

LA NUOVA NORMATIVA ISO 12354 PER LA PREVISIONE DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO DEGLI EDIFICI

THE NEW ISO 12354 FOR THE ESTIMATION OF ACOUSTIC PERFORMANCE OF BUILDINGS

Francesca Di Nocco *

CIRI Edilizia e Costruzioni, Università di Bologna, Bologna

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Via Terracini 34 - 40131, Bologna, Italia

e-mail: francesca.dinocco2@unibo.it

(Ricevuto il 28/02/2017, accettato il 15/06/2017)

RIASSUNTO

Il presente contributo è incentrato sull'implementazione e verifica del nuovo modello di calcolo CEN per la determinazione dell'isolamento acustico degli edifici, proposto dalla recente revisione della norma ISO FDIS 12354:2017. Tale modello è stato applicato nel caso di un edificio con struttura a telaio in legno, pareti multistrato leggere e solai in CLT, per i quali l'aggiornamento della norma propone nuovi strumenti specifici per la loro trattazione. Inoltre, sono state individuate le variabili principali che determinano l'accuratezza del modello. La fase di validazione è stata eseguita confrontando i risultati calcolati con i dati raccolti in opera su un edificio esistente.

ABSTRACT

This work concerns the implementation and verification of the new CEN calculation model for the estimation of acoustic performance of buildings, in according to the recent revision of the ISO FDIS 12354:2017. This model has been applied in the case of timber framed building with lightweight multi-layer walls and CLT floor; the standard's revision is supposed to offer new specific tools for each component. In addition, main variables have been identified in order to determine the accuracy of the model. The validation phase has been executed comparing the results calculated with the data collected during measurement activities in situ on an existing building.

Parole chiave: ISO 12354; Cross laminated timber; Efficienza di radiazione.

Keywords: ISO 12354; Cross laminated timber; Radiation efficiency.

1. Introduzione

Il presente articolo è un estratto del lavoro di tesi svolto durante il periodo di revisione della norma UNI EN 12354:2002 [1], aggiornamento che a seguito del Vienna Agreement ha portato all'acquisizione di tale norma tecnica a livello internazionale dall'International Organization of Standardization.

Lo studio degli aspetti normativi è stato focalizzato sui nuovi strumenti che la norma introduce per la progettazione acustica di elementi in legno o altri materiali considerati non tradizionali. Come primo accorgimento è stata introdotta una nuova classificazione degli elementi costruttivi: non si parla più di strutture pesanti e leggere, ma di strutture di tipo A dove il tempo di riverberazione strutturale T_s è principalmente determinato dalle connessioni degli elementi, quindi dal total loss factor, e strutture di tipo B che comprendono tutte le altre. Per la prima tipologia nel metodo di calcolo non sono stati apportati cambiamenti, mentre per la seconda deve essere seguita una nuova trattazione, che vede l'introduzione del termine di isolamento medio normalizzato di vibrazioni $\overline{D}_{v,ij,n}$ al posto dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} [2, 3].

Attualmente, grazie ai tanti anni di studio e sperimentazione, si ha una buona comprensione del comportamento acustico di elementi tradizionali, ad esempio come il calcestruzzo. Per i nuovi materiali, come ad esempio il CLT, solo da qualche anno sono stati avviati alcuni lavori di ricerca sul relativo comportamento vibro-acustico. Caratteristica fondamentale che influenza il comportamento delle lastre in CLT è quella di ortotropia del materiale, ovvero le proprietà meccaniche sono uniche e indipendenti sui tre assi principali mutualmente ortogonali. È stato visto sperimentalmente che la velocità del suono del materiale è influenzata dalla variabilità del modulo di elasticità e della densità, che in questo caso varia in base alla direzione delle fibre. Quindi, in materiali come il CLT, la propagazione del suono dipende dalla variabilità delle proprietà meccaniche e le vibrazioni si propagano diversamente lungo le tre direzioni principali [4]. Altra problematica del sistema costruttivo in CLT è legata alla tipologia di giunzioni degli elementi: questo aspetto influenza notevolmente la trasmissione laterale nelle strutture. Una delle prime campagne di misure sistematiche a livello europeo è stata condotta dal gruppo di ricerca dell'Università di Bologna sulla trasmissione laterale di strutture in cross laminated timber. Questa ricerca ha individuato una significativa variazione dei risultati, riconducibile alla tipologia e al numero di viti utilizzate per la connessione [5].

La finalità del lavoro è stata quella di implementare il nuovo modello di calcolo dettagliato indicato dalla normativa [2, 3], cercando di individuare le variabili che ne determinano l'accuratezza. È stato applicato sul caso reale di un edificio in legno che presenta quegli elementi di cui oggi non si ha ancora una piena comprensione del loro comportamento acustico. Sono stati eseguiti i calcoli per due casi differenti: il primo caso su ambienti sovrapposti per la determinazione del livello di calpestio normalizzato apparente L'_n del solaio in CLT (Caso A) e il secondo caso su ambienti adiacenti per la determinazione del potere fonoisolante apparente R' di una parete divisoria multistrato leggera (Caso B). Nella fase di validazione, i risultati calcolati sono stati confrontati con i valori raccolti da misurazioni in opera eseguite sull'edificio in esame.

2. Presentazione del caso studio

La scelta del caso studio è ricaduta su un edificio residenziale in legno, situato nel Comune di Coriano (RN), per il quale sono stati raccolti tutti i dati di misura in opera delle prove di isolamento acustico, condotte sia durante il cantiere sia a fine lavori.

La struttura portante dell'edificio è costituita da un telaio in legno lamellare e le chiusure sono costituite da solai in CLT e pareti leggere multistrato. Queste scelte costruttive consentono una forte flessibilità progettuale degli spazi interni e una rapida realizzazione dell'edificio. Quest'ultimo presenta tre piani fuori terra più uno interrato e all'interno gli ambienti sono dotati tutti di controsoffitto e delimitati internamente ed esternamente da pareti multistrato.

2.1 Modellazione geometrica ed acustica degli elementi

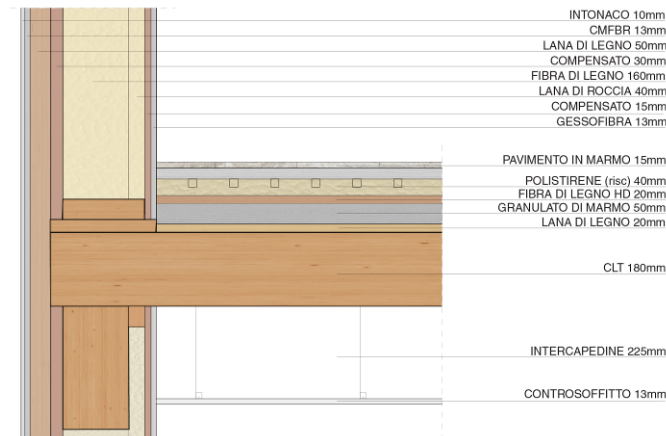


Fig. 1 - Dettaglio costruttivo del solaio interno con la parete esterna - Floor and outside wall structural junction detail.

