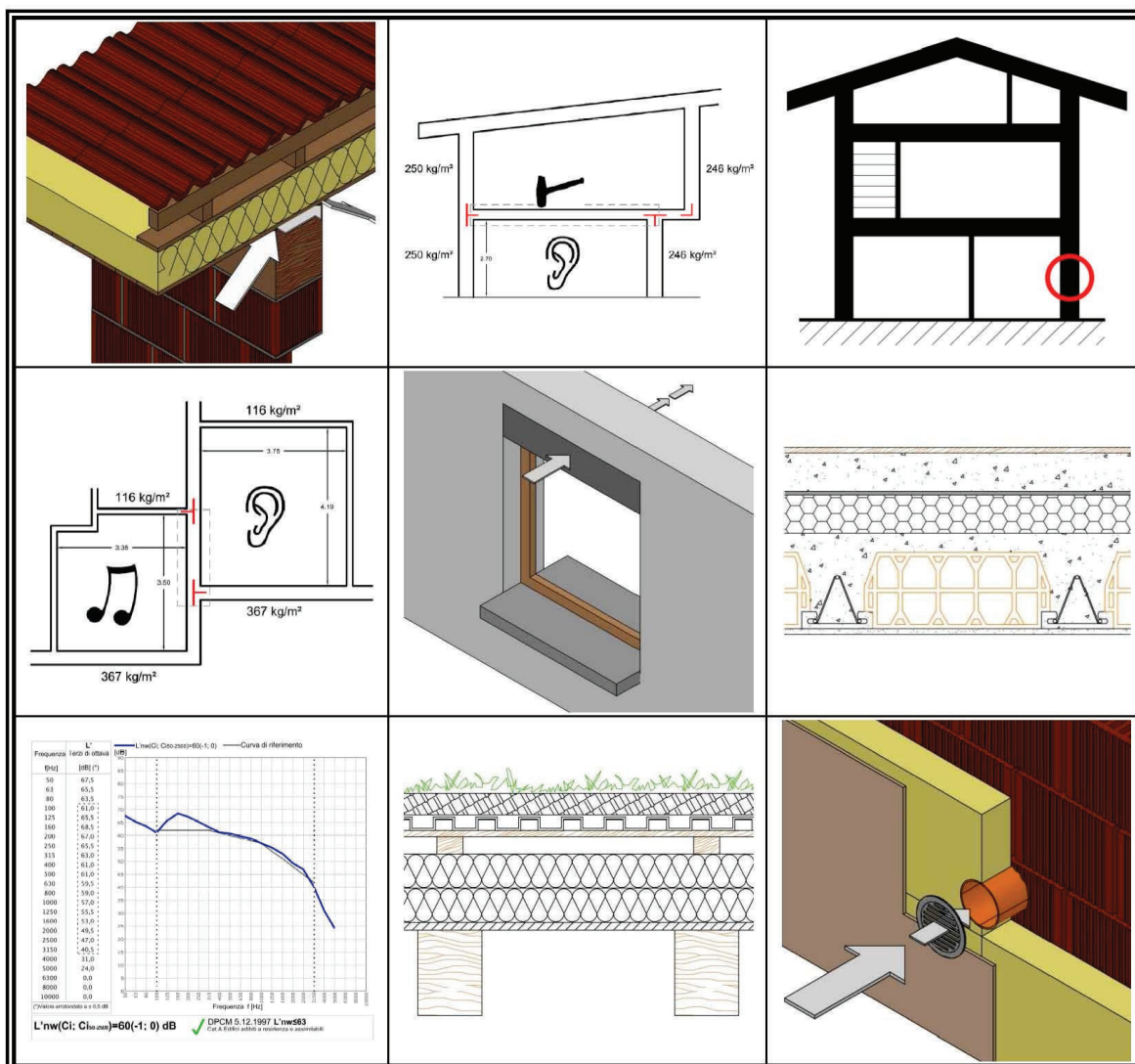


CATALOGO DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI PER L'ACUSTICA IN EDILIZIA



Editore:

Provincia autonoma di Bolzano / Alto Adige
Agenzia provinciale per l'ambiente – Ufficio aria e rumore
Bolzano 2014

Per ulteriori informazioni:

Ufficio aria e rumore
Tel.: 0471 411820
Internet: www.provincia.bz.it/agenzia-ambiente
Email: uar@provincia.bz.it

Le schede iniziali di cui è composto il catalogo ed il presente manuale per l'acustica in edilizia sono state messe a disposizione dalla TBZ Centro di Fisica Edile – Bolzano (Arch. Dott. Bernhard Oberrauch, Per. Ind. Alberto Piffer, Dott. Ing. Elena Resenterra), e sono il frutto di anni di esperienza, misurazioni e ricerca.

Tutti i diritti relativi al Catalogo degli elementi costruttivi sono di proprietà della Provincia autonoma di Bolzano. Esso può essere liberamente scaricato ed utilizzato a condizione che i suoi contenuti non vengano variati e contraffatti e non vengano utilizzati o diffusi a scopo di lucro. Alle violazioni si applicano le sanzioni previste dalla legge 22 aprile 1941, n. 633.

Le informazioni contenute nelle schede tecniche del Catalogo degli elementi produttivi non hanno alcun valore legale o di prova in fase di giudizio e non impegnano in alcun modo l'Agenzia provinciale per l'ambiente.



Che rumore fastidioso!

Distoglie la nostra concentrazione o ci impedisce di colloquiare tranquillamente; ci infastidisce mentre dormiamo o vogliamo rilassarci ed ha effetti negativi anche sulla nostra salute. Negli ultimi decenni il rumore è diventato uno dei principali disturbi ambientali.

Aumentano le persone che si lamentano per il rumore e, come prevedibile, il rumore del traffico è al primo posto di questa fastidiosa classifica, seguito dal rumore del vicinato. Perciò diventa sempre più importante applicare misure atte a prevenire problemi futuri, che permettano di ridurre ed attenuare la propagazione dei rumori.

L'agenzia provinciale per l'ambiente ha affrontato questa tematica ed ha sviluppato questo catalogo innovativo.

CasaClima ha introdotto in Alto Adige nuovi criteri di valutazione dell'efficienza energetica degli edifici. Garantire una temperatura degli ambienti e delle superfici adeguata è importante ma un ulteriore presupposto per rendere le nostre abitazioni più confortevoli è la schermatura dai rumori. Il desiderio di abitare in un ambiente tranquillo e silenzioso assume comprensibilmente sempre maggior rilievo.

Con questo Catalogo degli elementi costruttivi, l'Agenzia provinciale per l'ambiente desidera dare un aiuto pratico a progettisti e costruttori. Il catalogo contiene numerose soluzioni costruttive che permettono di ridurre la propagazione sonora ma è importante sottolineare che per ogni tipologia costruttiva sono state eseguite misure di rumore post operam. Naturalmente ciò assume maggior rilievo se si pensa che ad opera ultimata è difficile ovviare ad eventuali errori di progettazione o realizzazione.

Il catalogo vuol essere uno strumento di libero uso ed obiettivo dell'Agenzia è di integrarlo con ulteriori soluzioni costruttive testate e misurate dai progettisti e dai costruttori.

L'isolamento acustico degli edifici potrebbe diventare un ulteriore parametro qualitativo dello standard CasaClima, un passo importante che ci permette di raggiungere un obiettivo importante: migliorare la qualità abitativa delle nostre case!

Richard Theiner

Assessore allo Sviluppo del territorio, Ambiente ed Energia



CATOLOGO DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI PER L'ACUSTICA IN EDILIZIA

Contenuto

Come leggere il catalogo.....	3
Scheda tecnica - pagina 1: risultati sintetici, stratigrafia, geometria ambienti di prova	4
Scheda tecnica – pagina 2: il diagramma e l'indice mononumerico di valutazione.....	6
Termini e definizioni.....	8
Principi base di acustica.....	12
Il suono: definizione.....	12
Propagazione del suono all'interno degli edifici.....	16
Assorbimento acustico e potere fonoisolante.....	17
Il tempo di riverberazione.....	18
Il ruolo dei giunti.....	19
Strategie per un buon abbattimento acustico.....	22
Qualità acustica degli ambienti confinati: il controllo della riverberazione.....	23
Trasmissione del rumore per via aerea.....	24
Il potere fonoisolante e il potere fonoisolante apparente.....	24
Isolamento acustico da rumori aerei.....	25
La determinazione del potere fonoisolante apparente.....	27
La determinazione dell'indice mononumerico di valutazione del potere fonoisolante apparente Rw ed R'w.....	29
Meccanismo di propagazione del rumore aereo.....	30
Pareti ed altri elementi costruttivi omogenei.....	30
Pareti doppie.....	31
Principali errori di realizzazione.....	33
Isolamento acustico di facciata.....	37
La determinazione dell'indice mononumerico di valutazione dell'isolamento acustico di facciata D2m,nT,w	38
Fattori che influenzano la prestazione complessiva della facciata.....	39
L'attenuazione del suono per assorbimento: il silenziatore.....	41
Principali errori di realizzazione.....	43
Considerazioni finali sull'isolamento di facciate.....	45
Trasmissione del rumore per via strutturale.....	46
Livello di rumore da calpestio.....	46
La determinazione del livello normalizzato del rumore da calpestio.....	48
La determinazione dell'indice di valutazione mononumerico del livello normalizzato di calpestio Ln,w e L'n,w.....	50
Meccanismo di propagazione del rumore di calpestio.....	51



La rigidità dinamica.....	52
Principali errori di realizzazione.....	53
Rumorosità degli impianti.....	55
Impianti idraulici.....	55
Sistemi di elevazione.....	56
Impianti di riscaldamento.....	57
Impianti di ventilazione meccanica.....	58
Impianti di condizionamento.....	58
Leggi e norme.....	59
La legge in vigore.....	59
La norma tecnica in vigore.....	59
Modelli di calcolo previsionale.....	61
Secondo la UNI EN 12354-1.....	61
Secondo la UNI EN 12354-2.....	61
Secondo la UNI EN 12354-3.....	62
Software commerciali.....	62

Come leggere il catalogo

La Provincia Autonoma di Bolzano ha realizzato il Catalogo degli elementi costruttivi per l'acustica in edilizia con l'obiettivo di mettere a disposizione, per il libero uso, uno strumento che sia di facile comprensione e consultazione per progettisti, tecnici acustici e per chi opera in cantiere. I risultati illustrati in questo catalogo servono per dare un orientamento, ma molto dipenderà dalla corretta progettazione ed esecuzione dell'opera. Per questo si consiglia di rivolgersi a tecnici esperti in materia di acustica in edilizia.

Le prove raccolte e contenute nel catalogo sono tutte riferite a prove in opera. Questo tipo di approccio ha da un lato il vantaggio di fornire dei dati realistici rispetto alle prestazioni attese dalle strutture in quanto si tiene conto delle trasmissioni laterali, degli errori e delle incertezze legate alla fase di realizzazione in cantiere. Per contro vi è una inevitabile incertezza legata alla composizione effettiva delle strutture, in particolare per quanto riguarda le masse di ciascun componente. Infatti le masse dei materiali possono differire in maniera sensibile tra quanto previsto da progetto e quanto effettivamente realizzato. Nonostante la cura e l'attenzione con cui sono stati raccolti tutti i dati, non è stato possibile azzerare tale imprecisione e occorre quindi tenerne conto nella valutazione critica di ciascuna scheda.

Nei casi in cui i difetti realizzativi erano identificabili sono stati messi in evidenza per confronto con analoga struttura realizzata correttamente. Lo scopo di tale confronto è quello di far comprendere come nella realizzazione di qualsiasi elemento (solai, facciate o pareti) possano essere commessi errori talvolta macroscopici che vanno ad influenzare pesantemente la prestazione complessiva.

Inizialmente il catalogo è composto da oltre 150 schede che presentano varie soluzioni costruttive. Gli elementi costruttivi descritti sono solai, pareti tra unità abitative, pareti divisorie tra locali con diverse destinazioni d'uso, facciate e tetti. Sono state valutate sia costruzioni tradizionali massicce in muratura che costruzioni in legno e a secco.

Accanto alle schede relative alle soluzioni che soddisfano i requisiti minimi previsti dal D.P.C.M. 05.12.1997, sono stati inseriti, a titolo comparativo, alcuni risultati di prove condizionate da evidenti errori commessi in fase di progettazione o di realizzazione.

Il catalogo è concepito per essere ampliato ed aggiornato sulla base delle nuove soluzioni tecniche e di mercato.

I tecnici in acustica ed i progettisti che hanno misurato elementi costruttivi non ancora catalogati, realizzati utilizzando materiali e tecniche di posa in opera diverse da quelle già esaminate, sono invitati a completare una nuova scheda che, previa approvazione dell'Ufficio aria e rumore dell'Agenzia provinciale per l'ambiente, andrà ad implementare il catalogo stesso.

Scheda tecnica - pagina 1: risultati sintetici, stratigrafia, geometria ambienti di prova

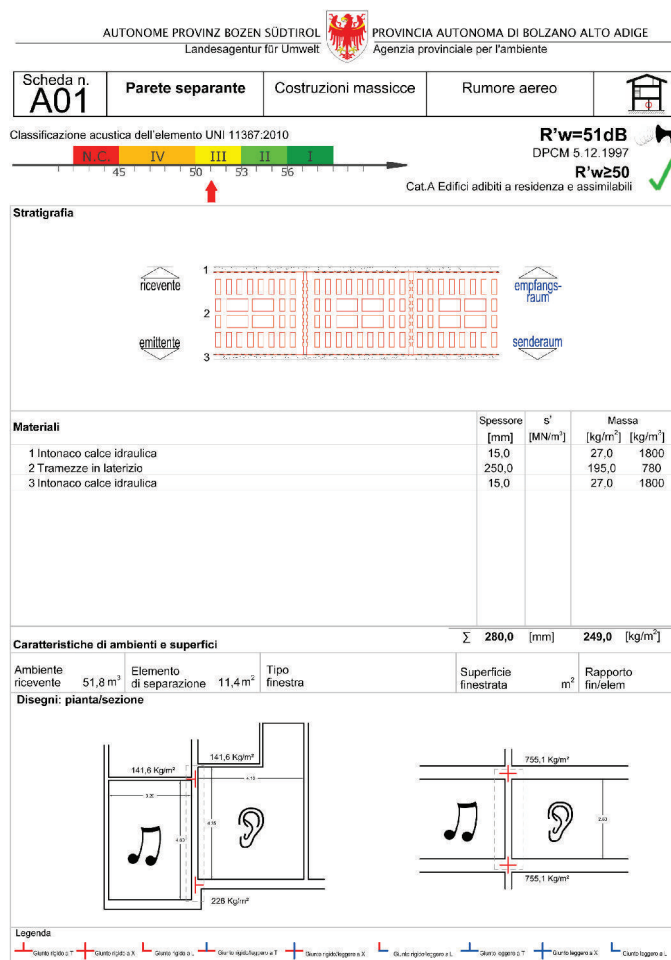


Fig. 1: pagina 1 della scheda. Fonte: TBZ S.r.l.

L'intestazione della scheda permette la rapida individuazione della prova sulla base di un codice univoco (es: A01) e della distinzione per elemento costruttivo, tipologia costruttiva e tipo di prova. Inoltre viene messo in evidenza il risultato complessivo della prova (Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente R'_w) e la sua classificazione secondo la norma UNI 11367, per la quale è stata ripresa la scala cromatica già impiegata per la classificazione energetica.

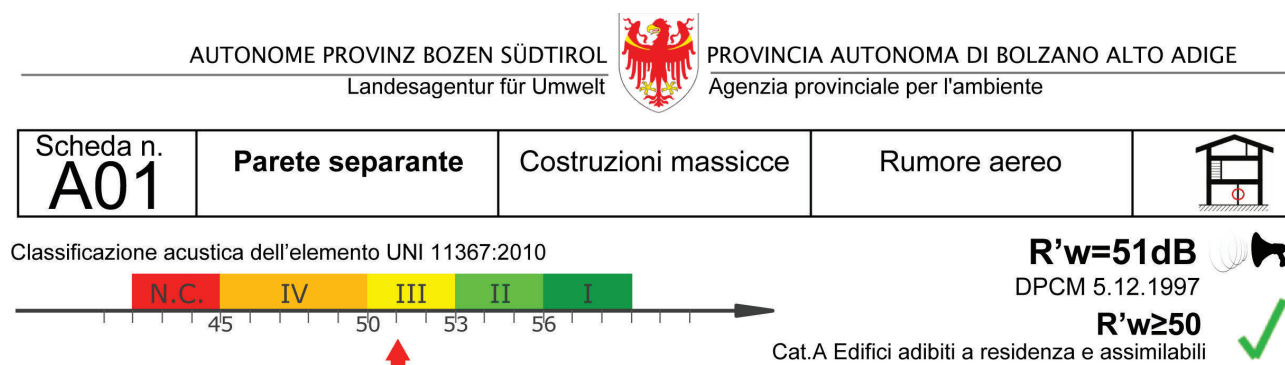


Fig. 2: intestazione pagina 1 della scheda. Fonte: TBZ S.r.l.

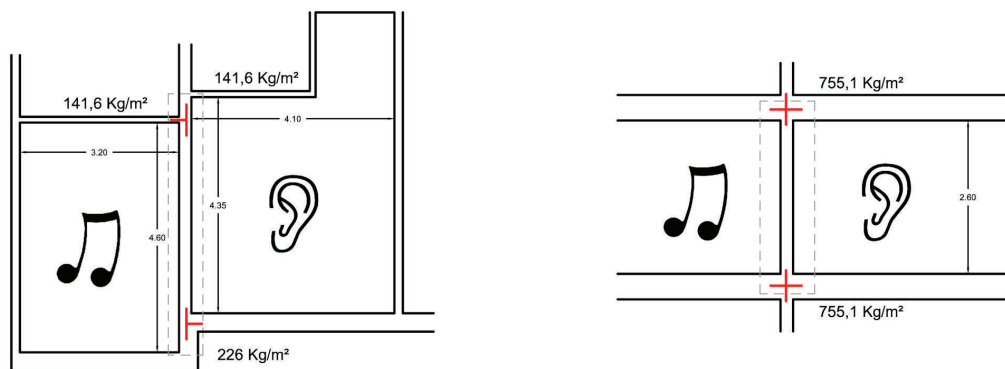
Nella parte centrale viene descritta, graficamente e nel dettaglio, la stratigrafia dell'elemento testato.

Stratigrafia

The diagram illustrates the stratigraphy of a wall. It is divided into three horizontal layers, numbered 1, 2, and 3 from top to bottom. Layer 1 is the top layer, labeled 'ricevente' (receiving) on the left and 'empfangsraum' (receiving room) on the right. Layer 2 is the middle layer, labeled 'emittente' (emitting) on the left and 'senderraum' (emitting room) on the right. Layer 3 is the bottom layer, also labeled 'emittente' (emitting) on the left and 'senderraum' (emitting room) on the right. The diagram shows a cross-section of a wall with a grid of vertical and horizontal lines representing the structure.

La sezione inferiore è dedicata alla rappresentazione grafica degli ambienti di prova. Vengono riportate le dimensioni principali, le masse indicative relative agli elementi laterali e il tipo di giunto realizzato tra i vari elementi.

Disegni: pianta/sezione



Legenda

Giunto rigido a T
 Giunto rigido a X
 Giunto rigido a L
 Giunto rigido/leggero a T
 Giunto rigido/leggero a X
 Giunto rigido/leggero a L
 Giunto leggero a T
 Giunto leggero a X
 Giunto leggero a L

Fig. 4: parte inferiore pagina 1 della scheda. Fonte: TBZ S.r.l.

Scheda tecnica – pagina 2: il diagramma e l'indice mononumerico di valutazione

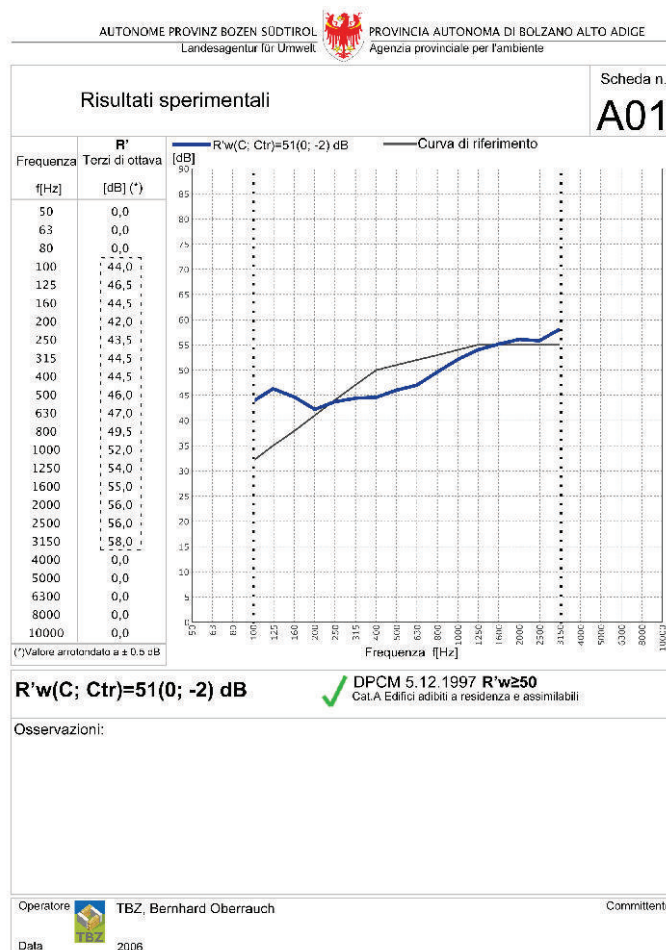


Fig. 5: pagina 2 della scheda. Fonte: TBZ S.r.l.

