

PROGETTAZIONE ACUSTICA DI UNO STUDIO DI REGISTRAZIONE E VERIFICHE SPERIMENTALI

Cecilia TORRACCHI, Donato MASCI, Simone SECCHI, Carla BALOCCO

SOMMARIO

Questo documento illustra i principali risultati scientifici esposti nella Tesi di Laurea “Fonoisolamento e trattamento acustico di uno studio di registrazione: analisi, progettazione e misure in opera”. In particolare, vengono qui affrontate le problematiche di progettazione dell’isolamento acustico di ambienti per la registrazione e/o l’ascolto professionale di musica. Sono riportati i dati delle misure di potere fonoisolante apparente condotte su partizioni ad alte prestazioni dell’ambiente per la registrazione di musica oggetto della Tesi.

Vengono anche esposti alcuni risultati preliminari di misure accelerometriche del potere fonoisolante di singoli elementi volte ad individuare i principali percorsi di trasmissione sonora.

Viene, infine, illustrato il processo di elaborazione dei dati, svolto facendo uso della normativa vigente; vengono assemblati e confrontati i risultati delle varie misure e di alcune simulazioni svolte tramite appositi software.

ABSTRACT

This document explains the main scientific results reached by the Thesis “Sound insulation and acoustic treatment of a recording studio: analysis, design and measurements”. In particular, problems dealing with sound insulation design of recording studios are exposed. Data of sound reduction index measurements on high-performance partitions are shown. Some preliminary results of accelerometer measurements of the sound reduction index of individual elements aimed at identifying the main sound transmission paths are also shown. Data processing is explained and the results of measurements and simulations are assembled and compared.

Parole chiave: Isolamento acustico; Misure di isolamento; Studio di registrazione.

Keywords: Acoustic insulation; Insulation measurement; Recording studio.

1. INTRODUZIONE

Le necessità di isolamento acustico di uno studio di registrazione sono superiori a quelle della maggior parte degli altri ambienti, musicali e non. Il rumore prodotto è caratterizzato da un’alta pressione sonora e si protrae per diverse ore, spesso anche in orario notturno; si capisce, quindi, l’esigenza di limitare le emissioni verso eventuali ricettori disturbati. Lo stesso tipo di problema si presenta anche in verso opposto: l’ingresso di rumori nello studio deve risultare

minimo poiché il più piccolo disturbo proveniente dall’esterno può compromettere la qualità delle registrazioni.

Uno degli aspetti più importanti da considerare quando ci si appresta a progettare un ambiente dedicato alla musica è la caratterizzazione delle potenziali sorgenti. Nel generico caso dell’edilizia residenziale, i rumori da isolare sono comunemente il calpestio, i rumori antropici e quelli causati dagli impianti. Le normative e la letteratura di settore fanno riferimento a uno spettro di frequenze che si estende, nella maggior parte

dei casi, da 100 Hz a 5 kHz, arrivando in taluni casi fino a 50 Hz verso le basse frequenze e fino a 10 kHz verso le alte. Ad ogni modo, mai vengono considerate frequenze al di sotto dei 50 Hz. Sebbene tale estensione possa ritenersi accettabile in ambito residenziale, essa non lo è quando si ha a che fare con sorgenti di natura musicale che possono riguardare tutto lo spettro dell'udibile, da 20 Hz a 20 kHz. Se, da una parte, l'ampliamento del range di interesse non risulta particolarmente problematico alle alte frequenze, poiché suoni così acuti sono facilmente controllabili e attenuabili con l'utilizzo di materiali fonoassorbenti, alle basse frequenze la questione è molto più complessa: la grande incertezza nelle previsioni e nella progettazione, per di più, aumenta via via che si scende di frequenza poiché riguarda le propagazioni strutturali. Se si eccita una struttura con una sorgente ad alta frequenza, è lo smorzamento interno del materiale eccitato a riuscire a estinguere subito i movimenti ondulatori. Al contrario, se l'eccitazione è a bassa frequenza (di natura vibrazionale) arrestare la propagazione risulta estremamente difficile: la sollecitazione percorre tutto l'elemento e raggiunge quelli adiacenti fino a grandi distanze con scarsa attenuazione. Le incertezze derivano principalmente dalla presenza di importanti modi di risonanza a bassa frequenza. Le norme in vigore presentano dei limiti considerevoli se si tenta di controllare le basse frequenze. Spesso i parametri richiesti non solo non considerano tali range, ma consistono in un unico valore, medio o riferito a una frequenza di riferimento (in genere 500 Hz).

