

Metodi di previsione delle prestazioni acustiche degli edifici: isolamento all'interno degli edifici

Massimo Garai, Simone Secchi
DIENCA, Università di Bologna

Introduzione

Mentre per i singoli componenti dell'edificio esistono da tempo metodi di previsione delle prestazioni acustiche, non esistono modelli altrettanto validi e diffusi per l'edificio nel suo insieme.

A parte modelli analitici tutt'ora oggetto di ricerca, l'unica proposta organica in questo senso è quella attualmente allo stadio prenormativo in ambito CEN [18, 19]. Tale metodo di calcolo, d'ora in avanti chiamato *modello CEN*, permette la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici sia in funzione della frequenza sia mediante indici di valutazione. Il calcolo in funzione della frequenza, qui esposto, permette una maggiore accuratezza, ma richiede un notevole impegno di calcolo e la disponibilità di dati di input dettagliati. Il metodo basato sugli indici di valutazione costituisce un buon compromesso fra semplicità di impiego e coerenza metodologica, ma non permette di tenere conto di importanti fenomeni valutabili solo con l'analisi in frequenza.

1 Calcolo del potere fonoisolante apparente tra ambienti adiacenti

Il *potere fonoisolante apparente* R' di una partizione è una grandezza che esprime la quantità di energia sonora trasmessa dalla parete nelle reali condizioni di utilizzo. Tale grandezza differisce dal *potere fonoisolante* R risultante da misure di laboratorio in quanto tiene conto, oltre che della trasmissione diretta attraverso la parete (τ_d), anche di eventuali percorsi di trasmissione aerea del suono (τ_e e τ_s) e dei percorsi di trasmissione per fiancheggiamento dovuti alle strutture laterali (τ_f).

Se la potenza sonora complessivamente trasmessa tra due ambienti è $W_t = W_1 + W_2$, con W_1 potenza trasmessa direttamente dalla partizione e W_2 potenza trasmessa dalle strutture laterali, e la potenza sonora incidente sulla partizione è W_i , si ha:

$$R = 10 \lg \frac{W_i}{W_1} \quad (\text{dB})$$
$$R' = 10 \lg \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ovvero:

$$R' = -10 \lg \tau' = -10 \lg \left(\tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \right) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

essendo τ_e e τ_s i coefficienti di trasmissione sonora di piccoli elementi posti nella partizione (ad esempio prese d'aria) o di sistemi in grado di trasmettere il suono per via aerea (condotti di ventilazione con uscite nei due ambienti). La distinzione tra piccoli e grandi elementi è fatta dalla norma ISO 140-10 [11], dove si intendono per piccoli elementi quelli aventi una superficie minore di 1 m^2 , ad esclusione delle finestre e porte. Per tali elementi e sistemi la prestazione acustica viene valutata in termini di isolamento acustico normalizzato D_n invece che di potere fonoisolante R , come per i grandi elementi (partizioni, porte, ecc.). I coefficienti di trasmissione τ_e e τ_s sono dati dal rapporto tra la potenza sonora complessivamente irradiata dall'elemento o dal sistema e la potenza sonora incidente sull'intera partizione.

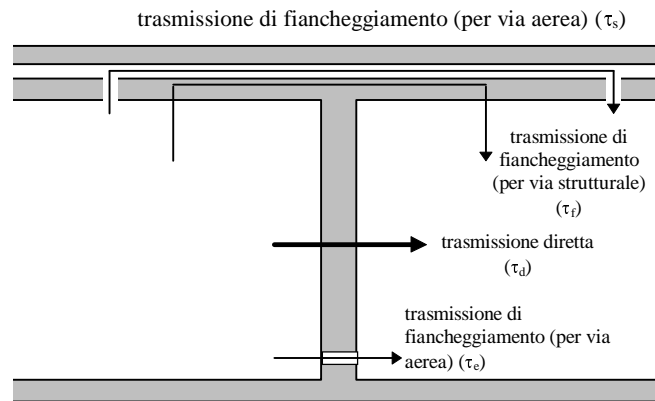


Figura 1) Diversi percorsi di trasmissione del suono (per via aerea e strutturale) tra due ambienti adiacenti.

Per calcolare i coefficienti di trasmissione aerea si può quindi fare riferimento ai rispettivi valori di isolamento acustico normalizzato D_n risultanti da prove di laboratorio degli elementi o dei sistemi.

$$\tau_e = \frac{A_0}{S_s} 10^{\frac{-D_{ne}}{10}}; \quad \tau_s = \frac{A_0}{S_s} 10^{\frac{-D_{ns}}{10}} \quad (3)$$

con $A_0 = 10 \text{ m}^2$;

$S_s =$ superficie della partizione (m^2).

La trasmissione di fiancheggiamento (τ_f) ha invece origine strutturale ed è funzione delle caratteristiche della struttura di separazione e delle strutture laterali dei due ambienti (solai e pareti).

Uno studio approfondito di questa trasmissione comporta la conoscenza di parametri di difficile valutazione e per i quali sono disponibili scarsi valori di riferimento. Quando tuttavia le strutture che delimitano i due ambienti sono omogenee e si mantengono invariate oltre la linea di separazione tra i due ambienti, possono essere fatte delle ipotesi semplificative che permettono di quantificare la trasmissione di fiancheggiamento a partire da dati generalmente noti.

Secondo il progetto di norma CEN [20], possono essere considerate strutture omogenee i solai in laterocemento, quelli a soletta piena in calcestruzzo normale o alleggerito, le pareti in laterizio forato o pieno, a blocchi di gesso, di calcestruzzo, ecc.

La trasmissione di fiancheggiamento tra ambienti adiacenti può essere determinata a partire dai seguenti dati:

- 1) *potere fonoisolante* R (dB) di tutte le strutture coinvolte (generalmente quattro strutture laterali più una di separazione);
- 2) *massa superficiale* m' (kg/m^2) delle medesime strutture;
- 3) *dimensioni principali* dei due ambienti (m);
- 4) *indice di riduzione delle vibrazioni* K (dB) per ogni giunto tra strutture laterali e tra queste e la struttura di separazione e per ogni percorso di fiancheggiamento (generalmente si hanno quattro nodi con tre percorsi di fiancheggiamento ciascuno per complessivi dodici valori dell'indice di riduzione K);

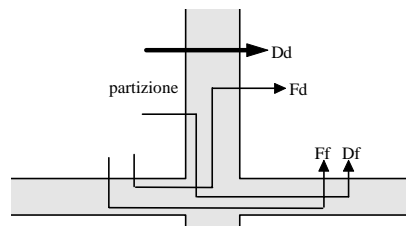


Figura 2) I tre percorsi di trasmissione strutturale laterale relativi a ciascuno dei quattro giunti tra partizione e strutture laterali. Complessivamente si hanno dodici percorsi di trasmissione laterale ed uno diretto.

- 5) eventuale *incremento del potere fonoisolante* ΔR (dB) per l'aggiunta di strati di rivestimento.

L'indice di riduzione delle vibrazioni K è una grandezza funzione della estensione del giunto e della differenza di livello medio di vibrazione che si viene a creare tra le due strutture esaminate quando una sola delle due è direttamente sollecitata:

$$K_{ij} = \frac{D_{vij} + D_{vji}}{2} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

definizione che fa riferimento al metodo di misura di K , in cui D_{vij} e D_{vji} sono rispettivamente le differenze tra i livelli medi di velocità che si stabiliscono nelle due strutture avendo sollecitato in un caso la struttura i e nell'altro la j . Nella formula si ha:

l_{ij} = lunghezza del giunto;

a_i e a_j = lunghezze di assorbimento equivalenti delle strutture i e j , date da:

$$a_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{si}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

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

Nei casi correnti, il secondo termine dell'equazione 5 assume il valore di - 5 dB.

Nelle ipotesi sopra citate di omogeneità e continuità delle strutture, l'indice K può essere posto in relazione con il rapporto tra le masse delle due strutture giuntate e può

quindi essere facilmente ottenuto a partire da formule sperimentali valide per i diversi tipi di giunti.

Note le suddette quantità, il potere fonoisolante apparente tra i due ambienti può essere calcolato mediante la seguente formula:

$$R' = -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

in cui R_{Dd} , R_{Ff} , R_{Df} , R_{Fd} rappresentano i valori del potere fonoisolante per trasmissione che avviene attraverso il percorso diretto (Dd) ed i percorsi laterali (figura 2).

Per poter calcolare il potere fonoisolante per i suddetti percorsi di trasmissione è necessario porre due ipotesi semplificative:

- a) i percorsi di trasmissione strutturale del suono sono tra di loro indipendenti;
- b) i percorsi di trasmissione di ordine superiore al secondo possono essere trascurati (ad esempio la trasmissione dovuta alle onde sonore che incidendo sulla struttura opposta a quella di separazione si trasmettono ad una struttura laterale e da questa all'ambiente ricevente).