Il diagramma riassume i risultati delle misure eseguite alle varie frequenze, rappresentate con la curva di riferimento, dalla quale si ottiene alla fine l'indice mononumerico dell'isolamento acustico ed i termini di adattamento spettrale C , C_{tr} e C_L , nel rispetto delle norme UNI 717 parte 1 e parte 2.

Le correzioni di spettro C e C_{tr} in Italia, Germania ed in Austria non vengono ancora applicate. In altri paesi invece vengono adottate per la verifica del rispetto dei limiti normativi.

Con il diagramma possono essere identificate anche le eventuali frequenze alle quali l'elemento costruttivo ha delle lacune (causate ad esempio da effetti di risonanza, discontinuità, collegamenti rigidi). Inoltre, elementi caratterizzati dallo stesso indice possono avere comportamenti acustici diversi, a seconda che prevalgano frequenze basse, medie o alte.

Occorre ricordare che le componenti a frequenza molto bassa (sotto i 100 Hz) non vengono considerate per il calcolo dell'indice, anche se queste sono percepite dall'uomo. Dove disponibili, i dati relativi alle basse frequenze sono stati inclusi nelle schede.

Nello spazio “osservazioni” vengono riportate le eventuali annotazioni utili per spiegare dettagli, problemi, carenze non facilmente illustrabili attraverso tabelle, disegni e grafici contenuti nella scheda.

Infine, nell'ultimo riquadro in basso sono riportati i riferimenti di chi ha effettuato le misurazioni e l'anno di esecuzione. Per stimolare la messa a disposizione di ulteriori misurazioni ed ampliare il numero delle schede è possibile indicare, in modo facoltativo, il committente delle misurazione.

Termini e definizioni

Nella tabella che segue sono riassunti e spiegati i principali termini ed indici di valutazione considerati all'interno del catalogo:

Parametro	Simbologia	Unità di misura	Descrizione
Periodo	T	s	Tempo necessario ad un'onda sonora per compiere una oscillazione completa.
Lunghezza d'onda	λ	m	Distanza percorsa da un'onda sonora nel periodo T .
Frequenza	f	Hz	Il numero di volte in cui un fenomeno di tipo periodico si ripete nell'unità di tempo. Le varie frequenze vengono percepite dall'orecchio umano come suoni gravi, medi o acuti.
Frequenza di risonanza	f_0	Hz	Frequenza propria di vibrare di un elemento che dipende dalle sue caratteristiche di dimensione, massa per unità di superficie e di rigidità. L'elemento costruttivo dovrebbe essere dimensionato in modo tale che la frequenza di risonanza sia al di sotto delle frequenze di maggior interesse.
Frequenza di coincidenza	f_c	Hz	Frequenza alla quale avviene il fenomeno della coincidenza: l'onda sonora colpisce un elemento e lo pone in vibrazione. Quando l'onda di pressione sonora incidente coincide con quella delle onde flessionali proprie dell'elemento si ha un calo di isolamento. L'elemento costruttivo dovrebbe essere dimensionato in modo tale che la frequenza di coincidenza sia sopra le frequenze di maggior interesse.
Pressione sonora	P	Pa	Ampiezza dell'onda sonora.
Pressione di riferimento	P_0	Pa	Pressione sonora pari a 20 μ Pa. Definita come la pressione soglia udibile dall'orecchio umano (pari a zero decibel).
Decibel	dB	dB (ref. 20 μ Pa)	Rappresentazione numerica del fenomeno sonoro. Si ricava dal rapporto logaritmico fra la pressione sonora dell'evento P e la pressione di riferimento P_0 . Si tratta di una convenzione per ottenere dati numerici di facile raffronto ed utilizzo.
Livello di pressione sonora in un ambiente	L	dB (ref. 20 μ Pa)	Livello medio spazio-temporale del fenomeno sonoro espresso in decibel.
Livello di pressione sonora nell'ambiente sorgente	L_1	dB (ref. 20 μ Pa)	Livello di pressione sonora presente nell'ambiente sorgente, separato dall'ambiente ricevente dall'elemento sottoposto a prova.
Livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente	L_2	dB (ref. 20 μ Pa)	Livello di pressione sonora presente nell'ambiente ricevente separato dall'ambiente sorgente dall'elemento sottoposto a prova.

Parametro	Simbologia	Unità di misura	Descrizione
Livello di pressione sonora a 2 metri	$L_{1,2m}$	dB (ref. 20 μ Pa)	Livello di pressione sonora presente ad una distanza di 2 metri dalla facciata.
Coefficiente di assorbimento acustico apparente	α	-	Rapporto tra l'energia sonora effettivamente assorbita dall'elemento più quella trasmessa attraverso l'elemento stesso e l'energia sonora incidente. r indica l'energia riflessa: $\alpha+r=1$; Il coefficiente di assorbimento acustico è compreso tra 0 (assorbimento nullo) e 1 (assorbimento totale).
Area equivalente di assorbimento acustico	A	m ²	Prodotto della superficie degli elementi che compongono un ambiente per il relativo coefficiente di assorbimento acustico apparente α .
Area equivalente di assorbimento acustico di riferimento	A_0	m ²	Area di assorbimento di riferimento pari a 10 m ² .
Volume	V	m ³	Volume di un ambiente.
Sorgente	S	-	Sistema elettroacustico o meccanico per la generazione di un segnale di prova.
Coefficiente di riflessione	r	-	Parte dell'energia sonora incidente che viene riflessa dal materiale.
Coefficiente di assorbimento	δ	-	Parte dell'energia sonora incidente che viene assorbita dal materiale.
Coefficiente di trasmissione	τ	-	Parte dell'energia sonora incidente che viene trasmessa attraverso il materiale.
Tempo di riverberazione	T_{60}	s	È il tempo necessario al decadimento di 60 dB di un suono rispetto al livello iniziale. Normalmente viene misurato il decadimento di 20 o 30 dB per poi calcolare il decadimento di 60 dB.
Tempo di riverberazione di riferimento	T_0	s	Tempo di riferimento per il confronto con il tempo di riverberazione effettivamente misurato. Per ambienti di medio/piccole dimensioni (tipicamente ambienti residenziali arredati) il tempo T_0 è assunto pari a 0,5 secondi.
Indice di riduzione delle vibrazioni	K_{ij}	dB (ref. 20 μ Pa)	Grandezza che definisce la trasmissione di potenza vibratoria attraverso un determinato giunto tra elementi strutturali.
Densità di massa	m	kg/m ³	Massa per unità di volume.
Massa superficiale	m'	kg/m ²	Massa per unità di area.
Isolamento acustico	D	dB (ref. 20 μ Pa)	Differenza tra i livelli L_1 e L_2 misurati in due ambienti distinti separati dall'elemento sottoposto a prova.
Isolamento acustico normalizzato	D_n	dB (ref. 20 μ Pa)	Valore di isolamento acustico D normalizzato rispetto all'area di assorbimento equivalente A .

Parametro	Simbologia	Unità di misura	Descrizione
Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione	$D_{n,T}$	dB (ref. 20 µPa)	Valore di isolamento acustico D normalizzato rispetto al tempo di riverberazione T_{60} .
Potere fonoisolante	R	dB (ref. 20 µPa)	Differenza tra i livelli L_1 e L_2 normalizzata rispetto all'area di assorbimento equivalente A ed alla superficie dell'elemento sottoposto a prova in laboratorio. Tale indice non tiene conto delle trasmissioni laterali ma indica la capacità di isolamento del solo elemento.
Indice del potere fonoisolante	R_w	dB (ref. 20 µPa)	Valore unico del potere fonoisolante misurato in laboratorio e riferito a 500 Hz.
Potere fonoisolante apparente	R'	dB (ref. 20 µPa)	Differenza tra i livelli L_1 e L_2 normalizzata rispetto all'area di assorbimento equivalente A ed alla superficie dell'elemento sottoposto a prova in condizioni reali. Tale indice tiene conto delle trasmissioni laterali indicando la capacità di isolamento dell'involucro nel suo complesso.
Indice del potere fonoisolante apparente in opera	R'_w	dB (ref. 20 µPa)	Valore unico del potere fonoisolante apparente misurato in opera e riferito a 500 Hz.
Indice di isolamento acustico di facciata	$D_{2m,nT}$	dB (ref. 20 µPa)	Differenza tra i livelli L_1 e L_2 di una facciata, normalizzata rispetto all'area di assorbimento equivalente A ed alla superficie dell'elemento sottoposto a prova in condizioni reali.
Isolamento acustico di facciata in opera	$D_{2m,nT,w}$	dB (ref. 20 µPa)	Valore unico dell'isolamento acustico di facciata misurato in opera e riferito a 500 Hz.
Livello normalizzato del rumore di calpestio	L_n	dB (ref. 20 µPa)	Livello L_2 normalizzato rispetto all'area di assorbimento equivalente A . Tale indice non tiene conto delle trasmissioni laterali ma indica la quantità di rumore trasmessa dal solo elemento sottoposto a prova.
Indice del livello normalizzato del rumore di calpestio	L_{nw}	dB (ref. 20 µPa)	Valore unico del livello normalizzato del rumore di calpestio misurato in laboratorio e riferito a 500 Hz.
Livello normalizzato del rumore di calpestio	L'_n	dB (ref. 20 µPa)	Livello L_2 normalizzato rispetto all'area di assorbimento equivalente A . Tale indice tiene conto delle trasmissioni laterali ed indica la quantità di rumore trasmessa attraverso l'involucro nel suo complesso.
Indice del livello normalizzato del rumore di calpestio in opera	$L'_{n,w}$	dB (ref. 20 µPa)	Valore unico del livello normalizzato del rumore di calpestio misurato in opera e riferito a 500 Hz.
Termine di adattamento spettrale C e C_{tr}	C / C_{tr}	dB (ref. 20 µPa)	Termine correttivo da applicare agli indici per l'isolamento da rumore aereo per meglio adattare il risultato alla sensazione uditiva umana in relazione alla tipologia della fonte di rumore. C : per rumore tipico in abitazioni come conversazioni, musica o TV. C_{tr} : per rumore da traffico stradale.

Parametro	Simbologia	Unità di misura	Descrizione
Termine di adattamento spettrale C_1 , $C_{1,50-2500}$	C_1 , $C_{1,50-2500}$	dB (ref. 20 μ Pa)	Termine correttivo da applicare all'indice del rumore di calpestio per meglio adattare il risultato alla sensazione uditiva umana in relazione ai rumori di tipo impattivo (di picco), secondo il tipo di solaio (massiccio o leggero) con o senza strato resiliente. Solai in calcestruzzo con un efficiente strato resiliente hanno $C_1 = 0$. $C_{1,50-2500}$ rispecchia le frequenze basse da 50-100 Hz, che sono fondamentali per la valutazione con il senso uditivo umano.
Rigidità dinamica	s'	MN/m ³	Grado di elasticità di un materiale rispetto a delle sollecitazioni di tipo dinamico.
Livello sonoro immesso da impianti funzionamento continuo	L_{Aeq} L_{ic}	dB(A) (ref. 20 μ Pa)	Livello sonoro prodotto da impianti a funzionamento continuo, ovvero il cui funzionamento è sostanzialmente costante nel tempo (impianti di riscaldamento, climatizzazione, ricambio d'aria...).
Livello sonoro immesso da impianti funzionamento discontinuo	L_{ASmax} L_{id}	dB(A) (ref. 20 μ Pa)	Livello sonoro prodotto da impianti a funzionamento discontinuo, ovvero il cui funzionamento non è costante nel tempo (impianti sanitari, di scarico, ascensori, montacarichi...).
Rumore rosa	-	-	Segnale acustico, usato per le prove di isolamento da rumore aereo, caratterizzato da una maggiore energia alle basse frequenze. Il rumore rosa (chiamato anche rumore 1/f) è caratterizzato da un'energia sonora che si riduce proporzionalmente con l'altezza delle frequenze, l'energia sonora si dimezza con il raddoppio delle frequenze. Praticamente si riduce il livello sonoro di 3 dB per ottava di frequenza.
Rumore bianco	-	-	Segnale acustico usato per le prove di isolamento da rumore aereo. Il rumore bianco è caratterizzato da una energia sonora ugualmente distribuita in uno spettro avente banda di frequenza di ampiezza costante Δf .
Sine Sweep	-	-	Segnale acustico usato per la determinazione della risposta all'impulso dell'ambiente. Con questa tecnica è possibile ricavare con estrema precisione il tempo di riverberazione T_{60} , oltre ad altri parametri relativi alle caratteristiche acustiche dell'ambiente.

Tabella 1: Prospetto riassuntivo dei termini e dei parametri acustici. Fonte: TBZ S.r.l.

Principi base di acustica

Il suono: definizione

Il suono è la sensazione uditiva generata dalla vibrazione di un corpo. Tale oscillazione si propaga nell'aria o in un altro mezzo di tipo elastico attraverso una successione di compressioni ed espansioni fino a raggiungere la membrana timpanica contenuta nell'orecchio. Questa viene sollecitata da una variazione di pressione e a sua volta viene messa in vibrazione determinando così una sensazione uditiva. Il segnale è quindi inviato al cervello che è in grado di analizzare e memorizzare il suono, associandolo anche ad azioni e ad altre sensazioni fisiche.

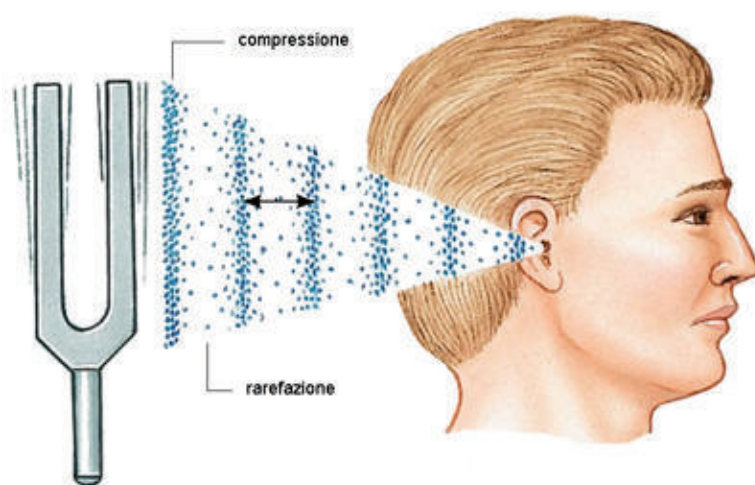


Fig. 6: Propagazione sonora. Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

Il suono si trasmette attraverso della materia (solida, liquida o gassosa). Maggiore è la rigidità del materiale (coesione delle molecole) e maggiore risulterà la velocità di propagazione. Nella tabella sottostante sono illustrate alcune velocità del suono per mezzi fluidi e solidi.

Mezzo	Velocità del suono [m/s]
Aria secca (15°C)	341
Acqua	1460
Mattoni	3650
Vetro	5000
Acciaio	6000
Sughero	500
Gomma elastica	30 ÷ 70

Tabella 2: Velocità del suono in vari materiali. Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

Per definire compiutamente un fenomeno sonoro, oltre alla velocità di propagazione, è necessario definire altre proprietà fisiche caratteristiche delle onde: la frequenza, il periodo e la lunghezza d'onda.

La **frequenza** è la misura del numero di oscillazioni che la sorgente sonora effettua nell'unità di tempo. Essa si misura in Hertz [Hz].

$$f = 1/T \quad [\text{Hz}]$$

Il **periodo** è l'inverso della frequenza ed è definito come il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa (compressione ed espansione), il suo simbolo è T e si misura in secondi.

$$T = 1/f \quad [\text{s}]$$

La **lunghezza d'onda** è la distanza che viene percorsa da un'onda sonora nel periodo di tempo e si misura in metri.

$$\lambda = c/f = cT \quad [\text{m}]$$

La frequenza (f) è legata alla lunghezza d'onda (λ) in quanto maggiore è la frequenza, minore è la lunghezza d'onda.

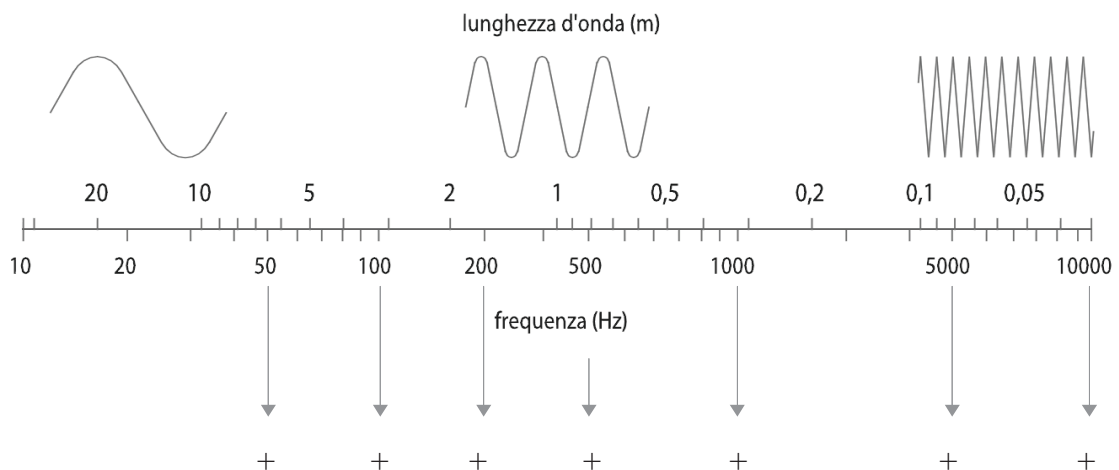


Fig. 7: Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

L'orecchio umano è in grado di recepire le frequenze che vanno da 16 a 20000 Hz. Al di sotto dei 16 Hz vi sono gli infrasuoni, percepibili solamente come vibrazioni, mentre al di sopra dei 20000 Hz vi sono gli ultrasuoni, udibili solamente da alcuni animali.

La sensazione uditiva in un soggetto normoudente non è legata ad una variazione lineare della pressione sonora, bensì ad una relazione di tipo logaritmico. Per tale motivo le grandezze acustiche sono espresse in **Decibel** [dB]. In particolare il livello della pressione sonora, espresso in dB è:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove P è la pressione acustica misurata e P_0 è la pressione di riferimento, pari a 20 μPa . Il valore di riferimento (20 μPa) corrisponde al valore minimo della pressione sonora, percepito alla frequenza di 1000 Hz, ossia 0 dB. Quindi moltiplicando la pressione sonora per 10 non facciamo altro che aggiungere 20 dB al livello, per cui 200 μPa corrispondono a 20 dB, 2000 μPa a 40 dB, e così via.

Nella tabella riportata di seguito sono elencati alcuni fenomeni acustici con i relativi livelli sonori espressi in dB ed in Pascal.

<i>Sorgente</i>	<i>Livello di pressione sonora [dB]</i>	<i>Pressione sonora [Pa]</i>
Razzo al decollo	180	20000
Turboreattore	160	2000
Martello pneumatico	130	63
Sirena	120	20
Motosega a 1 m	110	6
Discoteca	100	1
Camion	90	0,6
Traffico intenso	80	0,2
Aspirapolvere a 1 m	70	0,06
Attività in ufficio	60	0,02
Conversazione	50	0,0063
Biblioteca	40	0,0020
Bisbiglio	25	0,00036
Ticchettio orologio	20	0,00020
Brusio in un bosco	15	0,00011
Soglia dell'udibile	0	0,000020

Tabella 3: Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

La percezione dell'intensità dei suoni è legata al contesto in cui si trova l'ascoltatore. In un ambiente molto silenzioso anche un suono “poco energetico” verrà percepito come fastidioso. Lo stesso suono risulterà trascurabile o impercettibile in ambienti leggermente più rumorosi.

L'orecchio umano inizia a percepire una variazione del livello sonoro quando vi è l'aumento di +3 dB. La variazione risulta evidente con +5 dB di incremento mentre viene percepito il raddoppio della sensazione sonora (loudness) a fronte di un incremento di +10 dB.