Gli aspetti da considerare quando si progettano partizioni fonoisolanti sono quattro: massa, rigidità, smorzamento e distanza. Mettere in pratica i principi legati a questi fattori significa realizzare strutture fonoisolanti: partizioni verticali, soffitti, pavimenti, ma anche infissi e aperture. Per raggiungere alte prestazioni, però, non può bastare intervenire sulla singola partizione comunicante tra due ambienti disturbato/disturbante (parete o solaio che sia); le trasmissioni laterali che si propagano attraverso le strutture possono infatti assumere notevole rilevanza. Per questo motivo, quando si vuole realizzare un ambiente isolato, che isoli sufficientemente anche le basse frequenze, è necessario costruire un sistema composito comunemente denominato "box in a box". Questa soluzione consiste nel costruire tutte partizioni fonoisolanti, realizzando giunti resilienti tra di esse che le disaccoppino, in modo da eliminare ogni eventuale

ponte acustico.

In questa sede ci si limita a trattare le pareti, dal momento che è nostro principale interesse mostrare i risultati di misure di isolamento svolte in opera su una parete ad alte prestazioni.

Quando si devono realizzare le pareti di un guscio fonoisolante, la scelta più efficace sembrerebbe quella di realizzare partizioni dense e solide, in calcestruzzo o in muratura, le cosiddette "pareti pesanti"; in realtà, la capacità portante del solaio e/o lo spazio a disposizione non sempre ne consentono la realizzazione. L'alternativa, sempre più presente nel campo dell'acustica, è costituita dalle pareti leggere: costruite a secco con varie lastre in cartongesso e/o gessofibra, esse raggiungono prestazioni pari e spesso superiori a quelle massive. I vantaggi di quest'ultime sono molteplici: la semplicità e rapidità di realizzazione, il minor costo, la facilità di un'eventuale demolizione.

Le strutture che sorreggono le lastre in gesso possono essere singole o doppie e gli strati esterni più pesanti possono, a loro volta, essere composti da più lastre di cartongesso e/o gessofibra di spessori e densità differenti. Diversificare gli strati permette di minimizzare gli effetti di risonanze e coincidenze e di correggere i punti deboli delle strutture monostrato; infatti, due lastre diverse avranno diversi punti critici: quando una vibra sotto effetto della risonanza, l'altra la inibisce e limita la caduta di potere fonoisolante. Infine, poiché la frequenza critica è inversamente proporzionale allo spessore, con grandi spessori si ha una caduta di potere fonoisolante per effetto di coincidenza su frequenze pericolose dell'acustica edilizia. Il problema principale della progettazione consiste, pertanto, nel definire numero e caratteristiche degli strati in base alle necessità del caso. A condizionare le prestazioni fonoisolanti concorrono, quindi, diversi aspetti: il tipo di struttura (a telaio singolo o multiplo), il tipo di telaio (a travetti di legno, con profili metallici ecc.), il numero di lastre dei singoli strati, lo spessore delle cavità interne e il tipo di materiale di riempimento.

In generale, prendendo in esame la variazione dei fattori precedentemente descritti, si possono sintetizzare le seguenti considerazioni:

- il montaggio con telaio metallico porta a performance più alte su quasi tutto lo spettro, rispetto al telaio di travetti di legno;
- aumentare lo spessore della cavità migliora le prestazioni alle basse frequenze, mentre non ha effetti sulle alte. Le prestazioni aumentano molto quando la cavità viene riempita di lana

minerale; il potere fonoisolante aumenta con l'aumentare della densità della lana minerale (anche se non in modo proporzionale).