Sotto queste ipotesi, il potere fonoisolante per un generico percorso i-j si calcola in funzione del potere fonoisolante delle due strutture i e j coinvolte (R_i e R_j), dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} caratteristico del tipo di giunto e dell'accoppiamento tra le due strutture, del valore di incremento del potere fonoisolante $\Delta R_{i,j}$ di eventuali strati di rivestimento applicati ad una o entrambe le strutture e delle dimensioni principali (superficie di separazione S e lunghezza della giunzione l_{ij} ; $l_0 = 1$ m):

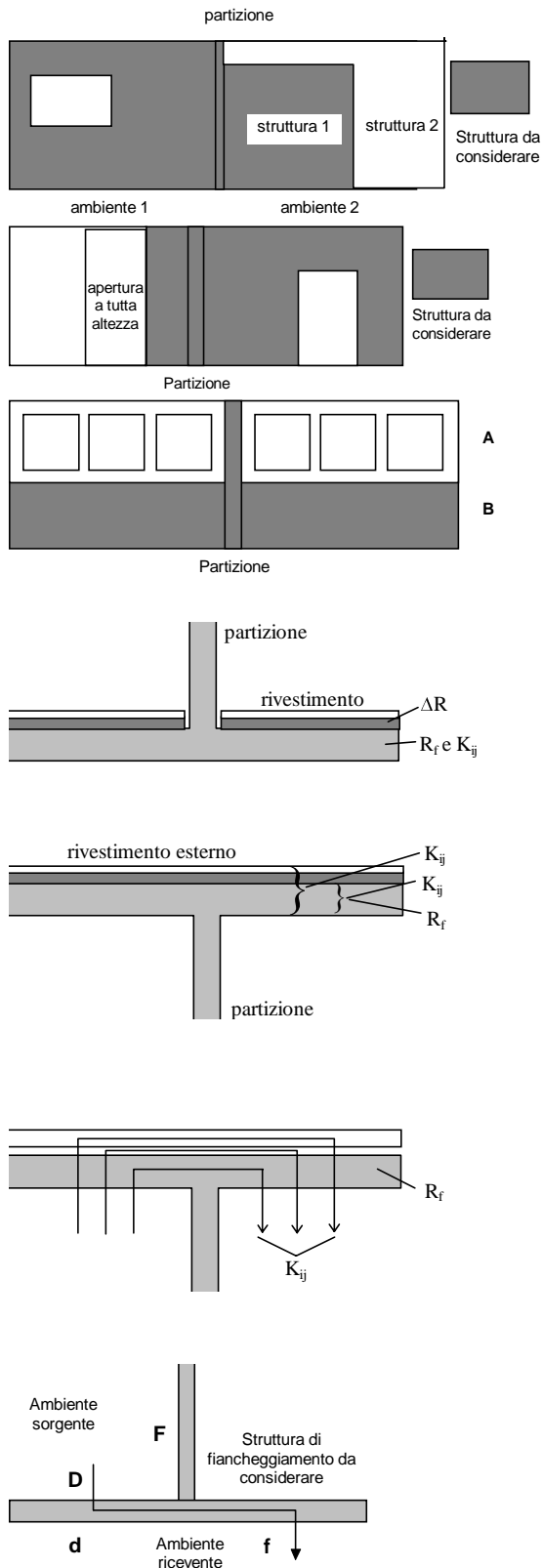
$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_{ij} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S}{l_0 l_{ij}} \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

I valori di R e ΔR possono essere ottenuti da calcolo oppure da misure sperimentali eseguite secondo la norma ISO 140-3 [8], mentre per la stima di K può essere usato il metodo semplificato riportato nel seguito. Per la misura di laboratorio dell'indice K esiste al momento solo un progetto di norma CEN [17], alle fasi iniziali di definizione.

1.1 Valutazione delle strutture laterali e della partizione ai fini del calcolo del potere fonoisolante apparente

Nella valutazione della trasmissione di fiancheggiamento tra ambienti adiacenti si trovano correntemente soluzioni di difficile valutazione sia per quanto concerne l'effettiva estensione della struttura che contribuisce alla trasmissione sia per la composizione della stessa.

Al fine di ridurre i margini di incertezza, il progetto di norma CEN riporta delle linee guida per la valutazione di tali soluzioni [20].



- A) Se l'elemento di fiancheggiamento è composto di diverse parti, si deve considerare il potere fonoisolante della parte più estesa fra quelle direttamente connesse all'elemento divisorio.
- B) Se ci sono delle aperture a tutta altezza nell'elemento di fiancheggiamento, la porzione di parete al di là di queste può essere tralasciata.
- C) Se l'elemento di fiancheggiamento è costituito da due parti (A e B) direttamente connesse all'elemento divisorio, ciascuna di queste deve essere considerata come elemento di fiancheggiamento indipendente.
- D) Se l'elemento di fiancheggiamento è rivestito con un strato isolante (controparete o pavimento galleggiante), il potere fonoisolante R e l'indice di riduzione delle vibrazioni K si riferiscono alla struttura di base, essendo l'effetto del rivestimento considerato separatamente, mediante il termine ΔR .
- E) Strati esterni di rivestimento leggero non hanno influenza sulle trasmissioni di fiancheggiamento; il valore di R_f è riferito alla sola struttura di base; l'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} può essere riferito alla sola struttura di base o all'insieme.
- F) Nel caso di elementi di fiancheggiamento costituiti da pareti doppie con intercapedine si considera il potere fonoisolante del solo strato interno, mentre l'insieme della struttura è preso in considerazione nella valutazione dell'indice di trasmissione alla giunzione.
- G) Nel caso di sfalsamenti di piano o non corrispondenza dei volumi dei locali adiacenti, la continuazione del divisorio in parti non direttamente investite dal suono, deve essere considerata come un elemento di fiancheggiamento.

1.2 Determinazione dell'indice di riduzione delle vibrazioni

L'indice di riduzione delle vibrazioni per giunti tra strutture omogenee che si mantengono invariate oltre la linea di separazione tra i due ambienti può essere calcolato in funzione del rapporto tra le masse superficiali delle strutture.

Il valore dell'indice deve in ogni caso essere superiore ad un valore minimo dato dalla seguente espressione:

$$K_{ij} \geq 10 \lg \left(l_{ij} l_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right) \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

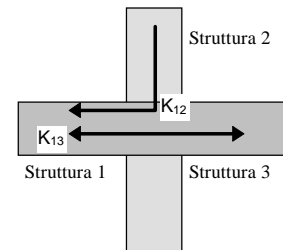
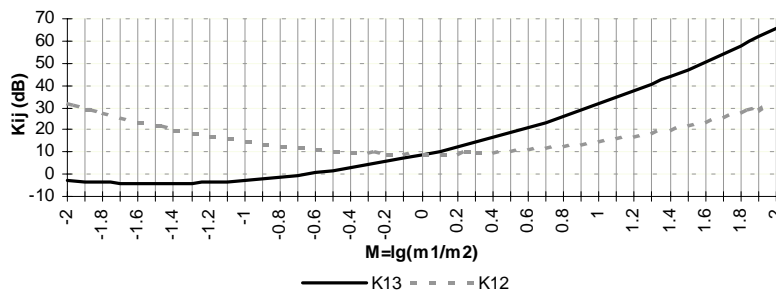
in cui l_{ij} è la lunghezza del giunto in esame, $l_0 = 1 \text{ m}$ e S_i e S_j sono rispettivamente le superfici delle due strutture in esame.

Se le connessioni strutturali dell'elemento di fiancheggiamento con l'elemento divisorio sono scarse o del tutto assenti, K_{Ff} deve essere preso uguale al valore minimo, mentre i percorsi di fiancheggiamento D_f e F_d devono essere trascurati assegnando a K_{Df} e K_{Fd} valori molto elevati (ad esempio $K = 20 \text{ dB}$).

Il calcolo di K_{ij} è effettuato in funzione di M , logaritmo in base 10 del rapporto fra le masse superficiali delle pareti collegate ad angolo retto fra di loro, e del tipo di giunto:

$$M = \lg m'_{\perp i} / m'_i \quad (9)$$

Giunti rigidi a croce

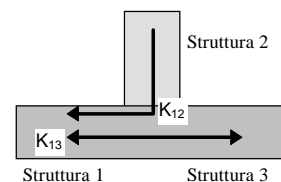
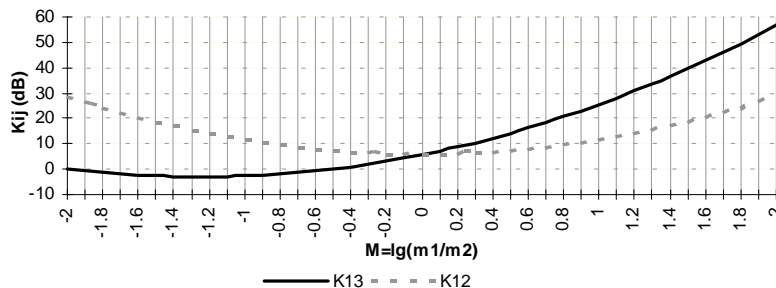


$$K_{13} = 8,7 + 17,1 M + 5,7 M^2$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 M^2 (= K_{23})$$

(10)

Giunti rigidi a T



$$K_{13} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2 (= K_{23})$$

(11)

Si riportano le formule ed i diagrammi per il calcolo di K per giunti rigidi tra strutture omogenee. Per il calcolo riferito a strutture leggere o a giunti elastici si rimanda all'appendice E del citato progetto di norma [20], tenendo presente, comunque, che in questi casi il grado di incertezza del metodo è maggiore.