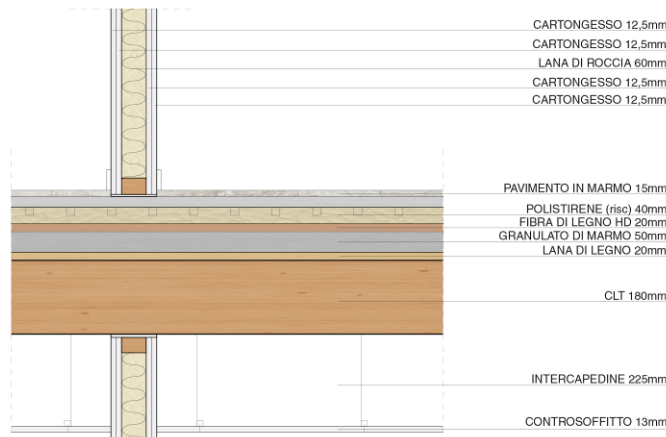


Fig. 2 - Dettaglio costruttivo della parete interna con il solaio - Floor and inside wall structural junction detail.

Il modello di calcolo per la previsione dei parametri di isolamento acustico dell'elemento di separazione orizzontale è stato applicato a due camere da letto sovrapposte di due unità immobiliari distinte. I solai interni hanno come base strutturale delle lastre in CLT di spessore 180 mm, su cui poggiano gli strati aggiuntivi, e sono dotati di controsoffitto (Fig. 1). Le pareti che delimitano le camere, all'interno della stessa unità immobiliare, sono di due tipologie diverse: l'involucro esterno è un sistema

di pannelli multistrato per uno spessore totale di 330 mm (Fig. 1), invece, le pareti interne sono costituite da pannelli sandwich di spessore 110 mm (Fig. 2).

Il modello di calcolo per la previsione dei parametri di isolamento acustico dell'elemento parete è stato applicato a due camere da letto adiacenti di due unità immobiliari differenti. La parete divisoria poggia sul solaio in CLT ed è una parete multistrato, per uno spessore totale di 320 mm (Fig. 3).

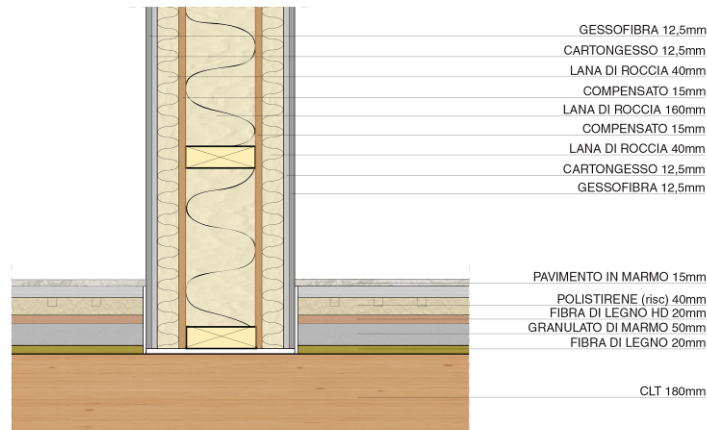


Fig. 3 - Dettaglio costruttivo della parete divisoria con il solaio - Floor and separation wall structural junction detail.

Per il solaio grezzo, i dati di ingresso del livello di pressione sonora normalizzato di calpestio $L_{n,0}$ sono stati estrapolati da dati di letteratura [6,7] e per il potere fonoisolante R_0 è stato fatto riferimento allo studio dell'università di Bologna [8]. I poteri fonoisolanti della parete interna, esterna e divisoria sono stati calcolati con il software *Insul 8.0*.

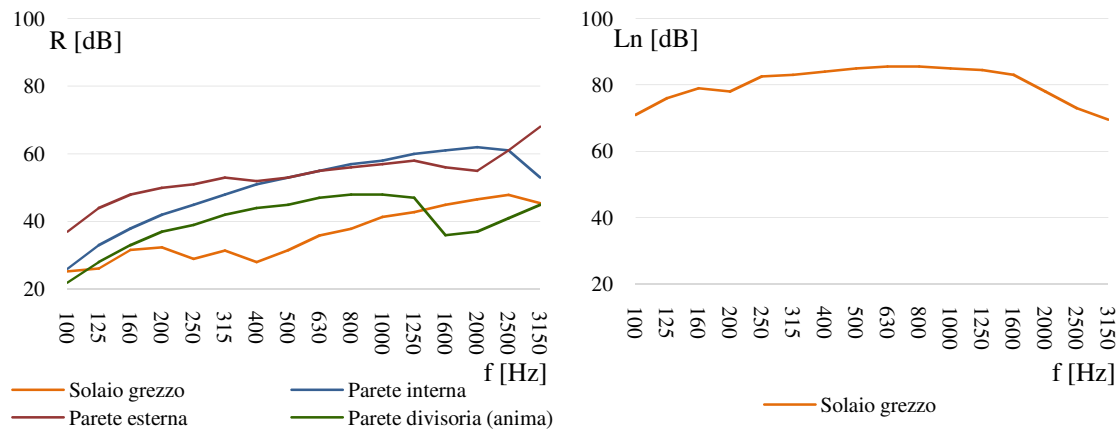


Fig. 4 - A sinistra l'andamento dei poteri fonoisolanti in ingresso e a destra l'andamento del livello di calpestio normalizzato del solaio grezzo - On the left sound reduction index input values trend and on the right rough slab impact sound pressure level.

3. Il nuovo modello di calcolo previsionale

3.1 Presentazione del modello nelle sue parti

Nel presente paragrafo vengono brevemente richiamate le formule principali utilizzate per lo sviluppo del modello di calcolo dettagliato.