Un esempio della percezione che si avverte variando i livelli sonori si può avere ascoltando le tracce audio sotto riportate:

	+1 dB	+3 dB	+5 dB	+10 dB
Rumore rosa	+	+	+	+
Voce maschile	+	+	+	+

Tabella 4: Fonte: TBZ S.r.l.

Come si può osservare, avendo un suono costante e restando concentrati è possibile percepire anche la minima variazione pari a 1 dB. Se la fonte sonora è di tipo variabile (ad esempio: voce umana) una variazione di 1 dB è pressoché impossibile da percepire. Anche il raddoppio dell'energia sonora che corrisponde a +3 dB risulta difficilmente identificabile. Risulta invece distinguibile per incrementi di 5 dB mentre risulta netta ed evidente con incrementi di 10 dB.

L'andamento della sensibilità uditiva media dell'orecchio umano è rappresentata nel diagramma seguente.

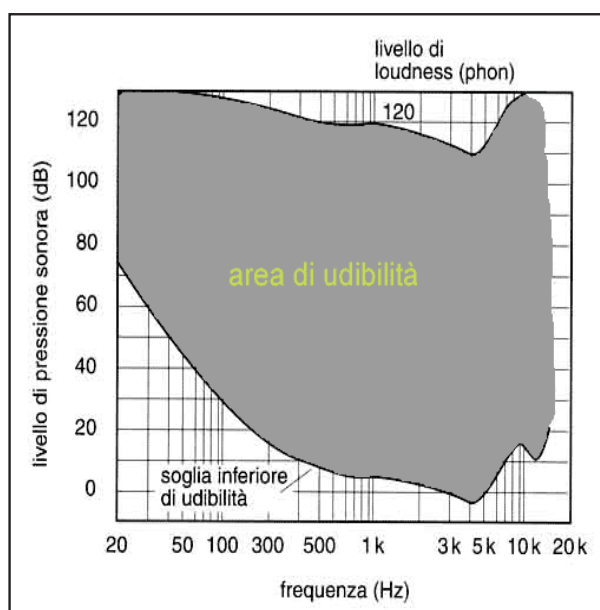


Fig. 8: diagramma della sensibilità dell'orecchio umano. Fonte: dispense Scuola di Acustica di Ferrara

Propagazione del suono all'interno degli edifici

Come detto in precedenza, il suono per diffondersi nell'ambiente ha bisogno di un mezzo elastico che può essere liquido, solido o gassoso. All'interno degli edifici il rumore si propaga attraverso gli elementi strutturali di cui sono composti ovvero pareti e solai.

I principali meccanismi di diffusione del suono sono: la trasmissione per via aerea e la trasmissione per via strutturale:

- Sono fenomeni trasmissibili per via aerea: il vociare delle persone, la musica, ecc. Il suono si propaga nell'edificio attraverso l'elemento di separazione tra i due ambienti. L'onda sonora incidente mette in vibrazione la struttura di separazione che può attenuarla solo parzialmente. La quantità di energia che riesce a passare è quanto percepiamo nell'altro ambiente.
- Sono fenomeni trasmissibili per via strutturale: i passi sul pavimento, battere sulla parete o sul soffitto, il rumore degli impianti tecnologici, ecc. L'elemento di separazione tra i due ambienti e le relative strutture a contorno vengono messe in vibrazione direttamente dalla sorgente. Nell'ambiente disturbato (ricevente), le vibrazioni che arrivano eccitano le superfici circostanti che fanno vibrare l'aria. In questo modo il fenomeno può essere percepito dal nostro orecchio. Vibrazioni particolarmente intense possono essere percepite anche fisicamente (con il corpo), per esempio quando passa un TIR, quando penetrano i bassi di un potente impianto stereo, o quando c'è un terremoto.

Quindi, se si pone una sorgente sonora in un locale (emittente), separato da un altro (ricevente) mediante una parete divisoria, una parte dell'energia emessa dalla sorgente colpisce la parete; una parte di questa viene riflessa all'indietro verso la sorgente, una parte viene assorbita dalla parete e trasmessa in altre parti dell'edificio e una parte viene trasmessa all'ambiente ricevente.

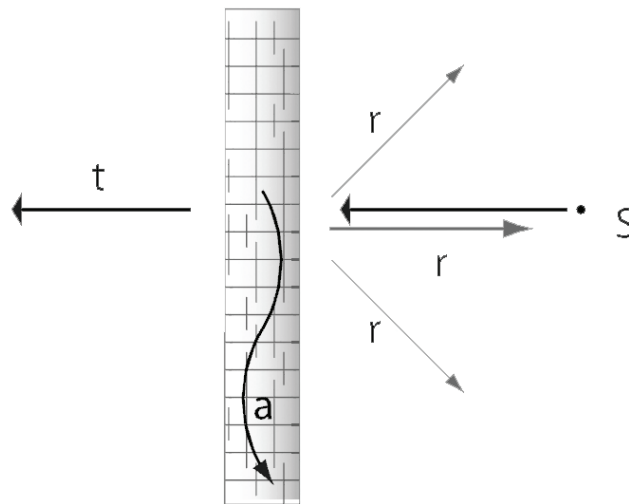


Fig. 9: Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

S) sorgente; r) energia riflessa; a) energia assorbita e trasmessa per via meccanica alle altre strutture; t) energia trasmessa

Questo tipo di trasmissione del rumore viene anche definito di tipo diretto, in quanto il rumore si propaga nell'ambiente emittente solamente attraverso l'elemento strutturale di divisione (parete o solaio).

Nella realtà vi è un altro tipo di trasmissione chiamata indiretta o laterale che avviene attraverso gli elementi strutturali adiacenti all'elemento considerato.

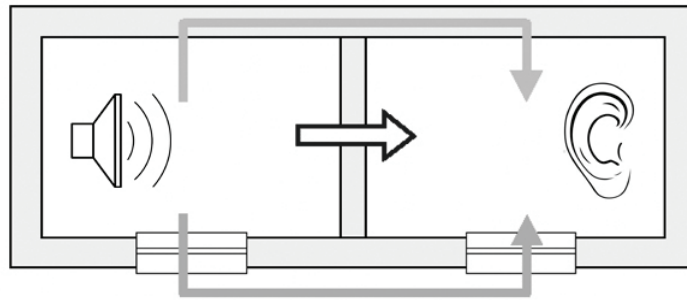


Fig. 10: Fonte TBZ S.r.l.

Parte dell'energia sonora si trasmette come vibrazione attraverso le strutture laterali che delimitano gli ambienti. Tale energia viene poi re-irradiata nell'ambiente ricevente sotto forma di onde di pressione sonora.

Assorbimento acustico e potere fonoisolante

Come accennato in precedenza parte dell'energia sonora che colpisce una parete viene assorbita dall'elemento stesso; ma come avviene questo fenomeno?

I meccanismi di assorbimento sono molteplici, l'onda di pressione sonora può essere in grado di mettere in vibrazione la superficie dell'elemento stesso, oppure è l'aria contenuta nella porosità del materiale ad entrare in movimento. In entrambi i casi vi è la dissipazione dell'energia sonora in calore.

Il coefficiente di **assorbimento acustico apparente**, indicato con α , è definito come il rapporto tra l'energia sonora effettivamente assorbita più quella eventuale trasmessa all'esterno e l'energia sonora incidente. Tale coefficiente può assumere valori variabili tra 0,01 e 1. Con coefficiente unitario non si ha riflessione dell'onda incidente: è come se l'onda sonora incidesse su una finestra aperta. Nel caso di valori prossimi allo zero, tutta l'energia viene invece riflessa in direzione della sorgente.

Nelle misurazioni in opera è difficile misurare il coefficiente di assorbimento δ , per cui si misura piuttosto il coefficiente di assorbimento acustico apparente α .

Il coefficiente di assorbimento acustico apparente α è dato da:

$$\alpha = 1 - r = \delta + \tau = 1 - (W_r / W_i)$$

dove:

δ = coefficiente di assorbimento= W_δ / W_i ;

r = coefficiente di riflessione= W_r / W_i ;

τ = coefficiente di trasmissione = W_τ / W_i ;

W_i = energia totale incidente;

W_δ = parte di energia assorbita;

W_r = parte di energia riflessa;

W_τ = parte di energia trasmessa.

Il **potere fonoisolante** R indica invece l'abbattimento in dB che il suono subisce passando attraverso la parete e quindi quantifica la capacità di isolare l'ambiente ricevente dai rumori provenienti dall'ambiente sorgente.

Il potere fonoisolante R è definito come:

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

Questi due parametri (α e R) sono distinti ed indipendenti tra loro.

Il tempo di riverberazione

Se all'interno di un ambiente si interrompe improvvisamente l'emissione di energia sonora di una sorgente, il livello di pressione sonora in un generico punto non si annulla immediatamente; a causa delle riflessioni multiple sulle pareti, che proseguono il loro percorso con la velocità del suono anche dopo lo spegnimento della sorgente, il livello sonoro decresce più o meno rapidamente a seconda delle dimensioni dell'ambiente e delle caratteristiche fonoassorbenti delle pareti e degli oggetti in esso contenuti. Questo fenomeno è conosciuto come coda sonora.

Per valutare questo fenomeno lo studioso americano Wallace Clement Sabine (1868-1919) ha introdotto il concetto di “tempo di riverberazione”, cioè l'intervallo di tempo che trascorre dal momento in cui la sorgente viene spenta al momento in cui il livello sonoro si riduce di un valore pari a 60 dB rispetto al valore iniziale.

Se l'ambiente è perfettamente riverberante allora il valore del tempo di riverberazione è lo stesso in tutti i punti e vale:

$$T_{60} = 0,161 V / A \quad [\text{s}]$$

dove V è il volume dell'ambiente e A è l'area di assorbimento acustico equivalente:

$$A = \alpha S \quad [\text{m}^2]$$

dove α è il coefficiente di assorbimento acustico medio del locale ricevente e S è la superficie complessiva delle pareti interne dell'ambiente ricevente.

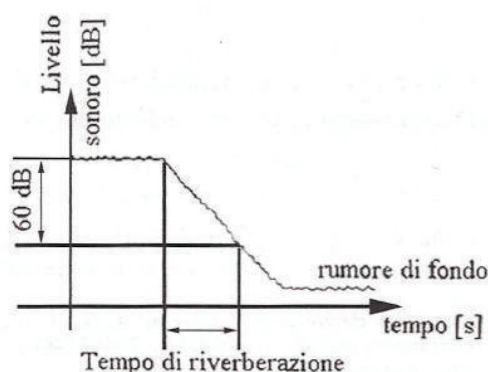


Fig. 11: Tempo di riverberazione. Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

Il ruolo dei giunti

Il ruolo dei giunti di connessione fra la partizione divisoria e le strutture perimetrali (solai, facciate, divisorie interne) viene spesso sottovalutato e quindi sottostimato. Capita spesso di vedere interventi di incremento del potere fonoisolante realizzati solo mediante aggiunta di strati addizionali alla struttura esistente. Il risultato spesso non rispecchia le aspettative. Il motivo va quasi sempre ricercato nelle trasmissioni laterali (di fiancheggiamento), ovvero si tratta di una quota non trascurabile di energia che si propaga sotto forma di vibrazioni dalle strutture dell'ambiente emittente alle strutture dell'ambiente ricevente nel quale viene re-immessa come onda di pressione (rumore). Questo passaggio avviene attraverso i giunti, che rappresentano una sorta di incrocio stradale in cui i flussi di traffico seguono delle vie preferenziali. La presenza di elementi massivi continui (gettate piene in calcestruzzo) o il passaggio di camere d'aria (tavelle) rappresentano il "semaforo verde" per il suono e le vibrazioni. Il disaccoppiamento delle strutture mediante strati elastici al contrario rappresenta il "semaforo rosso" in quella direzione.

Esempio di giunti rigidi calcolati con il metodo dei fattori di trasmissione (UNI TR 11175).

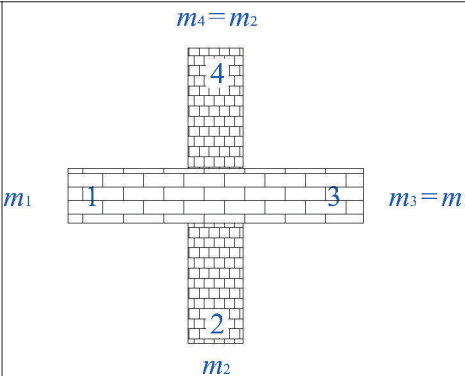
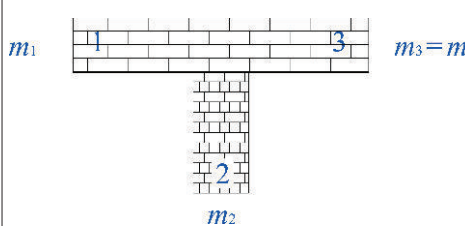
Trasmissione caratteristica di giunzioni K_{ij} per tipi più comuni di giunzione				
Giunzione		Trasmissione		Valori di K_{ij} [dB]
a) Rigida a croce		Dritto		$K_{13} = 8,7+17,1M+5,7M^2$
		Angolo		$K_{12} = 8,7+5,7M^2$
		$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$		
b) Rigida a T		Dritto		$K_{13} = 5,7+14,1M+5,7M^2$
		Angolo		$K_{12} = 5,7+5,7M^2$
		$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$ dove: $m'_{\perp i}$ è la massa per unità di area dell'elemento i nel percorso di trasmissione ij, in chilogrammi al metro quadro; m'_i è la massa per unità di area dell'altro elemento (perpendicolare) che costituisce il giunto, in chilogrammi al metro quadro.		

Tabella 5: Esempio giunti rigidi. Fonte UNI TR 11175

La quantificazione del contributo delle trasmissioni laterali attraverso i giunti può essere stimata sulla base delle norme UNI EN ISO 12354 e UNI TR 11175. Di seguito si riportano alcuni esempi relativi a strutture caratterizzate da giunti di tipo rigido.

Termine di correzione K per la trasmissione laterale per il calpestio [dB]									
Massa per unità di area del solaio di separazione [kg/m ²]	Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tabella 6: Fonte UNI TR 11175 Prospetto 5

Contributo globale della trasmissione laterale K' per giunti rigidi a croce e masse per unità di area uniformemente distribuite [dB]									
Massa per unità di area della partizione [kg/m ²]	Massa media per unità di area degli elementi laterali [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
150	3,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
200	4,5	2,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
250	5,0	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
300	6,0	4,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
350	7,0	5,0	3,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
400	7,5	5,5	3,5	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0
450	8,0	6,0	4,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5
500	8,5	6,5	4,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5

Tabella 7: Fonte UNI TR 11175 Prospetto A.7

Contributo globale della trasmissione laterale K' per giunti rigidi a T e masse per unità di area uniformemente distribuite [dB]									
Massa per unità di area della partizione [kg/m ²]	Massa media per unità di area degli elementi laterali [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	3,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
150	5,0	3,0	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
200	6,5	4,5	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
250	8,0	5,5	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
300	9,0	6,5	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
350	10,0	7,5	6,0	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5
400	10,5	8,5	6,5	5,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0
450	11,5	9,0	7,5	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5
500	12,0	9,5	8,0	6,5	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0

Tabella 8: Fonte: UNI TR 11175 Prospetto A.8

La propagazione delle vibrazioni meccaniche su una struttura dipendono dalla forza applicata, dalla massa e dalle caratteristiche elastiche/smorzanti della struttura stessa. Per quanto riguarda le strutture massive con giunti rigidi, a parità di forza applicata, una struttura leggera tenderà a vibrare maggiormente e quindi a trasmettere e re-irradiare maggiore energia sonora.

Dalle tabelle sopra riportate si evince come il miglior compromesso si ottenga accoppiando strutture con massa superficiale comparabile. Il motivo è una distribuzione più omogenea dell'energia sulla struttura. Al contrario, in caso di pareti con masse superficiali molto differenti, l'energia meccanica del sistema verrà dissipata attraverso l'elemento più debole (leggero).

I giunti di tipo elastico si ottengono frapponendo del materiale resiliente tra le due strutture. Occorre sottolineare che risulta difficile considerare elastico un giunto laddove:

- il materiale elastico viene eccessivamente caricato dalla massa della struttura;
- la realizzazione di intonaci e collegamenti rigidi non consente alla struttura un adeguato grado di libertà di oscillazione.

Quindi, sono essenzialmente considerati giunti elastici pareti massicce accoppiate a pareti leggere o a secco oppure a sistemi interamente realizzati a secco (cartongesso).

Strategie per un buon abbattimento acustico

Consideriamo un elemento costruttivo che separa due vani di cui uno è l'ambiente emittente in cui si trova la sorgente sonora (di tipo aereo o impattivo) e l'altro è l'ambiente ricevente.

Più alta è la resistenza dell'elemento di separazione al passaggio del suono, maggiore è l'isolamento acustico e quindi minore è il livello sonoro nel vano di ricezione. Di conseguenza, più alti sono i valori di “potere fonoisolante” R o di “isolamento acustico standardizzato di facciata” D , e più bassi sono i “livelli di rumore normalizzato da calpestio di solai” L_{nw} .

Per migliorare l'isolamento acustico ci sono varie strategie. La prima è quella di aumentare la massa dell'elemento di separazione: serve più energia sonora per stimolare un elemento pesante rispetto ad uno leggero. La seconda strategia è quella di separare le due masse con un materiale flessibile, “molla”, creando un elemento multistrato con taglio acustico, la nota “massa-molla-massa”. Va evidenziato che la molla separante funziona correttamente quando non ci sono elementi rigidi di collegamento, i cosiddetti “ponti acustici”. Anche nel caso di strutture multistrato vale il principio che serve più energia sonora per stimolare un elemento pesante rispetto ad uno leggero.

Sistemi di abbattimento acustico: elementi monostrato con meno (img. A) e più (img. B) massa; elementi multistrato massa-molla-massa (img. C) ed elementi multistrato con ponte acustico (img. D)

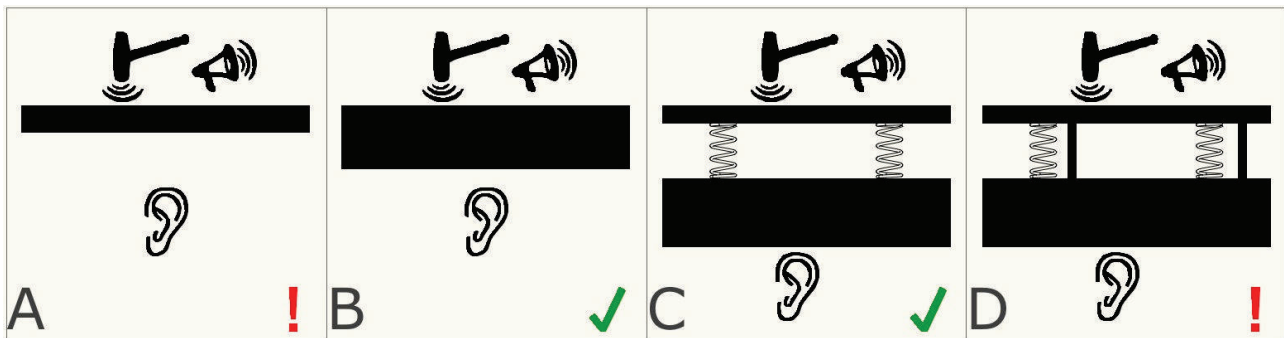


Fig. 12: sistema a massa e massa-molla-massa corretta e non. Fonte: TBZ S.r.l.

I due principi illustrati sopra, aumento della massa e taglio acustico (massa-molla-massa), funzionano sia nelle costruzioni massicce che in quelle leggere in legno e a secco. Sembrano concetti banali ma in realtà richiedono molta attenzione durante la messa in opera, anche se spesso ci sono esigenze costruttive o strutturali che impediscono la loro attuazione al 100%.

In sintesi la presenza di ponti acustici incide in modo sostanziale sul risultato finale.

Qualità acustica degli ambienti confinati: il controllo della riverberazione

Un parametro spesso sottovalutato per la realizzazione di ambienti acusticamente confortevoli è il tempo di riverberazione, ovvero il tempo di decadimento dell'energia sonora per mezzo dell'assorbimento dei materiali impiegati. Gli aspetti principali da tenere in considerazione sono due:

1. in un ambiente riverberante qualsiasi suono disturbante proveniente dall'esterno o da ambienti vicini, permane per maggior tempo causando un incremento del livello sonoro e conseguentemente della percezione del rumore. Il caso tipico è rappresentato dalla permanenza all'interno di un appartamento completamente vuoto. Si ha la sensazione di sentire perfettamente tutti i rumori interni ed esterni. Tale sensazione viene fortemente mitigata una volta finito di arredare l'appartamento;
2. in un ambiente riverberante gli stessi rumori o suoni emessi al suo interno possono risultare sgradevoli ed eccessivamente forti. Questo accade spesso in locali pubblici dove la presenza di numerose persone ed un eccessivo riverbero rende difficile la comunicazione e sgradevole la permanenza.