- a parità di spessore totale e massa è meglio, per le basse frequenze, realizzare partizioni con solo due pacchetti esterni (invece di tre), ma con una camera d'aria interna più grande. Tuttavia, sebbene quest'ultima possa essere assunta come regola generale, il motivo per cui spesso si preferisce distribuire la massa su più pacchetti è di natura prettamente pratica: è difficile, infatti, riempire cavità di spessori considerevoli con materiale "morbido".

Come scritto in precedenza, sia per le pareti leggere che per le pesanti, il principale problema che sussiste riguarda le trasmissioni laterali che si hanno nei punti di contatto con pavimenti e soffitti. Perché la partizione sia veramente efficiente, è necessario che essa sia del tutto disaccoppiata dalle altre partizioni. Si può raggiungere tale risultato interponendo strisce di appositi materiali resilienti (polietilene reticolato, neoprene, gomma vulcanizzata ecc.) lungo le linee di connessione in modo da smorzare la trasmissione strutturale delle vibrazioni e chiudere i ponti acustici (v. figura 2).

2. METODI PREVISIONALI

Esistono vari strumenti che vengono in nostro aiuto nella progettazione delle stratigrafie e che permettono di valutare le prestazioni nelle varie configurazioni. Le stime più affidabili sono quelle date dalle prove di laboratorio effettuate sullo specifico pacchetto; esse, tuttavia, vengono effettuate in condizioni standard, con condizioni al contorno definite dalle normative e che non sempre rispecchiano le condizioni in situ.

Le normative forniscono formule semi-empiriche per il calcolo del potere fonoisolante di pareti pesanti e leggere e per l'incremento di tale indice in caso di strati addizionali (come nel caso del montaggio di contropareti). Un riferimento utile può darlo, tra tutte, la UNI TR 11175 [14] che fornisce linee guida facilmente applicabili. I modelli considerati sono, però, piuttosto semplici e non sempre consentono stime precise, soprattutto nel caso di pareti leggere con stratigrafie complesse.

Le aziende costruttrici e/o fornitrici di pacchetti fonoisolanti forniscono le schede tecniche delle partizioni in cui sono riportati i risultati delle prove di laboratorio; tali schede possono fornire un interessante punto di riferimento.

Esistono, poi, appositi software che simulano la

trasmissione del rumore attraverso le strutture semplici o complesse. Con il passare degli anni, questi programmi si sono affinati e, allo stato attuale, permettono di definire stratigrafie complesse, precise condizioni al contorno, modalità di montaggio e proprietà del campo acustico incidente.

3. VERIFICHE SPERIMENTALI

In seguito al lavoro di progettazione di uno studio di registrazione e alla sua completa realizzazione, si è deciso di valutare le prestazioni di fonoisolamento di una partizione ad alte prestazioni fonoisolanti.

A tale scopo, abbiamo svolto diverse misure (figura 1):

- 1) misura di trasmissione aerea diretta;
- 2) misura di trasmissione aerea indiretta (attraverso il corridoio);
- 3) misura di vibrazioni sull'infisso di vetro che occupa gran parte della partizione.

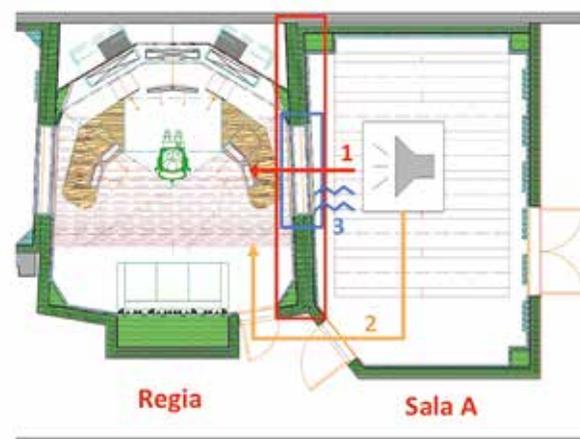


Fig. 1 - Pianta dei percorsi di trasmissione misurati

Per le modalità di prova e per l'elaborazione dei dati ci siamo affidati alle indicazioni delle normative, rispettivamente le UNI EN ISO 16283-1 [17] (per le misure di potere fonoisolante apparente) e la UNI EN ISO 12354-1 [13] (per la determinazione, sulla base delle misure, del percorso di trasmissione attraverso il corridoio). Ha fatto eccezione la parte di misura delle vibrazioni per la quale è stato necessario ricorrere a quanto prescritto dalla norma UNI EN ISO 10848 [18].