Il potere fonoisolante apparente R' è determinato mediante la somma logaritmica di tutti i contributi di trasmissione sonora diretta e indiretta attraverso l'equazione [2]:

$$(1) \quad R' = -10 \log \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{-\frac{R_{ij}}{10}} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove il contributo di trasmissione diretta è dato dalla somma del potere fonoisolante dell'elemento di separazione $R_{s,situ}$ e dei contributi di eventuali strati aggiuntivi $\Delta R_{D,situ}$ e $\Delta R_{d,situ}$ [2]:

$$(2) \quad R_{D,d} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} \quad [\text{dB}]$$

Inoltre, per ciascun percorso di trasmissione laterale può essere calcolato il relativo potere fonoisolante mediante la relazione [2]:

$$(3) \quad R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:

$R_{i,situ}$ è il potere fonoisolante per l'elemento i in opera [dB];

$R_{j,situ}$ è il potere fonoisolante per l'elemento j in opera [dB];

$\Delta R_{i,situ}$ è l'incremento del potere fonoisolante mediante strati aggiuntivi per l'elemento i [dB];

$\Delta R_{j,situ}$ è l'incremento del potere fonoisolante mediante strati aggiuntivi per l'elemento j [dB];

$\overline{D_{v,ij,situ}}$ è l'isolamento medio di vibrazioni del giunto, tra gli elementi i e j nell'effettiva situazione in opera [dB];

S_s è la superficie dell'elemento di separazione s [m²];

S_i è la superficie dell'elemento i nell'ambiente sorgente [m²];

S_j è la superficie dell'elemento j nell'ambiente ricevente [m²].

Analogamente, per la previsione del livello totale normalizzato di pressione sonora di calpestio L'_n si ha [3]:

$$(4) \quad L'_n = 10 \log \left(10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove il contributo di trasmissione diretta $L_{n,d}$ è dato dalla somma del livello normalizzato di calpestio dell'elemento di separazione $L_{n,situ}$ e dei contributi di attenuazione $\Delta L_{s,situ}$ del livello di pressione sonora, dovuta alla presenza di pavimento galleggiante, e di attenuazione $\Delta L_{d,situ}$ dovuta alla presenza di un ulteriore rivestimento sul lato dell'ambiente ricevente (controsoffitto) [3]:

$$(5) \quad L_{n,Dd} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} \quad [\text{dB}]$$

Per ciascun percorso di trasmissione laterale può essere calcolato il relativo livello di pressione sonora di calpestio normalizzato $L_{n,ij}$ con la seguente equazione [3]:

$$(6) \quad L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log \sqrt{\left(\frac{S_i}{S_j}\right)} \quad [\text{dB}]$$

dove:

$L_{n,situ}$ è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio nell'effettiva situazione in opera [dB];

ΔL_{situ} è l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio di un rivestimento di pavimentazione nella situazione in opera [dB];

$R_{i,situ}$ è il potere fonoisolante dell'elemento eccitato [dB];

$R_{j,situ}$ è il potere fonoisolante per trasmissione diretta dell'elemento laterale j nell'ambiente ricevente [dB];

$\Delta R_{j,situ}$ è l'incremento del potere fonoisolante dovuto ai rivestimenti interni dell'elemento laterale j [dB];

$\overline{D_{v,ij,situ}}$ è l'isolamento medio di vibrazioni del giunto, tra gli elementi i e j nell'effettiva situazione in opera [dB];

S_i è la superficie dell'elemento i nell'ambiente sorgente [m^2];

S_j è la superficie dell'elemento j nell'ambiente ricevente [m^2].

Nello specifico la grandezza di isolamento medio di vibrazioni del giunto è determinata mediante l'equazione 7, per gli elementi che rientrano nella tipologia A e mediante l'equazione 8, per tutti gli altri che rientrano nella tipologia B [3], come segue:

$$(7) \quad \overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \right) \quad [\text{dB}]$$

$$(8) \quad \overline{D_{v,ij,situ}} = \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \left(\frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{i,situ} S_{j,situ}}} \right) \quad [\text{dB}]$$

Le lunghezze equivalenti di assorbimento degli elementi i e j risultano:

$$(9) \quad a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad [\text{m}]$$

$$(10) \quad a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad [\text{m}]$$

dove:

c_0 è la velocità del suono nell'aria [m/s];

$T_{s,i,situ}$ è il tempo di riverberazione strutturale in situ dell'elemento i [s];

$T_{s,j,situ}$ è il tempo di riverberazione strutturale in situ dell'elemento j [s];

f_{ref} è la frequenza di riferimento ed è pari a 1000 Hz.

Per i valori dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} , per ciascuna via di trasmissione ij , e dell'isolamento medio normalizzato di vibrazioni $D_{v,ij,n}$, del giunto tra gli elementi i e j , possono essere utilizzati valori ricavati da misurazioni in laboratorio oppure, in mancanza di quest'ultimi, dalle formule empiriche indicate nell'appendice E della normativa [2].

Nell'appendice B della normativa [2] viene illustrato il metodo per il calcolo dell'efficienza di radiazione in frequenza. Con l'aggiornamento, per valori di $f < f_c$, è stata introdotta una correzione affinché possa essere considerata la sola trasmissione di risonanza. Quindi, il potere fonoisolante effettivo si calcola applicando, per ogni frequenza, un fattore di correzione al valore di R (dB) di laboratorio dipendente dai fattori di radiazione:

$$(11) \quad R^* = R + 10 \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right) \quad [\text{dB}]$$

Per strutture non omogenee leggere è indispensabile applicare questa correzione poiché gli elementi che le costituiscono sono caratterizzati da internal loss factors significativi. Le proprietà meccaniche del materiale incidono sul valore della frequenza di coincidenza e si verifica che per queste strutture tale frequenza ricade nel range delle medio-alte frequenze. In buona approssimazione, secondo la normativa [2], si può applicare un fattore di correzione pari a 8 dB per frequenze al di sotto della frequenza critica e pari a 0 dB per frequenze al di sopra di questa.

3.2 Modellazione geometrica degli ambienti

La modellazione geometrica degli ambienti è fondamentale per capire le peculiarità degli elementi che costituiscono il sistema. Quindi, occorre individuare l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente e scomporli nei loro elementi base (Fig. 5 e 6).

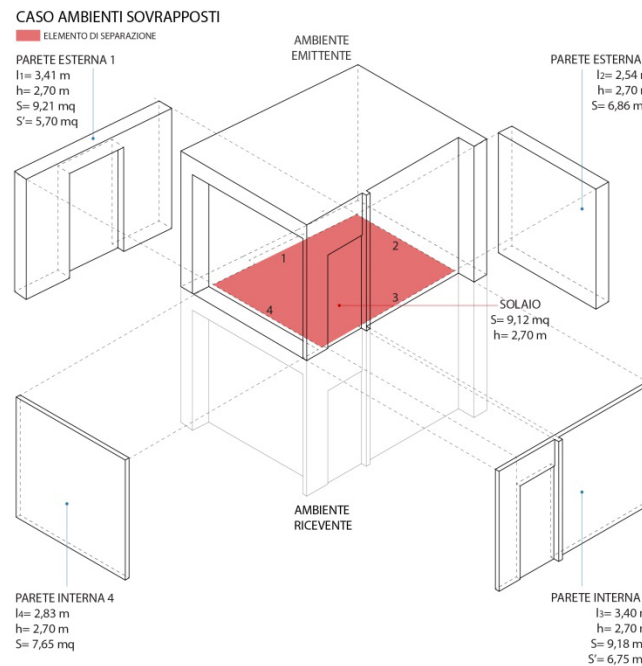


Fig. 5 - Esploso assometrico nel caso di ambienti sovrapposti (Caso A) – Axonometric exploded of the case of overlapping environments (Case A).

