

RADIAZIONE E TRASMISSIONE SONORA NELLE STRUTTURE EDILIZIE

SOUND RADIATION AND SOUND TRANSMISSION IN BUILDING STRUCTURES

Andrea Santoni

Università degli Studi di Ferrara - Dipartimento di Ingegneria

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:
via Saragat, 1 - 44122, Ferrara (FE), Italia
e-mail: andrea.santoni@unife.it

(Ricevuto il 28/02/2018, accettato il 19/05/2018)

RIASSUNTO

Il calcolo previsionale della radiazione e della trasmissione sonora è, da diversi anni, oggetto di studio in molteplici ambiti. Nonostante in letteratura si possano trovare modelli di calcolo più o meno sofisticati, è spesso difficile applicarli alle partizioni edilizie più comuni. In questo articolo sono presentati modelli previsionali per la valutazione delle prestazioni acustiche di elementi edilizi complessi. Vengono calcolati l'efficienza di radiazione e l'isolamento acustico di pannelli ortotropi in legno cross-laminato. Inoltre, viene presentato un modello per calcolare l'isolamento acustico fornito da un sistema a cappotto in lana minerale, considerando anche il contributo di trasmissione strutturale per mezzo degli ancoraggi meccanici. I risultati previsionali sono stati validati confrontandoli con misure sperimentali.

ABSTRACT

Prediction models for sound radiation and sound transmission have been of great interest in many research fields. In the literature many formulations can be found, even though it is not straightforward to apply them to the common building partitions. In this paper different approaches to model complex building elements are presented. More specifically, the radiation efficiency and the transmission loss of cross-laminated timber plates are computed. Besides, a model to investigate sound transmission through external thermal insulation composite system is presented. It allows to compute both the airborne sound transmission coefficient and the structure-borne contribution through the mechanical fixing. The numerical models are validated by comparing the results with the experimental data.

Parole chiave: efficienza di radiazione; isolamento acustico; piastre ortotrope; strutture multistrato.
Keywords: radiation efficiency, transmission loss; orthotropic plates; multilayer structures.

1. Introduzione

Per un'accurata previsione della trasmissione sonora è necessario considerare l'interazione tra il campo vibrazionale generato da una certa sorgente in una struttura e il fluido circostante in cui viene irradiata energia sonora. I metodi numerici agli elementi finiti (FEM), o ai contorni finiti (BEM), rappresentano strumenti sofisticati con cui effettuare analisi vibro-acustiche. Tuttavia, questi software richiedono un elevato costo computazionale, specialmente per analizzare geometrie complesse o ampi intervalli di frequenza. Per un'analisi vibro-acustica dell'interazione fluido-struttura, nell'ampio range di frequenze generalmente considerato in acustica edilizia, può essere più conveniente utilizzare un approccio basato sulla Statistical Energy Analysis (SEA) [1], in cui un sistema complesso viene modellato come una combinazione di sottosistemi tra i quali avviene uno scambio di energia. Si assume, in questo tipo di approccio, che nell'intero range di frequenze tutti i sottosistemi siano caratterizzati da un'elevata densità modale. La serie di norme UNI EN ISO 12354 [2] fornisce metodi di previsione della trasmissione sonora negli edifici, basati su un approccio SEA semplificato. Generalmente la prestazione acustica di una struttura eccitata da un campo sonoro incidente è valutata in termini di trasmissione sonora, o di isolamento acustico; mentre quando l'eccitazione è di tipo strutturale si analizza la potenza sonora irradiata. Si definisce efficienza di radiazione un descrittore acustico utilizzato per caratterizzare la capacità di un elemento in vibrazione di irradiare energia sonora nel fluido circostante. Negli ultimi cinquant'anni sono state proposte varie formulazioni analitiche [3, 4] o approssimate [5] per la determinazione dell'efficienza di radiazione di una piastra isotropa, basate su ipotesi differenti e con un diverso grado di approssimazione. Tuttavia, sono ben più limitati gli studi che si sono concentrati sull'analisi delle strutture ortotrope.

In questo articolo, sono presentati dei modelli previsionali per l'analisi della radiazione acustica e della trasmissione sonora in elementi edilizi caratterizzati da una struttura non-omogenea o con comportamento non-isotropo. In particolare sono stati sviluppati modelli per calcolare l'efficienza di radiazione e l'isolamento acustico di un pannello ortotropo, con l'obiettivo di analizzare piastre in legno cross-laminato (CLT). Questa tecnologia costruttiva, relativamente nuova, sta avendo molto successo negli ultimi anni, sia in Europa che negli Stati Uniti d'America. I pannelli CLT sono costituiti da un numero dispari di strati di tavole di legno, incollate tra loro e sovrapposte ruotando di 90° l'orientazione delle fibre di strati adiacenti. A causa di questa particolare sottostruttura i pannelli CLT possono presentare un comportamento altamente ortotropo, caratterizzato da una diversa rigidità lungo le due direzioni principali. Solitamente, per fini statici le fibre degli strati esterni sono orientate verticalmente conferendo a questa direzione una maggiore rigidità. La rigidità flessionale ortotropa del pannello CLT, necessaria come dato di input dei modelli previsionali sviluppati, è stata approssimata tramite un'interpolazione ellittica dei numeri d'onda strutturali, determinati sperimentalmente per mezzo di una tecnica non distruttiva, facilmente applicabile sia in laboratorio che in situ [6], basata su l'analisi della propagazione delle onde flessionali.

Inoltre viene presentato un modello sviluppato per la valutazione dell'isolamento acustico di un sistema a cappotto ETICS, dall'inglese *external thermal insulation composite system*, considerando sia il contributo di trasmissione sonora per via aerea che per via strutturale. È possibile simulare la propagazione di un'onda sonora attraverso sistemi multi-strato utilizzando il metodo delle matrici di trasferimento [7]. Tuttavia, nelle strutture a cappotto, così come nelle strutture leggere a telaio, la trasmissione strutturale attraverso le connessioni meccaniche non è trascurabile.

La formulazione classica delle matrici di trasferimento non permette di tenere in considerazione questo contributo, che può però essere introdotto utilizzando un approccio disaccoppiato, in cui il contributo di trasmissione strutturale, ipotizzato indipendente, viene sommato a quello aereo. In questo studio, il metodo sviluppato da Vigran [8] per pareti doppie leggere è stato riformulato sotto diverse ipotesi, per poter considerare anche partizioni massive, come pareti in muratura, eventualmente accoppiate con materiali porosi a elevata densità.