1.3 Conversione dei valori di laboratorio in valori "in situ"

I valori del potere fonoisolante delle diverse strutture R_i che vengono impiegati per il calcolo secondo il modello CEN devono essere corretti per tenere conto delle reali condizioni di vincolo delle strutture in opera. Infatti, il potere fonoisolante di una struttura, per campo sonoro diffuso ed al di sopra della frequenza critica f_c (per le comuni partizioni edilizie è dell'ordine dei 200 Hz), è funzione dello smorzamento totale η_{tot} secondo la seguente relazione [19]:

$$R = 20\lg(m' f) + 10\lg\left(\frac{f}{f_c} - 1\right) + 10\lg\eta_{tot} - 44 \quad (\text{dB}) \quad (12)$$

dove m' è la massa superficiale della struttura in kg/m^2 .

Lo smorzamento totale η_{tot} dipende, oltre che dalle caratteristiche intrinseche del materiale (smorzamento interno), anche dalle condizioni di vincolo della struttura ed è funzione della frequenza e del tempo di riverberazione strutturale T_s :

$$\eta_{tot} = \frac{2,2}{fT_s} \quad (13)$$

Pertanto, se le condizioni di vincolo di una data parete provata in laboratorio non sono uguali a quelle di uso in opera ($\eta_{lab.} \neq \eta_{situ}$), il valore del potere fonoisolante deve essere corretto secondo la seguente formula:

$$R_{situ} = R_{lab.} + 10\lg\frac{\eta_{situ}}{\eta_{lab.}} = R_{lab.} - 10\lg\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab.}} \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

in cui $T_{s,lab.}$ e $T_{s,situ}$ sono rispettivamente i valori del tempo di riverberazione strutturale misurato o stimato in laboratorio e in opera.

Per quanto riguarda il valore di miglioramento ΔR dovuto ad eventuali strati addizionali, il progetto di norma CEN consente di assumere uguali i valori di laboratorio ed in opera.

$$\Delta R_{situ} = \Delta R_{lab.} \quad (15)$$

In realtà, l'importanza delle condizioni di messa in opera degli strati di rivestimento è maggiore a quella degli elementi strutturali. La presenza di eventuali discontinuità dello strato elastico è in grado di creare ponti acustici che possono ridurre fortemente il potere fonoisolante; l'irrigidimento locale o generale dello stesso strato elastico (nel caso, ad esempio, di pavimenti galleggianti) può dare luogo a fenomeni di risonanza nel campo delle frequenze di interesse pratico. Tuttavia questi fenomeni non possono essere previsti in funzione del solo tempo di riverberazione strutturale, prealtro di difficile stima in tali situazioni, ma coinvolgono una serie di aspetti di difficile quantificazione. Pertanto ci si deve assicurare della esatta corrispondenza tra soluzione progettata e soluzione di

cui si dispongono i certificati di laboratorio (ΔR). Solo in tale caso si può ritenere valida la relazione 15.

1.4 Note critiche all'applicabilità del modello CEN per il calcolo del potere fonoisolante apparente R'

Vi sono essenzialmente tre contrapposti limiti alla applicabilità del modello CEN per la valutazione delle prestazioni in opera di elementi edilizi:

- 1) l'affidabilità del metodo a fronte di un contesto che presenta notevoli margini di incertezza, soprattutto nella fase di messa in opera dei componenti;
- 2) la scarsa disponibilità dei dati necessari per poter calcolare tutte le componenti della trasmissione laterale (poteri fonoisolanti, indici di riduzione delle vibrazioni, valori di miglioramento ΔR , tempi di riverberazione strutturale per tutte le strutture ed i giunti);
- 3) la difficoltà di impiego del metodo da parte di non esperti, spesso non giustificata dalla differenza riscontrabile tra i valori calcolati di R ed R' .

Per superare queste limitazioni è necessario fare riferimento allo specifico contesto costruttivo italiano. Il metodo di calcolo CEN, infatti, trae origine da una filosofia di base e da alcune ipotesi la cui validità è più o meno verificata a seconda del contesto costruttivo cui ci si riferisce.

In particolare, la necessità di impiegare un modello analitico di calcolo della trasmissione di fiancheggiamento ha senso laddove siano prevedibili forti differenze tra i valori di laboratorio e quelli in opera del potere fonoisolante degli elementi costruttivi e quando tali differenze siano imputabili alla trasmissione strutturale attraverso gli elementi laterali. Tale evenienza chiama in causa ad esempio quelle situazioni in cui la parete di separazione, fortemente isolante, viene giuntata a pareti laterali leggere, come nel caso delle partizioni leggere a lastre di gesso o di legno.

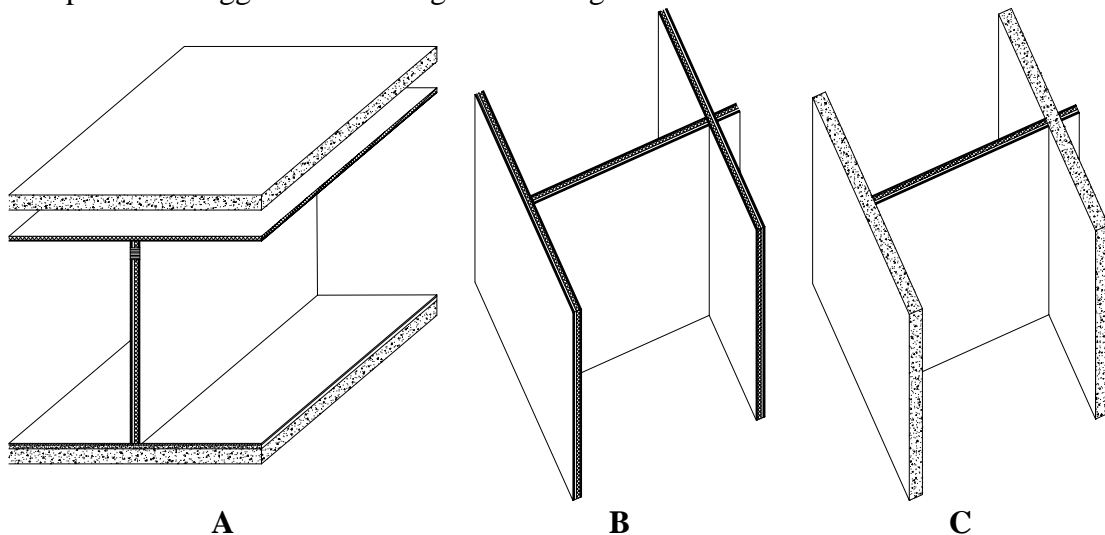


Figura 3) Tre situazioni correnti in cui l'entità della trasmissione di fiancheggiamento è molto differenziata. Nel caso A, con controsoffitto leggero passante, la trasmissione di fiancheggiamento può avere un'entità superiore ai 5 dB. Nei casi B e C la trasmissione di fiancheggiamento risulta più o meno ridotta a seconda della massa delle strutture laterali.

La soluzione B, con pareti laterali leggere, è più critica della C.

In questi contesti, resi più complessi dalla eventuale presenza di giunti elastici tra i diversi strati delle partizioni, la differenza tra il valore di laboratorio di R e quello in opera di R' può essere anche di oltre 10 dB ed avere comunque un'entità difficilmente stimabile a priori.

Operando invece in un contesto dove prevale un numero relativamente ridotto di strutture massicce giuntate rigidamente tra loro, il contributo della trasmissione laterale può assumere valori minori e più facilmente stimabili con un approccio meno analitico di quello CEN.

Rispetto all'applicabilità del modello, si deve pertanto tenere conto delle seguenti peculiarità del contesto costruttivo italiano:

- prevalenza di partizioni verticali in muratura di laterizio a singolo o doppio strato aventi un valore della massa superficiale variabile tra 100 e 500 kg/m²;
- prevalenza di solai in laterocemento aventi un valore della massa superficiale variabile tra 250 e 400 kg/m²;
- prevalenza di strutture portanti a travi e pilastri in cemento armato;
- scarso impiego di giunti elastici di desolidarizzazione delle strutture (con l'eccezione dei pavimenti galleggianti).

Rispetto a questo contesto si possono valutare i reali limiti del modello di calcolo ed individuare la possibilità di definire un'alternativa più semplificata valida nella maggioranza dei casi.

1.5 Affidabilità ed applicabilità del modello CEN

L'affidabilità del modello dipende da differenti fattori: la validità dei dati di input (potere fonoisolante e massa superficiale delle diverse strutture, incrementi ΔR , ecc.), la corrispondenza tra modello e situazione reale, il tipo di elementi e di giunti coinvolti, l'accuratezza della messa in opera.

In generale, secondo quanto riportato nel progetto di norma CEN, non è possibile dare indicazioni precise sull'accuratezza del modello. Comunque misurazioni eseguite su strutture omogenee in muratura di laterizio, in gesso ed in calcestruzzo hanno evidenziato una deviazione standard di 1,5 - 2,5 dB dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente (i valori maggiori della deviazione si hanno con situazioni complesse e quando non si correggono i dati in base al tempo di riverberazione strutturale) [20].

Future ricerche potranno dare indicazioni più precise sulla affidabilità del modello.