Per avere una previsione precisa delle prestazioni delle partizioni verticali, sono state effettuate simulazioni di trasmissione con il software *Insul*[®]. Tutti i vari contributi sono stati, infine, confrontati tra loro e assemblati in modo da caratterizzare la trasmissione sonora globale tra i due ambienti.

3.3 Misure di vibrazione

Le misure di vibrazione sono state condotte seguendo le indicazioni della norma UNI EN ISO 10848 [18]. È stata utilizzata la stessa sorgente dodecaedrica omnidirezionale impiegata per le misure di trasmissione aerea. Per l'acquisizione dei livelli di velocità è stato usato un accelerometro, posizionato in punti casuali lungo l'intera superficie vetrata. I parametri ricavati dalle misure di vibrazioni sono stati utilizzati per ottenere il potere fonoisolante del percorso di trasmissione in esame, secondo l'equazione (1):

$$R = 10 \log \frac{p^2}{4\rho_0^2 c_0^2 v^2 \sigma}$$

dove:

p è la pressione media nella stanza sorgente [Pa],

ρ_0 è la densità dell'aria [kg/m^3],

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

v è la velocità media misurata sulla superficie [m/s],

σ è il coefficiente di irraggiamento [-].



Fig. 6 - Il dodecaedro emette rumore rosa, l'accelerometro rileva le vibrazioni del vetro

4. RISULTATI

4.1 Coefficiente di irraggiamento

Sono necessarie alcune precisazioni sull'uso che si è fatto del coefficiente di irraggiamento presente nell'equazione (1). Esso è stato calcolato seguendo le indicazioni della norma UNI EN ISO

12354-1 (Appendice B.1); lo spessore di vetro considerato è soltanto quello emittente, ovvero lo strato monolitico più esterno (cioè quello sopra cui è stato applicato l'accelerometro). La norma distingue i coefficienti tra quello per onde forzate e quello per onde libere. Nonostante in una parte del campo di frequenze di interesse ci si trovi in presenza di onde forzate, si è assunto il coefficiente di irraggiamento per onde libere su tutto lo spettro così come determinato in precedenti esperienze [12] riferite a situazioni simili. Inoltre, dalle misure di livello di velocità di vibrazione non si evidenziava una particolare riduzione del potere fonoisolante dovuto all'effetto della coincidenza. Ciò sembra dovuto al fatto che il vetro di cui è stata misurata la vibrazione non è un vetro semplice e monolitico, ma un vetro stratificato con uno strato di PVB all'interno. Il PVB presenta alte capacità smorzanti in grado di attenuare anche gli effetti negativi della coincidenza; pertanto il coefficiente di irraggiamento è stato corretto per tenere conto di tale diverso comportamento del vetro stratificato, come evidenziato in figura 7.

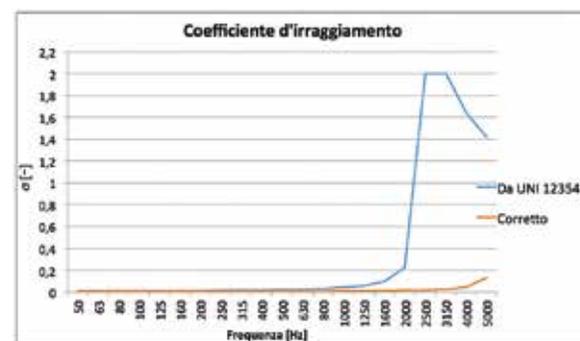


Fig. 7 - Confronto tra il coefficiente di irraggiamento secondo la UNI 12354 (vetro monolitico) e i valori impiegati nei calcoli