In ambienti piccoli (tipicamente domestici) il fenomeno è limitato grazie ai molteplici oggetti di arredo che permettono di assorbire il suono e di diffonderlo rompendo i fronti d'onda. Il problema diventa maggiore in ambienti caratterizzati da grandi volumi e da superfici dure e lisce. Un classico esempio è rappresentato dal vano scala. Il rumore prodotto al suo interno si diffonde e riverbera spesso per tutta l'altezza dell'edificio, trasmettendo i suoni da un piano all'altro ed a causa dello scarso isolamento acustico dei portoncini di ingresso, il rumore penetra facilmente nei vari appartamenti.

La soluzione, a livello progettuale, è quella di prevedere delle zone con controsoffitto con marcate prestazioni assorbenti. Nel caso di situazioni già in essere, è possibile ridurre il riverbero applicando materiali esteticamente validi sulle pareti o sui soffitti. Vi sono infatti in commercio elementi personalizzabili per colori e forme, caratterizzati da buoni coefficienti di assorbimenti acustico.

Sotto si riporta un'elaborazione audio relativa al vociare di bambini in una mensa poco, mediamente e molto riverberante:

Ambiente	Poco riverberante (T_{60} medio 0.5 secondi)	Mediamente riverberante (T_{60} medio 1 secondo)	Molto riverberante (T_{60} medio > 4 secondi)
Mensa scolastica	+	+	+

Tabella 9: Esempio di sensazione sonora al variare della riverberazione dell'ambiente. Fonte: TBZ S.r.l.

Trasmissione del rumore per via aerea

Il potere fonoisolante e il potere fonoisolante apparente

Come visto nel paragrafo precedente il **potere fonoisolante** è la capacità di un elemento di isolare acusticamente un ambiente ricevente dai suoni che vengono prodotti nell'ambiente emittente.

Tale valore viene determinato in modo sperimentale in laboratorio secondo le norme della serie UNI EN ISO 10140, che sostituiscono le precedenti versioni della norma UNI EN ISO 140 per le misure in laboratorio. L'elemento di prova viene realizzato tra due ambienti che sono separati da giunti elastici in modo da eliminare le trasmissioni laterali. Per ogni frequenza vengono misurati i livelli sonori presenti nei due ambienti, di cui uno emittente e l'altro ricevente, inoltre viene misurato il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente.

Il potere fonoisolante si ottiene dalla seguente relazione:

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

In cui S è la superficie del divisorio ed A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente.

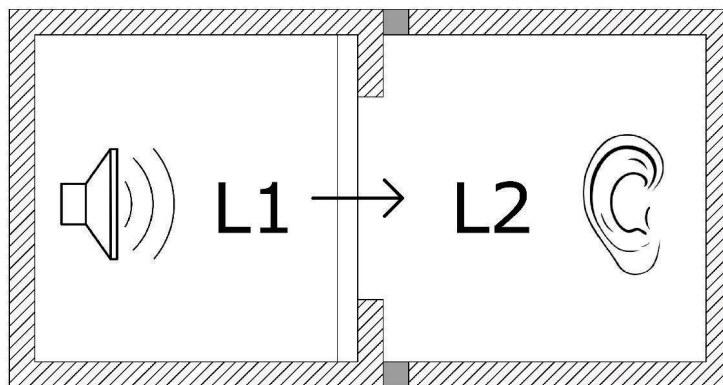


Fig. 13: Potere fonoisolante in laboratorio. Fonte: TBZ S.r.l.

Nella realtà però i collegamenti tra la parete che separa i due ambienti e le strutture laterali non sono di tipo elastico come nel caso del laboratorio di prova, bensì vi sono delle trasmissioni di tipo indiretto o laterali che determinano una riduzione del potere fonoisolante dell'elemento divisorio.

Il valore di isolamento acustico per via aerea misurato in condizioni reali (presenza di trasmissioni laterali) prende il nome di **potere fonoisolante apparente** e si misura in opera.

L'espressione analitica è del tutto simile a quella del potere fonoisolante:

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

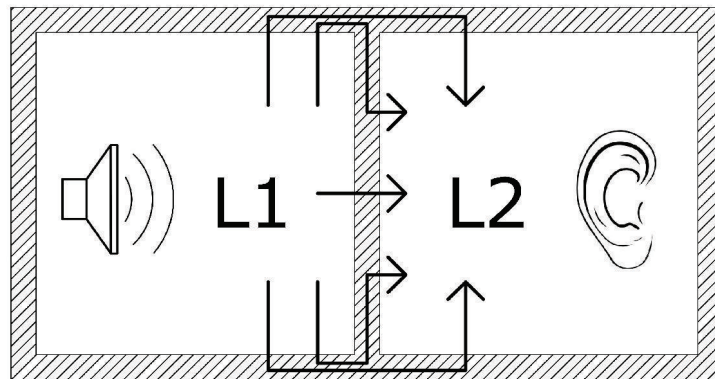


Fig. 14: Potere fonoisolante in opera. Fonte: TBZ S.r.l.

E' evidente che se le trasmissioni laterali non sono nulle, nel locale ricevente avremo un livello sonoro L_2 maggiore rispetto alla prova di laboratorio dove i giunti sono elastici, pertanto si avrà un potere fonoisolante minore.

Questo spiega perché i valori di fonoisolamento ottenuti in laboratorio siano maggiori rispetto a quelli misurati in opera.

Isolamento acustico da rumori aerei

La determinazione dell'**isolamento acustico** D di un elemento si calcola con la seguente relazione:

$$D = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}]$$

dove L_1 è il livello sonoro nell'ambiente emittente e L_2 è il livello sonoro nell'ambiente ricevente.

La valutazione dell'isolamento acustico di un divisorio in opera si effettua mediante la determinazione dell'**isolamento acustico normalizzato** D_n o dell'**isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione** D_{nT} :

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$$

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

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

dove T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0,5 s (ambienti normali residenziali).

La differenza rispetto al **potere fonoisolante apparente** sta che nell'**isolamento acustico normalizzato** D_n la superficie S dell'elemento separante non viene considerata. Tale indice viene impiegato quando la determinazione di detta superficie risulta non definibile (esempio: facciate).

La determinazione del potere fonoisolante apparente

La determinazione in opera del potere fonoisolante apparente R'_w va eseguita secondo le indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 140 parte 4 e parte 14 (situazioni particolari di misura).

Dati due ambienti confinanti e divisi fra loro da una struttura (parete o solaio), si genera un segnale acustico (rumore rosa o bianco) in uno dei due ambienti grazie ad una sorgente che deve avere caratteristiche isotropiche (deve emettere rumore in maniera uniforme in tutte le direzioni nello spazio). Si misurano quindi i livelli sonori L_1 e L_2 rispettivamente nell'ambiente sorgente ed in quello ricevente. È previsto che la sorgente sia posizionata in almeno due posizioni all'interno dell'ambiente emittente. Per quanto riguarda le posizioni di misura occorre scegliere almeno 5 punti dell'ambiente che presentino caratteristiche di suono diffuso. In altre parole occorre:

- evitare di misurare troppo vicino alla sorgente o alla parete sottoposta a test (campo diretto);
- evitare di misurare troppo vicino a superfici riflettenti o eccessivamente assorbenti;
- eseguire le misurazioni variando casualmente l'altezza da terra del microfono.

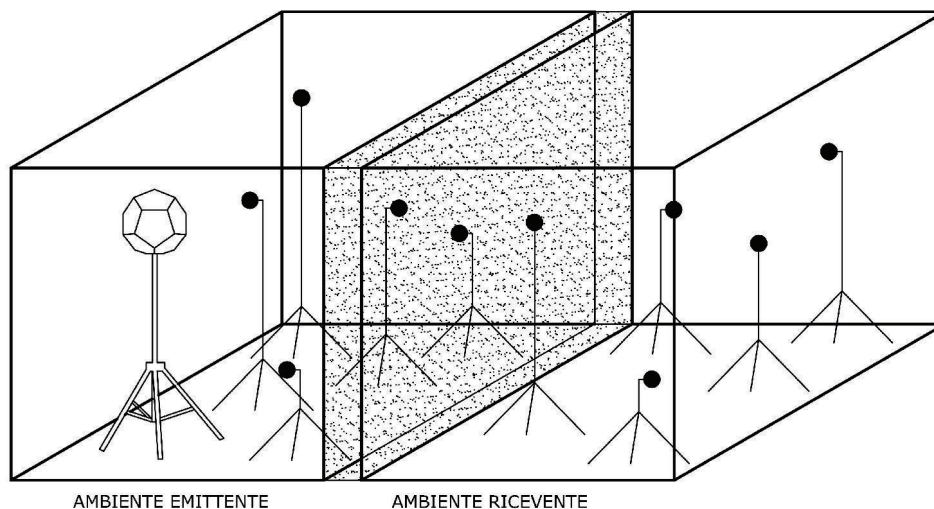


Fig. 15: Schema per la determinazione dell'indice R'_w . Fonte: TBZ S.r.l.

Per ambienti di grandi dimensioni o con geometrie complesse, il numero di misurazioni va incrementato in maniera da ottenere una media nello spazio del livello sonoro.

La verifica va quindi completata con la misurazione del rumore di fondo e del tempo di riverberazione.

Il rumore di fondo durante le prove non deve essere tale da influenzare o addirittura mascherare il segnale sonoro nell'ambiente ricevente. In linea di principio il rumore di fondo deve essere 6-10 dB inferiore, frequenza per frequenza, al livello L_2 .

Il tempo di riverberazione viene determinato misurando il tempo di decadimento di un segnale emesso all'interno dell'ambiente ricevente che può essere di tipo: continuo (rumore rosa), impulsivo (palloncini, pistola, clappatore) o con un segnale dove viene variata progressivamente la frequenza emessa (sine sweep). Anche per il tempo di riverberazione occorre eseguire varie prove cambiando la combinazione sorgente – punto di misura. Si tratta di un parametro di fondamentale importanza per la normalizzazione del risultato delle prove di isolamento.

Infatti, un suono immesso in un ambiente, è fortemente influenzato dalle caratteristiche acustiche proprie dell'ambiente stesso. In un ambiente completamente privo di arredi (maggiore riverberazione) il suono permane per un maggior tempo andando a sommarsi con i suoni successivi. Ciò determina un aumento del livello sonoro totale. Al contrario, in un ambiente completamente arredato, il suono viene assorbito e diffuso da molteplici superfici e quindi decresce in intensità molto più velocemente (minore riverberazione). A parità di energia sonora immessa in un ambiente, il livello sonoro risulta maggiore in un ambiente fortemente riverberante. Per evitare che questo influenzi la determinazione del potere fonoisolante apparente i risultati vanno rapportati ad un tempo di riverberazione standard che per gli ambienti residenziali è pari a 0,5 secondi.

La determinazione dell'indice mononumerico di valutazione del potere fonoisolante apparente R_w ed R'_w

Per facilitare la comprensione e la comparazione delle prestazioni acustiche di un elemento, nel caso di misurazioni in opera o in laboratorio, si definisce un parametro univoco che descrive le prestazioni complessive dell'elemento sottoposto a prova. Si tratta dell'indice di valutazione che nel caso di prove di laboratorio è R_w mentre nel caso di prove eseguite in opera è R'_w .

Il metodo per determinare il valore dell'indice è descritto nella norma UNI EN ISO 717-1 e prende il nome di “metodo di confronto”. Il valore dell'indice di valutazione è ottenuto sovrapponendo la curva sperimentale di R (misurata) con una curva di riferimento definita dalla norma, in modo tale che la somma degli scarti favorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento sia minore o uguale a 32. Il valore a 500 Hz della curva di riferimento traslata rappresenta l'indice di valutazione del potere fonoisolante.

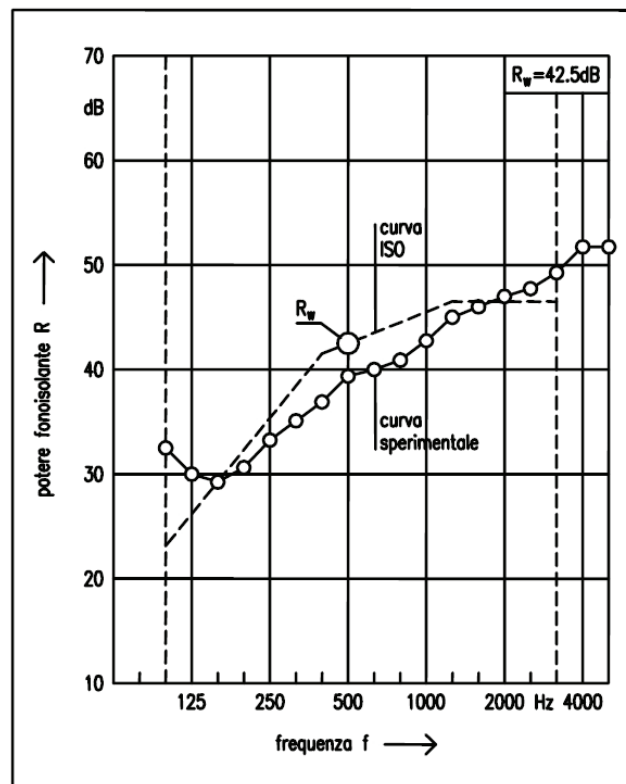


Fig. 16: Determinazione dell'indice di valutazione. Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

È di fondamentale importanza non considerare soltanto il valore univoco, ma anche l'andamento della curva alle varie frequenze. Per questo motivo in tutte le schede del catalogo è stato ritenuto indispensabile inserire tutti i valori in frequenza.

I termini di adattamento spettrale C e C_{tr} , per l'isolamento da rumore aereo sono stati introdotti per meglio adattare il risultato alla sensazione uditiva umana in relazione alla tipologia della fonte di rumore.

Nel rumore aereo il termine di adattamento spettrale C è indicato per il rumore tipico presente nelle abitazioni come: conversazioni, musica, TV, mentre C_{tr} si riferisce al rumore da traffico stradale.

Meccanismo di propagazione del rumore aereo

Quando in un ambiente si trova una sorgente sonora il rumore generato si propaga a tutti gli ambienti circostanti attraverso gli elementi strutturali di separazione. Tali elementi vengono colpiti dalle onde sonore e si comportano in modi diversi a seconda delle loro caratteristiche. Di seguito verranno definite brevemente le principali tipologie.

Pareti ed altri elementi costruttivi omogenei

Per capire il comportamento di questo tipo di elementi è opportuno fare riferimento al diagramma sotto riportato nel quale è rappresentato l'andamento del potere fonoisolante di una parete di tipo monolitico al variare della frequenza.

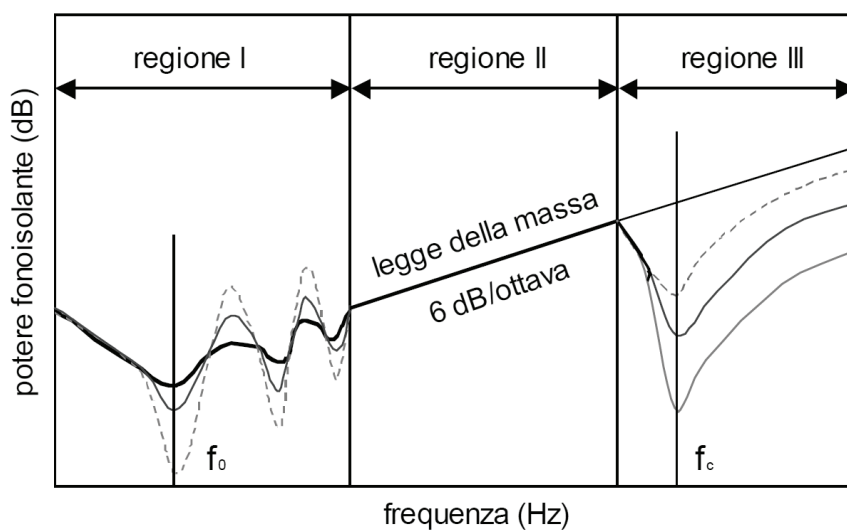


Fig. 17: Andamento delle proprietà fonoisolanti per pareti monolitiche. Fonte: dispense Scuola di Acustica Università di Ferrara

Nella regione I la parete risente dell'effetto delle risonanze che si verificano quando la frequenza dell'onda incidente è uguale alla frequenza propria di oscillazione della parete; in queste condizioni si ha un calo del potere fonoisolante. Ad ogni modo tale effetto si verifica solitamente per frequenze molto basse (al di sotto dei 50 - 100 Hz). Un esempio di risonanza è la vibrazione dei vetri delle finestre provocata da un veicolo a motore acceso che si ferma in prossimità di una abitazione.

Nella regione II il comportamento è quello relativo alla **legge di massa** per la quale si ha un aumento lineare del potere fonoisolante all'aumentare della frequenza. Questo spiega il fatto che le basse frequenze si schermano più difficilmente rispetto alle alte frequenze.

Nella regione III vi è invece un effetto di coincidenza che comporta un abbassamento del potere fonoisolante. Il più basso valore della frequenza in cui si verifica l'effetto di coincidenza prende il nome di frequenza critica (f_c).

Per le pareti di tipo omogeneo si può affermare che all'aumentare della massa o dello spessore aumenta anche il suo potere fonoisolante; per contro la frequenza critica è inversamente proporzionale allo spessore e perciò l'aumento di quest'ultimo determina una diminuzione della frequenza critica su valori che possono rientrare nel campo di frequenze comprese tra 100 e 500 Hz che sono quelle di maggior interesse.

Quando lo spessore diventa troppo elevato si innescano fenomeni di risonanza causati dalle onde longitudinali e di taglio che si creano all'interno della struttura. Queste possono determinare una forte caduta prestazionale alle alte frequenze. Tale fenomeno si manifesta solitamente per pareti di spessore superiore a 15-20 cm mentre al di sotto di tale spessore le risonanze si verificano con frequenze superiori a 5000 Hz.

Pareti doppie

Se gli elementi costruttivi monolitici consentono di limitare la trasmissione dell'energia sonora grazie alla propria massa, le pareti stratificate invece si basano sul principio di smorzamento della trasmissione delle vibrazioni che si propagano da un elemento all'altro.

In particolare le pareti doppie sono costituite da due elementi solidi separati da un'intercapedine d'aria che può essere riempita con del materiale fibroso. L'onda sonora che colpisce il primo elemento non si trasmette direttamente al secondo ma viene smorzata all'interno dell'intercapedine trasformandosi in energia meccanica e quindi in calore. Questa tecnica costruttiva è ottimale se si desidera aumentare il potere fonoisolante della parete senza aumentarne in modo eccessivo il peso.

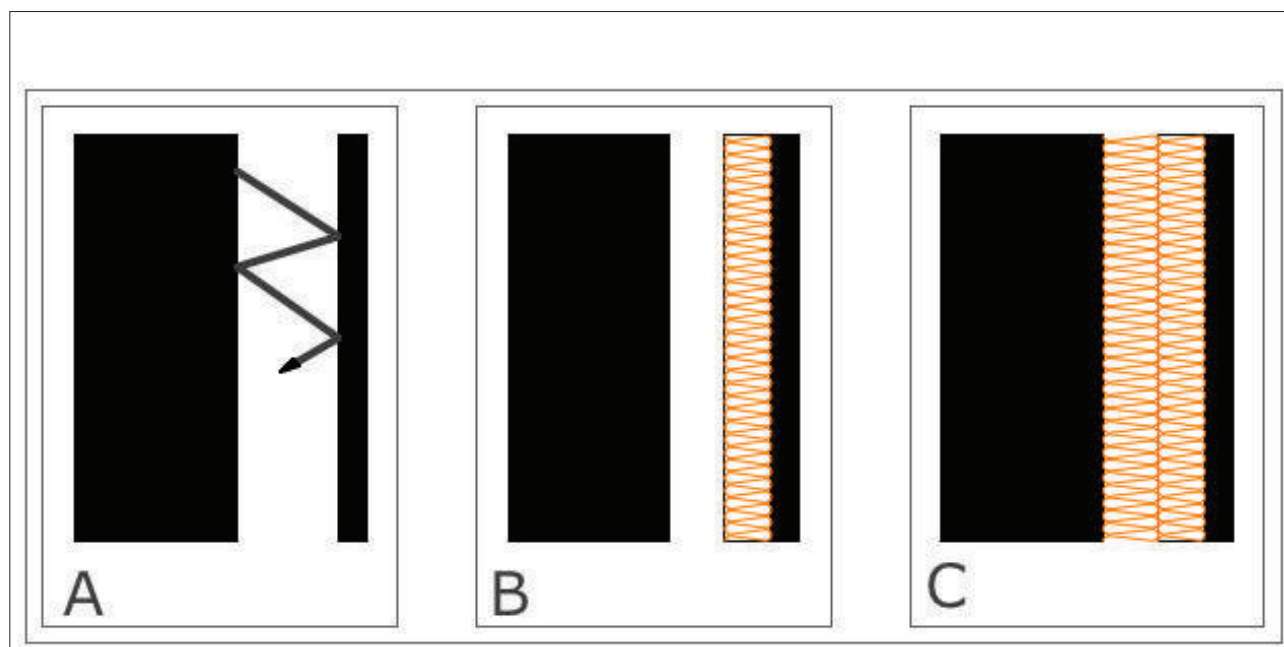


Fig. 18: L'attenuazione negli elementi multistrato. Fonte: TBZ S.r.l.