Nella prossima sezione sono richiamati i concetti alla base della teoria delle piastre ortotrope. Nel paragrafo 2.1 sono descritti i due modelli sviluppati per il calcolo dell'efficienza di radiazione di un pannello ortotropo, mentre nel paragrafo 2.2 è illustrato l'approccio utilizzato per il calcolo dell'isolamento acustico di queste strutture tramite il metodo delle matrici di trasferimento. Nella sezione 3 viene descritto l'approccio utilizzato per considerare il contributo di trasmissione sonora strutturale, attraverso le connessioni meccaniche nelle strutture multistrato, utilizzando un modello basato sul metodo delle matrici di trasferimento. Nella sezione 4 sono descritte le partizioni investigate per la validazione dei modelli e le misurazioni effettuate per determinarne l'efficienza di radiazione e l'isolamento acustico. L'affidabilità e l'accuratezza dei modelli previsionali sono valutate confrontando i risultati ottenuti con i valori misurati sperimentalmente nella sezione 5.

2. Pannelli Ortotropi

I materiali ortotropi sono caratterizzati da proprietà meccaniche diverse lungo tre direzioni ortogonali; la matrice di rigidezza ortotropa è definita per mezzo di nove parametri elastici indipendenti. Tuttavia, assumendo la validità della teoria delle piastre sottili, sviluppata da Kirchhoff per una piastra omogenea isotropa, il numero di variabili si riduce a cinque: i moduli elastici associati alle direzioni principali E_x e E_y , i relativi coefficienti di Poisson ν_{xy} , ν_{yx} e il modulo di taglio nel piano G_{xy} . Sotto tali ipotesi è possibile definire l'equazione del moto non forzato di un pannello sottile ortotropo come [9]:

$$(1) \quad D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

La variabile w rappresenta lo spostamento trasversale, ρ è la densità della piastra e h il suo spessore; D_x , D_y sono rispettivamente le rigidezze flessionali lungo le direzioni principali x e y definite come:

$$(2) \quad D_i = \frac{E_i h^3}{12(1-\nu_{ij}\nu_{ji})}$$

mentre la rigidezza torsionale effettiva B è definita come:

$$(3) \quad B = \frac{\nu_{yx} D_x}{2} + \frac{\nu_{xy} D_y}{2} + 2 \frac{G_{xy} h^3}{12}$$

Per una piastra ortotropa è possibile definire una rigidità flessionale effettiva in funzione dell'angolo di propagazione dell'onda strutturale ϕ , assumendo una distribuzione spaziale ellittica:

$$(4) \quad D(\phi) = D_x \cos^4 \phi + 2B \cos^2 \phi \sin^2 \phi + D_y \sin^4 \phi$$

la rigidità flessionale $D(\phi)$ può essere calcolata dal numero d'onda strutturale $k_B(\phi)$ associato all'angolo di propagazione ϕ :

$$(5) \quad D(\phi) = \frac{\omega^2 \rho h}{k_B^4(\phi)}$$

definito, per un dato angolo di propagazione, come:

$$(6) \quad k_B(\phi) = \sqrt{(k_{B,x} \cos \phi)^2 + (k_{B,y} \sin \phi)^2}$$

dove $k_{B,x}$ e $k_{B,y}$ sono in numeri d'onda strutturali associati alle due direzioni principali x - y , dipendenti dalle proprietà elastiche della struttura in cui si propagano.

2.1 Efficienza di Radiazione di pannelli ortotropi

L'efficienza di radiazione di una struttura in vibrazione è definita come il rapporto tra l'energia irradiata da tale elemento W e quella che sarebbe teoricamente irradiata da un pistone rigido di pari superficie S posto in vibrazione alla stessa velocità quadratica media $\langle v^2 \rangle$.

$$(7) \quad \sigma = \frac{W}{\rho_0 c_0 S \langle v^2 \rangle}$$

Esistono in letteratura diversi modelli per calcolare l'efficienza di radiazione di una piastra sottile omogenea e isotropa. Utilizzando un approccio modale è possibile considerare il contributo sulla potenza totale irradiata di ogni singolo modo risonante della struttura investigata. Inoltre, è possibile tenere in considerazione il contributo dell'accoppiamento cross-modale e del carico del fluido utilizzando per esempio il metodo generale proposto da Nelisse [4]. Mejdj e Atalla [10] hanno presentato un modello semi-analitico per calcolare la risposta vibro-acustica di piastre nervate, mentre Legault per analizzare queste strutture ha sviluppato un modello basato su una teoria periodica [11].

I modelli previsionali presentati in questo articolo sono stati sviluppati considerando il pannello ortotropo investigato come una struttura omogenea equivalente, descritta da parametri elastici dipendenti dalla frequenza, oltre che dall'angolo di propagazione dell'onda strutturale. È stato sviluppato un modello previsionale analitico/modale della risposta vibro-acustica di una piastra ortotropa in semplice appoggio, in grado di considerare contributo dei modi risonanti e l'influenza del carico del fluido, utilizzando l'approccio generale proposto da Nelisse [4]. Assumendo una dipendenza dal tempo di

tipo armonico $e^{i\omega t}$ è possibile esprimere l'equazione del moto di una piastra sottile in forma matriciale come:

$$(8) \quad (-\omega^2 M + K + i\omega Z)w = f$$

Il vettore associato allo spostamento trasversale del pannello w risulta l'unica incognita del sistema, in quanto i coefficienti delle matrici della massa M , di rigidità K e dell'impedenza di radiazione Z , così come il vettore associato alla forzante esterna f , possono essere calcolati analiticamente o con metodi approssimati, come descritto in [12]. È perciò possibile calcolare il vettore associato all'ampiezza dello spostamento trasversale operando un'inversione matriciale:

$$(9) \quad w = Af$$

dove A rappresenta la matrice di ammittanza definita come:

$$(10) \quad A = (-\omega^2 M + K + i\omega Z)^{-1}$$

In funzione dell'ampiezza dello spostamento trasversale, calcolato per ogni modo (m , n), è possibile determinare la potenza sonora irradiata dal pannello W e la velocità quadratica media $\langle v^2 \rangle$, da cui dipende l'efficienza di radiazione definita nell'eq. (7):

$$(11) \quad W = \frac{\omega^2}{2} \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q w_{mn} \operatorname{Re}(Z_{mnpq}) w_{pq}^*$$

$$(12) \quad \langle v^2 \rangle = \frac{\omega^2}{8} \sum_m \sum_n |w_{mn}|^2$$

Tale metodo risulta molto accurato e permette di calcolare una dettagliata risposta vibro-acustica della struttura, tuttavia richiede un costo computazionale notevole, soprattutto per investigare pannelli di dimensioni significative, come pareti e solai. In alternativa è possibile utilizzare metodi semplificati per determinare un'efficienza di radiazione media, utilizzando per esempio l'approccio asintotico proposto da Leppington per una piastra omogenea isotropa [13, 14], anziché considerare il contributo di ogni modo risonante. Il modello implementato per le piastre ortotrope prende ispirazione da quello proposto da Ghinet e Atalla [15] e dal lavoro di Anderson a Bratos-Anderson [16]. Il modello, ancora una volta sviluppato per una piastra sottile in semplice appoggio, si basa su alcune ipotesi fondamentali: i) elevata densità modale in tutto l'intervallo di frequenze considerato; ii) i modi risonanti non sono correlati tra loro e rappresentano l'unico contributo alla radiazione sonora; iii) l'energia modale può essere ripartita equamente all'interno di ogni banda. Per un dato angolo di propagazione dell'onda flessionale ϕ l'efficienza di radiazione $\sigma(\omega, \phi)$ viene pesata in funzione della densità modale della piastra n_d in modo da considerare l'energia vibrazionale risonante totale nella banda di frequenza investigata:

$$(13) \quad \sigma(\omega) = \frac{\int_{k_{min}}^{k_{max}} \int_0^{\pi/2} \sigma(\omega, \phi) n_d(\omega, \phi) d\phi dk}{\int_{k_{min}}^{k_{max}} \int_0^{\pi/2} n_d(\omega, \phi) d\phi dk}$$