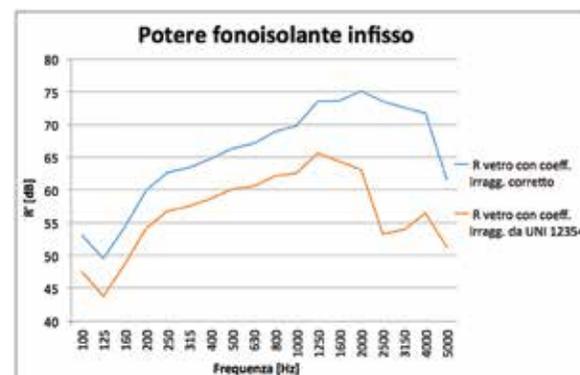


Fig. 8 - Potere fonoisolante dell'infisso in vetro: previsioni e misure

Il grafico di figura 8 mostra come, in corrispondenza della frequenza di coincidenza (circa 2500 Hz), non si abbia alcun calo di potere fonoiso-

lante come, invece, suggerirebbe il modello della UNI EN ISO 12354. In accordo con la UNI EN ISO 717-1, l'indice di valutazione dell'infisso risulta:

	Con σ da UNI 12354	Con σ corretto
R_w (vetro) (C; C_{tr})	60 (-2.5; -2.8) dB	70 (-2; -5.8) dB

Tab. 1 - Indice di valutazione dell'infisso

4.2 Importanza della trasmissione indiretta

Il grafico di figura 9 mostra il confronto tra potere fonoisolante per trasmissione diretta attraverso la partizione e potere fonoisolante apparente per trasmissione diretta e per trasmissione aerea at-

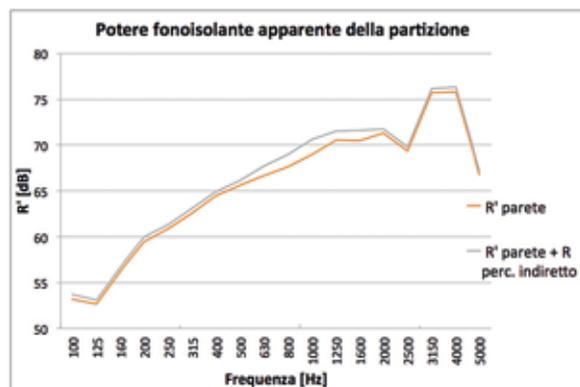


Fig. 9 - Potere fonoisolante della partizione con e senza il contributo indiretto

traverso il corridoio di collegamento.

Seppur molto vicine, le due curve si discostano un po' alle medie frequenze; il potere fonoisolante del percorso indiretto presenta un calo di isolamento alle medie frequenze ma ciò è dovuto, probabilmente, alla chiusura difettosa di una delle porte. Infatti, il cardine di una delle sale ha visibilmente ceduto per il grande peso dell'infisso o per un difetto di montaggio e ciò ha compromesso la sigillatura e, di conseguenza, le prestazioni. In definitiva, la trasmissione indiretta attraverso il corridoio dà un contributo peggiorativo al potere fonoisolante del percorso di trasmissione, ma in misura molto contenuta.

4.3 Confronto tra previsioni e misure

4.3.1 Parete opaca

Vengono mostrati alcuni confronti tra i risultati ottenuti con le previsioni e le misurazioni in situ in modo da caratterizzare le modalità di trasmissione e individuare eventuali limiti dei modelli previsionali semplificati utilizzati.

Il grafico di figura 10 mette a confronto il potere fonoisolante apparente misurato in opera e quello della parete opaca ottenuto tramite la simulazione di *Insul*®.