Un'intercapedine vuota funziona come la cassa armonica di una chitarra dove i suoni vengono riflessi e così amplificati (Figura A). Se la stessa intercapedine viene riempita con materiale fonoassorbente il suono, anziché riflettere viene assorbito. E' sufficiente coprire anche solo una delle due superfici dell'intercapedine (Figura B). L'immagine C illustra un'intercapedine completamente riempita, in questo caso avremo valori di abbattimento acustico leggermente superiori rispetto alla situazione B.

Il concetto appena illustrato viene definito anche come sistema “**massa – molla – massa**” nel quale le due masse sono rappresentate dalle parti solide mentre l'intercapedine funge da molla. Per garantire il funzionamento di tale sistema è necessario che i collegamenti tra le varie parti siano di tipo elastico, se così non fosse l'insieme si comporterebbe come un elemento costruttivo monolitico, del quale però non potrebbe eguagliare le prestazioni in quanto di massa inferiore.

Anche nelle pareti doppie come in quelle monolitiche vi sono delle cadute prestazionali in corrispondenza di alcune frequenze. La prima si verifica quando la frequenza delle onde incidenti eguaglia quella di risonanza dell'intero sistema stratificato nel suo complesso. Altre riduzioni di isolamento sono determinate dal fenomeno di coincidenza che si verifica alle frequenze critiche che caratterizzano ciascuno strato di cui è composta la parete. Infine un'ulteriore perdita prestazionale si produce alla frequenza di risonanza dello strato d'aria in cui le onde sonore, dopo aver interessato il primo strato dell'elemento, si riflettono all'interno dell'intercapedine dando luogo a delle onde di tipo stazionario.

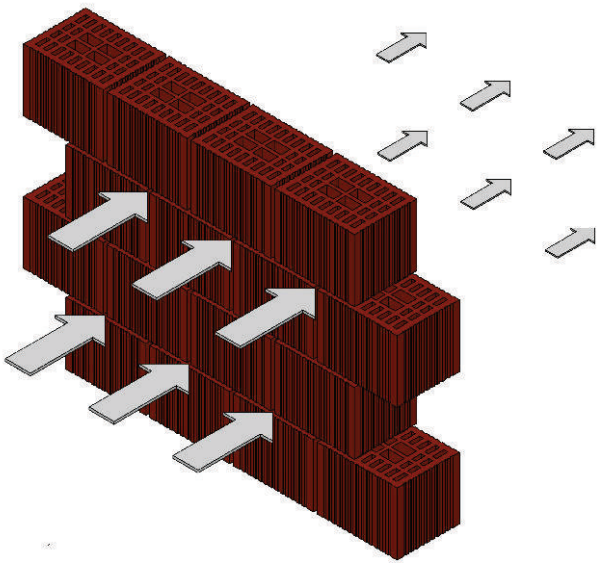
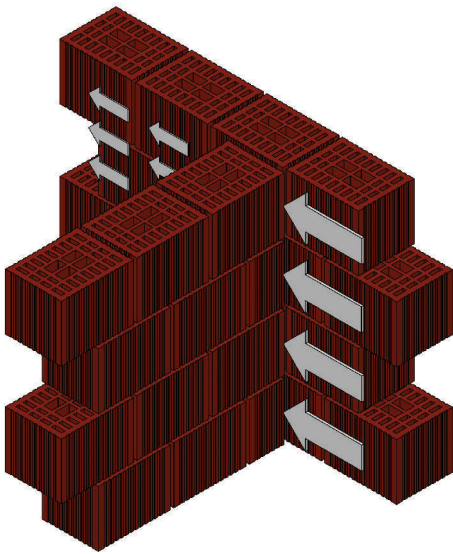
Nel primo caso, che vede la perdita di isolamento dovuta alla frequenza di risonanza dell'elemento nel suo insieme, si può agire sullo spessore dell'intercapedine d'aria, in modo che, in relazione alla massa degli strati laterali, la frequenza di risonanza cada al di sotto della gamma di frequenze per le quali l'orecchio umano è più sensibile al disturbo.

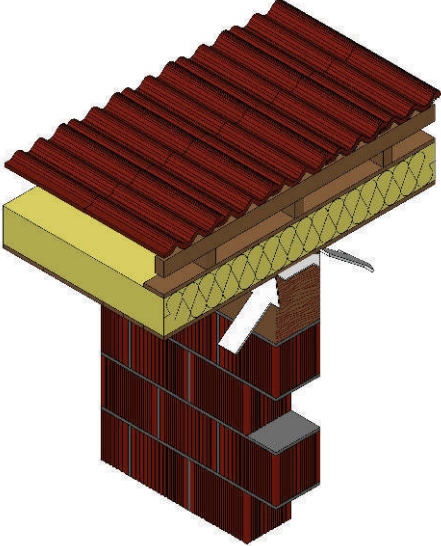
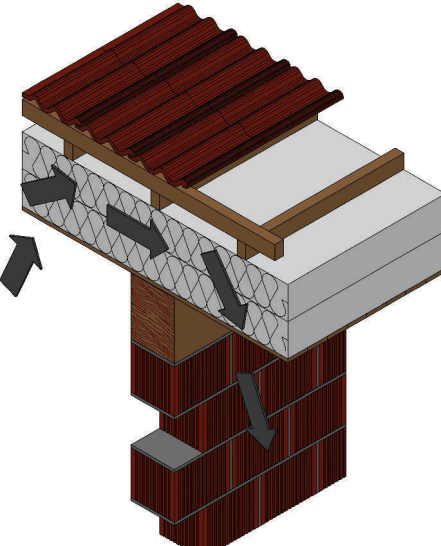
Nel secondo caso, per ridurre la perdita di isolamento acustico si può lavorare sulla frequenza di coincidenza di ciascuno strato. Per fare ciò è importante che i vari strati siano realizzati con materiali diversi oppure con lo stesso materiale ma di spessore diverso in modo tale che la caduta prestazionale, in corrispondenza della frequenza critica di uno strato, sia compensata dal permanere delle prestazioni nell'altro.

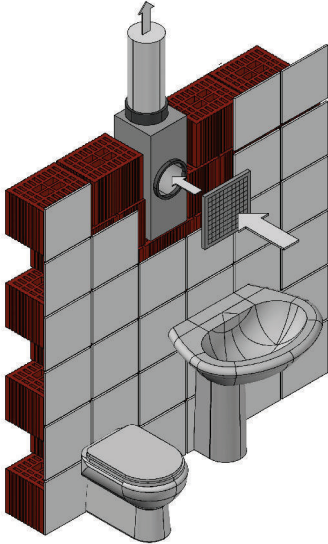
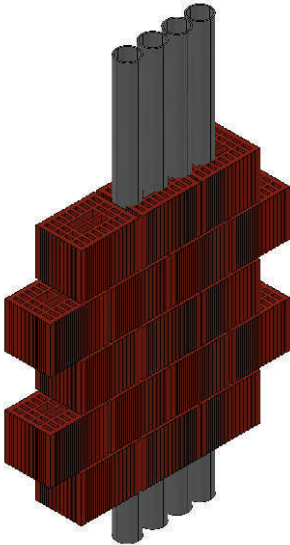
Nell'ultimo caso, le perdite di isolamento alla frequenza di risonanza dello strato d'aria compreso tra i due elementi esterni, possono essere ridotte riempiendo l'intercapedine parzialmente o totalmente con materiale fibroso e realizzando dei collegamenti di tipo elastico tra gli elementi stessi.

Principali errori di realizzazione

Di seguito si riporta un elenco non esaustivo delle principali cause di decadimento prestazionale delle strutture divisorie interne (verticali/orizzontali):

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Giunti verticali dei blocchi non perfettamente intonacati. Su strato singolo di blocchi non intonacati è possibile vedere dei trafiletti di luce da parte a parte. Vi sono piccoli ma numerosi punti in cui si ha il passaggio d'aria.	3-6 dB	1. Maggior cura nella posa dei blocchi e della malta nei giunti verticali ed orizzontali. 2. Aumento dello spessore dell'intonaco superficiale. 3. Controplaccaggio con lastre in cartongesso e materiale fibroso.
		
Fessure presenti sui punti di accoppiamento tra la parete divisoria e le strutture laterali e/o con altri elementi (camini).	1-3 dB	1. Maggior cura nella posa dei blocchi e della malta nei giunti verticali. 2. Aumento dello spessore dell'intonaco superficiale. 3. Controplaccaggio con lastre in cartongesso e materiale fibroso.
		

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Trasmissione di rumore attraverso il pacchetto di copertura. Tavolato passante.	1-10 dB	1. Taglio del tavolato e realizzazione di un setto divisorio sulla testa della parete (intervento dall'alto). 2. Controplaccaggio del tavolato con lastre in cartongesso e materiale fibroso.
		
Trasmissione di rumore attraverso il pacchetto di copertura. Intercapedine con materiale leggero (espanso).	3-6 dB	1. Taglio del tavolato, dello strato isolante e dell'intercapedine e realizzazione di un setto divisorio sulla testa della parete (intervento dall'alto). Sostituzione/aggiunta di materiale fibroso fonoassorbente. 2. Controplaccaggio del tavolato con lastre in cartongesso e materiale fibroso.
		

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Trasmissione di rumore attraverso i condotti di sfiato di bagni e cucine.	1-9 dB	1. Impiego di condotti separati in materiale multistrato e/o foderati con materiale elastico ed eventualmente aggiungendo della malta per separare i condotti e creare un sistema massa – molla – massa. 2. Evitare il contatto rigido tra i vari condotti. 3. Installazione di silenziatori all'imbocco del condotto.
		
Indebolimento della struttura per il passaggio degli impianti sanitari.	1-9 dB	1. Realizzazione di contropareti in cartongesso per l'alloggiamento degli impianti. 2. Realizzazione di una banchina per l'alloggiamento ad incasso della cassetta dello sciacquone.
		

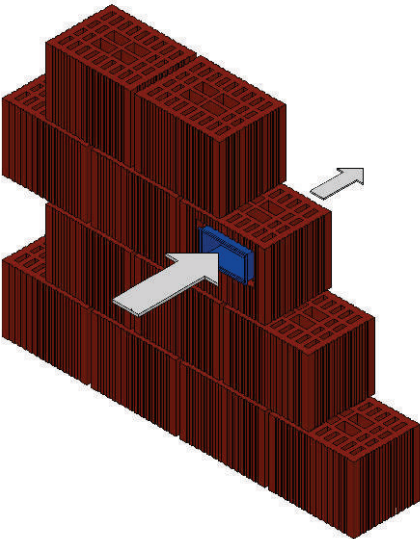
Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Posizionamento delle scatole elettriche.	1-3 dB	1. Evitare le contrapposizioni tra le scatole sui due lati. 2. Tamponare il retro delle scatole con materiale fibroso. 3. Evitare il passaggio di canalizzazioni elettriche da parte a parte delle divisorie. Eventualmente inserire nelle canalizzazioni del materiale fibroso e chiudere i condotti ermeticamente (garantire la tenuta all'aria).
		

Tabella 10: R'_w - principali cause di decadimento delle prestazioni. Fonte: TBZ S.r.l.

Isolamento acustico di facciata

La determinazione sperimentale dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata viene descritta dalla norma UNI EN ISO 140-5. La norma definisce due metodi che sono: l'utilizzo di un altoparlante come sorgente sonora esterna oppure l'uso del rumore da traffico presente. Il parametro che viene misurato è definito dalla seguente relazione:

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

dove $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora all'esterno ad una distanza di 2 m davanti alla facciata; L_2 è il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente; T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0,5 s.

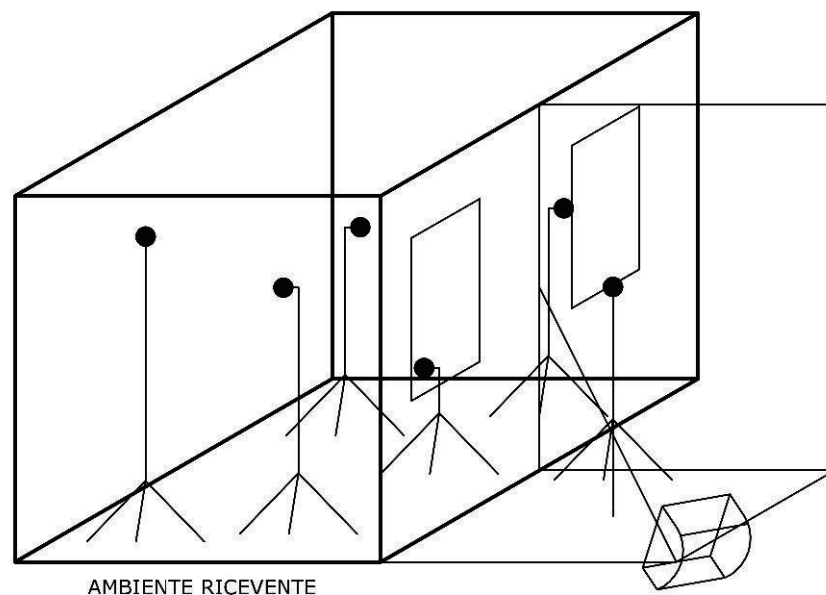


Fig. 19: Schema per la determinazione dell'indice $D_{2m,nT,w}$. Fonte: TBZ S.r.l.

Se la misura viene effettuata utilizzando il metodo dell'altoparlante esso va posizionato sul terreno rivolto verso il centro della facciata con un angolo di circa 45° e ad una distanza minima orizzontale di 5 m dal piano più esterno della facciata. La misura esterna va effettuata invece posizionando il microfono a 2 m dal centro della facciata e ad una altezza dal pavimento di 1,5 m.

Per quanto riguarda le posizioni di misura nell'ambiente ricevente occorre scegliere almeno 5 punti con caratteristiche di suono diffuso. In altre parole occorre:

- evitare di misurare troppo vicino alla parete sottoposta a test (campo diretto);
- evitare di misurare troppo vicino a superfici riflettenti o eccessivamente assorbenti;
- eseguire le misurazioni variando casualmente l'altezza da terra del microfono.

Per ambienti di grandi dimensioni o con geometrie complesse, il numero di misurazioni va incrementato in maniera da ottenere una media nello spazio del livello sonoro.

La verifica va quindi completata con la misurazione del rumore di fondo e del tempo di riverberazione.

Il rumore di fondo durante le prove non deve essere tale da influenzare o addirittura mascherare il segnale sonoro nell'ambiente ricevente. In linea di principio il rumore di fondo deve essere 6-10 dB inferiore, frequenza per frequenza, al livello L_2 .

Il tempo di riverberazione viene determinato misurando il tempo di decadimento di un segnale emesso all'interno dell'ambiente ricevente che può essere di tipo: continuo (rumore rosa), impulsivo (palloncini, pistola, clappatore) o con un segnale dove viene variata progressivamente la frequenza emessa (sine sweep). Anche per il tempo di riverberazione occorre eseguire varie prove cambiando la combinazione sorgente-punto di misura. Si tratta di un parametro di fondamentale importanza per la normalizzazione del risultato delle prove di isolamento. Infatti, un suono immesso in un ambiente è fortemente influenzato dalle caratteristiche acustiche proprie dell'ambiente stesso. In un ambiente completamente privo di arredi (maggiore riverberazione) il suono permane per un maggior tempo andando a sommarsi con i suoni successivi. Ciò determina un aumento del livello sonoro totale. Al contrario, in un ambiente completamente arredato, il suono viene assorbito e diffuso da molteplici superfici e quindi decresce in intensità molto più velocemente (minore riverberazione). A parità di energia sonora immessa in un ambiente, il livello sonoro risulta maggiore in un ambiente fortemente riverberante. Per evitare che questo influenzi la determinazione del potere fonoisolante apparente, i risultati vanno rapportati ad un tempo di riverberazione standard che per gli ambienti residenziali è pari a 0,5 secondi.

La determinazione dell'indice mononumerico di valutazione dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT,w}$

Il metodo per determinare il valore dell'indice mononumerico di valutazione dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT,w}$ è lo stesso descritto descritto nella norma UNI EN ISO 717-1 per il potere fonoisolante e per il potere fonoisolante apparente. Il valore dell'indice di valutazione è ottenuto sovrapponendo la curva sperimentale di $D_{2m,nT,w}$ (misurata) con una curva di riferimento definita dalla norma, in modo tale che la somma degli scarti favorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento sia minore o uguale a 32. Il valore a 500 Hz della curva di riferimento traslata rappresenta l'indice di valutazione del potere fonoisolante. Anche in questo caso all'indice di valutazione possono essere sommati i termini di adattamento spettrale C e C_{tr} per meglio adattare il risultato alla sensazione uditiva umana in relazione alla tipologia della fonte di rumore.

Fattori che influenzano la prestazione complessiva della facciata

Se la facciata di un edificio presenta, oltre alla parte muraria, anche finestre, porte, cassonetti, prese d'aria per la ventilazione degli ambienti interni, questi elementi rappresentano delle vie preferenziali per la trasmissione del rumore e quindi dei punti deboli che possono pregiudicare le prestazioni dell'elemento di facciata nel suo insieme.

L'isolamento acustico complessivo di una facciata dipende pertanto dalle superfici dei vari componenti:

$$R'_w = -10 \log \left(\sum \frac{S_n}{S_{totale}} \cdot 10^{\frac{R_n}{10}} + \sum \frac{S_{n(\text{piccoli elementi})}}{S_{totale}} \cdot 10^{\frac{-D_{\text{piccoli elementi}}}{10}} \right) \quad [dB]$$

$$D_{2m,nT,w} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{0,163 \cdot V}{T_0 \cdot S} \right) \quad [dB]$$

Dove:

S_n sono le superfici dei vari componenti (parete opaca, serramento, porte);

R_n sono i valori di potere fonoisolante dei vari componenti;

$S_{n \text{ piccoli elementi}}$ è la superficie degli elementi tecnici quali cassonetti, prese di ventilazione;

$D_{\text{piccoli elementi}}$ è il valore di isolamento acustico degli elementi tecnici;

ΔL_{fs} fattore correttivo per la forma della facciata.

Il serramento è senza dubbio l'elemento determinante per quanto riguarda le prestazioni complessive della facciata e queste dipendono principalmente da due fattori: il potere fonoisolante del serramento stesso e la sua superficie rispetto alla superficie totale della facciata.

Infatti più vetro è presente in facciata, più il valore di abbattimento della facciata si avvicina a quello del vetro.

Un esempio: parete con $R'_w=50$ dB, finestra con $R'_w=38$ dB, percentuale di superficie vetrata tra 5% e 98% (stanza ad angolo di dimensioni 3,38 m x 3,65 m e altezza netta 2,61 m). Dal grafico si nota come i valori di isolamento decrescano da 50 dB (parete completamente cieca) fino a valori di 38 dB per pareti completamente finestrate.

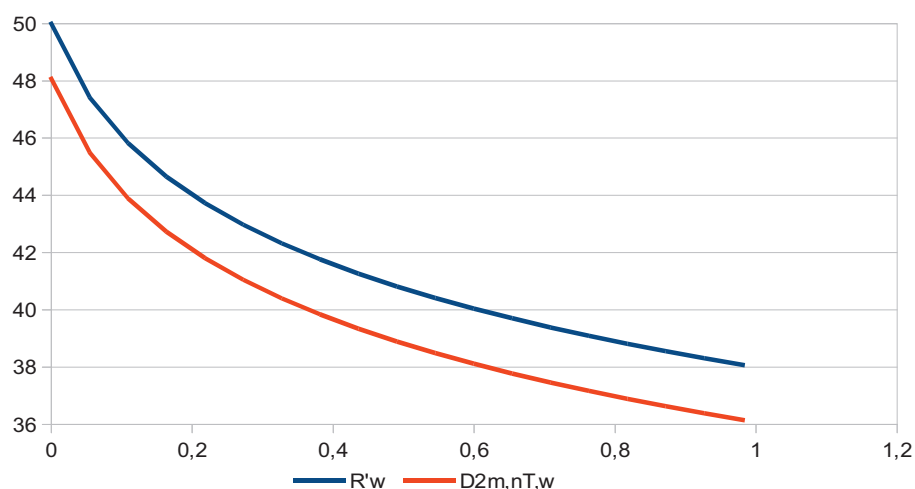


Fig. 19: andamento dei parametri di isolamento R'_w e $D_{2m,nT,w}$ al crescere della percentuale di superficie finestrata. Fonte: TBZ Srl

La differenza numerica tra R'_w e $D_{2m,nT,w}$ dipende dalla geometria del vano di ricezione, mentre l'andamento delle due curve è uguale. Si ricorda che la differenza tra **potere fonoisolante apparente** e **isolamento acustico normalizzato** D_n è che la superficie S dell'elemento separante non viene considerata, dato che non è determinabile. Alle persone che vivono in un appartamento non interessa quanto sia l'isolamento della facciata per unità di superficie, ma quanto sia la prestazione complessiva. Inoltre, l'impiego dell'indice D richiede al progettista ed alle ditte esecutrici una maggiore attenzione agli ambienti con maggior superficie esposta (in particolare alle stanze ad angolo).