La densità modale del pannello n_d quantifica il numero di modi per Hz e può essere calcolata in funzione del numero d'onda flessionale k_B , come:

$$(14) \quad n_d(\omega) = \frac{L_x L_y}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} k_B(\omega, \phi) \frac{\partial k_B}{\partial \omega} d\phi$$

È possibile riscrivere l'eq. (13) in funzione del numero d'onda flessionale come:

$$(15) \quad \sigma(\omega) = \frac{L_x L_y}{\pi^2 n_d} \int_0^{\pi/2} \sigma(\omega, \phi) k_B(\omega, \phi) \frac{\partial k_B}{\partial \omega} d\phi$$

Come descritto in [12], per ogni data frequenza ω e angolo di propagazione ϕ l'efficienza di radiazione $\sigma(\omega, \phi)$ è calcolata utilizzando il metodo asintotico proposto da Leppington [14].

2.2 Isolamento acustico di pannelli ortotropi

È possibile trovare in letteratura modelli previsionali in grado di calcolare l'efficienza di radiazione di una struttura eccitata da un'onda sonora incidente [17]. Tuttavia, in questo caso la prestazione acustica di un elemento è più comunemente valutata in termini di trasmissione sonora, o transmission loss (TL). La trasmissione sonora attraverso strutture ortotrope è stata studiata da Guyader e Lesueur [18] e più recentemente da Wareing et al. [19]. Il metodo delle Matrici di Trasferimento (TMM) è attualmente uno degli strumenti più utilizzati per il calcolo di TL nelle strutture composite e multistrato [7]. Il formalismo generale del metodo TMM può essere espresso come:

$$(16) \quad V_{S1} = T V_{S2}$$

Come schematizzato in Figura 1, il vettore V_{S1} rappresenta tutte le variabili necessarie a descrivere il campo acustico sulla superficie $S1$ eccitata dall'onda sonora incidente: pressione e velocità di particella, sforzi e deformazioni, . Il vettore V_{S2} invece contiene tutte le variabili che descrivono il campo acustico sulla superficie radiante in ambiente emittente $S2$, calcolate in funzione della matrice di trasferimento T associata alla struttura investigata. Kuo et al. hanno sviluppato la matrice per descrivere la propagazione attraverso un mezzo solido elastico ortotropo [20]. Tuttavia, per l'implementazione di tale matrice è necessario conoscere le nove costanti elastiche che definiscono la matrice di rigidità di questi materiali, spesso di difficile reperibilità. Ipotizzando la validità della teoria delle piastre sottili, analogamente a quanto descritto nella sezione precedente, il problema si semplifica notevolmente. È possibile definire la matrice di trasmissione in funzione della rigidità flessionale effettiva, riportata nell'eq. (4). La matrice di trasferimento per una piastra sottile ortotropa è perciò definita come:

$$(17) \quad T = \begin{bmatrix} 1 & -i\omega\rho h \left(1 - \frac{D(\phi)k_t^4}{\omega^2\rho h}\right) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dove k_t è il numero d'onda eccitato nella struttura dall'onda sonora incidente con angolo θ , calcolato in funzione del numero d'onda acustico come: $k_t = k_0 \sin \theta$. Risolvendo il sistema espresso nell'eq. (16) è possibile calcolare il coefficiente di trasmissione sonora della struttura investigata τ , da cui l'isolamento acustico si calcola come:

$$(18) \quad TL = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

È bene precisare che il metodo TMM è stato sviluppato per elementi infinitamente estesi, senza considerare le riflessioni e le rifrazioni in corrispondenza delle discontinuità della struttura. Sono state proposte diverse tecniche per includere nel calcolo, almeno parzialmente, il contributo di questi effetti [21, 22], permettendo di ottenere risultati accurati e affidabili anche alle basse frequenze [23].

3. Giunti strutturali in elementi multistrato

Le strutture edilizie leggere, come i pannelli CLT presentano molti vantaggi rispetto alle tecnologie più tradizionali, che ne giustificano il recente successo. Tuttavia, le prestazioni acustiche dei singoli elementi non permettono di rispettare i requisiti definiti dalla legge per garantire un ottimale confort acustico all'interno degli ambienti di vita. È necessario perciò, l'utilizzo di rivestimenti, placcaggi e contro-pareti per migliorarne le prestazioni acustiche. Le strutture risultanti sono elementi multi-strato, il cui isolamento acustico è facilmente calcolabile utilizzando il metodo TMM. L'accoppiamento tra i diversi strati, nella maggior parte dei casi, avviene anche tramite connessioni di tipo meccanico, che hanno un'influenza significativa sulla trasmissione sonora, soprattutto a alta frequenza. Per una valutazione previsionale affidabile della prestazione acustica è quindi necessario tenere in considerazione anche un contributo aggiuntivo di trasmissione sonora per via strutturale. In letteratura esistono modelli previsionali, che permettono di determinare questo contributo di trasmissione causato dai giunti e delle connessioni meccaniche in elementi leggeri, come pareti doppie in cartongesso. Tuttavia, questi metodi non possono essere applicati a strutture massive, come esempio rivestimenti a cappotto su pareti in muratura, o realizzati con materiali poro-elastici con elevata densità. Per tanto, per valutare l'isolamento acustico di un sistema a cappotto ETICS, è stato necessario modificare il modello disaccoppiato proposto da Vigran [8], basato sulle matrici di trasferimento. In Figura 1 è schematizzato il modello proposto.

Utilizzando un approccio disaccoppiato vengono considerati indipendenti e addizionabili due contributi di trasmissione sonora: i) trasmissione sonora per via aerea attraverso i diversi strat dell'elemento, calcolabile con il metodo delle matrici di trasferimento; ii) trasmissione sonora per via strutturale attraverso le connessioni meccaniche. Quest'ultimo contributo non è considerato dal metodo TMM, ma può essere aggiunto al contributo areo calcolando il coefficiente di trasmissione totale come:

$$(19) \quad \tau_{tot} = \tau_{air} \left(1 + \frac{W_b}{W_{air}}\right)$$

Il coefficiente correttivo è calcolato come rapporto tra la potenza sonora associata alla sola trasmissione per via aerea W_{air} , che si avrebbe in caso di assenza delle connessioni meccaniche e la potenza associata alla trasmissione per via strutturale W_b , cioè ad opera delle sole connessioni.