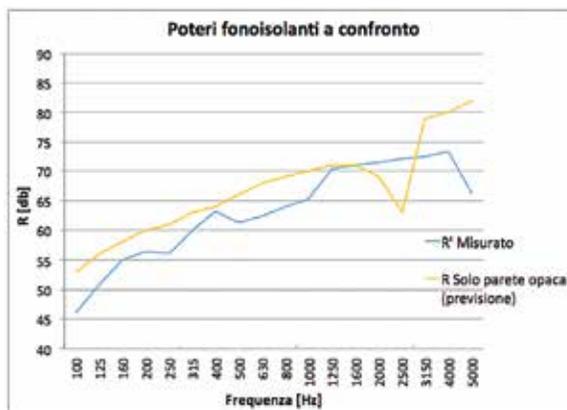


Fig. 10 - R' della parete composta misurato e R della parete opaca previsto

Dal momento che il potere fonoisolante della parete opaca previsto non tiene conto del contributo dell'infisso (che, invece, occupa una superficie importante), la distanza tra le due curve risulta accettabile su gran parte dello spettro, fino a 2000 Hz; a partire da tale frequenza, le due curve si comportano in modo piuttosto diverso. La simulazione, infatti, individua un forte calo di isolamento, centrato nella banda dei 2500 Hz, in corrispondenza della frequenza di coincidenza, che nelle misure non viene rilevato. Per di più, avendo analizzato certificati di pareti in commercio simili a quella provata, si è verificato che anch'esse presentano lo stesso calo di isolamento dovuto alla coincidenza.

In definitiva, si può affermare che la parete reale si comporta meglio di quella simulata poiché l'effetto della coincidenza viene fortemente attenuato. Ciò sembra da attribuire al fatto che nel modello previsionale non sono stati inseriti i due strati di materiale fonoassorbente del trattamento acustico che, in realtà, ricoprono la partizione da entrambi i lati. Probabilmente, la fibra di poliestere agisce particolarmente bene a 2000-3000 Hz ed attenua, quindi, l'effetto della coincidenza sulla parete di base.

Per indagare meglio tale differenza è stata simulata una nuova partizione che avesse esternamente 4 cm di materiale fibroso. Questo risultato non è affidabile come i precedenti poiché il software non permette di definire un materiale poroso come strato più esterno e, in particolare, non permette di inserire la sua resistività al flusso d'aria, parametro fondamentale in questo caso. È stato, pertanto, definito un generico materiale con la densità e il modulo elastico della fibra di poliestere in modo da ottenere una stima del comportamento della nuova parete. I grafici di figura 11 mostrano il confronto tra le prestazioni della partizione con e senza rivestimento.

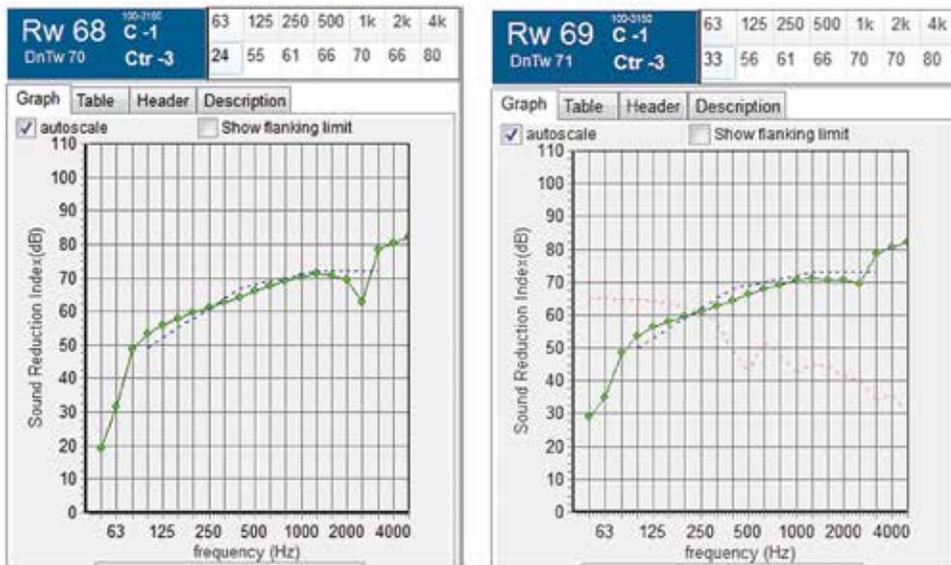


Fig. 11 - Potere fonoisolante della partizione in esame "nuda" (a sinistra) e rivestita di fibra di poliestere (a destra) - (Simulazione svolta con software *Insul*[®])

Appare confermato quanto supposto: il trattamento interno attenua il calo di potere fonoisolante in corrispondenza della frequenza critica. Sostituire i nuovi valori del potere fonoisolante nel grafico di figura 10, si ottiene il risultato di figura 12.