Per quanto riguarda i prodotti, esistono in commercio materiali e tecnologie che permettono di realizzare serramenti con elevatissime prestazioni sia acustiche che termiche.

Le ditte produttrici di serramenti forniscono valori di abbattimento acustico molto elevati, essi però vengono testati in laboratorio dove l'infisso viene montato a regola d'arte e l'apertura per il suo alloggiamento viene realizzata in modo preciso.

In realtà, le condizioni del contorno dell'infisso sono molto variabili e si assiste molto spesso alla posa di serramenti ad elevate prestazioni che però, una volta montati, non permettono alla facciata di ottenere risultati che rispettino i limiti imposti dalla normativa.

Molti studi condotti attraverso prove acustiche in opera hanno evidenziato come il montaggio del serramento e la sua corretta registrazione siano operazioni determinanti per garantire le prestazioni acustiche in opera, anche in relazione alla tipologia di oscurante scelto.

Un punto debole è rappresentato dall'interfaccia tra il paramento murario ed il falso telaio dove spesso si creano delle fessure che vengono erroneamente riempite con materiale poliuretanico, con scarse proprietà fonoisolanti, e che rappresentano dei ponti acustici considerevoli. Capita spesso di riscontrare in cantiere la presenza di fessure di 3-5 cm tra la muratura e il falso telaio, riempite prima del montaggio del serramento con schiuma auto espandente. In corrispondenza di queste fessure l'abbattimento acustico è determinato essenzialmente dell'intonaco interno ed esterno mentre lo strato di schiuma e l'eventuale isolamento termico in polistirene espanso non offrono alcuna garanzia di isolamento acustico.

Se consideriamo una parete di dimensioni 4 x 2,7 m (10,8 m²), avente una porta finestra di dimensioni 2,2 x 1,0 m (2,2 m²) intorno alla quale è stata lasciata una luce di 3 cm (lati verticali e lato superiore), possiamo stimare un potere fonoisolante complessivo pari a:

Elemento	Superficie m ²	% superficie	R'_w [dB]	% incidenza sul risultato complessivo
Muratura	8,4	77,9	50	4,1%
Porta finestra	2,2	20,5	36	17,2%
Fessure tamponate	0,16	1,6	20	78,7%
Risultato complessivo			37,2 dB	
Risultato atteso senza fessure			43,9 dB	
Perdita prestazionale			- 6,7 dB	

Tabella 11: Esempio numerico dell'incidenza dei piccoli ponti acustici sulle facciate. Fonte: TBZ S.r.l.

Questo semplice esempio mostra come la sola fase di montaggio possa vanificare completamente la scelta progettuale (e la spesa) per un serramento particolarmente performante. Sicuramente è più conveniente economicamente assicurare una buona esecuzione piuttosto che adottare finestre e stratigrafie costose.

Oltre al serramento, un altro punto critico per l'isolamento acustico di facciata è rappresentato dai fori di ventilazione. Essi sono essenziali per il passaggio dell'aria ma al contempo favoriscono la trasmissione dei rumori esterni all'interno dell'edificio. La soluzione che aiuta a ridurre questo problema è la realizzazione di aerazioni silenziate che possono essere di tipo rettilineo, con rivestimento interno fonoassorbente oppure a labirinto, nelle quali le prese di ventilazione sono tra loro sfalsate.

L'attenuazione del suono per assorbimento: il silenziatore

Quando un'onda sonora colpisce una superficie fonoassorbente, l'energia meccanica dell'onda si dissipa sotto forma di calore ed il suono viene “assorbito”. I silenziatori funzionano seguendo lo stesso principio: l'aria passa in una tubazione rivestita con materiale fonoassorbente come fibra di legno, lana di legno, lana minerale, lana di pecora o materiali schiumosi elastici, ed il suono viene progressivamente attenuato per dissipazione.

Chiaramente, per fare in modo che tale sistema funzioni, l'aria deve entrare in contatto con il materiale fibroso ed è quindi di fondamentale importanza utilizzare prodotti innocui per la salute dell'uomo.



Fig. 20: Silenziatore flessibile. Fonte: TBZ S.r.l.

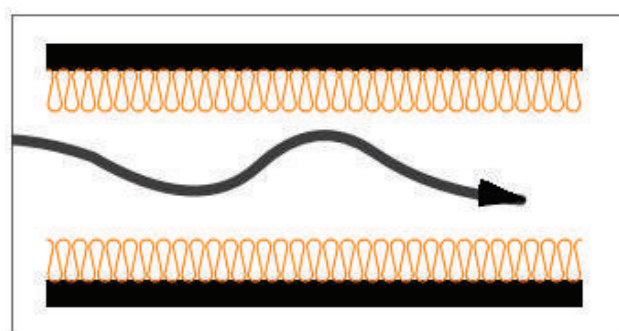


Fig. 21: Principio di funzionamento del silenziatore. Fonte: TBZ S.r.l.

Una ricerca condotta sull'isolazione acustica dei tetti leggeri ha portato a delle osservazioni interessanti in merito al comportamento acustico di spifferi e fessurazioni. Sono stati praticati diversi fori nella copertura con diametri da 20 a 100 mm e successivamente è stato misurato l'abbattimento acustico. Si è osservato che con il solo foro grezzo l'isolamento acustico peggiora in maniera lieve mentre infilando un tubo di plastica nel buco si registra un notevole abbassamento del potere fonoisolante, questo perché le onde sonore si riflettono sulla superficie interna del tubo in plastica anziché essere assorbite da un materiale fibroso o poroso quale è la fibra di legno della copertura. Questo esperimento ha dimostrato i vantaggi dei coibenti fibrosi pesanti rispetto a quelli schiumati leggeri.

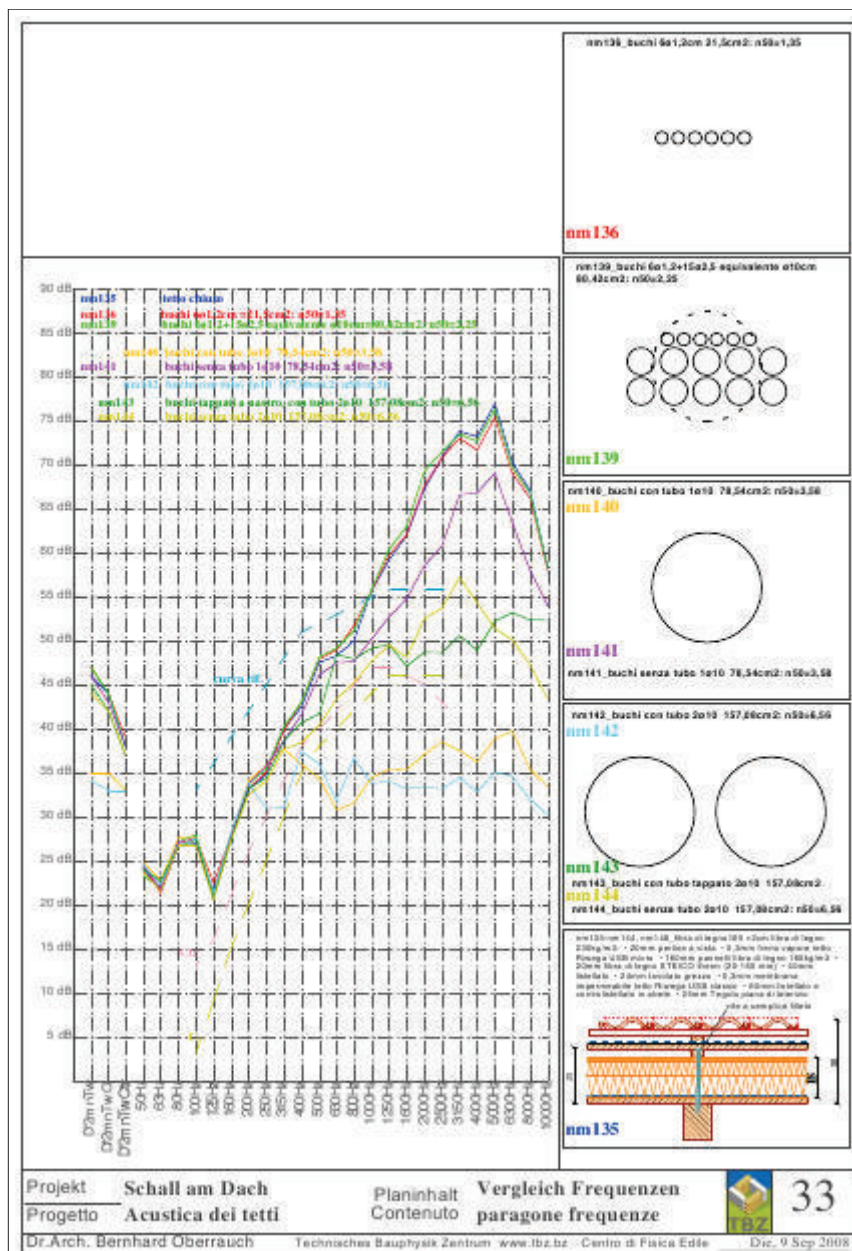
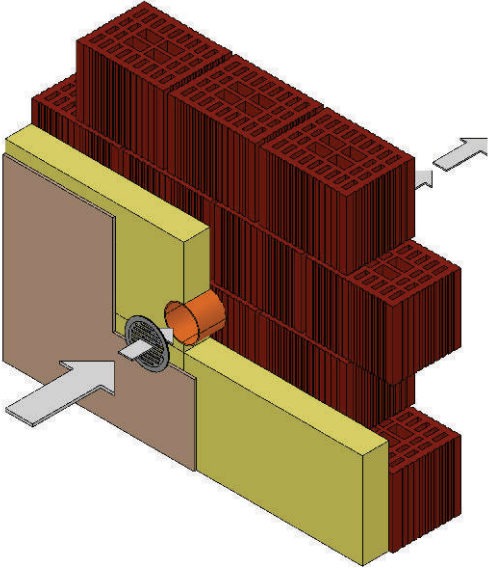
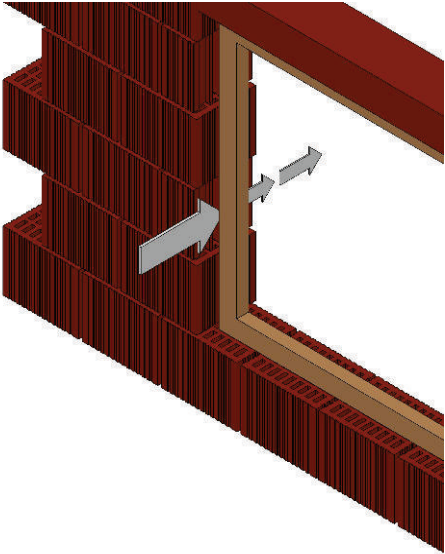


Fig. 22: Esperimento nella ricerca "acustica dei tetti". Fonte: TBZ S.r.l.

Principali errori di realizzazione

Di seguito si riporta un elenco non esaustivo delle cause principali di decadimento prestazionale delle facciate:

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Fori di aerazione non silenziati.	5-15 dB	1. Inserimento setto assorbente. 2. Installazione trappola acustica.
		
Montaggio del serramento con eccessivo spazio tra la struttura muraria ed il telaio.	3-9 dB	1. Ripristino della massa con intonaco in luogo di schiume autoespandenti. 2. Tamponamento delle fessure con materiali fibrosi. 3. Realizzazione di un cordolo in pietra sul perimetro esterno del serramento.
		

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Insufficiente spinta della finestra sulle guarnizioni.	1-3 dB	1. Regolazione della pressione di chiusura del serramento. 2. Controllo periodico/sostituzione delle guarnizioni.
Cassonetto avvolgibile non isolato.	3-6 dB	1. Posa di un travetto massiccio dietro al cassonetto. 2. Inserimento di materiale fonoisolante /assorbente nel vano del cassonetto.

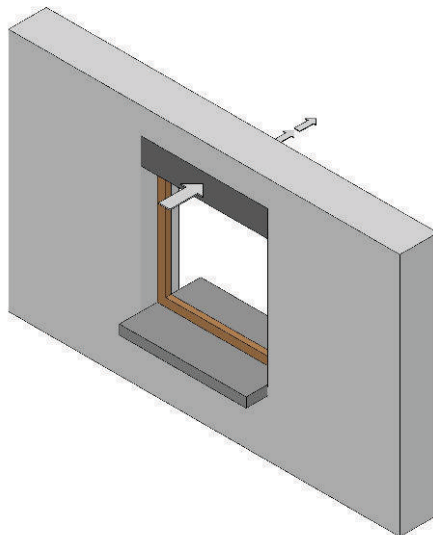


Tabella 12: $D_{2m,nl,w}$ - principali cause di decadimento delle prestazioni. Fonte: TBZ S.r.l.

Considerazioni finali sull'isolamento di facciate

I punti seguenti riassumono in modo generale le esperienze delle misure:

1. Il principio massa-molla-massa funziona anche nei tetti leggeri.
2. Le masse sono importanti per ridurre il passaggio di rumore a frequenze basse (p.e. traffico, aerei, ...).
3. Coibentazioni leggere-rigide (polistirene espanso, polistirene estruso, ...) non sono in grado di isolare adeguatamente ed hanno bisogno di masse aggiuntive.
4. Aperture come crepe o altre imperfezioni (mancanza di tenuta all'aria) indeboliscono l'isolamento acustico se non sono presidiate da materiali acusticamente assorbenti. Ad esempio le fibre in questo caso sono più adatte di materiali rigidi.
5. Gli elementi che compongono la facciata, come le finestre o le prese d'aria, influiscono molto sul risultato complessivo. L'elemento più debole influisce di più e determina la prestazione complessiva dell'intera facciata (si vedano gli esempi riportati nel paragrafo "Fattori che influenzano la prestazione complessiva della facciata"). Economicamente può risultare controproducente montare degli elementi particolarmente performanti (ad esempio: serramenti) abbinati ad altri poco isolanti (ad esempio: prese d'aria o cassonetti non coibentati). È certamente più conveniente livellare le prestazioni verso l'alto investendo maggiormente sugli elementi notoriamente più deboli.
6. Anche il tetto non può essere considerato da solo, ma vale la regola che l'elemento più debole influisce di più e determina la prestazione complessiva. Il miglior tetto non aiuta, se non è garantito un isolamento acustico buono della facciata. La regola fondamentale è quella di considerare l'involucro nel suo insieme evitando di curare solo uno degli elementi tralasciando quelli ad esso collegati.
7. Elementi che passano dall'interno all'esterno (travetti, travi, balconi...) conducono molto rumore all'interno. I tagli termici ed acustici sono fondamentali. Per le coperture è preferibile una soluzione con finti travetti esterni.
8. In cantiere spesso accadono situazioni non previste per cui è importantissimo non prevedere di rimanere al limite prestazionale previsto dalla legge ma lasciare un margine sicurezza di almeno 5 dB.

Trasmissione del rumore per via strutturale

Livello di rumore da calpestio

Il livello di rumore da calpestio è definito come il livello di pressione sonora misurato nell'ambiente ricevente quando sul pavimento è in funzione una macchina di rumore di calpestio normalizzata.

Anche in questo caso, come per i rumori di tipo aereo, si possono effettuare delle prove di laboratorio descritte dalla norma UNI EN ISO 140-6 oppure delle prove in opera per le quali si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 140-7.

Il livello sonoro misurato dipende sia dalla natura dell'elemento di separazione sia dalle caratteristiche riverberanti dell'ambiente ricevente, pertanto anche in questo caso si definisce un **livello normalizzato di rumore da calpestio** rispetto ad un ambiente standard con un'area di assorbimento equivalente di 10 m^2 .

Il livello normalizzato di rumore da calpestio viene definito dalla seguente relazione:

$$L_n = L + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$$

dove L è il livello di pressione sonora misurato nell'ambiente ricevente quando il solaio è sollecitato da un generatore di calpestio normalizzato; A è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente; A_0 è l'area di assorbimento equivalente di riferimento pari a 10 m^2 .

Il livello di rumore di calpestio L_{nT} normalizzato rispetto al tempo di riverbero è dato invece da:

$$L_{nT} = L + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

dove T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a $0,5 \text{ s}$.

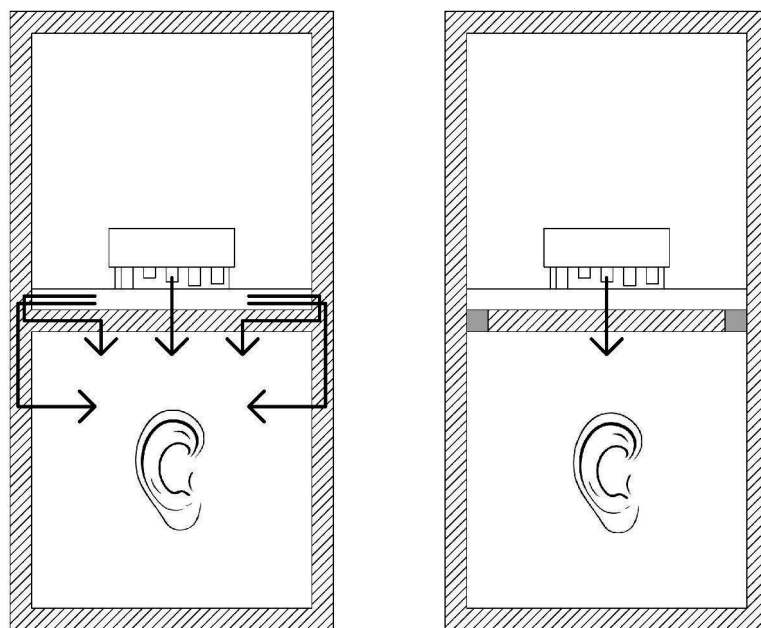


Fig. 23: prova in opera (sx) e prova in laboratorio (dx). Fonte: TBZ S.r.l.

Nelle prove di laboratorio il solaio in prova è collegato con le strutture perimetrali in modo da limitare le trasmissioni laterali, mettendo in evidenza la sola trasmissione diretta attraverso il solaio. In particolare il giunto che supporta il solaio di prova deve essere realizzato in calcestruzzo e le pareti laterali devono avere una massa ed uno spessore sufficienti per limitare la velocità delle vibrazioni.

La prova di laboratorio permette di misurare il livello di pressione sonora normalizzato L_n .

Al contrario, la situazione in opera comporta inevitabilmente che una parte dell'energia venga trasmessa per fiancheggiamento sotto forma di vibrazioni.

La prova in opera permette di misurare il livello di pressione sonora normalizzato L'_n dove l'apice indica la potenziale presenza di componenti di rumore di tipo indiretto.

La determinazione del livello normalizzato del rumore da calpestio

La determinazione in opera del livello di rumore da calpestio va eseguita secondo le indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 140 parte 7 e parte 14 (situazioni particolari di misura).

Dati due ambienti generalmente sovrapposti e divisi fra loro da una struttura (solaio), si genera un segnale di eccitazione usando un generatore normalizzato di calpestio. Si tratta di un apparecchio elettromeccanico costituito da un meccanismo che lascia cadere, da un'altezza di 4 cm sulla superficie del pavimento, 5 martelletti in acciaio del peso di 500 gr ciascuno. Gli impatti si susseguono con intervalli di 100 ms. Ogni generatore deve soddisfare le specifiche riportate nella norma UNI EN ISO 10140-5 per cui, indipendentemente dal produttore dell'apparecchio, la sollecitazione del solaio risulta "normalizzata".



Fig. 24: generatore di calpestio. Fonte: TBZ S.r.l.

Registrazione audio del generatore di calpestio per due differenti finiture di pavimento		
	Legno	Ceramica
Locale sorgente (sopra)	+	+
Locale ricevente (sotto)	+	+
	L'_{nw} : 53 dB	L'_{nw} : 62 dB

Tabella 13: registrazione audio del generatore di calpestio. Fonte: TBZ S.r.l.

Il generatore deve essere posizionato in almeno 4 posizioni distribuite sulla porzione del solaio di prova. È preferibile disporre il generatore orientato a 45° rispetto alla direzione delle travi della struttura portante. Nel locale ricevente è necessario eseguire almeno 6 misurazioni del livello sonoro con il generatore in funzione. Anche in questo caso è necessario:

- evitare di misurare troppo vicino al soffitto (campo diretto);
- evitare di misurare troppo vicino a superfici riflettenti o eccessivamente assorbenti;
- eseguire le misurazioni variando casualmente l'altezza da terra del microfono.