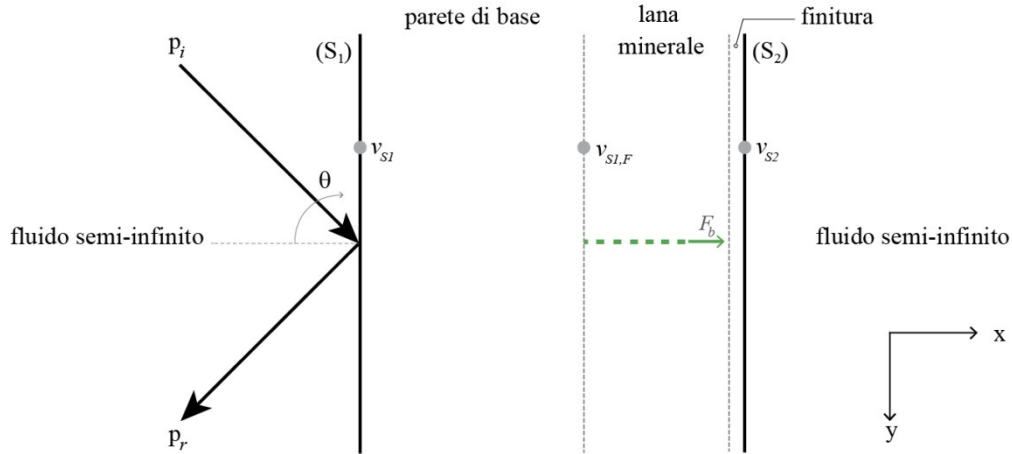


Figura 1 - Schema di un sistema ETICS modellato con il metodo TMM. La forzante meccanica applicata da ogni connessione strutturale F_b è calcolata in funzione della velocità $v_{S1,F}$ calcolata con l’algoritmo TMM - Diagram of the multilayer ETICS system modelled using TMM. The mechanical force F_b due to the bridge action is determined as a function of the velocity $v_{S1,F}$, computed with the TMM model.

Tale rapporto viene espresso in funzione dell’efficienza di radiazione e della velocità quadratica media nelle due condizioni di trasmissione sonora.

$$(20) \quad \frac{W_b}{W_{air}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{air}} \left\langle \left| \frac{v_{S2,b}}{v_{S1,F}} \right|^2 \right\rangle \left\langle \left| \frac{v_{S1,F}}{v_{S1}} \right|^2 \right\rangle \left\langle \left| \frac{v_{S1}}{v_{S2}} \right|^2 \right\rangle$$

Le velocità v_{S1} , $v_{S1,F}$ e v_{S2} si riferiscono alla struttura in assenza di connessioni, come illustrato in Figura 1, e sono calcolate dall’algoritmo TMM [24]. Il modulo al quadrato della forzante, applicata da ogni connessione sullo strato di finitura, può esser approssimato come:

$$(21) \quad |F_b|^2 = \frac{\langle |v_{S1,F}|^2 \rangle}{|Y_{S2}|^2}$$

È possibile calcolare il primo rapporto tra velocità superficiali dell’eq. (20) come:

$$(22) \quad \left\langle \left| \frac{v_{S2,b}}{v_{S1,F}} \right|^2 \right\rangle = \frac{n_b Re(Y_{S2})}{\omega \eta_{S2} m_{S2} |Y_{S2}|^2}$$

dove η_{S2} e m_{S2} sono rispettivamente lo smorzamento e la massa superficiale dello strato di finitura. La mobilità dello strato di finitura, molto maggiore della mobilità della parete di base, può essere calcolata per connessioni sia puntuali che lineari come

indicato da Davy [25]. Infine l'efficienza di radiazione per eccitazione meccanica può essere determinata con il metodo semplificato descritto nel paragrafo 2.1. L'efficienza di radiazione per eccitazione aerea deve invece necessariamente tenere conto del contributo non-risonante. Per un pannello sottile e isotropo può essere approssimata come proposto da Davy et al. [26].

4. Misure sperimentali

4.1 Pannelli ortotropi in legno cross-laminato (CLT)

Presso i laboratori federali svizzeri EMPA¹ sono stati misurati l'isolamento acustico e l'efficienza di radiazione di un pannello in CLT costituito di tre strati, per uno spessore totale di 80 mm e con densità di circa 484 kg/m³. Il pannello di dimensioni significative, circa 4.2 m di larghezza per 2.9 m di altezza, è stato montato nell'anello di prova tra le due camere accoppiate per la misurazione dell'isolamento acustico in accordo alla norma EN 10140-2 [27]. Inoltre per poter valutare l'efficienza di radiazione dei pannelli CLT sono state fatte misure vibro-acustiche da 1 Hz a 6000 Hz. Utilizzando un vibrometro laser Polytec PSV 500, è stata misurata la velocità di vibrazione superficiale su 513 punti, distribuiti su una griglia con spaziatura uniforme di 16 cm, come illustrato in Figura 2a). I pannelli sono stati eccitati con un rumore bianco utilizzando uno shaker connesso rigidamente alla superficie, Figura 2b).

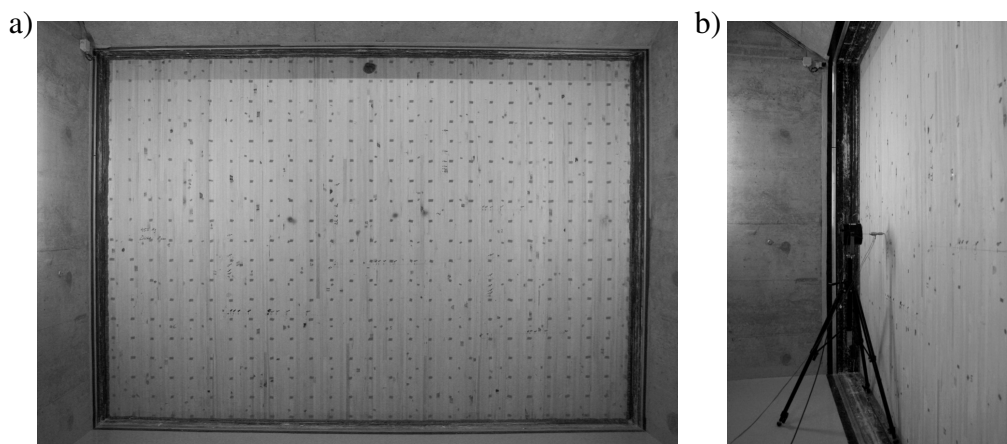


Figura 2 - Pannello CLT investigato, montato nell'anello di prova tra le camere accoppiate per l'isolamento acustico dei laboratori Empa: a) Griglia di 513 punti su cui è stata misurata la velocità vibrazionale; b) Shaker elettrodinamico connesso alla piastra CLT - Investigated CLT plate mounted in the test ring of the sound transmission test facility of Empa Laboratories: a) 513 points grids over which the vibration velocity was measured; b) Electrodynamic shaker connected to the investigated CLT plate.