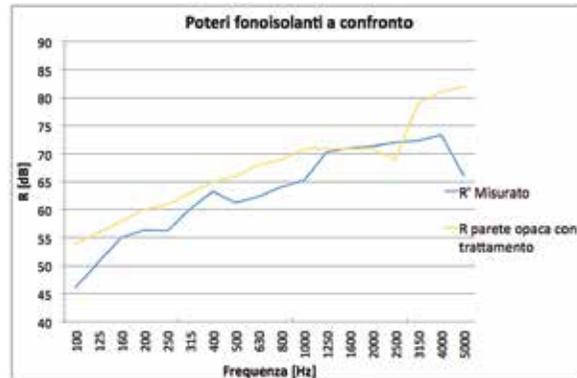


Fig. 12 - R' della parete composta misurato e R della parete opaca rivestita previsto

4.3.2 Infisso

Il grafico di figura 13 mostra il confronto tra i risultati delle misurazioni di trasmissione globale attraverso la parete ed attraverso la visiva in vetro, quest'ultimo dato ottenuto mediante la misura della velocità di vibrazione del vetro.

Le due curve sono abbastanza vicine, con distanze massime di 6 dB; ciò indica la bontà della campagna di rilevamenti effettuati e dà qualche indicazione

sulla trasmissione. Alle alte frequenze, infatti, è la perdita di potere fonoisolante del vetro a far abbassare la prestazione dell'intera parete. A tale proposito, nel grafico è anche riportata la curva del potere fonoisolante della sola parete opaca (vedi figura 12).



Fig. 13 - R' della parete composta misurato, R dell'infisso misurato e R della parete opaca rivestita previsto

5. DISCUSSIONE

Il grafico di figura 14 riassume i risultati delle varie misurazioni e simulazioni.

Si nota che il grafico del potere fonoisolante apparente è più basso di tutti gli altri su quasi tutto lo spettro e, in particolare, anche di quello del potere fonoisolante dell'infisso. La motivazione è, probabilmente, quella già esposta: il danneggiamento di una delle due porte fonoisolanti può

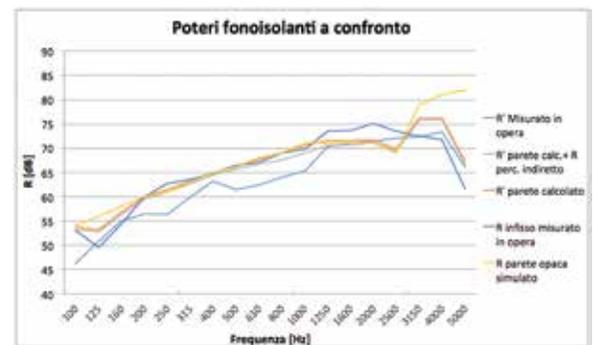


Fig. 14 - Grafico riassuntivo: valori del potere fonoisolante simulati, calcolati e misurati

aver fatto calare le prestazioni del guscio fonoisolante; questo aspetto è emerso, comprensibilmente, dalle misure di trasmissione aerea, ma non da quelle di vibrazione sul vetro. Infine, è ben evidente, qui più di prima, che il calo di potere dell'infisso ad alte frequenze fa calare anche quello dell'intera partizione. In tabella 2 sono infine comparati i valori degli indici di valutazione del potere fonoisolante normalizzato attraverso i vari percorsi.

Percorso	R _w [dB]
Diretto Misurato (daR' misurato in opera)	66
Diretto simulato (solo parete opaca) (daR parete opaca simulato)	69
Diretto simulato (parete opaca+infisso) (daR' calcolato)	67
Percorso indiretto attraverso il corridoio	80
Infisso* (daR infisso misurato in opera)	70
Percorso diretto+indiretto (daR' calcolato+Rperc. indiretto)	69

*(con coefficiente di irraggiamento corretto)

Tab. 2 - Indice di potere fonoisolante normalizzato per i vari percorsi

6. CONCLUSIONI

In conclusione le misure effettuate permettono di evidenziare i seguenti punti salienti.