Per quanto riguarda l'applicabilità del modello di calcolo, è necessario tenere conto che le ipotesi di base della teoria sono quelle dell'analisi energetico-statistica per cui si ipotizza la distribuzione uniforme dell'energia sonora nei due ambienti e l'assenza di discontinuità strutturali nelle pareti e nei solai interessati. Queste ipotesi comportano di limitare l'applicazione del modello di calcolo ad ambienti di dimensione non eccessiva (le dimensioni tipiche dell'edilizia residenziale) ed a edifici a struttura non intelaiata. La presenza di pilastri e travi in cemento armato, e ancor più in acciaio, è in grado infatti di creare discontinuità forti nelle strutture che delimitano gli ambienti.

Volendo effettuare il calcolo in presenza di pilastri e travi è bene distinguere il caso in cui il pilastro è inserito nel nodo tra la parete di separazione e quelle laterali (A) dal caso in cui il pilastro è inserito in una delle strutture laterali o di separazione (B). Nel caso A i pilastri e le travi dovrebbero ridurre la trasmissione delle vibrazioni attraverso

il giunto e quindi anche la trasmissione sonora di fiancheggiamento. Nel secondo caso si viene a creare una discontinuità nella struttura della parete (se si tratta di pilastro) o del solaio (se di trave). Se la discontinuità è nella parete di separazione (B1), non vi dovrebbero essere limiti alla applicabilità del metodo se non per il fatto che la partizione assume una configurazione che difficilmente trova riscontro in dati sperimentali o di calcolo. In particolare, nel nodo tra partizione e pilastro vi possono essere problemi di continuità della malta cementizia che fa da legante tra i blocchi (figura 5), per cui si possono creare dei percorsi preferenziali di trasmissione aerea dei suoni. Quando tale evenienza non è verificata, si ha comunque un diverso comportamento dinamico della parete che modifica il valore del potere fonoisolante.

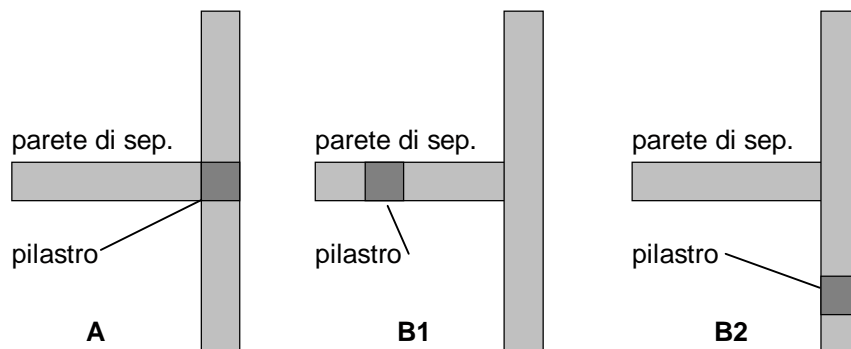


Figura 4) La presenza di pilastri può influenzare la trasmissione laterale secondo la posizione in cui si trovano. Nel caso A la trasmissione di fiancheggiamento viene ridotta soprattutto alle alte frequenze.

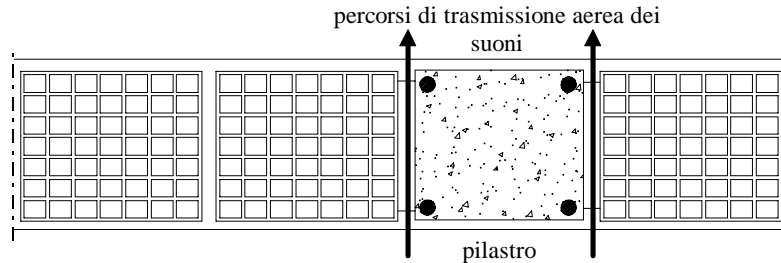


Figura 5) Possibili percorsi di trasmissione aerea dei suoni nel giunto tra parete di separazione e pilastro in cemento armato.

Quando invece la discontinuità riguarda una delle strutture laterali (B2), può essere opportuno considerare solo la parte della struttura che si trova verso la parete di separazione.

In presenza di strutture multistrato, si deve fare attenzione a considerare nel calcolo solo la parte della partizione laterale che effettivamente contribuisce alla trasmissione laterale e questo dipende dalla modalità di giunzione dei diversi strati.

In generale una partizione costituita da due strati tra di loro completamente sconnessi (A) si può comportare peggio di una a singolo strato di uguale massa in quanto la parte che effettivamente contribuisce alla trasmissione sonora laterale è quella rivolta verso l'ambiente ricevente.

Pertanto in presenza di tali tipi di partizioni laterali vi può essere incertezza su come valutare il grado di giunzione delle due o più parti costituenti.

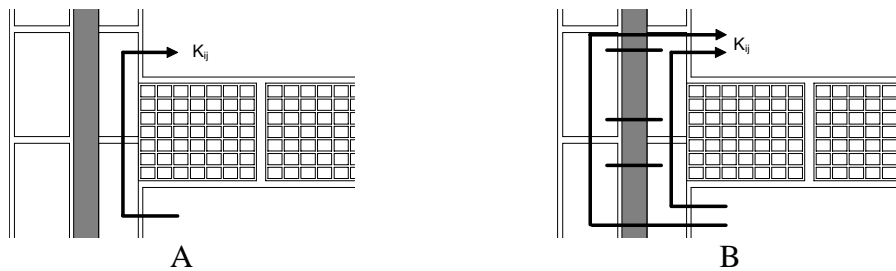


Figura 6) Nel caso di pareti a più strati tra di loro sconnessi (A), nel calcolo si deve considerare solo la parte effettivamente coinvolta nella trasmissione di vibrazioni.

1.7 Disponibilità dei dati

I problemi maggiori per l'applicabilità del metodo riguardano la disponibilità di dati sugli strati isolanti addizionali (controsoffitti, pavimenti galleggianti, pavimenti resilienti e contropareti) e sui tempi di riverberazione strutturali.

Per quanto riguarda gli *strati addizionali*, si sottolinea come il valore del miglioramento al potere fonoisolante dipenda fortemente dalle caratteristiche dello strato di base su cui viene applicato il rivestimento. Infatti il comportamento dello strato di rivestimento è dominato dal fenomeno della risonanza che dipende dalle caratteristiche elastiche del prodotto ma anche dalla massa superficiale dei due strati (rivestimento e base). Pertanto, i dati di laboratorio certificati sono utilizzabili solo se viene specificata la natura dello strato base su cui è stato applicato il rivestimento in prova e se questa coincide con le condizioni di installazione in opera.

Il contributo di un rivestimento può essere differente a seconda che sia impiegato nella partizione tra i due ambienti (trasmissione diretta) o in una struttura laterale (trasmissione di fiancheggiamento). I dati generalmente misurati fanno riferimento alla trasmissione diretta e non vi sono metodi diretti per derivare da questi il valore dell'incremento per trasmissione laterale. Alcuni dati per la trasmissione laterale sono forniti dai laboratori tedeschi (ad esempio il Fraunhofer Institute für Bauphysik) che fanno riferimento alla norma DIN 52210.

I dati relativi al *tempo di riverberazione strutturale* dei vari elementi, necessari per tenere conto delle diverse condizioni di vincolo delle strutture in opera ed in laboratorio, sono difficilmente forniti dai laboratori di prova e pertanto diventa impossibile correggere i valori del potere fonoisolante. Questa limitazione può comportare errori di notevole entità quando le partizioni sono montate con giunti elastici di sconnessione per ridurre la trasmissione laterale.

La figura 7 mostra il risultato di una simulazione dove si è ipotizzata una situazione in laboratorio in cui la struttura in prova (una parete di mattoni forati da 8 cm) è sconnessa strutturalmente dalle strutture laterali mediante materiale elastico ed una situazione in opera in cui la stessa struttura è giuntata rigidamente ai bordi. Si tratta pertanto di un caso limite che evidenzia la massima differenza tra le due situazioni. Il potere fonoisolante per trasmissione diretta è maggiore in situ (R_{situ}) in quanto si ha un più alto smorzamento dovuto alla connessione rigida ai bordi. Tale differenza viene comunque compensata dalla notevole riduzione della trasmissione di fiancheggiamento in laboratorio dovuta proprio alla presenza dello strato elastico. La differenza tra potere fonoiso-

lante in laboratorio ed in opera in questo caso è nell'ordine di 3-4 dB, essendo massima alle alte frequenze dove l'efficacia della sconnessione dovuta allo strato elastico è maggiore.