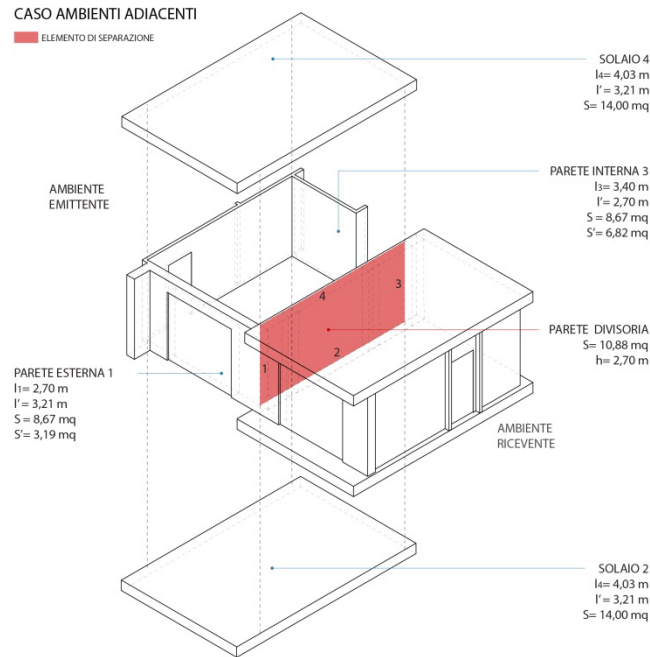


Fig. 6 - Esploso assonometrico nel caso di ambienti adiacenti (Caso B) – Axonometric exploded of the case of adjacent environments (Case B).

In prima approssimazione, il modello geometrico ideale è stato ricondotto ad un modello più semplice: non sono state considerate né le aperture presenti né le partizioni secondarie che si innestano sulle pareti principali.

3.3 Dati geometrici e acustici in ingresso

Da ora in avanti, delle singole stratigrafie verranno considerate solo le parti di elementi collegate tra di loro e, quindi, interessate dalla trasmissione laterale, considerando gli effetti dei rivestimenti come contributi aggiuntivi ΔR e/o ΔL (dB).

I dati di input nel caso di ambienti sovrapposti (Caso A), raccolti nella tabella 1, e nel caso di ambienti adiacenti (Caso B), raccolti nella tabella 2, sono: le superfici lorde S (m^2), le masse areiche totali m' (kg/m^2), gli spessori s (mm), internal loss factors η_{int} , le velocità delle onde longitudinali nel mezzo c_L (m/s) e le frequenze critiche f_c (Hz). Si è scelto che le grandezze elencate, ad eccezione delle prime due, interessano solo lo strato dell'elemento che irradia energia sonora nell'ambiente.

Per il valore della velocità delle onde longitudinali c_L (m/s) del pannello in CLT di spessore 180 mm è stato utilizzato un valore sperimentale riportato nella *Guide to Calculating Airborne Sound Transmission in Buildings* [9], nella sezione dedicata a misure di laboratorio sul CLT. Per i pannelli della parete esterna (1 e 2) ed interna (3 e 4), rispettivamente (verso l'interno) in compensato più gessofibra e in cartongesso, non si hanno a disposizione dati sperimentali di laboratorio. Per questa ragione, i valori delle velocità c_L (m/s) sono stati dedotti dal valore minimo di frequenza per cui si verifica il fenomeno della coincidenza [10].

Tab. 1 - Valori delle principali grandezze di input (Caso A) - Main input variables values (Case A).

Elementi	Area S (m ²)	Massa areica m' (kg/m ²)	Spessore s (mm)	Internal loss factor η_{int}	Velocità delle onde c_L (m/s)	Frequenza critica f_c (Hz)
ELEMENTO DI SEPARAZIONE						
Solaio	9,12	108,0	180	0,05 [9]	1150 [9]	310
ELEMENTI LATERALI						
Parete 1	9,21	100,5	12,5	0,01 [10]	2500	2055
Parete 2	6,86	100,5	12,5	0,01 [10]	2500	2055
Parete 3	9,18	46,8	12,5	0,01 [10]	1800	2854
Parete 4	7,64	46,8	12,5	0,01 [10]	1800	2854

Tab. 2 - Valori delle principali grandezze di input (Caso B) - Main input variables values (Case B).

Elementi	Area S (m ²)	Massa areica m' (kg/m ²)	Spessore s (mm)	Internal loss factor η_{int}	Velocità delle onde c_L (m/s)	Frequenza critica f_c (Hz)
ELEMENTO DI SEPARAZIONE						
Parete divisoria	10,88	24,0	15	0,02 [10]	2500	1710
ELEMENTI LATERALI						
Parete 1	8,67	100,5	12,5	0,01 [10]	2500	2055
Solaio 2	14,00	108,0	180	0,05 [9]	1150 [9]	310
Parete 3	8,67	46,8	12,5	0,01 [10]	1800	2854
Solaio 4	14,00	108,0	180	0,05 [9]	1150 [9]	310

Per i parametri acustici di ingresso, non avendo dati di laboratorio di misure specifiche al caso studio, si è scelto di utilizzare: i dati sperimentali raccolti nell'articolo *Direct impact sound insulation of CLT floors with e without toppings* [6,7] per il livello di calpestio del solaio grezzo $L_{n,0}$ (dB), i dati sperimentali raccolti nell'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [8] per il potere fonoisolante del solaio R (dB) e il software *Insul 8.0* per stimare gli andamenti dei poteri fonoisolanti R (dB) delle pareti verticali.

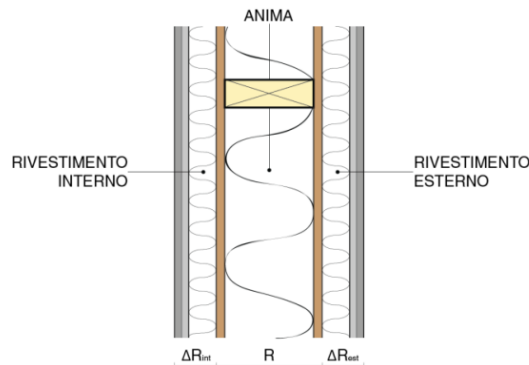


Fig. 7 - Schematizzazione della parete divisoria per il modello di calcolo - Layout of the separation wall for the calculation model.