L'efficienza di radiazione è stata determinata sperimentalmente utilizzando un metodo tradizionale, basato sull'ipotesi di campo diffuso, che valuta la potenza irradiata

¹Laboratory for Acoustics and Noise Control, Empa – Swiss Federal Laboratories for Material Science and Technology, Ueberlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, Switzerland

dalla pressione sonora misurata nell'ambiente ricevente. Inoltre, dal momento che non esiste uno standard normativo per la valutazione sperimentale di tale grandezza, la consistenza dei risultati è stata valutata confrontandoli con l'efficienza di radiazione ottenuta attraverso l'applicazione di un metodo ibrido, noto come *discrete calculation method* (DCM) [28], in cui la potenza irradiata viene determinata dalla velocità vibrazionale. I risultati presentati nella prossima sezione per la validazione dei modelli previsionali, sono ottenuti dalla media dei valori forniti dai due metodi, che hanno fornito risultati consistente nonostante ognuno presenti limitazioni in un preciso range di frequenze, come discusso in [29].

4.2 Sistema a cappotto ETICS

L'isolamento acustico di un sistema a cappotto ETICS è stato misurato nelle camere accoppiate per l'isolamento acustico del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara. La struttura investigata è costituita da una parete di base in mattoni pieni, intonacata su entrambi i lati, con spessore totale di 150 mm. Il sistema a cappotto è stato realizzato con pannelli in lana minerale da 100 mm di spessore e una densità di 78 kg/m^3 , rifiniti con uno strato di circa 5 mm di intonaco rinforzato.

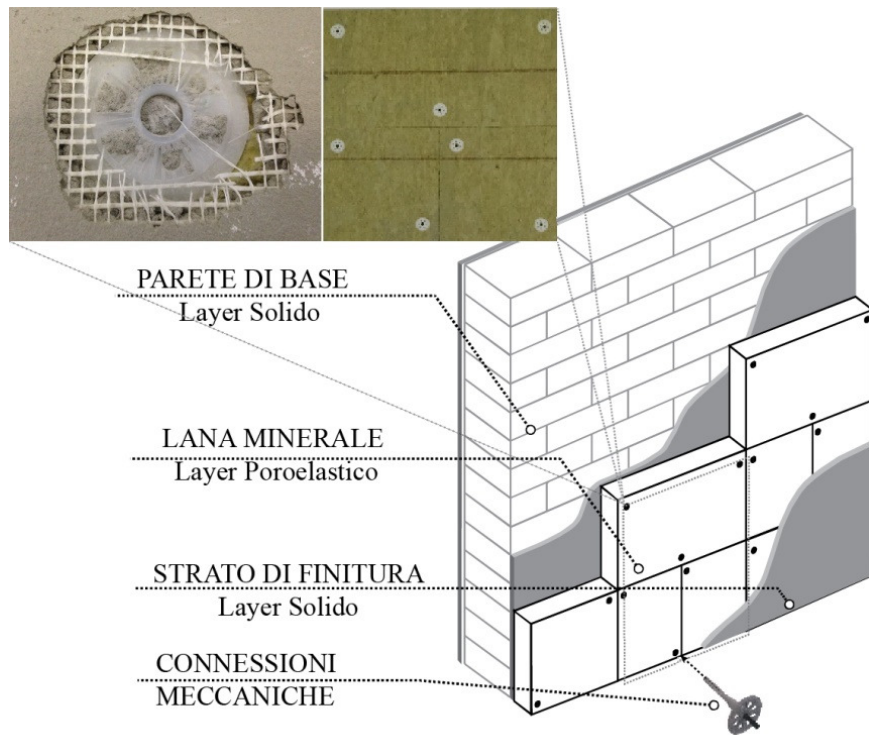


Figura 3 - Schema del sistema a cappotto ETICS, montato su una parete in mattoni pieni. Per ogni strato è indicato il mezzo associato nel modello TMM. - Diagram of the ETICS system mounted on the basic masonry wall and the definition of TMM. For each layer the associated medium in the TMM model is provided.

Per validare il modello previsionale descritto nella sezione 3 sono state investigate due diverse configurazioni di montaggio: una in cui i pannelli in lana minerale sono

stati fissati alla parete di base solo tramite l'applicazione di malta adesiva, eliminando così il contributo di trasmissione per via strutturale; un'altra in cui pannelli sono stati montati prevedendo un media di 7/m² tasselli meccanici, come da condizioni reali in opera. L'isolamento acustico del sistema nelle due configurazioni di montaggio è stato misurato in accordo con la norma EN 10140-2 [27]. Inoltre, per validare i vari termini con cui viene definito il coefficiente correttivo nell'eq. (20), sono state eseguite misurazioni della velocità vibrazionale sulla superficie dello strato di finitura.

5. Risultati

5.1 Efficienza di radiazione di pannelli ortotropi in CLT

La validazione dei modelli presentati nella sezione 2 è stata effettuata confrontando i risultati numerici ottenuti con l'efficienza di radiazione sperimentale misurata per il pannello descritto nel paragrafo 4.1. I numeri d'onda strutturali, caratterizzanti le proprietà elastiche e di rigidità della struttura, necessari all'implementazione dei modelli di previsione sono stati valutati sperimentalmente tramite la misurazione del tempo di volo delle onde flessionali [6].

Il modello analitico è stato validato confrontando i risultati numerici con l'indice di radiazione sperimentale, $L_\sigma = 10 \log \sigma$, determinato per ciascuna posizione dello shaker. Il confronto è riportato in Figura 4. L'indice di radiazione calcolato con il modello analitico/modale approssima molto bene la curva sperimentale. I picchi associati alle risonanze della piastra sono ben approssimati al di sopra della banda centrata su 50 Hz. Le due frequenze che caratterizzano la regione delle coincidenze di un pannello ortotropo sono correttamente individuate. La prima coincidenza, nella banda di 250 Hz, è associata alla direzione più rigida del pannello, che in una piastra CLT è quella verticale lungo cui sono orientate le fibre degli strati esterni. La frequenza di coincidenza più alta, che corrisponde anche alla condizione critica del pannello, si localizza tra le bande degli 800 Hz e 1000 Hz ed è associata alla direzione orizzontale, lungo cui sono orientate le fibre del core interno. Nonostante la buona approssimazione, i risultati numerici sovrastimano leggermente la curva sperimentale a causa dell'ipotesi semplificativa di condizioni al contorno in semplice appoggio. Infatti questo vincolo ideale non è riproducibile sperimentalmente. La piastra in CLT è stata tenuta in posizione nell'anello di prova sigillando manualmente ogni bordo con dello stucco elastico, non in grado di prevenire completamente la traslazione del pannello nel piano. Questo rappresenta una riduzione del grado di vincolo, a cui è associata una riduzione dell'efficienza di radiazione, come dimostrato recentemente da Squicciarini et al. [30].