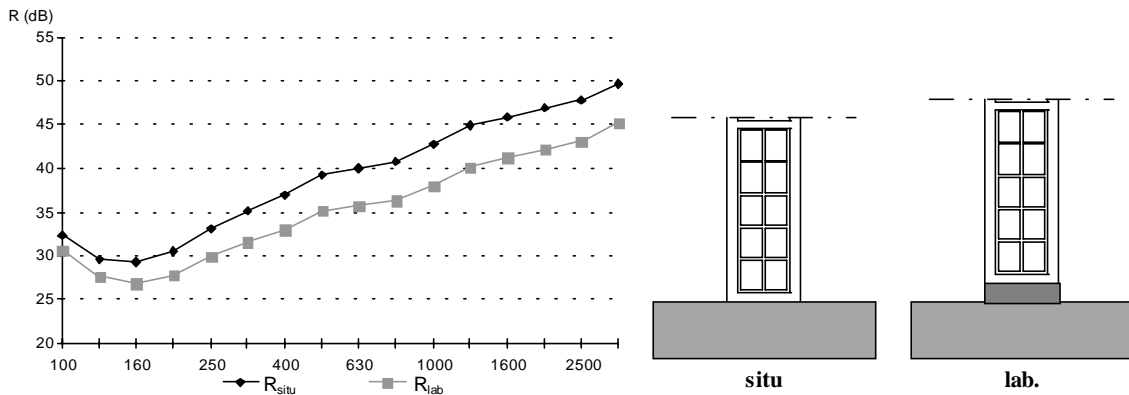


Figura 7) incremento al valore del potere fonoisolante per diverse condizioni di vincolo in laboratorio ed in opera.

Disponendo di dati di laboratorio in cui sia riportato anche il valore in funzione della frequenza del tempo di riverberazione strutturale $T_{s,lab}$. (la norma ISO 140-3 contiene un'appendice informativa in cui vengono specificate le modalità di misura di tale parametro), rimane il problema della valutazione di $T_{s,situ}$ da progetto. Allo stato attuale i metodi di calcolo fanno riferimento alle ipotesi statistiche della SEA che richiedono di determinare le caratteristiche di tutti i giunti tra struttura in esame e strutture laterali (nei casi correnti si tratta di valutare da 13 a 16 giunti per ogni singola partizione). Pertanto la valutazione ha un grado di complessità giustificabile solo in particolari situazioni (ad esempio nel caso di impiego di giunti elastici di desolidarizzazione). Per rendere accessibile il calcolo in tempi brevi è necessario servirsi di procedure di valutazione automatizzate o di tabelle di soluzioni tipo prevalutate.

La valutazione del tempo di riverberazione strutturale si può effettuare mediante la seguente relazione [19]:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{tot}} \quad (s) \quad (16)$$

dove lo smorzamento totale η_{tot} può essere ottenuto in funzione dei coefficienti di assorbimento per onde flessionali α_k relativi a tutto il perimetro di giunzione della struttura:

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{\rho_0 c_0 \sigma}{\pi f m'} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \quad (17)$$

in cui f_c è la frequenza critica della struttura (Hz), S la sua superficie (m^2), m' la massa superficiale (kg/m^2), σ il coefficiente di irraggiamento e le altre grandezze hanno il significato già espresso.

I tre termini dell'equazione 17 rappresentano rispettivamente lo smorzamento interno (per le strutture edilizie comuni da assumersi in genere pari a 0,01), lo smorzamento per radiazione acustica e lo smorzamento per accoppiamento ai bordi.

1.8 Ipotesi per un modello semplificato

A partire dalle condizioni relativamente ripetibili del contesto costruttivo italiano è possibile definire un modello di calcolo semplificato del potere fonoisolante apparente da impiegarsi nella maggioranza dei casi di ambienti residenziali.

Differenti studi hanno dimostrato che la trasmissione dell'energia sonora attraverso giunti rigidi tra partizioni omogenee in muratura è funzione solo del rapporto tra le masse superficiali delle murature tra loro ortogonali (formula 9) e non della frequenza, almeno nel campo di frequenze tra 100 e 2000 Hz circa. Inoltre, se si limita la previsione di isolamento acustico al solo indice di valutazione del potere fonoisolante, può essere ritenuta valida l'approssimazione data da una delle differenti formulazioni della legge della massa.

Sotto queste ipotesi può essere definita una relazione per il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R'_w nella seguente forma [24]:

$$R'_w = R_w - C_F \quad (\text{dB}) \quad (18)$$

in cui C_F è il contributo globale, in dB, della trasmissione di fiancheggiamento dovuta ai percorsi strutturali i-j.

$$C_F = -10 \lg \left(1 + 10^{\frac{R_{ijw} - R_{Ddw}}{10}} \right) \quad (19)$$

L'indice di valutazione del potere fonoisolante R_{wij} si calcola mediante la formula 7, per cui è necessario conoscere i valori degli indici di valutazione del potere fonoisolante $R_{wi,j}$ e dell'indice di riduzione K_{ij} .

Poiché sia R_w che K_{ij} possono essere espressi in funzione della sola massa superficiale dei differenti elementi connessi, se la trasmissione di fiancheggiamento, rappresentata dal termine C_F , viene considerata come media del contributo dei differenti percorsi di trasmissione strutturale, si può definire una tabella per il calcolo di C_F a partire dalla massa superficiale della partizione e dalla massa superficiale media degli elementi di fiancheggiamento.

Massa superficiale della partizione (kg/m ²)	Massa superficiale media degli elementi di fiancheggiamento omogenei, non coperti da rivestimento isolante (kg/m ²)								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	2	1	0	0	0	0	0	0	0
150	3	2	1	1	0	0	0	0	0
200	4	3	2	1	1	1	0	0	0
250	5	3	2	2	1	1	1	1	0
300	6	4	3	2	2	1	1	1	1
350	7	5	4	3	2	2	1	1	1
400	7	5	4	3	3	2	2	1	1
450	8	6	5	4	3	2	2	2	1
500	8	6	5	4	3	3	2	2	2

Tabella 2) Valore del contributo globale di fiancheggiamento C_F per trasmissione di rumori aerei in funzione della massa superficiale degli elementi connessi per giunti rigidi a croce tra strutture omogenee.

I valori riportati in tabella 2 fanno riferimento alle formule per il calcolo del potere fonoisolante apparente e dell'indice di riduzione delle vibrazioni del progetto di norma CEN, per il caso di giunti a croce rigidi tra gli elementi. Nella realtà, dei quattro giunti laterali della parete di separazione ve ne è in genere almeno uno (quello con la facciata) che è un giunto a T; questo consente, rispetto al giunto a croce, una maggiore trasmissione laterale. Tuttavia si è anche riscontrato che il modello CEN tende a sovrastimare la trasmissione di fiancheggiamento indicando dei valori di K in genere inferiori a quelli misurati. Per questo si può ritenere che i valori riportati in tabella 2 siano validi per una prima valutazione del contributo di fiancheggiamento.

Per la trasmissione sonora tra ambienti adiacenti in piano, la massa superficiale è quella media delle due pareti e dei due solai, per cui il valore è difficilmente inferiore a 200-250 kg/m².

Si deve tenere conto che, qualora uno o più elementi di fiancheggiamento siano rivestiti con uno strato isolante con frequenza di risonanza sufficientemente bassa ($f_0 < 125$ Hz), la trasmissione globale di fiancheggiamento viene ridotta per l'assenza di uno o più percorsi di trasmissione. In questo caso, si può ancora considerare la valutazione offerta dalla tabella 2 una approssimazione di massima più cautelativa, oppure si deve procedere con il calcolo analitico della trasmissione attraverso tutti i percorsi laterali.

In generale, si può classificare la trasmissione laterale in tre categorie principali, in base alle quali può essere più o meno opportuno un intervento migliorativo teso a ridurre la trasmissione strutturale.

Questo approccio è stato seguito dal CSTB nella guida applicativa al nuovo regolamento acustico francese [1] dove però si fa riferimento alla trasmissione dovuta ad ogni singolo percorso laterale. Riprendendo le categorie del CSTB, ma con riferimento alla trasmissione globale, si possono definire le seguenti categorie:

- A) *trasmissione laterale forte*: $C_F > 5$ dB; è il caso ad esempio di elementi laterali leggeri su partizioni massicce o di controsoffitti passanti (figura 3 A e B): la trasmissione laterale rappresenta un grosso contributo negativo all'isolamento aereo per cui gli interventi migliorativi devono riguardare prioritariamente questo aspetto;
- B) *trasmissione laterale media*: $2 < C_F \leq 5$ dB; è il caso più frequente: le strategie di intervento possono essere tese sia al miglioramento del divisorio che a ridurre la trasmissione laterale;
- C) *trasmissione laterale debole*: $C_F \leq 2$ dB; è il caso ad esempio di molti edifici a muratura portante in cui le strutture laterali sono massicce o di edifici con giunti elastici di sconnessione: la trasmissione laterale ha una entità tale da non richiedere alcun intervento migliorativo.

2 Calcolo del livello di rumore da calpestio per ambienti sovrapposti

Il livello di rumorosità provocato da sorgenti di calpestio che agiscono nel solaio di separazione tra due ambienti interni confinanti è caratterizzato dal livello normalizzato di rumore da calpestio L'_n . Questo rappresenta il livello medio di pressione sonora che si stabilisce nell'ambiente disturbato quando nel solaio di separazione dei due ambienti agisce una sorgente in grado di produrre un livello determinato di forza di impatto. Il li-

vello di pressione sonora viene normalizzato all'assorbimento equivalente dell'ambiente disturbato.

Il livello normalizzato di rumore da calpestio fra due ambienti sovrapposti L'_n si ottiene dal livello equivalente normalizzato di rumore da calpestio $L_{n,eq}$ in base alla seguente formula:

$$L'_n = L_{n,eq} - \Delta L + K \quad (\text{dB}) \quad (20)$$

in cui ΔL è il valore della riduzione del livello di rumore da calpestio dovuta ad eventuali strati di rivestimento applicati all'intradosso o all'estradosso del solaio e K è un termine che tiene conto in maniera globale della trasmissione di fiancheggiamento, da non confondersi con l'indice di riduzione delle vibrazioni precedentemente definito.