Per la scelta dei contributi aggiuntivi $\Delta R_{floating}$, $\Delta R_{ceiling}$, $\Delta L_{floating}$ e $\Delta L_{ceiling}$ (dB), sono state considerate due stratigrafie di solai, con e senza controsoffitto, analoghe al caso studio ed analizzate precedentemente in laboratorio [8].

Occorre precisare che l'elemento di separazione verticale è stato schematizzato come in figura 7. Quindi, i valori di R (dB) in ingresso si riferiscono all'anima della parete (compensato, lana di roccia, compensato) e gli strati aggiuntivi internamente ed esternamente all'ambiente si riconducono rispettivamente ad un ΔR_{int} e ΔR_{est} (dB). In prima ipotesi si è scelto di considerare ΔR_{int} uguale a ΔR_{est} .

4. Identificazione delle variabili del modello

4.1 Caso A: ambienti sovrapposti

La validazione del modello di calcolo dettagliato per gli ambienti sovrapposti è stata effettuata solo per il livello di calpestio normalizzato apparente L'_n del solaio in CLT. Questa scelta è stata condizionata dalla disponibilità dei dati di misura in opera limitata a quelli del livello di pressione sonora di calpestio. Il modello di calcolo è stato testato utilizzando diversi dati di input, indagando principalmente la variabile K_{ij} (dB), indice di riduzione alle vibrazioni per la trasmissione laterale, e in totale sono stati sviluppati quattro diverse varianti del modello di calcolo.

I dati in ingresso principali del *modello di calcolo base*, che rappresenta la base per le successive varianti, sono:

- le aree S (m²) degli elementi assunte pari alle superfici lorde;
- il potere fonoisolante R (dB) e il livello di pressione sonora di calpestio L_n (dB) del solaio riferiti a valori sperimentali [6, 7];
- i poteri fonoisolante R (dB) delle pareti esterne ed interne simulati con il programma *Insul 8.0*;
- i contributi aggiuntivi $\Delta R_{floating}$, $\Delta R_{ceiling}$, $\Delta L_{floating}$ e $\Delta L_{ceiling}$ (dB) assunti da prove sperimentali di stratigrafie di solai analoghe al caso studio, con e senza controsoffitto [8];
- le formule empiriche per il calcolo dei K_{ij} (dB) riferite ad una soluzione mista che si avvicini al sistema costruttivo reale. Per i giunti che hanno come elemento i il solaio sono state impiegate le formule empiriche da normativa (Annex E.3.5) [2] riferite a giunti di una parete leggera a doppio strato ed elementi omogenei. Mentre per i giunti che hanno come elemento i le strutture laterali sono state assunte le formule empiriche da normativa (Annex F.4.3) [2] riferite a giunti di strutture leggere in legno con elementi multistrato;
- la correzione degli 8 dB, introdotta dall'aggiornamento della normativa, è applicata ai poteri fonoisolanti in ingresso e non sul livello di pressione sonora di calpestio poiché quest'ultimo non fa riferimento ad un'eccitazione aerea dell'elemento, bensì meccanica.

Il *modello di calcolo 1* presenta delle differenze rispetto al modello di calcolo base, in particolare: i contributi aggiuntivi $\Delta L_{floating}$ e $\Delta L_{ceiling}$ non sono più dei dati sperimentali, ma vengono assunti uguali ai contributi reali, ricavati da considerazioni sulle misurazioni in opera. Questo è stato possibile grazie alla disponibilità di dati acquisiti dalle misurazioni eseguite durante la costruzione del solaio.

Una volta fissati i dati acustici di ingresso del modello, è stata valutata l'influenza dell'indice di riduzione delle vibrazioni, per poter fare delle considerazioni su queste nuove tipologie di strutture. Nel *modello di calcolo 2*, per il calcolo dei K_{ij} (dB), invece della soluzione mista adottata per il *modello di calcolo base* e *1*, si è optato per

l'adozione delle formule empiriche di riferimento da normativa (Annex F.3.2) [2] per giunzioni interamente in CLT.

Nell'ultimo modello, il *modello di calcolo 3*, sono stati utilizzati gli indici di riduzione delle vibrazioni reali, ovvero i K_{ij} (dB) misurati attraverso le misure di velocità di vibrazione in opera eseguite sull'edificio del caso studio.

4.2 Caso B: ambienti adiacenti

Nel caso B, la validazione del modello di calcolo dettagliato per gli ambienti adiacenti ha riguardato il potere fonoisolante apparente R' della parete divisoria tra due unità immobiliari differenti. I calcoli condotti sul secondo caso sono stati guidati dalla variabile K_{ij} (dB) e dal comportamento risonante degli elementi costruttivi leggeri (correzione degli 8 dB) che costituiscono l'ambiente ricevente. Le ipotesi del *modello di calcolo base* sono le medesime del caso A.

Nel *modello di calcolo 4* per il calcolo dei K_{ij} (dB) sono state adottate le formule empiriche da normativa (Annex F.3.2) per giunzioni interamente in CLT [2].

Nel *modello di calcolo 5* è stato considerato un diverso approccio al comportamento risonante della parete divisoria. A differenza del modello precedente, la frequenza di coincidenza, in base alla quale si applicano termini correttivi previsti come da paragrafo B.2 della norma, non si riferisce all'anima della parete, bensì all'ultimo strato della parete completa (Fig. 7). Quindi, è stato considerato che è l'ultimo strato dell'intera parete a reimmettere energia sonora nell'ambiente. In questo modo, poiché la frequenza di coincidenza è risultata oltre i 3150 Hz, la correzione degli 8 dB è stata applicata su tutte le bande di frequenza considerate nel calcolo.

Sulla base dei dati di ingresso del *modello di calcolo 5*, nel *modello di calcolo 6* è stata eseguita una correzione empirica del contributo del rivestimento esterno della parete, in prima ipotesi posto uguale a quello del rivestimento interno.

5. Risultati ottenuti, incidenza delle variabili e validazione del modello

Di seguito vengono riportati i grafici finali in cui si possono osservare i diversi andamenti delle grandezze di isolamento acustico, calcolati dai vari modelli, a confronto con l'andamento dei valori misurati in opera (linea nera). I risultati ottenuti dai *modelli di calcolo base, 1, 2 e 3* relativi al caso di ambienti sovrapposti (Caso A) per la determinazione del livello normalizzato di calpestio apparente L'_n (dB) del solaio in CLT sono riportati nel grafico in figura 8. Invece, i risultati ottenuti dai *modelli di calcolo base, 4, 5 e 6* relativi al caso di ambienti adiacenti (Caso B) per la determinazione del potere fonoisolante apparente R' (dB) della parete divisoria sono riportati nel grafico in figura 9.