Per ambienti di grandi dimensioni o con geometrie complesse, il numero di misurazioni va incrementato in maniera da ottenere una media nello spazio del livello sonoro.

La verifica va quindi completata con la misurazione del rumore di fondo e del tempo di riverberazione.

Il rumore di fondo durante le prove non deve essere tale da influenzare o addirittura mascherare il segnale sonoro nell'ambiente ricevente. In linea di principio il rumore di fondo deve essere 6-10 dB inferiore, frequenza per frequenza, al livello L_2 .

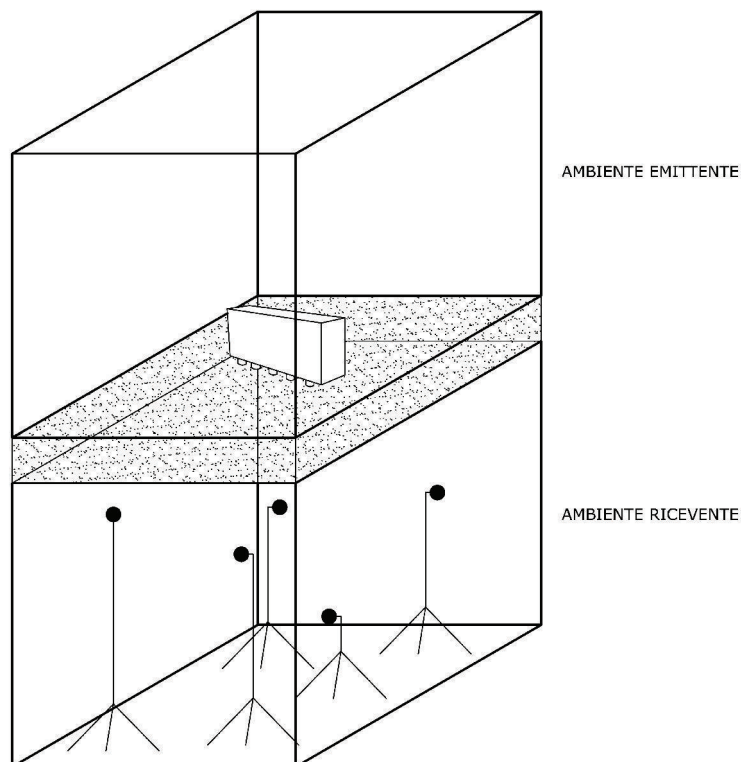


Fig. 25: Schema per la determinazione dell'indice $L'w$. Fonte: TBZ S.r.l.

Il tempo di riverberazione viene determinato misurando il tempo di decadimento di un segnale emesso all'interno dell'ambiente ricevente che può essere di tipo: continuo (rumore rosa), impulsivo (palloncini, pistola, clappatore) o con un segnale dove viene variata progressivamente la frequenza emessa (sine sweep). Anche per il tempo di riverberazione occorre eseguire varie prove cambiando la combinazione sorgente – punto di misura. Si tratta di un parametro di fondamentale importanza per la normalizzazione del risultato delle prove di isolamento. Infatti un suono immesso in un ambiente è fortemente influenzato dalle caratteristiche acustiche proprie dell'ambiente stesso. In un ambiente completamente privo di arredi (maggiore riverberazione) il suono permane per un maggior tempo andando a sommarsi con i suoni successivi. Ciò determina un aumento del livello sonoro totale. Al contrario, in un ambiente completamente arredato, il suono viene assorbito e diffuso da molteplici superfici e quindi decresce in intensità molto più velocemente (minore riverberazione). A parità di energia sonora immessa in un ambiente, il livello sonoro risulta maggiore in un ambiente fortemente riverberante. Per evitare che questo influenzi la determinazione del potere fonoisolante apparente i risultati vanno rapportati ad un tempo di riverberazione standard che per gli ambienti residenziale è pari a 0,5 secondi.

La determinazione dell'indice di valutazione mononumerico del livello normalizzato di calpestio $L_{n,w}$ e $L'_{n,w}$

Come visto per l'isolamento acustico per via aerea, anche nel caso del rumore da calpestio le prestazioni acustiche dell'elemento, misurate in laboratorio o in opera, vengono descritte da un indice di valutazione del livello di calpestio: $L_{n,w}$ in laboratorio e $L'_{n,w}$ in opera.

La norma UNI EN ISO 717-2 descrive il “metodo di confronto” con il quale si ottiene l'indice di valutazione sovrapponendo la curva sperimentale L_n (misurata) con la curva di riferimento definita dalla norma, in modo tale che la somma degli scarti favorevoli della curva sperimentale sia minore o uguale a 32. Il valore a 500 Hz della curva di riferimento traslata rappresenta l'indice di valutazione del livello normalizzato del rumore di calpestio.

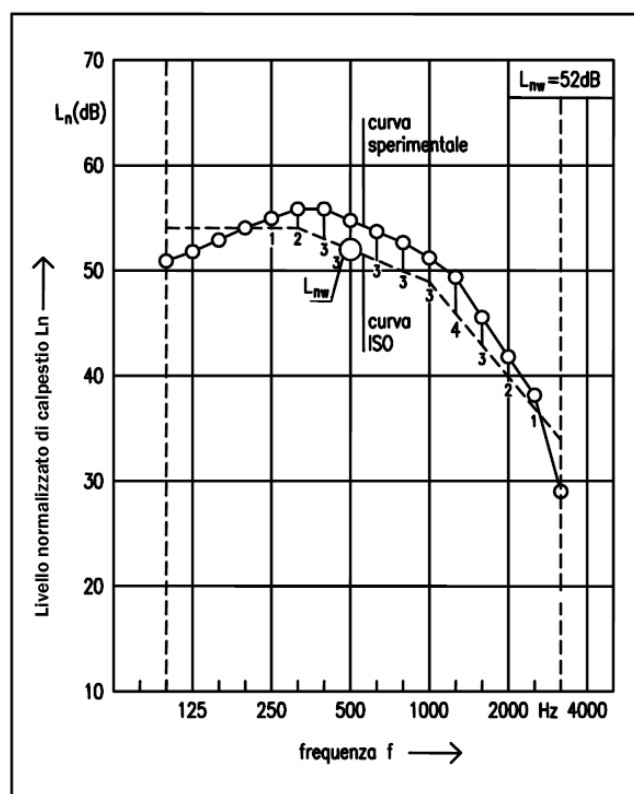


Fig. 26: Determinazione dell'indice di valutazione. Fonte: dispense Scuola di acustica Università di Ferrara

Nel rumore di calpestio il termine di adattamento spettrale C_1 , $C_{1,50-2500}$ serve per correggere il risultato rispetto al tipo di solaio in calcestruzzo con/senza un'efficace strato resiliente o in legno. Solai in calcestruzzo con un'efficiente strato resiliente hanno $C_1 = 0$. $C_{1,50-2500}$ tiene conto delle basse frequenze da 50-100 Hz, che sono fondamentali per la valutazione con il senso uditivo umano. Attualmente, i termini di adattamento spettrale vengono applicati in pochi Paesi. In Italia non vengono ancora considerati nella verifica del rispetto dei parametri normativi.

Meccanismo di propagazione del rumore di calpestio

Innanzitutto è necessario definire che i rumori impattivi sono quelli causati dai passi, dalla caduta di oggetti, da urti, dallo spostamento di sedie o mobili. Tali azioni si propagano sotto forma di **vibrazioni** a tutta la struttura interessata sia in modo verticale che orizzontale e vengono poi re-irradiate negli ambienti come rumore.

L'entità del rumore re-irradiato dipende dalla capacità di smorzamento delle vibrazioni che possiede la struttura e dal tipo di vincolo strutturale esistente tra il solaio e le pareti perimetrali.

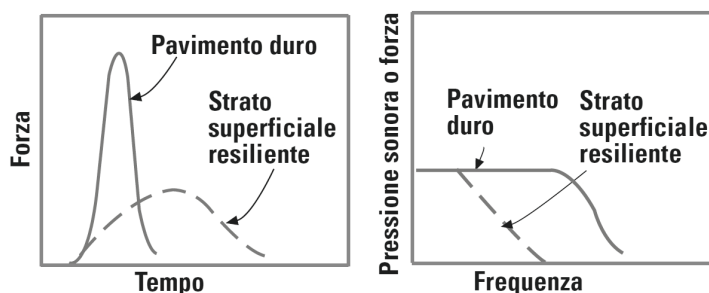


Fig. 27: reazione dei pavimenti alle sollecitazioni. Fonte: Manuale di acustica applicata (R. Spagnolo)

Nell'immagine sopra riportata si evince che nel caso di un urto su un materiale rigido il rumore raggiunge un picco elevato che si distribuisce su un tempo breve, al contrario, con la presenza di un materiale resiliente, la forza impattiva ha un picco più basso che si dilata nel tempo grazie alle proprietà di deformazione del materiale. Ne consegue che il rumore re-irradiato negli ambienti avrà un valore minore.

La soluzione ottimale per limitare la trasmissione dei rumori impattivi è quella del cosiddetto “solaio galleggiante” il cui principio si fonda sulla realizzazione di un piastra (elemento che riceve l'urto) perfettamente isolata rispetto alle strutture portanti dell'edificio, impedendo così la trasmissione delle vibrazioni che rimangono isolate dalla struttura portante e si dissipano grazie allo smorzamento dello strato resiliente.

Nell'immagine sottostante è riportato lo schema di un pavimento galleggiante.

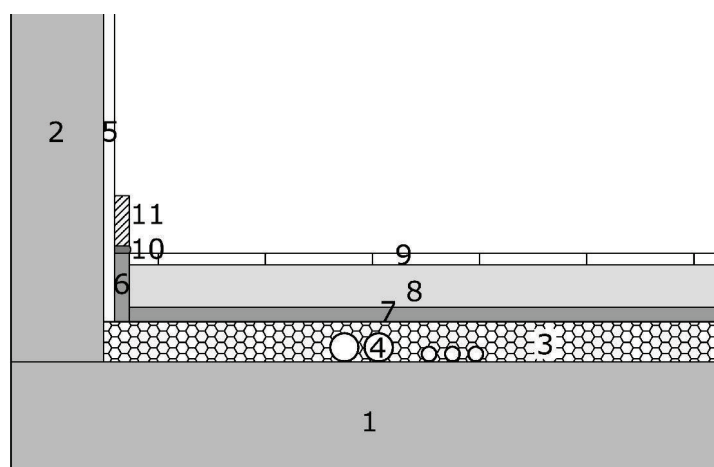


Fig. 28: Pavimento galleggiante. Fonte: TBZ S.r.l.

1. solaio – 2. parete – 3. massetto alleggerito – 4. impianti – 5. intonaco – 6. fascia resiliente perimetrale – 7. materassino resiliente – 8. massetto galleggiante – 9. pavimentazione – 10. sigillante elastico – 11. zocchetto

La posa di materiali resilienti molto sottili nella realtà del cantiere può portare risultati peggiori di quelli previsti considerando solo il dato di rigidità dinamica misurata in laboratorio. Se ci sono dei sassolini con diametro 5 mm sotto il materiale resiliente dello stesso spessore, questi possono formare dei ponti acustici e/o lacerare lo strato elastico.

La rigidità dinamica

Come detto precedentemente per ottenere una riduzione della trasmissione sonora dovuta al calpestio si utilizza il pavimento galleggiante che consiste in una pavimentazione separata dal solaio attraverso uno strato continuo in materiale resiliente.

Il parametro che descrive il grado di elasticità del materiale resiliente nei confronti delle eccitazioni di tipo dinamico è la **rigidità dinamica**. Il suo funzionamento è assimilabile a quello di una molla, pertanto più la sua costante di rigidità è elevata e più il materiale è rigido, con la conseguente riduzione della capacità di attenuazione della trasmissione vibratoria.

La definizione della rigidità dinamica è la seguente:

$$s' = (F/A) / \Delta L \quad [\text{MN/m}^3]$$

dove F è la forza dinamica perpendicolare al campione in Newton; A è la superficie del campione e ΔL è la variazione dinamica dello spessore del campione in metri.

Affinché un pavimento galleggiante offra un buon isolamento è necessario che la sua frequenza di risonanza sia bassa, che la massa galleggiante sia molto pesante e che il materiale resiliente sottostante abbia caratteristiche sia elastiche che smorzanti in modo che l'ampiezza delle vibrazioni si riduca nel minor tempo possibile.

Correlando il dato di rigidità dinamica del materiale resiliente con i valori delle masse superficiali inferiori (struttura portante) e superiori (massetto) è possibile calcolare la prestazione acustica di un solaio.

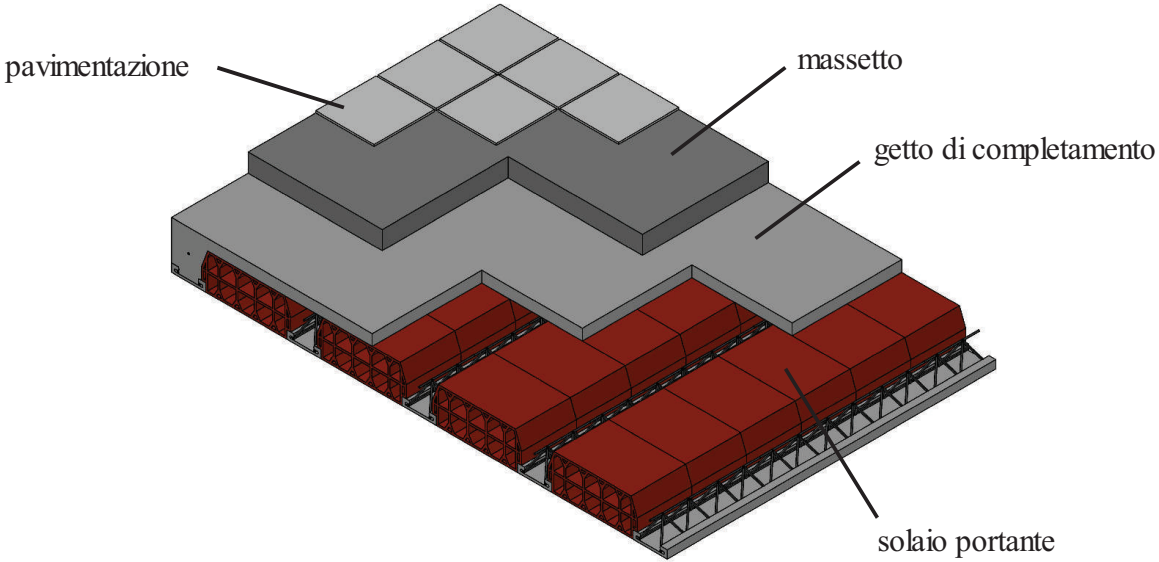
Il solo valore di rigidità dinamica del materiale resiliente, così come il valore di attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio ΔL , non danno informazioni sufficienti sulle prestazioni acustiche di una specifica stratigrafia ma possono essere usate per paragonare differenti materiali o sistemi anticalpestio.

Da confronti tra misurazioni ed i calcoli previsionali sorgono spesso dubbi sulla correttezza del dato di rigidità dinamica che spesso viene ricavato con metodi che si differenziano da produttore a produttore. Nel caso di accoppiamento di due materiali resilienti, non risulta possibile valutare preventivamente la prestazione finale del sistema.

In estrema sintesi, il dato di rigidità dinamica va valutato con estrema criticità ed è preferibile scegliere i materiali anche sulla base di caratteristiche come la resistenza alla lacerazione, la deformazione a compressione (“comprimibilità”) e la facilità di posa e di sagomatura.

Principali errori di realizzazione

Di seguito si riporta un elenco non esaustivo delle cause principali di decadimento prestazionale dell'isolamento da rumore di calpestio dei solai:

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Nessun materiale resiliente impiegato.	15-25 dB	1. Nel locale sorgente: (misura più efficace e più costosa): scarnificazione del massetto e realizzazione del pavimento galleggiante. 2. Ricopertura della pavimentazione con listoni in legno flottante o moquette. 3. Nel locale ricevente (misura meno efficace e meno costosa): applicare un controsoffitto (poco efficace nel caso di importanti trasmissioni attraverso le strutture laterali).
 Il diagramma illustra la struttura di un solaio portante. Si vede una griglia di travi metalliche (solaio portante) ricoperta da una serie di pannelli rossi (massetto). Sopra il massetto c'è uno strato grigio (getto di completamento) e in cima una pavimentazione a piastrelle grigie. Le etichette puntano a: 'pavimentazione' (le piastrelle), 'massetto' (i pannelli rossi), 'getto di completamento' (lo strato grigio) e 'solaio portante' (la griglia di travi).		
Non corretta scelta/posa del materiale resiliente.	10-15 dB	1. Nel locale sorgente: (misura più efficace e più costosa): scarnificazione del massetto e realizzazione del pavimento galleggiante. 2. Ricopertura della pavimentazione con listoni in legno flottante o moquette. 3. Nel locale ricevente (misura meno efficace e meno costosa): applicare un controsoffitto (poco efficace nel caso di importanti trasmissioni attraverso le strutture laterali).

Punto critico	Perdita prestazionale	Soluzione (in ordine di priorità)
Collegamenti rigidi al bordo del pavimento (zoccoletti).	5-15 dB	1. Posare con cura la fascia perimetrale e rifilarla solo dopo la posa delle piastrelle. Lasciare uno spazio di 1-2 mm tra le piastrelle e lo zoccoletto (da riempire con silicone o altri materiali elastici). 2. Rimozione degli zoccoletti e ripristino del taglio fra massetto e pareti.

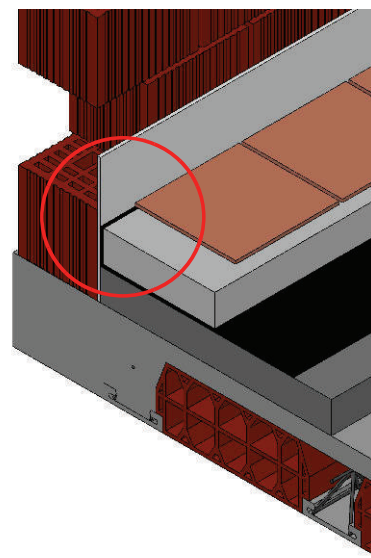
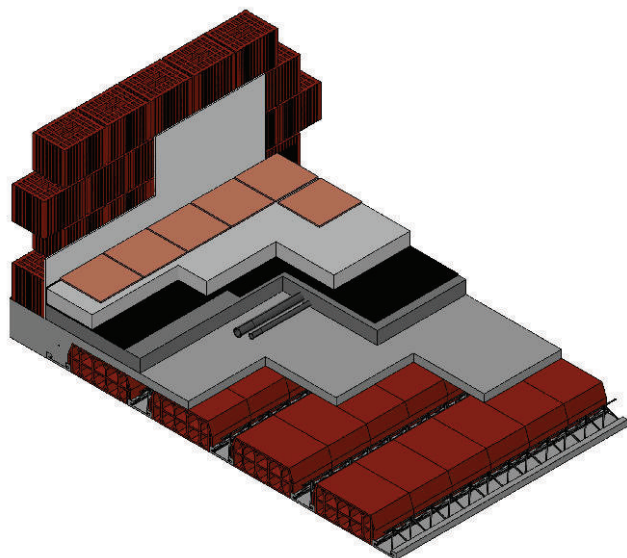


Tabella 14: $L'_{n,w}$ - principali cause di decadimento delle prestazioni. Fonte: TBZ S.r.l.

Rumorosità degli impianti

La legge italiana sui requisiti acustici passivi degli edifici, il DPCM 5/12/1997, prende in esame la rumorosità degli impianti distinguendoli in due principali categorie:

1. Impianti a funzionamento discontinuo: caratterizzati da livelli sonori che variano nel tempo sia per intensità che per numero di eventi che si verificano. Essi sono:
 - impianti idraulici;
 - impianti meccanici (es. sistemi di elevazione, chiusure automatizzate, etc.)
2. Impianti a funzionamento continuo: nei quali il livello sonoro immesso nell'ambiente rimane costante nel tempo. Essi sono:
 - impianto di riscaldamento e raffrescamento;
 - impianto di ventilazione meccanica;
 - impianto di condizionamento.

Il decreto fissa dei livelli massimi di rumorosità per gli impianti, validi per le varie categorie di edifici e sono:

Categoria di edificio	Impianti a funzionamento discontinuo $L_{AS\ max}$	Impianti a funzionamento continuo L_{Aeq}
A: edifici adibiti a residenza o assimilabili	≤ 35	≤ 35
B: edifici adibiti ad uffici o assimilabili	≤ 35	≤ 35
C: edifici adibiti ad albergo, pensione o assimilabili	≤ 35	≤ 35
D: edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura	≤ 35	≤ 25
E: edifici adibiti ad attività scolastica a tutti i livelli	≤ 35	≤ 25
F: edifici adibiti ad attività ricreative o di culto	≤ 35	≤ 35
B: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili	≤ 35	≤ 35

Tabella 15: Fonte: Tabella B dell'allegato A del D.P.C.M. 05/12/97

Impianti idraulici

Gli impianti idraulici sono composti dalle tubazioni di adduzione dell'acqua calda e fredda, dalle tubazioni di scarico che allontanano l'acqua dall'edificio e dagli apparecchi sanitari.