Questo modello di calcolo, che, a differenza di quello per i rumori aerei, valuta il contributo della trasmissione strutturale laterale in modo globale, è applicabile ad ambienti sovrapposti nei quali gli elementi costruttivi di fiancheggiamento del solaio divisorio sono costituiti da strutture omogenee.

Sotto questa ipotesi, il valore del termine K , analogo a C_F precedentemente introdotto per i rumori aerei, può essere ottenuto dalla tabella 3 in funzione della massa superficiale del solaio divisorio e della massa superficiale media delle strutture laterali.

Massa superficiale del solaio di separazione(kg/m ²)	Massa superficiale media degli elementi di fiancheggiamento omogenei, non coperti da rivestimento isolante (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 3) Valore del contributo globale di fiancheggiamento K per trasmissione di rumori impattivi in funzione della massa superficiale degli elementi connessi.

2.1 Calcolo della riduzione del livello di rumore da calpestio dovuta a pavimento galleggiante

Nel caso specifico di pavimenti galleggianti costituiti da uno strato di massetto in conglomerato cementizio su sottofondo resiliente, si può fare riferimento alla seguente relazione di calcolo [3, 9]:

$$\Delta L = 30 \lg \frac{f}{f_0} \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

dove f è la frequenza in ottave o terzi di ottava e f_0 è la frequenza di risonanza, in Hz, del sistema pavimento galleggiante - strato resiliente, calcolata in base alla seguente relazione [20]:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ (Hz)} \quad (22)$$

con s' rigidità dinamica dello strato elastico, espressa in MN/m^3 , e m' massa superficiale dello strato di rivestimento (kg/m^2).

2.2 Note critiche all'applicabilità del modello CEN per il calcolo del livello di rumore da calpestio

Il modello di calcolo della trasmissione di rumori impattivi del progetto di norma CEN, a differenza di quello per i rumori aerei, considera la trasmissione di fiancheggiamento in maniera globale, per cui risulta facilmente applicabile a casi correnti anche da non esperti.

I margini di maggiore incertezza riguardano in questo caso l'affidabilità dei dati sul livello di rumore da calpestio del solaio.

Inoltre, proprio perché riferito ad una valutazione globale del fiancheggiamento, risulta poco applicabile a casi particolari come ambienti sovrapposti solo in parte (paragrafo 1.1, caso G).

Nel caso di pavimenti galleggianti, la valutazione della frequenza di risonanza richiede la conoscenza precisa della consistenza dei differenti strati del solaio. Questo rappresenta quasi sempre un problema perché lo spessore del massetto e dello strato di allettamento della pavimentazione variano in funzione di esigenze difficilmente valutabili a livello di progettazione (ad esempio la stesura della soletta del solaio non esattamente orizzontale, la sovrapposizione dei tubi degli impianti che richiede di alzare la soletta). Inoltre l'efficacia reale del pavimento galleggiante dipende molto anche dalla messa in opera, in quanto la presenza di discontinuità nello strato elastico può ridurre sensibilmente l'effetto smorzante delle vibrazioni.

Il comportamento acustico dei solai nei confronti degli impatti dipende anche dal verso di orditura dei travetti e dall'interasse tra i blocchi e si deve tenere conto che vi sono limiti oltre i quali un solaio in latero cemento non può più essere considerato omogeneo, come viene fatto nel modello CEN.

Secondo quanto riportato nel progetto di norma, comunque, il 60 % dei casi misurati di trasmissione di rumori impattivi tra ambienti sovrapposti rientra in un intervallo di ± 2 dB centrato sul valore calcolato (come indice di valutazione) ed il 100 % in un intervallo di ± 4 dB.

Come per la trasmissione dei rumori aerei è possibile stabilire tre classi di qualità nei confronti della trasmissione laterale. Ci si può riferire allo stesso schema riportato al paragrafo 1.8, sostituendo il termine C_F con il termine K .

3 Esempio di calcolo del potere fonoisolante apparente tra due ambienti adiacenti: confronto tra soluzioni differenti

Nella presente appendice viene presentato il risultato di calcolo del potere fonoisolante apparente R' per tre differenti soluzioni di ambienti adiacenti, in cui la trasmissio-

ne di fiancheggiamento assume una diversa rilevanza. Si tratta di tre soluzioni di corrente realizzazione che riguardano pareti in laterizio e solai in laterocemento con l'uso di strati di rivestimento in cartongesso e materassino in lana minerale. La parete di separazione tra i due ambienti è stata mantenuta invariata per agevolare il confronto tra le soluzioni ed è costituita da blocchi in laterizio alveolato intonacati su entrambi i lati, con massa superficiale pari a 285 kg/m^2 .

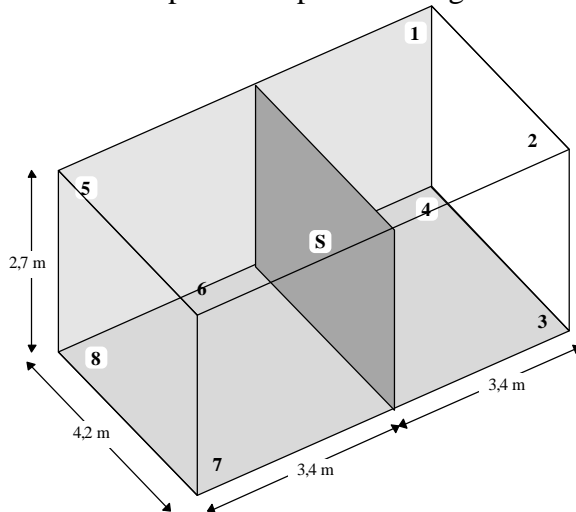


Figura 8) I due ambienti della cui partizione viene calcolato il potere fonoisolante apparente delle tre soluzioni.

Le soluzioni a minore trasmissione laterale (di conseguenza a maggiore R') non sono da intendersi come valide strategie per la riduzione della trasmissione sonora tra ambienti adiacenti, in quanto la strategia prioritaria è quasi sempre quella di intervenire prima sulla partizione e quindi sulle strutture laterali.

Per ogni soluzione vengono descritte le strutture di involucro dei due ambienti facendo riferimento alla numerazione riportata nella figura 8.

I numeri pari individuano i solai, quelli dispari le pareti. Gli ambienti esaminati sono due stanze residenziali poste al primo piano di un edificio su

piano terra costituito da un unico spazio aperto; pertanto i giunti tra partizione e strutture laterali sono due a croce e due a T (parete di facciata e solaio del pavimento).

Nel calcolo si è trascurata la presenza di porte e finestre che dovrebbe ridurre la trasmissione di fiancheggiamento per via strutturale ma può creare degli importanti percorsi di trasmissione aerea. Inoltre, per l'indice di riduzione delle vibrazioni del giunto tra partizione e parete di facciata si è considerato un vincolo rigido tra le pareti che coinvolge solo il tavolato interno di quest'ultima (figura 6A). Pertanto la parete viene considerata equivalente ad una in mattoni forati da 8 cm.

Per il calcolo delle prestazioni acustiche delle tre soluzioni esaminate sono stati impiegati dati sperimentali certificati per la partizione, le strutture laterali (pareti e solai) e gli strati di rivestimento. I dati relativi alle pareti ed ai solai sono stati misurati nei laboratori dell'Università di Parma, mentre il valore dell'incremento ΔR della controparete è del Fraunhofer Institute für Bauphysik.

I valori, in funzione della frequenza in bande di terzi di ottava, sono riportati in tabella 4; l'indice di valutazione è stato ottenuto da questi valori secondo la norma ISO 717-1 [13].