Si osserva l'elevata incidenza dei dati L_n e ΔL_n (dB) in ingresso al modello di calcolo per il caso A (Fig. 8): il *modello di calcolo base*, che considera in ingresso dei valori sperimentali, risulta molto distante da quello che è il comportamento reale del sistema. Inoltre, si osserva l'incidenza dei contributi dei rivestimenti in ingresso ΔR nel modello di calcolo per il caso B (Fig. 9): dal *modello di calcolo 5* (linea bordeaux) utilizzando dei valori più idonei, si ottiene con il *modello di calcolo 6* un andamento maggiormente veritiero (linea verde). Pertanto, si può affermare che se non si dispone di dati sperimentali specifici degli elementi del caso studio è difficile ottenere dei risultati attendibili. Risulta corretta la scelta di considerare la correzione degli 8 dB introdotta dall'aggiornamento della normativa. In merito a questo aspetto, però, occorre prestare

attenzione a qual è lo strato dell'elemento che irradia energia sonora nell'ambiente (fenomeno della coincidenza), poiché questa scelta influenza l'applicazione dei termini correttivi per l'efficienza di radiazione. Quanto appena detto si può riscontrare nella figura 9, dove il passaggio dal *modello di calcolo 4*, linea arancione, al *modello di calcolo 5*, linea bordeaux, è tradotto in un miglioramento del potere fonoisolante alle alte frequenze.

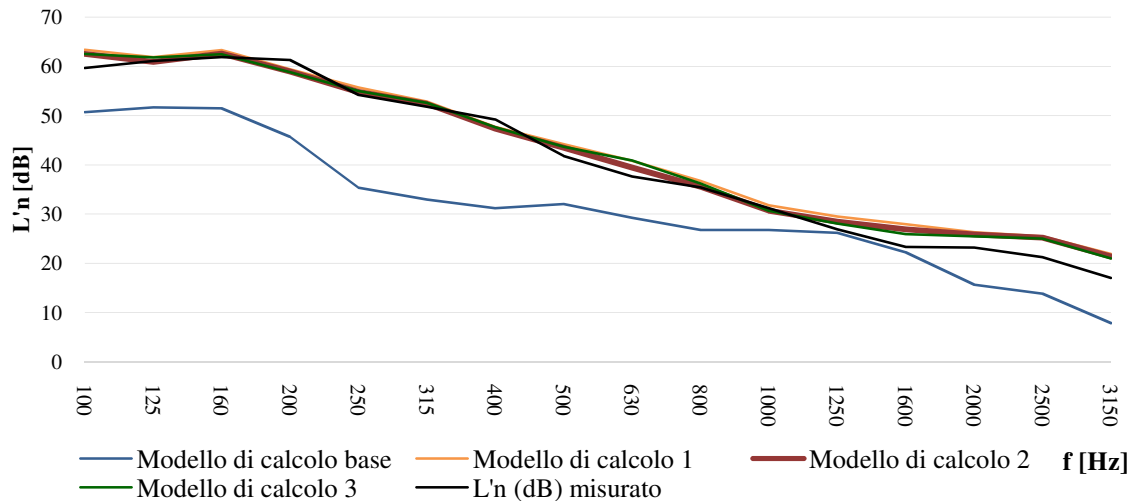


Fig. 8 - Grafico di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso A) – Comparison graph of calculation models with measured values (Case A).

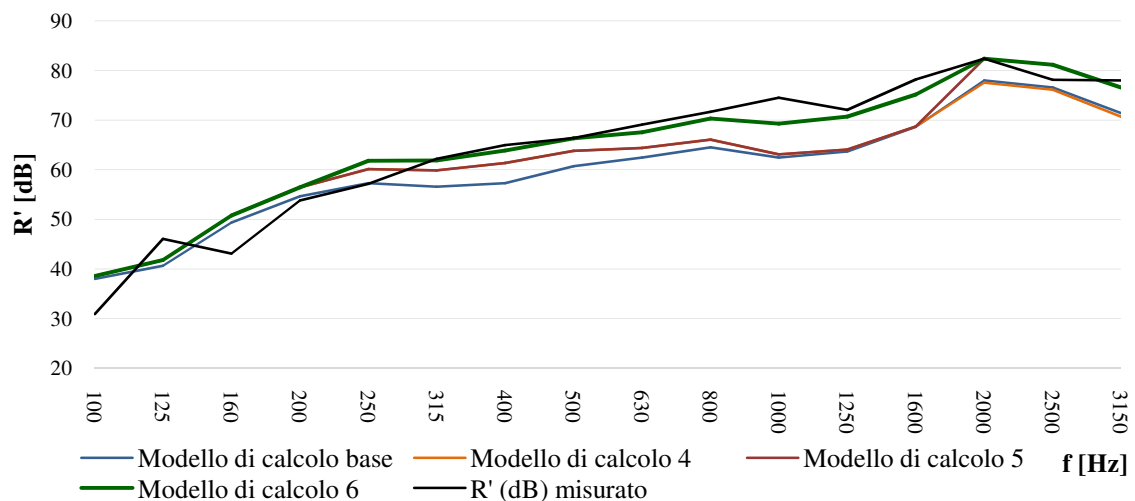


Fig. 9 - Grafico di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso B) – Comparison graph of calculation models with measured values (Case B).

La scelta delle formule empiriche per il calcolo dei valori di K_{ij} o $\overline{D_{v,ij,n}}$, a seconda della tipologia di giunto, risulta determinante per l'andamento complessivo delle curve e non per gli indici R'_w e $L'_{n,w}$ finali. Ciò è giustificato dal fatto che gli indici di valutazione sono valori semplificativi e non mantengono informazioni relative all'andamento in frequenza dei descrittori.

La validazione dei risultati delle grandezze di isolamento acustico è stata discussa sia in termini di indici di valutazione sia di comportamento in frequenza, utilizzando come strumento di analisi la deviazione standard.

Tab. 3 - Valori finali degli indici di valutazione acustica e delle deviazioni standard
 – Acoustic evaluation index and standard deviations final values.

CASO A			CASO B		
Modello	$L'_{n,w}$ (dB)	std. dev.	Modello	R'_w (dB)	std. dev.
Misurato in opera	51,3	-	Misurato in opera	65,6	-
Modello di calcolo base	40,0	40,5	Modello di calcolo base	63,0	17,1
Modello di calcolo 1	52,4	8,3	Modello di calcolo 4	64,8	11,7
Modello di calcolo 2	51,6	5,2	Modello di calcolo 5	64,7	7,6
Modello di calcolo 3	51,9	5,5	Modello di calcolo 6	67,4	1,5

Per il caso A, il valore di $L'_{n,w}$ che si avvicina maggiormente al valore misurato, pari a 51,3 dB, è calcolato mediante il *modello di calcolo 2*, ovvero il modello che considera i valori di ingresso dedotti da misurazioni e i valori dei K_{ij} relativi a strutture con giunti interamente in CLT [2]. In termini di comportamento infrequenza si riportano nel grafico in figura 10 le differenze dei valori di $L'_{n,w}$ calcolati rispetto ai valori misurati. Il modello di calcolo più attendibile risulta sempre essere il *modello di calcolo 2*, linea bordeaux, riscontrabile dai valori della deviazione standard riportati nella tabella 3.