L'efficienza di radiazione media, calcolata tramite il modello semplificato, è stata confrontata con i risultati sperimentali ottenuti dalla media delle due posizioni dello shaker. Il confronto è riportato in termini di indici di radiazione in bande di terzi di ottava in Figura 5. Nonostante le semplificazioni alla base di questo modello, è possibile ottenere una buona approssimazione del trend dell'indice di radiazione sperimentale del pannello CLT. La prima coincidenza è identificabile nella banda dei 250 Hz, sia da un cambio nella pendenza della curva sperimentale, che nei risultati numerici, seppur in maniera meno enfatizzata. La condizione critica, correttamente individuata tra le bande centrate su 800 Hz e 1000 Hz, presenta invece un picco più pronunciato nell'indice di radiazione numerico, probabilmente a causa di una sottostima del coefficiente di smorzamento del sistema.

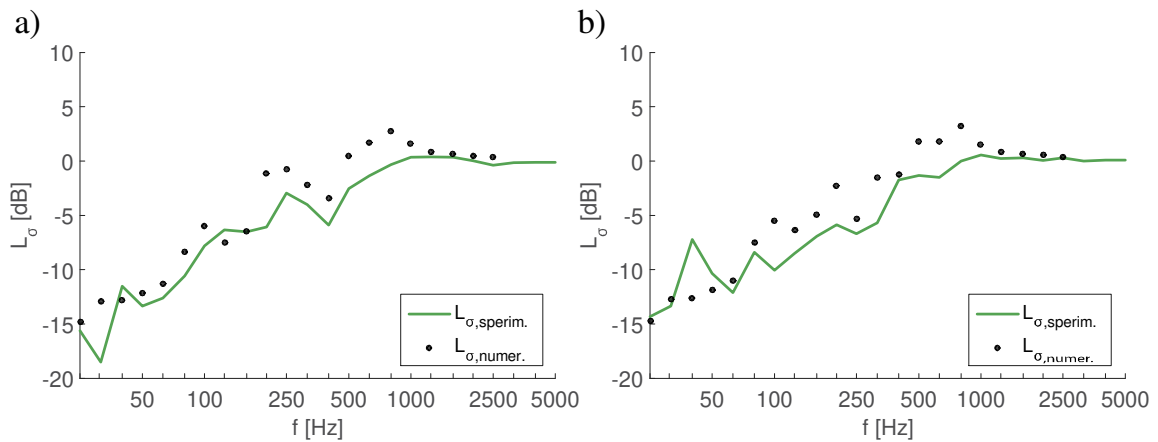


Figura 4: Efficienza di radiazione del pannello CLT: confronto tra i risultati numerici ottenuti dal modello analitico/modale con i risultati sperimentali in termini di Indice di radiazione in terzi di ottava: a) piastra eccitata meccanicamente nella posizione p_1 (0.5, 0.8); b) piastra eccitata meccanicamente nella posizione p_2 (3.6, 0.9) - Radiation Efficiency of the CLT panel: comparison between analytic/modal results and experimental radiation index in one-third octave bands. a) plate mechanically excited at position p_1 (0.5, 0.8); b) plate mechanically excited at position p_2 (3.6, 0.9).

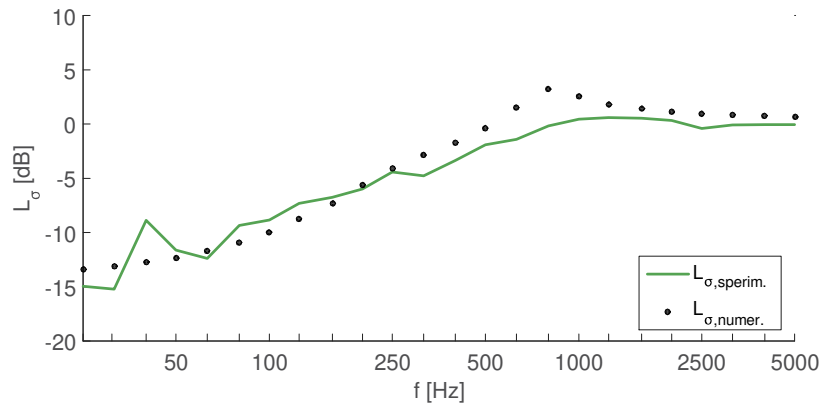


Figura 5: Efficienza di radiazione del pannello CLT: confronto tra i risultati numerici ottenuti dal modello approssimato con i risultati sperimentali in termini di Indice di radiazione in terzi di ottava - Radiation Efficiency of the CLT panel: comparison between modal average results and experimental radiation index in one-third octave bands.

Questo metodo approssimato è molto efficiente dal punto di vista computazionale e permette di stimare con buona approssimazione il trend dell'efficienza di radiazione. Tuttavia, non è possibile determinare una dettagliata risposta vibro-acustica del pannello a bassa frequenza, dove il campo vibrazionale non è perfettamente diffuso ma caratterizzato dai modi risonanti della struttura. Per un'analisi più approfondita dei risultati e una descrizione dettagliata di tutte le equazioni dei modelli si rimanda al riferimento [12].

5.2 Isolamento acustico di pannelli ortotropi in CLT

La curva di TL del pannello in CLT è stata calcolata con il metodo TMM, utilizzando come dati di input i numeri d'onda flessionali associati alle due direzioni principali. In Figura 6, la curva di TL ottenuta dal modello TMM è confrontata con l'isolamento acustico della piastra in CLT determinato sperimentalmente. Il range di frequenze delimitato dalla prima coincidenza e dalla frequenza critica è in accordo con quello evidenziato dall'efficienza di radiazione del pannello. Nella banda di terzi di ottava centrata sui 250 Hz avviene una significativa riduzione dell'isolamento acustico associata alla prima coincidenza, ben identificabile sia nei risultati sperimentali che in quelli numerici. Al di sopra della frequenza critica del pannello, nella banda centrata su 800 Hz, la pendenza della curva di isolamento cambia significativamente presentando un incremento di circa 9 dB per ottava. Il modello implementato, attraverso i numeri d'onda sperimentali, utilizza caratteristiche elastiche variabili in frequenza che compensano le semplificazioni associate alla teoria delle piastre sottili permettendo una buona approssimazione dell'isolamento acustico anche alle alte frequenze. Si sottolinea come, anche a bassa frequenza, i risultati del modello TMM siano affidabili e ben approssimano la curva sperimentale, grazie all'implementazione della correzione per la dimensione finita del pannello secondo il modello proposto da Rhazi [22, 23].