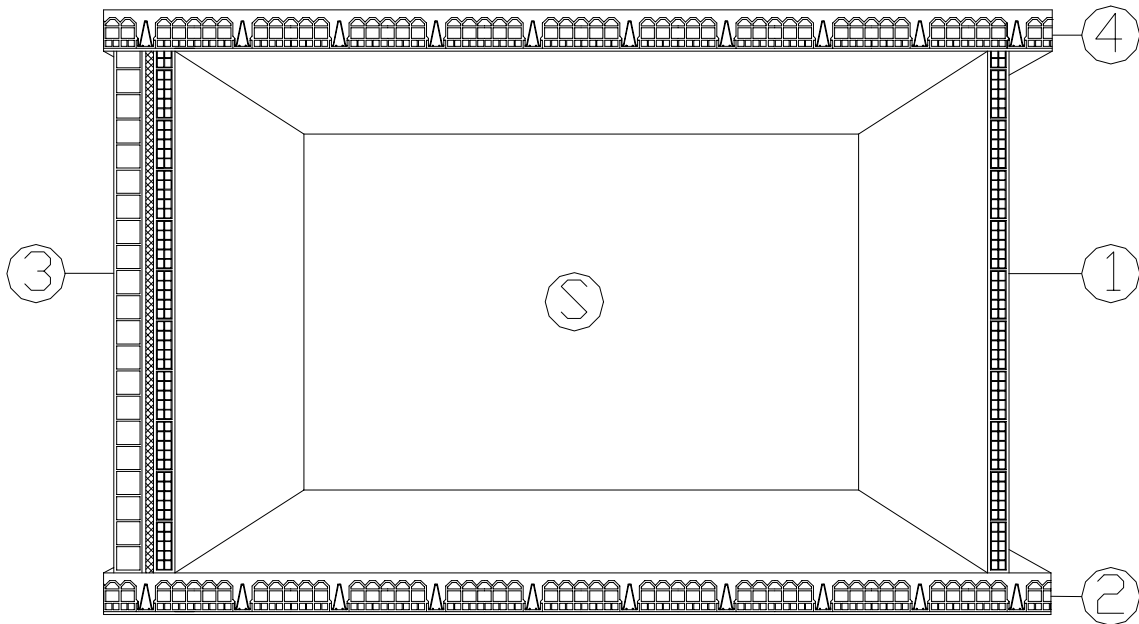
	Frequenza (terzi di ottava)																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	R _w
Partizione in blocchi allegg. (R)	39,3	40,1	42,7	42,9	43,0	45,5	45,4	47,0	48,6	49,5	50,8	52,0	55,1	56,3	53,4	55,4	51,5
Parete in forati da 8 cm (R)	32,4	29,7	29,3	30,6	33,2	35,1	36,9	39,3	40,0	40,8	42,7	44,9	45,9	46,9	47,8	49,7	42,5
Solaio 16+4 (R)	35,9	40,6	40,6	39,5	41,8	44,1	45,0	47,0	43,6	45,5	47,3	50,2	52,0	51,7	50,7	54,8	49,0
Solaio 20+4 (R)	41,1	40,1	41,7	42,8	42,8	44,9	42,4	42,5	46,3	48,3	49,3	52,4	54,2	52,4	53,1	58,5	50,0
Controparete (ΔR)	5,5	7,0	9,5	10,5	14,0	14,0	14,5	16,2	16,0	17,5	19,5	22,5	25,0	28,5	28,0	22,5	15,0

Tabella 4) Valore del potere fonoisolante e dell'incremento del potere fonoisolante delle strutture impiegate.

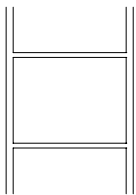
I valori dell'incremento del potere fonoisolante relativo allo strato addizionale costituito da una lastra di cartongesso su intercapedine con lana minerale sono stati ottenuti presso i laboratori del Fraunhofer Institute für Bauphysik secondo una procedura di misura standardizzata dalla norma DIN 52210 che prevede il montaggio della controparete su una parete di supporto in calcestruzzo spessa 10 cm. Il comportamento della controparete, quando montata su un differente supporto, può subire delle variazioni dovute ad un differente valore della risonanza del sistema parete di supporto - intercapedine - rivestimento.

Nell'esempio di calcolo, la controparete viene montata al supporto mediante correnti metallici.

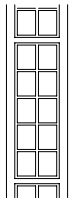
3.1 Soluzione con pareti laterali leggere



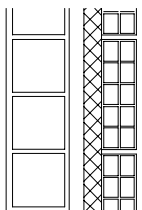
Descrizione delle strutture che delimitano i due ambienti



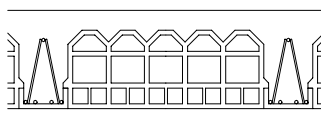
Partizione S: parete in blocchi semipieni in laterizio alleggerito in pasta (alveolato) di 25 cm di spessore con foratura del 45%, a fori verticali, intonacata con 1,5 cm di malta su ambo i lati. Massa superficiale $m' = 285 \text{ kg/m}^2$.



Pareti interne 1 e 5: parete in mattoni forati da 8 cm a fori orizzontali con foratura del 60 %, intonacata con 1,5 di malta su ambo i lati. Massa superficiale $m' = 136 \text{ kg/m}^2$.

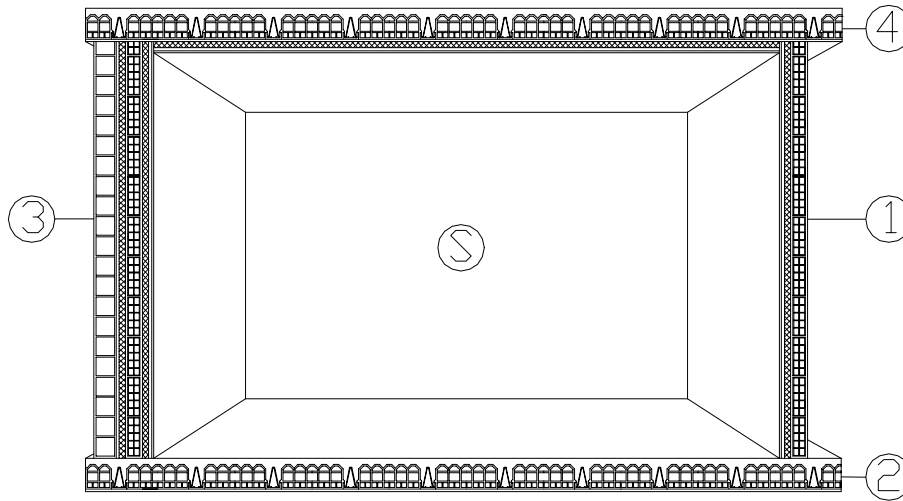


Pareti esterne 3 e 7: muratura a cassetta che ai fini del calcolo viene considerata al pari di una parete monostrato in mattoni da 8 cm a fori orizzontali con foratura del 60 %, intonacata con 1,5 di malta su ambo i lati. Massa superficiale $m' = 136 \text{ kg/m}^2$.

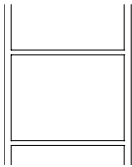


Solai 2, 4, 6 e 8: solai con travetti a traliccio e pignatte tipo A da 16 cm con 4 cm di soletta in calcestruzzo e 1,5 cm di intonaco all'intradosso. Massa superficiale $m' = 270 \text{ kg/m}^2$.

3.2 Soluzione a pareti laterali leggere con contropareti

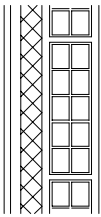


Descrizione delle strutture che delimitano i due ambienti

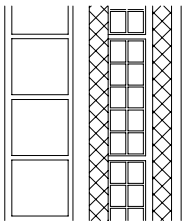


Partizione: parete in blocchi semipieni in laterizio alleggerito in pasta (alveolato) di 25 cm di spessore con foratura del 45%, a fori verticali, intonacata con 1,5 cm di malta su ambo i lati.

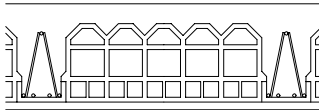
Massa superficiale $m' = 285 \text{ kg/m}^2$



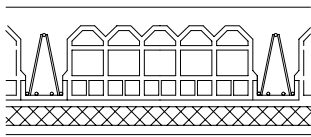
Pareti 1 e 5: parete in mattoni forati da 8 cm a fori orizzontali con foratura del 60 %, intonacata con 1,5 cm di malta su ambo i lati. Controparete in lastre di cartongesso da 1,25 cm di spessore su intercapedine spessa 6 cm parzialmente riempita con lastra di lana minerale da 4 cm. Massa superficiale $m' = 136 \text{ kg/m}^2$



Pareti 3 e 7: muratura a cassetta che ai fini del calcolo viene considerata al pari di una parete monostrato in mattoni da 8 cm (8 x 25 x 25), a fori orizzontali, foratura 60 %, intonacata con 1,5 di malta su ambo i lati. Controparete in lastre di cartongesso da 1,25 cm di spessore su intercapedine spessa 6 cm parzialmente riempita con lastra di lana minerale da 4 cm. Massa superficiale $m' = 136 \text{ kg/m}^2$.



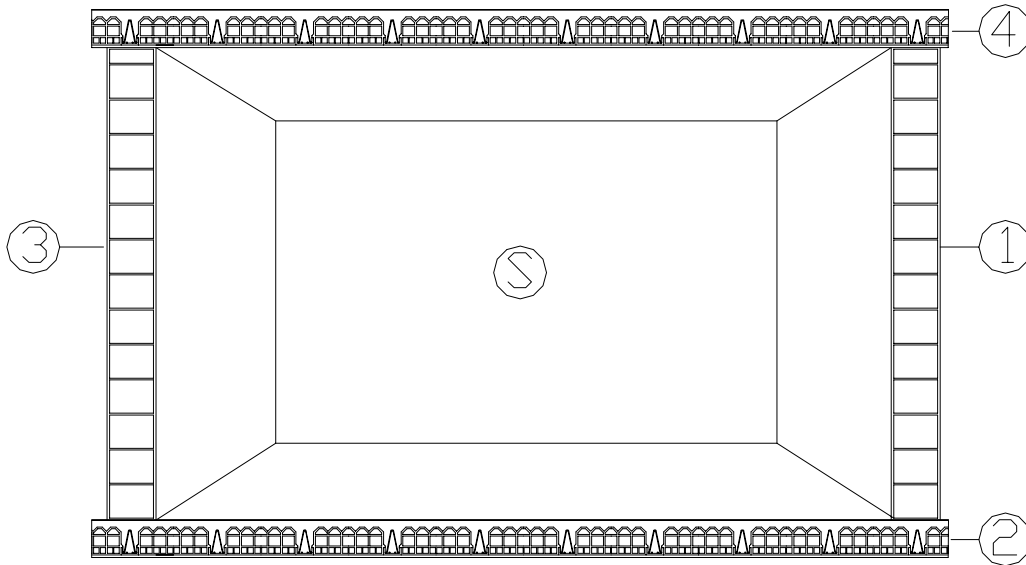
Solai 2 e 6: solai con travetti a traliccio e pignatte tipo A da 16 cm con 4 cm di soletta in calcestruzzo e 1,5 cm di intonaco all'intradosso. Massa superficiale $m' = 270 \text{ kg/m}^2$.