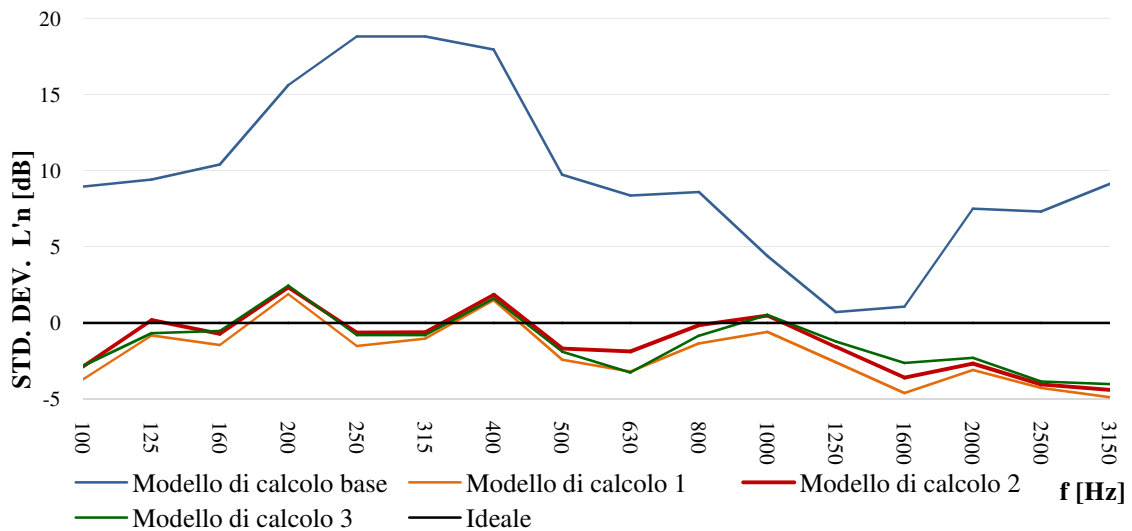


Fig. 10 - Differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati (Caso A) -
 Differences between measured in situ and calculated values (Case A).

Per il caso B, il valore di R'_w che si avvicina maggiormente al valore misurato, pari a 64,8 dB, è calcolato mediante il *modello di calcolo 4*, ovvero il modello che considera i valori di ingresso dedotti dall'esperienza, i valori di K_{ij} ricavati dalle formule empiriche per giunti in CLT e il comportamento risonante solo dell'anima della parete (Fig. 7). In termini di andamento in frequenza si riportano nel grafico in figura 11 le differenze dei valori di R' calcolati rispetto ai valori misurati. Il *modello di calcolo 6* (Fig. 11, linea verde), che considera il comportamento risonante dell'intera parete e i valori di ΔR dei rivestimenti corretti, risulta il più corretto. Le due valutazioni, in questo caso, non combaciano e questo conferma quanto detto prima sulla natura dell'indice di valutazione.

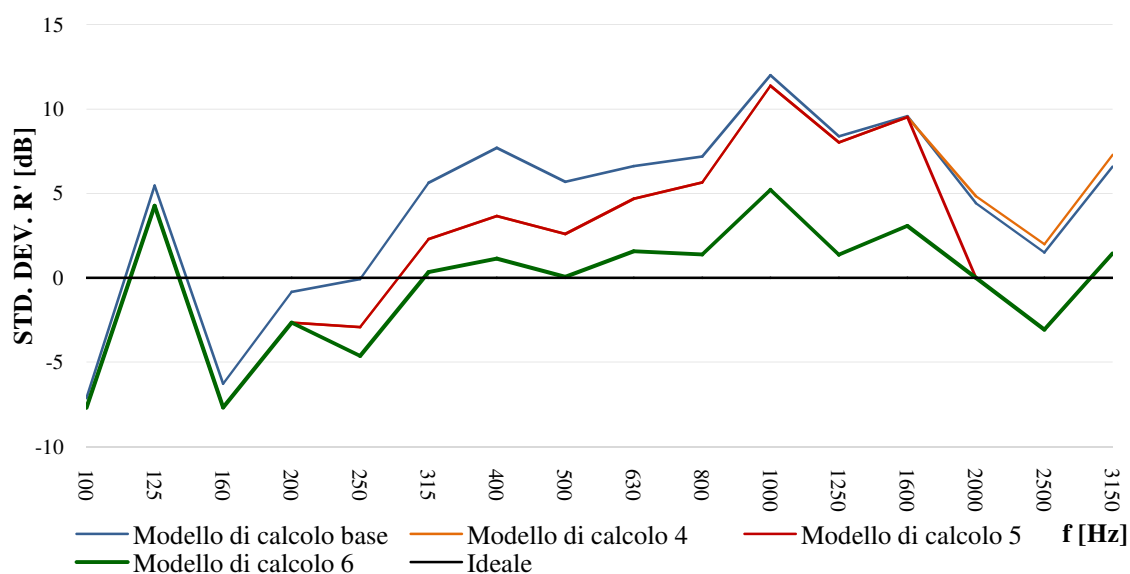


Fig. 11 - Differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati (Caso B) – Differences between measured in situ and calculated values (Case B).

Conclusioni

Il presente articolo mostra i risultati ottenuti durante il lavoro di tesi focalizzato sull'applicazione del nuovo modello di calcolo proposto dalla ISO FDIS 12354:2017. Il lavoro si è svolto in tre fasi principali: la prima sullo studio della teoria di propagazione delle onde sonore nel legno e sull'analisi dell'aggiornamento della normativa ISO FDIS 12354, la seconda centrata sull'applicazione del nuovo modello di calcolo su un caso studio reale e l'ultima fase di validazione dei risultati ottenuti.