5.3 Connessioni strutturali in elementi multistrato

L'isolamento di un sistema a cappotto ETICS è stato calcolato utilizzando il metodo delle matrici di trasferimento e introducendo la componente di trasmissione strutturale causata dalle connessioni meccaniche. La parete di base, in muratura intonacata, è stata modellata come uno mezzo solido omogeneo equivalente descritto da proprietà elastiche variabili in frequenza, ottenute tramite un algoritmo di minimizzazione come descritto in [31]. I pannelli di lana minerale sono stati modellati come mezzo poro-elastico, le cui proprietà elastiche e acustiche sono state misurate in laboratorio. Infine, lo strato di finitura è stato modellato come un solido elastico omogeneo e isotropo caratterizzato da costanti elastiche ottenute da letteratura.

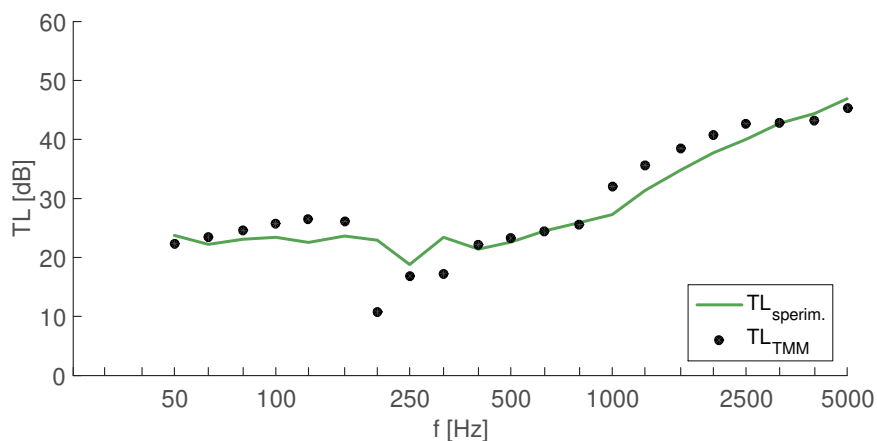


Figura 6: Confronto tra l'isolamento acustico del pannello CLT ottenuto dal modello TMM e i risultati sperimentali. Risultati espressi in bande di terzi di ottava - Comparison between the TMM results and experimental TL of the CLT panel in one-third octave bands.

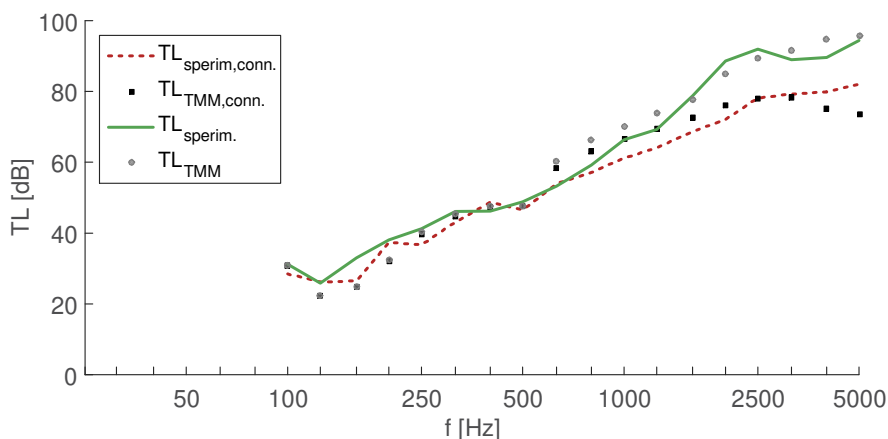


Figura 5: Isolamento acustico del sistema ETICA: confronto tra i risultati numerici ottenuti dal modello alle matrici di trasferimento TMM con i risultati sperimentali, con e senza connessioni strutturali. Risultati espressi in bande di terzi di ottava - Transmission loss of ETICS system: comparison between transfer matrix method TMM results and experimental TL, with and without bridges, in one-third octave bands.

Tutti i dati di input utilizzati nel modello e una validazione più dettagliata del modello utilizzato sono riportati nel riferimento [24]. Il modello è stato validato confrontando i valori di TL ottenuti con l'isolamento acustico del sistema ETICS, misurato in laboratorio nella configurazione di montaggio senza connessioni meccaniche. Il confronto tra i valori sperimentali e numerici, riportato in Figura 7, evidenzia come l'approccio utilizzato per simulare questo tipo di struttura permetta un'ottima approssimazione dell'isolamento acustico sperimentale del sistema.

La presenza di connessioni meccaniche causa una riduzione significativa dell'isolamento acustico fornito dal sistema alle alte frequenze, introducendo un contributo di trasmissione sonora aggiuntiva per via strutturale. Il modello presentato permette di calcolare con buona approssimazione questa riduzione, infatti, come mostrato in Figura 7, i risultati numerici sono in perfetto accordo all'isolamento sperimentale, misurato in laboratorio nella condizione di montaggio con tassellature meccaniche.

Conclusioni

In questo articolo sono stati presentati modelli previsionali per analizzare la radiazione e la trasmissione sonora nelle partizioni edilizie. In particolare, sono stati implementati due diversi modelli per la previsione dell'efficienza di radiazione di un pannello ortotropo, per analizzare pannelli in CLT. Il modello basato su un approccio analitico/modale permette di determinare la risposta vibro-acustica del pannello ortotropo, nell'intero range di frequenze di interesse, in maniera dettagliata e accurata. Tuttavia, questo metodo richiede un costo computazionale significativo. Alternativamente, sotto ipotesi più restrittive, è stato presentato un modello semplificato, in cui l'efficienza di radiazione mediata su tutti i modi risonanti è calcolata utilizzando un approccio asintotico. Nonostante le semplificazioni introdotte da questo metodo, i risultati ottenuti approssimano molto bene l'andamento della curva di efficienza di radiazione ottenuta sperimentalmente, anche se non è possibile ottenere una dettagliata risposta alle basse frequenze. Entrambi i modelli previsionali sono stati

implementati utilizzando come dato di input i numeri d'onda strutturali associati alle due direzioni principali di ortotropia, misurati sperimentalmente.

L'isolamento acustico della piastra in CLT è stato calcolato utilizzando il metodo delle matrici trasferimento, implementato per una piastra sottile ortotropa. Anche in questo caso, le caratteristiche di rigidità del pannello sono state descritte utilizzando i numeri d'onda strutturali. Sia i modelli previsionali per la valutazione dell'efficienza di radiazione che quello per il calcolo della trasmissione sonora sono stati validati con i risultati sperimentali, dimostrando una buona affidabilità.

Infine è stato presentato un modello per calcolare l'isolamento acustico delle strutture edilizie multistrato, considerando anche il significativo contributo di trasmissione strutturale ad opera di eventuali connessioni meccaniche. Anche in questo caso, il modello è stato sviluppato nel contesto del metodo delle matrici di trasferimento, adottando un approccio disaccoppiato. Il confronto con l'isolamento sperimentale ha evidenziato un'ottima approssimazione dei risultati.