I flussi turbolenti che si generano all'interno delle tubazioni si traducono in vibrazioni che, se trasmesse alla struttura muraria dell'edificio, vengono re-irradiate negli ambienti sotto forma di rumore.

Le interruzioni brusche del flusso d'acqua provocano fenomeni di cavitazione o i cosiddetti colpi di ariete e possono generare rumori intensi di tipo impulsivo.

Generalmente i rumori prodotti dagli impianti idrici sono dovuti alla ridotta sezione delle tubazioni, alla presenza di curve troppo strette o alla mancanza di anse di espansione tali da permettere la dilatazione delle tubazioni.

Per ovviare a questi inconvenienti, oltre alla eliminazione delle cause, è di fondamentale importanza ricorrere alla fasciatura delle tubazioni con materiale resiliente in modo da ridurre la trasmissione di vibrazioni, oppure utilizzare tubazioni di scarico silenziate trattate con materiale fonoisolante.

Un altro accorgimento per ridurre la rumorosità degli impianti idraulici è quello di evitare l'inserimento delle tubazioni nelle tracce delle murature, realizzando apposite contropareti o cavedi ed avendo cura di ancorare le tubazioni con collari in materiale resiliente per ridurre la propagazione delle vibrazioni.

Anche nella fase di progettazione vi possono essere degli accorgimenti che aiutano a limitare il disturbo generato dagli impianti idrici come: evitare che bagni e camere da letto siano adiacenti, l'utilizzo di sciacquoni "a due vie" o il posizionamento dei wc vicino alle colonne di scarico.



Esempio di realizzazione di un cavedio per il passaggio delle tubazioni di scarico e sfiato. Si noti la fasciatura delle tubazioni con materiale resiliente per evitare la propagazione di vibrazioni alla struttura portante.

Fig. 29: Fonte: TBZ S.r.l.

Sistemi di elevazione

In fase di progettazione è importante collocare gli impianti di sollevamento in modo da evitare l'accostamento con ambienti particolarmente sensibili.

I sistemi di elevazione si possono dividere in due categorie principali: elettrici e oleodinamici, inoltre anche il motore può essere collocato in appositi locali oppure all'interno della cabina dell'ascensore.

Nei sistemi di sollevamento di tipo elettrico il rumore prevalente è quello generato dal gruppo motore-argano, dall'attrito delle guide e dal funzionamento delle porte scorrevoli. Gli interventi che devono essere messi in atto per diminuire il disturbo provocato da questi tipi di impianti sono: la scelta di un motore con livelli di potenza sonora ridotti, certificati dalla ditta produttrice, l'aumento del potere fonoisolante e di fonoassorbimento del locale macchine dove è inserito il motore, la lubrificazione periodica dei componenti mobili per evitare il rumore dovuto ad attriti e la regolare manutenzione di tutte le parti dell'impianto.

Per i sistemi di sollevamento di tipo oleodinamico gli interventi da eseguire per ridurre la propagazione del rumore aereo e delle vibrazioni sono: il posizionamento di supporti antivibranti alla base della pompa dell'olio, l'aumento del potere fonoisolante e di fonoassorbimento delle pareti del locale dove è posizionata la centralina, la periodica manutenzione dell'impianto.

Nei sistemi di sollevamento con centralina posta nel vano corsa dell'ascensore i motori devono essere particolarmente silenziosi, inoltre le pareti che costituiscono il vano corsa devono avere un grado di isolamento acustico tale da evitare la propagazione del rumore alle unità abitative ad esso adiacenti.

Impianti di riscaldamento

Gli impianti di riscaldamento sono sostanzialmente di due tipi: ad acqua e ad aria.

Nel caso di impianti con fluido vettore ad acqua il riscaldamento degli ambienti avviene attraverso un generatore di calore che riscalda l'acqua e la invia, mediante pompe, ai radiatori o ai ventilconvettori. La sorgente di rumore predominante in questo tipo di impianto è costituita dalla centrale termica, pertanto la sua localizzazione deve essere il più possibile lontana dalle zone sensibili dell'edificio e l'involucro deve essere realizzato con materiali fonoisolanti e fonoassorbenti per limitare la propagazione del rumore di tipo aereo. La caldaia deve essere posizionata su supporti antivibranti allo scopo di ridurre la trasmissione per via solida. Le pompe per la circolazione dei fluidi dovrebbero essere spente la notte, se le condizioni di isolamento termico lo permettono.

Le tubazioni dell'impianto devono essere rivestite con materiale fonoisolante e fissate alle strutture murarie attraverso collari in materiale resiliente per limitare la propagazione di vibrazioni alle strutture, inoltre è importante realizzare dei giunti di espansione per permetterne la naturale dilatazione.

Negli impianti di riscaldamento ad aria le principali sorgenti di rumore sono date dai compressori, dalle pompe e dall'aria all'interno dei condotti. Nel caso di blocchi di condizionamento posti nei locali è necessario prevedere l'utilizzo di apparecchi particolarmente silenziosi mentre se l'impianto ha una centrale di condizionamento è fondamentale un'isolazione acustica adeguata. Spesso negli impianti di questo tipo il rumore si propaga attraverso le canalizzazioni stesse, in questo caso è necessario dimensionarle con diametri grandi per ridurre la velocità dell'aria e di conseguenza i rumori connessi, rivestire le tubazioni con materiale fonoassorbente o inserire dei silenziatori sulla bocca di espulsione dell'aria.

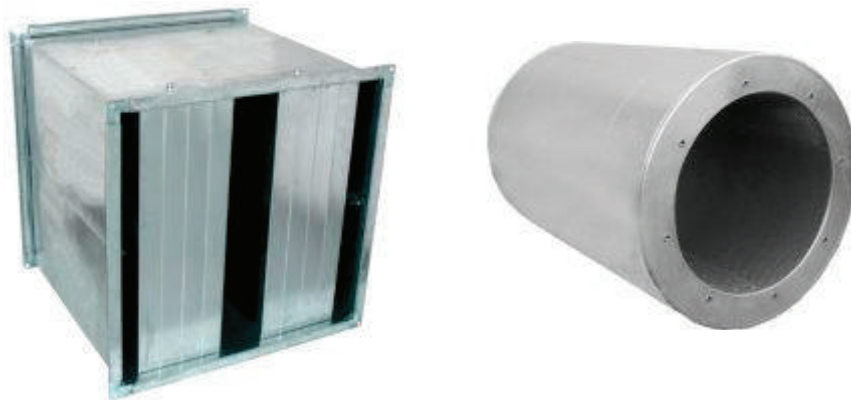


Fig. 30: Esempi di silenziatori acustici Fonte: MP3 S.r.l. www.MP3-air.com

Impianti di ventilazione meccanica

Per la ventilazione meccanica controllata VMC valgono gli stessi requisiti dell'impianto di riscaldamento ad aria. La trasmissione "a telefono" tra due vani si evita utilizzando dei silenziatori. Aperture di passaggio sopra il telaio fisso possono essere rivestite con materiale fonoassorbente. I canali possono essere condotti in intercapedini isolati acusticamente.

Gli impianti di ventilazione meccanica controllata decentralizzata che garantiscono un flusso volumetrico soddisfacente per fini igienici ed emissioni sonore ridotte ($L_{Aq} \leq 25\text{dB}$) sono difficilmente reperibili sul mercato. È quindi preferibile utilizzare la ventilazione meccanica controllata centralizzata.

Impianti di condizionamento

Anche nel caso degli impianti di condizionamento vi sono due tipologie principali: piccoli impianti con un'unità esterna ed una interna ed impianti centralizzati con unità posta generalmente sulla copertura dell'edificio.

Nel primo caso, per limitare il disturbo provocato dall'impianto, è utile posizionare l'unità esterna di condensazione lontano dalle superfici vetrate e comunque fissare l'apparecchiatura su supporti elastici per limitare la propagazione di vibrazioni alle strutture.

Negli impianti di tipo centralizzato le sorgenti di rumore sono rappresentate dai compressori e dai ventilatori. Per limitare la propagazione del rumore per via strutturale il compressore deve essere posizionato su supporti antivibranti mentre per limitare il rumore proveniente dai ventilatori i condotti di distribuzione dell'aria devono essere opportunamente rivestiti con materiale fonoassorbente oppure devono essere installati dei silenziatori sulla bocca di espulsione dell'aria.

Leggi e norme

La legge in vigore

Il D.P.C.M. 5/12/1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”, ha definito i requisiti acustici passivi sia dei componenti costruttivi che delle sorgenti sonore interne, per ciascuna delle categorie di edifici indicate nella tabella sotto riportata:

- classificazione degli ambienti abitativi (DPCM 5/12/1997, art. 2) e
- requisiti acustici passivi degli edifici (DPCM 5/12/1997, tabella B)

Cat	Destinazione	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	L'_{nw}
A	Edifici adibiti a residenza e assimilabili	≥ 50	≥ 40	≤ 63
B	Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	≥ 50	≥ 42	≤ 55
C	Edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili	≥ 50	≥ 40	≤ 63
D	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	≥ 55	≥ 45	≤ 58
E	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	≥ 50	≥ 48	≤ 58
F	Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto e assimilabili	≥ 50	≥ 42	≤ 55
G	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili	≥ 50	≥ 42	≤ 55

Tabella 16: Fonte: Tabella B dell'allegato A del D.P.C.M. 05/12/97

R'_w indice del potere fonoisolante apparente di partizione fra due distinte unità immobiliari

L'_{nw} indice del livello di rumore da calpestio di solai, normalizzato

$D_{2m,nT,w}$ indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata

La norma tecnica in vigore

Il D.P.C.M. 5/12/1997 è una norma legislativa con punti forti e punti deboli. Nell'anno 2010 è stata emanata la norma tecnica, la UNI 11367 che ha introdotto la certificazione acustica delle unità immobiliari. Tuttavia, tale norma ha valenza volontaria e tuttora valgono i limiti del D.P.C.M. 5/12/1997.

Nel dettaglio, la norma **UNI 11367:2010** “Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera” è stata realizzata per permettere di classificare gli immobili in considerazione delle loro caratteristiche di protezione acustica. Il documento è stato redatto da una commissione di 60 tecnici, in rappresentanza delle principali corporazioni del mondo dell'edilizia (costruttori, progettisti, produttori di materiali, impianti e serramenti, tecnici acustici, università) e si propone come strumento tecnico a supporto del legislatore per la stesura del nuovo decreto atteso in materia.

La nuova norma, entrata in vigore nel luglio 2010, propone dei valori di riferimento per l'attribuzione della classe. Occorre ricordare che la valutazione si basa sui dati sperimentali relativi a tutte le strutture ed agli impianti acusticamente verificabili, mediati secondo il criterio energetico, tenendo conto dell'incertezza estesa, associabile alle misure in opera.

Classe	Indice di valutazione				
	a) Descrittore del isolamento acustico normalizzato di facciata $D_{2m,2Tw}$ dB	b) Descrittore del potere fonoisolante apparente di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti di differenti unità immobiliari R'_w dB	c) Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari L'_{nw} dB	d) Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo L_{ic} dB(A)	e) Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo L_{id} dB(A)
I	≥ 43	≥ 56	≤ 53	≤ 25	≤ 30
II	≥ 40	≥ 53	≤ 58	≤ 28	≤ 33
III	≥ 37	≥ 50	≤ 63	≤ 32	≤ 37
IV	≥ 32	≥ 45	≤ 68	≤ 37	≤ 42

Tabella 17: Valori dei parametri descrittivi delle caratteristiche prestazionali degli elementi edilizi da utilizzare ai fini della classificazione acustica delle unità immobiliari. Fonte: Prospetto 1 norma UNI 11367

La norma prevede la possibilità di effettuare un numero di prove ridotto scegliendo un campione pari al 10% (minimo 3 elementi) per ciascuna tipologia di struttura. Tale metodica consente una forte riduzione del numero di prove, e quindi dei costi, nel caso di edifici di grandi dimensioni (> 50 unità), dove la tipologia costruttiva si ripete regolarmente. Al contrario, per gli edifici di minori dimensioni (10-20 unità) ogni tipologia di elemento si ripete in poche unità costringendo a verificare la quasi totalità degli elementi.

Nel tentativo di limitare i costi di certificazione per gli edifici non seriali, nel maggio del 2012 è stata pubblicata la norma **UNI 11444** “Linee guida per la selezione delle unità immobiliari in edifici con caratteristiche non seriali”. La norma prevede la possibilità di selezionare un campione ristretto di unità immobiliari (U.I.) all’interno dello stesso edificio. Il campione minimo è di 2 U.I.; per edifici composti da 5 a 30 U.I. vanno testate almeno 3 U.I.; oltre le trenta unità occorre testare almeno il 10% delle U.I. La scelta delle unità immobiliari da testare va fatta tenendo conto delle maggiori criticità acustiche rilevabili e/o prevedibili. Nelle U.I. selezionate vanno testati tutti gli elementi acusticamente verificabili. La classificazione si riferisce pertanto alle sole U.I. critiche verificate. La classe minima riscontrata può essere estesa all’intero edificio.

Dovrebbe essere compito e responsabilità del direttore dei lavori, coadiuvato dal tecnico competente in acustica, individuare gli elementi costruttivi più deboli. Soltanto il direttore dei lavori conosce i punti critici emersi in fase di realizzazione dell'edificio.

Modelli di calcolo previsionale

Secondo la UNI EN 12354-1

Il modello si basa sull'assunto che la trasmissione totale di potenza sonora tra due ambienti sia il risultato della somma delle trasmissioni di potenza attraverso diversi percorsi e che i campi sonori e vibratori che si vengono ad instaurare, negli ambienti e nelle strutture, per ciascun percorso, siano diffusi. Nella situazione tipica di due ambienti adiacenti, uno emittente e l'altro ricevente, ciascun percorso di trasmissione è identificato da un elemento (i) esposto al suono e da un elemento (j) che irradia il suono nell'ambiente ricevente. Nella figura sotto sono riportati i percorsi per un elemento fiancheggiante e per l'elemento di separazione.

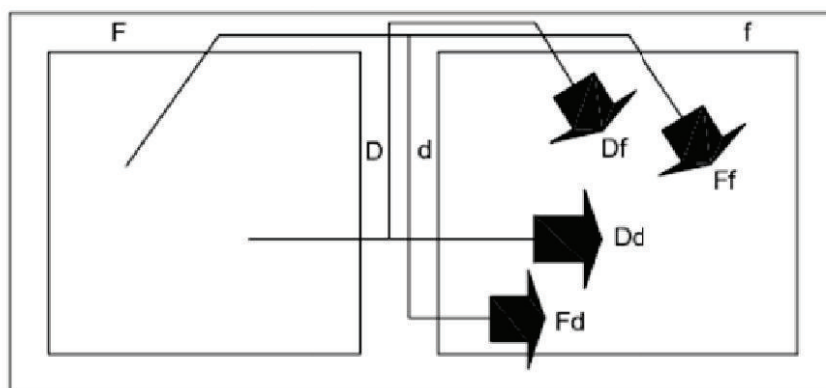


Fig. 31: Percorsi delle trasmissioni laterali. Fonte: UNI EN 12354

Nell'ambiente emittente l'elemento (i) è indicato con F, se si tratta di un elemento fiancheggiante, e con D, se si tratta dell'elemento di separazione. Nell'ambiente ricevente l'elemento (j) è indicato con f, se è un elemento fiancheggiante, e con d, se è un elemento di separazione.

Secondo la UNI EN 12354-2

La UNI EN12354-2 illustra il metodo per calcolare l'indice acustico basato sulle masse dei vari strati e sulle caratteristiche fonoassorbenti ossia di rigidità dinamica dello strato resiliente. Con questi valori si calcola anche la frequenza di risonanza.

Il modello di calcolo semplificato riportato nella norma UNI EN 12354-2:2002 si applica ad ambienti, uno sovrapposto all'altro, con solai aventi una struttura di base omogenea, e considera l'influenza dello smorzamento strutturale in una maniera media, trascurando la situazione specifica, mentre la trasmissione di fiancheggiamento è trattata globalmente o con quanto riportato nel Rapporto tecnico UNI/TR 11175:2005.

In caso di elementi costruttivi che fiancheggiano il solaio divisorio, costituiti da strutture omogenee, il termine di correzione K è dato dal prospetto 1 della norma UNI EN 12354-2:2002, in funzione delle masse per unità di superficie delle strutture coinvolte nella trasmissione.

Secondo la UNI EN 12354-3

Il valore di isolamento delle facciate si calcola sulla base delle medie energetiche che risultano da tutti gli elementi che fanno parte della facciata stessa: la parete/il tetto, il serramento, il cassonetto, eventuali fori (per esempio di ventilazione), ecc. L'impiego della medie energetica è rappresentativa del contributo dei ponti acustici.

Software commerciali

Esistono in commercio numerose soluzioni commerciali per agevolare i calcoli previsionali. Tutti i software impiegano, di base, le relazioni previste dalle norme UNI EN 12354 e UNI TR 11175. In molti programmi sono poi implementate numerose altre relazioni sperimentali proposte da vari autori italiani ed europei per soluzioni costruttive specifiche o particolari. Tutti i programmi dispongono inoltre di un database relativo alle caratteristiche fisico meccaniche dei principali materiali da costruzione ed una serie di pacchetti costruttivi con i relativi risultati di laboratorio.

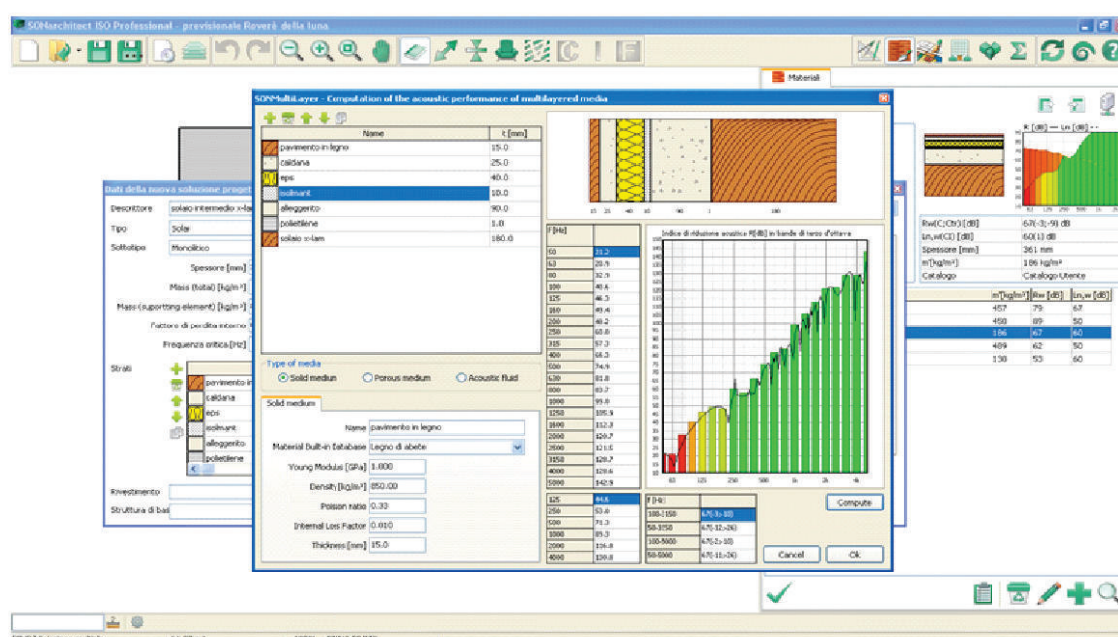


Fig. 32: Esempio di software commerciale per il calcolo previsionale. Fonte: TBZ S.r.l.

Le differenze riscontrabili nei vari software riguardano in particolare:

- numero di relazioni di calcolo disponibili;
- possibilità di modellizzare geometrie complesse o semplificate;
- ampiezza del database dei materiali e dei pacchetti;
- possibilità di implementare il database.

In generale tutti i software sono adatti per dare un orientamento nelle scelte costruttive, ma nella maggior parte dei casi portano a valori sovrastimati a causa della variabilità delle condizioni di posa dei materiali, che incidono sempre in difetto. Occorre pertanto impiegare gli strumenti di calcolo con occhio critico, possibilmente supportati da un'adeguata esperienza sul campo, sia per quanto riguarda le verifiche in opera che per la buona esecuzione dei lavori in cantiere.

Lo scopo del presente catalogo è anche quello di dare degli esempi reali con cui confrontare i risultati teorici dei modelli di calcolo.