Il primo aspetto su cui porre attenzione è la trattazione che la normativa propone per il comportamento risonante degli elementi leggeri. L'introduzione della correzione degli 8 dB nonostante sembri opportuna, da come si riscontra anche dai risultati, comunque risulta poco chiara. Quindi occorrerebbero ulteriori spiegazioni affinché anche i tecnici possano affrontare più agevolmente la progettazione acustica di tipologie costruttive diverse da quelle tradizionali. La norma ISO FDIS 12354:2017 offre dei nuovi strumenti per la progettazione acustica di elementi non omogenei e di elementi costituiti da nuovi materiali, come il CLT, e dei relativi giunti. Data la complessità della trattazione di questi nuovi elementi, parallelamente alla formalizzazione di questi aspetti nella normativa, si sta ampliando il campo di ricerca per acquisire dati sperimentali

validi. Il modello di calcolo prevede l'utilizzo di dati misurati in laboratorio come valori in ingresso, ma allo stesso tempo la normativa non offre soluzioni previsionali valide nel caso in cui si è sprovvisti totalmente o in parte di tali dati.

Il modello di calcolo implementato è stato applicato separatamente nel caso di ambienti sovrapposti per la determinazione del livello di calpestio normalizzato apparente L'_n e nel caso di ambienti adiacenti per la determinazione del potere fonoisolante apparente R' . Individuate le variabili principali, lo sviluppo dei diversi modelli di calcolo, ciascuno guidato da una variabile, ha permesso di trarre conclusioni importanti:

- limitate variazioni geometriche non incidono sui risultati finali;
- il modello per il calcolo del potere fonoisolante R' risulta maggiormente sensibile alla scelta degli indici di riduzione delle vibrazioni K_{ij} , rispetto al modello di calcolo per il livello di calpestio L'_n ;
- in generale, sono determinanti i valori dei dati di ingresso di isolamento acustico al modello di calcolo: se questi non rispecchiano il comportamento reale degli elementi, il modello fornisce risultati non attendibili;
- l'applicazione della correzione degli 8 dB risulta necessaria, però prima occorre comprendere il comportamento effettivo dell'elemento leggero risonante;
- il comportamento anomalo, simile per tutti i modelli, alle basse frequenze conferma come negli ambienti di piccole dimensioni, al di sotto della frequenza di Schröder (tra i 160 Hz e i 250 Hz), l'isolamento acustico è fortemente influenzato dal comportamento modale dell'ambiente, pertanto la differenza di 5 dB tra il misurato ed il calcolato è da attribuire principalmente al campo sonoro non diffuso dell'ambiente ricevente.

La validazione del modello di calcolo è stata effettuata tramite il confronto dei risultati ottenuti con i dati raccolti precedentemente da misurazioni in opera sull'edificio in esame. I risultati ottenuti lasciano intravedere buone potenzialità del nuovo modello di calcolo CEN per la determinazione delle prestazioni acustiche di edifici in legno, costituendo una buona base per sviluppi futuri.

Conclusions

This paper reports the results obtained during the thesis work focused on the application of the new calculation model proposed by the ISO FDIS 12354:2017. The research has been developed in three main steps: the study of sound waves propagation theory through the wood and on the analysis of the ISO FDIS 12354, the application of the new computation model on an actual case study and the validation of results obtained.

The first aspect to be considered is the indication given by the ISO standard for the resonant behaviour of the lightweight structural elements. Even if the introduction of the 8 dB correction seems appropriate from the results obtained, it appears not so clear. Therefore, further indications would be needed in order to allow technicians to realize a better acoustic design of these construction typologies, that are different from the traditional ones. The ISO FDIS 12354:2017 offers new tools for the acoustic design of both elements that are not homogeneous and elements that are made up of new materials, such as CLT, and the related junctions. Given the complexity of these elements the research attempts to obtain reliable experimental data. Although the calculation model considers laboratory's results as input data, the standard does not provide forecasting solutions that are proper when the input data are not available.

The implemented calculation model has been applied separately on rooms one above each other to determine the total impact sound pressure level L'_n and on rooms one next to other to determine the apparent sound reduction index R' . Once the main variables have been identified, the development of calculation models for each variable, allowed to reach significant conclusions:

- limited geometric variations do not affect the final results;
- the calculation model for the sound reduction index R' results more sensible to the choice of vibration reduction index K_{ij} than the computation model for the normalized impact sound pressure level L'_n ;
- in general, the input values of acoustic insulation are determinant for the calculation model: in case these values do not reflect the actual elements behaviour, the model will provide not reliable results;
- the application of the 8 dB correction is needed, but it is necessary to first understand the effective resonant behaviour of the lightweight element;
- the anomalous behaviour, similar for all the models, in case of low frequency, confirms that in small spaces, under the Schröder frequency level (between 160 Hz and 250 Hz), acoustic insulation is significantly influenced by the modal behaviour of space: thus the 5 dB difference between measured and calculated values is mainly due to not diffuse sound field of the receiving room.

The validation of the calculation model has been executed through the comparison between the results obtained and data previously collected during the measurement activities in situ. Finally, the results obtained represent a good potential for the new CEN calculation model for the determination of acoustic performance of the timber buildings and they represent an important starting point for further studies.

Bibliografia

- [1] UNI (2002). UNI EN 12354:2002. Acustica in edilizia - Valutazioni dell'isolamento acustico degli edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Milano, Italia: UNI.
- [2] ISO (2017). ISO FDIS 12354-1:2017. Building acoustics -Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Geneva, Switzerland: ISO.
- [3] ISO (2017). ISO FDIS 12354-2:2017. Building acoustics -Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms. Geneva, Switzerland: ISO.
- [4] Krajčí, L., Hopkins, C., Davy, J.L. (2012). Airborne sound transmission of a cross laminated timber plate with orthotropic stiffness. In: Proceedings of Euronoise 2012, Prague (Czech Rep.) 10-13 June. EAA.
- [5] Barbaresi, L., Morandi, F., Speranza, A. (2016). Caratterizzazione sperimentale della trasmissione laterale di diversi sistemi di connessione per pannelli in CLT. In: Atti del Convegno AIA 2016. Alghero (Italia), 25-27 Maggio. AIA.
- [6] Zeitler, B., Schoenwald, S., Sabourin, I. (2014). Direct impact sound insulation of cross laminate timber floors with and without toppings. In: Proceedings of Internoise 2014. Melbourne (Australia), 16-19 November. INCE.
- [7] Di Bella A., Granzotto N., Barbaresi L. (2016). Analysis of acoustic behavior of bare CLT floors for the evaluation of impact sound insulation improvement. In: Proceedings of meetings on acoustics 2016. Buenos Aires (Argentina), 5-9 September. ICA.

- [8] Barbaresi, L., D'Orazio, D., Garai, M. (2016). Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in clt. In: Atti del Convegno AIA 2016. Alghero (Italia), 25-27 Maggio. AIA.
- [9] Zeitler, B., Quirt, D., Hoeller, C., Mahn, J., Schoenwald, S., Sabourin, I. (2016). RR-331: Guide to calculating airborne sound transmission in buildings. National Research Council Canada 2016-04.
- [10] Hopkins, C. (2007). Sound Insulation. Elsevier, Oxford.