Conclusions

In this paper prediction models to compute sound radiation and sound transmission in building elements have been presented. Two models have been developed in order to evaluate the radiation efficiency of orthotropic plates, in order to investigate CLT panels. One of those, based on an analytical/modal approach, allows to accurately determine the detailed vibro-acoustic response in the entire frequency range of interest, with good accuracy. However, it requires a significant computational effort. Alternatively, a simplified approach has been presented, developed under more restrictive assumptions. This computationally efficient model provides an accurate trend of the orthotropic panel radiation efficiency, even though it cannot predict a detailed vibro-acoustic behaviour at the lower frequencies. For both models the structural wavenumbers, experimentally determined along the plate's principal directions, were used as input data. Moreover, the CLT plate transmission loss was computed by using a TMM model, implemented for a thin orthotropic plate. Once again, the structural wavenumbers, were used to describe the elastic properties of the structure. These prediction models have all been validated with experimental data, showing a good reliability. Finally, a model to compute the transmission loss in multilayer systems considering the structure-borne contribution due to mechanical fixings has been presented. A decoupled approach was implemented within the TMM framework. It was proved that the model is reliable by comparing numerical and experimental results, which shown a good approximation of the TL.

Bibliografia

- [1] Lyon, R.H., DeJong, R.G. (1995). Theory and application of statistical energy analysis. Boston, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2nd ed.
- [2] ISO (2000-2017). ISO EN 12354: 2000-2017 - Building acoustics: Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements. ISO, Geneva, Switzerland.
- [3] Lord Rayleigh (1896). The theory of sound, vol. 2, New York, NY, USA: reprinted by Dover.
- [4] Nelisse, H., Beslin, O., Nicolas, J. (1998). A generalized approach for the acoustic radiation from a baffled or unbaffled plate with arbitrary boundary conditions, immersed in a light or heavy fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 211(2), pp. 207-225.

- [5] Maidanik, G. (1962). Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(6), pp. 809-826.
- [6] Santoni, A., Schoenwald S., Van Damme, B., Fausti, P. (2007). Determination of elastic and stiffness characteristics of cross-laminated timber plates from flexural velocity measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 400, pp 387-401.
- [7] Allard, J., Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2nd ed.
- [8] Vigran, T.E. (2010). Sound transmission in multilayered structures introducing finite structural connections in the transfer matrix method. *Applied Acoustics*, 71(1), pp. 39-44.
- [9] Leissa, A.W. (1969). *Vibration of plates*, Tech. Rep. NASA SP-160, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.
- [10] Mejdi, A., Atalla, N. (2010). Dynamic and acoustic response of bidirectionally stiffened plates with eccentric stiffeners subject to airborne and structure-borne excitations. *Journal of Sound and Vibration*, 329(21), pp. 4422-4439.
- [11] Legault, J., Mejdi, A., Atalla, N. (2011). Vibro-acoustic response of orthogonally stiffened panels: The effects of finite dimensions. *Journal of Sound and Vibration*, 330(24), pp. 5928-5948.
- [12] Santoni, A., Schoenwald, S., Fausti, P., Troebs, H.M. (2019). Modelling the radiation efficiency of orthotropic cross-laminated timber plates with simply supported boundaries. *Applied Acoustics*, 143, pp. 112-124.
- [13] Leppington, F.G., Broadbent, E.G., Heron, K.H. (1982). The acoustic radiation efficiency of rectangular panels. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382, pp 245-271.
- [14] Leppington, F.G., Heron, K.H., Broadbent E.G., Mead S.M. (1986). Resonant and non-resonant acoustic properties of elastic panels. I. The radiation problem. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 406, pp 139-171.
- [15] Ghinet, S., Atalla, N. (2001). Sound transmission loss of insulating complex structures. *Canadian Acoustics*, 29(3), pp. 26-27.
- [16] Anderson, J., Bratos-Anderson, M. (2005). Radiation efficiency of rectangular orthotropic plates. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(1), pp 61-76.
- [17] Guyader J. L., *Sound radiation from structures and their response*. Handbook of noise and vibration control (Crocker M.J. ed.), Ch. 6, pp. 79-98, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [18] Guyader, J. L., Lesueur, C. (1978). Acoustic transmission through orthotropic multilayered plates. Part II: transmission loss. *Journal of Sound and Vibration*, 58(1), pp. 69-86.
- [19] Wareing, R.R., Davy, J.L., Pearse, J.R. (2016). The sound insulation of single leaf infinite size rectangular plywood panels with orthotropic frequency dependent bending stiffness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(1), pp. 520-528.
- [20] Kuo, Y.M., Lin, H.J., Wang, C.N. (2008). Sound transmission across orthotropic laminates with a 3D model. *Applied Acoustics*, 69(11), pp. 951-959.
- [21] Bonfiglio, P., Pompoli, F., Lioni, R. (2016). A reduced-order integral formulation to account for the finite size effect of isotropic square panels using the transfer matrix method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), pp. 1773-1783.

- [22] Rhazi, D., Atalla, N. (2010). A simple method to account for size effects in the transfer matrix method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(2), EL30-EL36.
- [23] Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Schoenwald, S. (2017). Predicting sound radiation efficiency and sound transmission loss of orthotropic cross-laminated timber panels. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 30, pp. 015013.
- [24] Santoni, A., Bonfiglio, P., Davy, J.L., Fausti, P., Pompoli, F., Pagnoncelli, L. (2017). Sound transmission loss of ETICS cladding systems considering the structure-borne transmission via the mechanical fixings: Numerical prediction model and experimental evaluation. *Applied Acoustics*, 122, pp. 88-97.
- [25] Davy, J.L. (2012). Sound transmission of cavity walls due to structure borne transmission via point and line connections. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(2), pp. 814-821.
- [26] Davy, J.L., Larner, D.J., Wareing, R.R., Pearse, J.R. (2015). The acoustic radiation impedance of a rectangular panel, *Building and Environment*, 92, pp. 743-755.
- [27] ISO (2010). ISO EN 10140-2: 2010 - Acoustics: Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation. ISO, Geneva, Switzerland.
- [28] Hashimoto, N. (2001). Measurement of sound radiation efficiency by the discrete calculation method. *Applied Acoustics*, 62(4), pp. 429-446.
- [29] Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Schoenwald, S., Troebbs, H.M. (2016). Sound radiation efficiency measurements on cross laminated timber plates. In: *Proceedings of the 45nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Hamburg, Germany, pp. 3697-3707.
- [30] Squicciarini, G., Thompson, D., Corradi, R. (2014). The effect of different combinations of boundary conditions on the average radiation efficiency of rectangular plates. *Journal of Sound and Vibration*, 333(17), pp. 3931–3948.
- [31] Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Zuccherini Martello, N. (2015). Sound insulation of heavyweight walls with linings and additional layers: Numerical investigation. In: *Proceeding of the 10th European Congress and Exposition on Noise Control*, Maastricht, Netherlands.