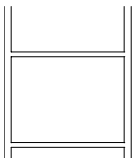
Solai 4 e 8: solai uguali al 2 e 6, ma con controparete in lastre di cartongesso da 1,25 cm di spessore su intercapedine spessa 6 cm parzialmente riempita con lastra di lana minerale da 4 cm.

Massa m' superficiale = 270 kg/m^2 .

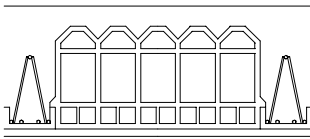
3.3 Soluzione a pareti laterali pesanti



Descrizione delle strutture che delimitano i due ambienti



Partizione, pareti 1, 3, 5 e 7: parete in blocchi semipieni in laterizio alleggerito in pasta (alveolato) di 25 cm di spessore (25 x 30 x 19), foratura = 45%, a fori verticali, intonacata con 1,5 cm di malta su ambo i lati. Massa superficiale $m' = 285 \text{ kg/m}^2$.



Solai 2, 4, 6 e 8: solai con travetti a traliccio (interasse = 50 cm) e pignatte tipo A da 20 cm con 4 cm di soletta in calcestruzzo e 1,5 cm di intonaco all'intradosso. Massa superficiale $m' = 340 \text{ kg/m}^2$.

3.4 Confronto tra il potere fonoisolante apparente offerto dalle tre soluzioni

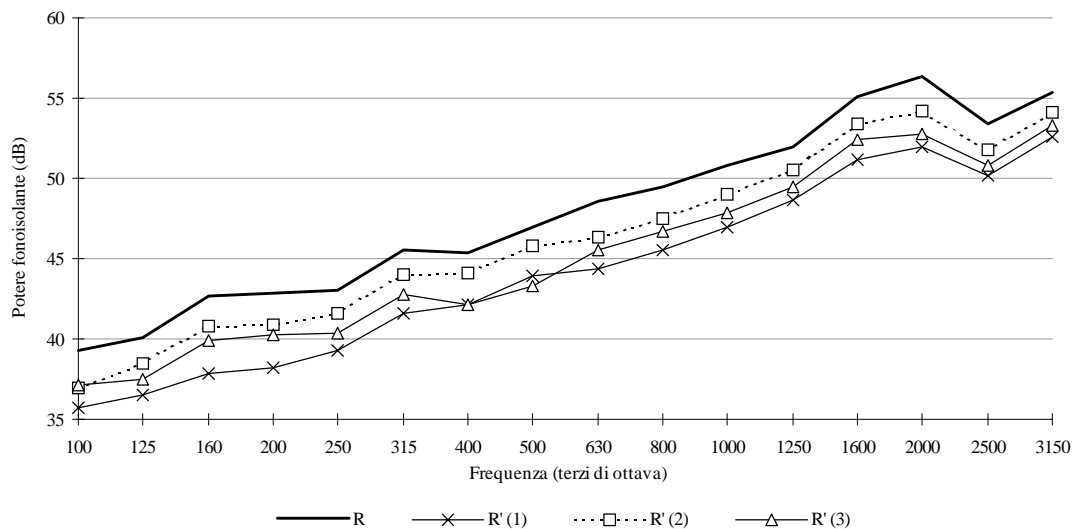


Figura 9) Potere fonoisolante apparente in bande di terzi di ottava offerto dalle tre soluzioni.

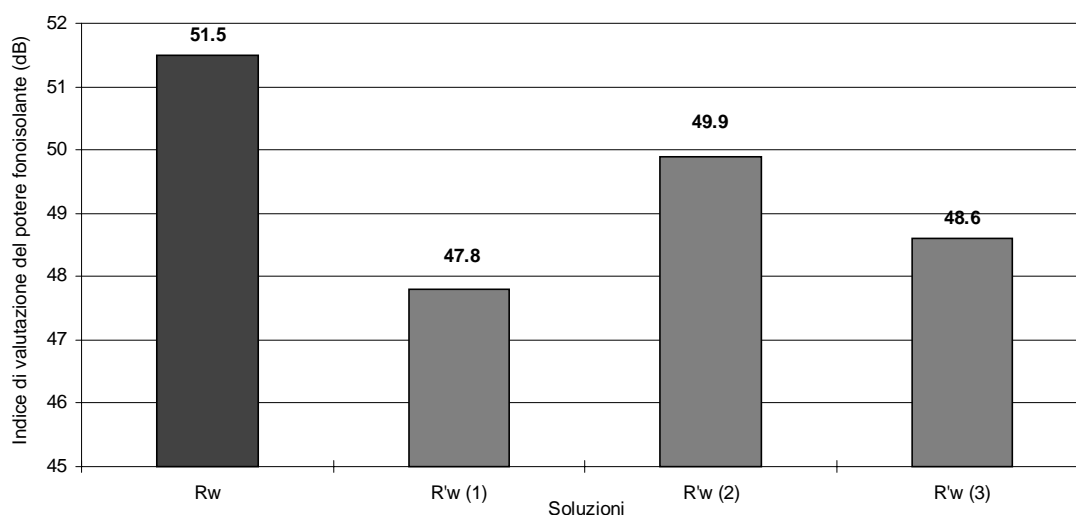


Figura 10) Indice di valutazione del poterefonoisolante apparente offerto dalle tre soluzioni.

Riferimenti

- [1]CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECNQUE DU BATIMENT, *Nouvelle Réglementation Acoustique: exemples de solution*, CSTB, 1995;
- [2]COCCHI A., FARINA A., FAUSTI P., POMPOLI R., SEMPRINI G., "Prestazioni acustiche di solai in laterizio", in *Murature oggi*, p. 30-42;
- [3]CREMER L., HECKL M., UNGAR E., *Structure borne sound*, Springer-Verlag, 1973;
- [4]GERRETSEN E., "Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings", in *Appl. Acous.* **19**, 1986, pp. 245-264;
- [5]GERRETSEN E., "Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures", in *Appl. Acous.* **12**, 1979, pp. 413-433;
- [6]GERRETSEN E., *Vibration reduction index K_{ij} , a new quantity for sound transmission at junctions of building elements*, Proc. Internoise 96, Liverpool, July 1996, pp. 1475-1480;
- [7]GERRETSEN E., *Vibration reduction index K_{ij} , for junctions of building elements with cavities*, Proc. Internoise 97, Budapest, August 1997, pp. 693-698;
- [8]ISO 140-3, *Acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*;
- [9]ISO 140-6, *Acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, part 6: laboratory measurements of impact sound insulation of floor*;
- [10]ISO 140-8, *Acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, part 8: laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a standard floor*;
- [11]ISO 140-10, *Acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, part 10: laboratory measurements of airborne sound insulation of small building elements*;

- [12]ISO 140-12, *Acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, part 12: laboratory measurements of room to room airborne and impact sound insulation of an access floor*;
- [13]ISO 717-1, *Acoustics - rating of sound insulation in buildings and of building elements; part 1, airborne sound insulation*;
- [14]ISO 717-2, *Acoustics - rating of sound insulation in buildings and of building elements; part 2, impact sound insulation*;
- [15]UNI EN 29052-1, *Acustica. Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali*;
- [16]ISO 9053-1, *Acoustics - materials for acoustical applications - determination of airflow resistance*;
- [17]ISO/CD 10848, *Acoustics - measurements of flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms*;
- [18]NIGHTGALE T. R. T., "Application of the CEN draft building acoustics prediction model to a lightweight double leaf construction" in *Appl. Acous.* **46**, 1995;
- [19]NORTON M. P., *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*, Cambridge University Press, 1989;
- [20]Pr. EN 12354-1, *Building acoustics; estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products, part 1: airborne sound insulation between rooms*, CEN, 1997;
- [21]Pr. EN 12354-2, *Building acoustics; estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products, part 2: impact sound insulation between rooms*, CEN, 1997;
- [22]ROCCO L., SAURO S., *Calcoli semplificati delle prestazioni acustiche degli edifici con indici a singolo numero*, in Atti del XXV congresso dell'AIA, Perugia, 1997;
- [23]SEMPRINI G., SECCHI S., *La trasmissione di vibrazione ai giunti di strutture edilizie. Metodo di valutazione e studio di alcuni casi tipici*, in Atti del XXV congresso dell'AIA, Perugia, 1997;
- [24]SZUNROWICZ B., IZEWSKA A., "Simplified evaluation of flanking transmission based on the mean mass and mean area of flanking elements" in *Appl. Acoust.* **46**, 1995.