riportato un elenco delle principali norme comunitarie e nazionali in materia di rumore.

Legislazione Comunitaria

[Raccomandazione 2003/613/CE del 06/08/03](#)

concernente le linee guida relative ai metodi calcolo aggiornati per il rumore dell'attività industriale, degli aeromobili, del traffico veicolare e ferroviario, e i relativi dati di rumorosità (G.U.C.E. 22/08/03)

[Direttiva 2003/10/CE del 06/02/03](#)

sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore) - (diciassettesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) (G.U.C.E. 15/02/03)

[Direttiva 2002/49/CE del 25/06/02](#)

sulla determinazione e gestione del rumore ambientale (G.U.C.E. 18/07/02)

[Direttiva 2002/44/CE del 25/06/02](#)

sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (vibrazioni) (sedicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) - Dichiarazione congiunta del Parlamento europeo e del Consiglio (G.U.C.E. 06/07/02)

[Direttiva 2002/30/CE del 26/03/02](#)

che istituisce norme e procedure per l'introduzione di restrizioni operative ai fini del contenimento del rumore negli aeroporti della Comunità. (G.U.C.E. 28/03/02)

[Direttiva 2000/14/CE del 08/05/00](#)

sul ravvicinamento delle legislazioni degli stati membri concernenti l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto. (G.U.C.E. 03/07/00)

Legislazione nazionale

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 30 marzo 2004 , n. 142

Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare, a norma dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447. (in G.U. n. 127 del 1° giugno 2004 - in vigore dal 16 giugno 2004)

[LEGGE 31 ottobre 2003, n.306](#)

Disposizioni per l'adempimento di obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia alle Comunità europee. Legge comunitaria 2003. (G.U. n. 266 del 15/11/03 - Suppl. Ordinario n. 173) - Art. 14 Delega al Governo per l'adeguamento della normativa nazionale alle disposizioni comunitarie in materia di tutela dall'inquinamento acustico.

[DECRETO LEGISLATIVO 4 settembre 2002, n.262](#)

Attuazione della direttiva 2000/14/CE concernente l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto. in G.U. n° 273 del 21/11/02 - supp. ord. n° 214

[Legge 179 del 13/07/02](#)

Disposizioni in materia ambientale in G.U. n° 189 del 13/08/02

[DM Giustizia 30/05/02](#)

Adeguamento dei compensi spettanti ai periti, consulenti tecnici, interpreti e traduttori per le operazioni eseguite su disposizione dell'autorità giudiziaria in materia civile e penale. in G.U. n° 182 del 05/08/02

[DM Ambiente 23/11/01](#)

Modifiche all'allegato 2 del decreto ministeriale 29 novembre 2000 - Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore, in GU n. 288 del 12/12/01

[DPR 03/04/01 n. 304](#)

Regolamento recante disciplina delle emissioni sonore prodotte nello svolgimento delle attività motoristiche, a norma dell'articolo 11 della legge 26 novembre 1995, n. 447 in GU n. 172 del 26/07/01

[DM Ambiente 29/11/00](#)

Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore in GU n. 285 del 06/12/00.

[DM Ambiente 03/12/99](#)

Procedure antirumore e zone di rispetto negli aeroporti in GU n. 289 del 10/12/99.

[DPR 09/11/99 n. 476](#)

Regolamento recante modificazioni al decreto del Presidente della Repubblica 11 dicembre 1997, n. 496, concernente il divieto di voli notturni.

[DM Ambiente 20/05/99](#)

Criteri per la progettazione dei sistemi di monitoraggio per il controllo dei livelli di inquinamento acustico in prossimità degli aeroporti nonché criteri per la classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico in GU n. 225 del 24/09/99.

[DPCM 16/04/99 n.215](#)

Regolamento recante norme per la determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo e nei pubblici esercizi in GU n. 153 del 02/07/99.

[LEGGE 09/12/98, n. 426](#)

Nuovi interventi in campo ambientale in GU n. 291 del 14/12/98.

[DPR 18/11/98, n. 459](#)

Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario in GU n. 2 del 04/01/99.

[DPCM 31/03/98](#)

Atto di indirizzo e coordinamento recante criteri generali per l'esercizio dell'attività del Tecnico competente in acustica, ai sensi dell'art.3, comma 1, lettera b), e dell'art.2, commi 6,7 e 8, della legge 26 ottobre 1995, n.447 "Legge quadro sull'inquinamento acustico" in GU n. 120 del 26/05/98.

[DM Ambiente 16/03/98](#)

Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico in GU n. 76 del 01/04/98.

[DPCM 19/12/97](#)

Proroga dei termini per l'acquisizione ed installazione delle apparecchiature di controllo e registrazione nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo di cui al DPCM 18.09.97 in GU n. 296 del 20/12/97.

[DPR 11/12/97 n.496](#)

Regolamento recante norme per la riduzione dell'inquinamento acustico prodotto dagli aeromobili civili in GU n. 20 del 26/01/97.

[DPCM 05/12/97](#)

Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici in GU n. 297 del 22/12/97.

[DPCM 14/11/97](#)

Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore in GU n. 280 del 01/12/97.

[DM Ambiente 31/10/97](#)

Metodologia del rumore aeroportuale in GU n. 267 del 15/11/97.

[DPCM 18/09/97](#)

Determinazione dei requisiti delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante in GU n. 233 del 06/10/97.

[DM Ambiente 11/12/96](#)

Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo in GU n. 52 del 04/03/97.

[LEGGE 26/10/95, n. 447.](#)

Legge quadro sull'inquinamento acustico in GU n. 254 del 30.05.95 - suppl. ord. n. 125

[DPCM 01/03/91](#)

Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno in GU n. 57 del 08/03/91

[D.Lgs. 15 Agosto 1991 - n°277](#)

Attuazione delle direttive n.80/1107/CEE, n.82/605/CEE, n.83/477/CEE e n.88/642/CEE, in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art.7 della Legge 30 Luglio 1990 n.212 in GU n. 200 del 27.08.91 - suppl. ord. n.53

Norme tecniche

Di seguito viene riportato un elenco delle principali norme tecniche in materia di acustica edilizia.

Norme per la progettazione

UNI EN 12354 "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti"

Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti

Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti

Parte 3: Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea

Progetto di norma U20001230: “Acustica in edilizia. Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale” (in fase di analisi) (maggio 2005)

Norme per la verifica in opera o in laboratorio dei requisiti acustici

UNI EN ISO 140 Acustica - Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 1 - Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale;

Parte 3 - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio;

Parte 4 - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti;

Parte 5 - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate;

Parte 6 - Misurazioni in laboratorio dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai;

Parte 7 - Misurazioni in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai;

Parte 8 - Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato.

Parte 12 - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico dai rumori trasmessi per via aerea e dal calpestio tra due ambienti attraverso un pavimento sopraelevato.

UNI EN 20140 Acustica - Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 2 - Determinazione, verifica e applicazione della precisione dei dati;

Parte 9 - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea da ambiente a ambiente coperti dallo stesso controsoffitto;

Parte 10 - Misura in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di piccoli elementi di edificio.

UNI EN ISO 717 Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 1 - Isolamento di rumori aerei; (Calcolo degli Indici di valutazione)

Parte 2 - Isolamento di rumore di calpestio. (Calcolo degli Indici di valutazione)

UNI EN 29052-1 Acustica - Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali

UNI EN 12431:2000

Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore degli isolanti per pavimenti galleggianti

UNI EN 1606:1999

Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione

UNI EN 29053, Acustica – Materiali per applicazioni acustiche – Determinazione della resistenza al flusso d’aria.

UNI EN ISO 11654 Acustica - Assorbitori acustici per l'edilizia - Valutazione dell'assorbimento acustico

UNI EN ISO 10534-1:2001

Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo con le onde stazionarie

UNI EN ISO 10534-2:2001

Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo della funzione di trasferimento

UNI EN ISO 3382 Acustica – Misurazione del tempo di riverberazione di ambienti con riferimento ad altri parametri acustici