- È stata trovata una buona corrispondenza tra le prestazioni della partizione in esame simulate tramite il software *Insul*[®] e quelle misurate in opera. L'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, R'_w, (per la parete composta: parete opaca + infisso) è risultato pari a 67 dB per la stima e a 66 dB per la misura in situ.
- La parete opaca reale mostra un comportamento migliore di quella simulata: infatti, in quella in opera non è stato rilevato il calo di fonoisolamento dovuto all'effetto coincidenza che risultava dalla simulazione e da certificati di laboratorio di analoghe pareti. Si ritiene che tale miglioramento sia dovuto allo strato di fibra di poliestere che ricopre la parete e che non è stato inserito nella simulazione (in quanto rivestimento). Tale materiale fonoassorbente risulta particolarmente efficace proprio alle frequenze interessate dalla coincidenza naturale della partizione. Questo risultato, desunto in opera, richiederà eventuali approfondimenti futuri.
- Trasmissione indiretta: è stato rilevato un calo di isolamento di tale percorso alle medio-alte frequenze, probabilmente dovuto al danneggiamento di una porta. In definitiva, comunque, il percorso indiretto pare avere un peso minimo sulla trasmissione totale.
- Trasmissione attraverso il vetro: la misura in situ ha portato a diverse considerazioni relative al coefficiente di irraggiamento e alla sua valutazione secondo la norma UNI EN ISO 12354-1. Infatti, il valore del coefficiente di irraggiamento che meglio consente di spiegare i risultati delle misure sperimentali sembra essere quello per onde libere in tutto il campo di frequenze di interesse. Infine, dalle misure non si evidenzia alcun calo di potere fonoisolante del vetro dovuto all'effetto della coincidenza della lastra esterna. Ciò sembra attribuibile alla presenza dello strato di PVB all'interno del vetro stratificato.

SUMMARY

Conclusions on the in situ measurements:

- There is a good match between the performance of the test partition simulated through the Software *Insul* and those measured on site. The predicted sound insulation index (wall + window) is R_w = 67 dB while the in situ index is R_w = 66 dB.
- The real wall performs better than the simulated one. In fact, we did not measure any decrease in sound insulation due to coincidence that resulted from *Insul* simulation. We believe this improvement is due to the polyester fiber layer covering the wall that was not included in the simulation. This sound absorbing material is particularly effective among those frequencies which are affected by natural coincidence of the partition. This result will require future investigation.
- Flanking transmission: an insulation decrease has been detected at medium-high frequencies but it was probably caused by the damage to a door. However, the indirect path transmission seems to have a minimum weight on the total transmission.
- Transmission through the glass: the vibration measurement led to different considerations about radiation efficiency and its evaluation according to UNI EN ISO 12354-1. In fact, the value of the radiation coefficient that explains the results of the experimental measurements at best seems to be the one for free waves for all frequencies. Measurements did not reveal any decrease in the sound reduction index due to coincidence as the UNI 12354-1 would suggested. The reason is probably the presence of a PVB layer inside the laminated glass.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alton Everest, F., Pohlmann, K. C., *Master Handbook of Acoustics*, McGraw Hill, 2009
- [2] ANIT - Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico, *Manualetto di acustica edilizia*, 2006
- [3] Biblioteca tecnica Knauf, *L'acustica con Knauf - Soluzioni tecniche per l'edilizia civile e industriale*, 2006
- [4] Cremer, L., Heckl, M. and Ungar, E.E., *Structure-borne sound*, Springer-Verlag, 1973
- [5] D'Arcy, R., Flynn, H., *RA: The Book - the Recording Architecture Book of Studio Design*, 2011
- [6] Fausti P., Secchi S., *Comparison between sound reduction index measurement techniques*, 2002
- [7] Gerretsen, E., *Architectural and Building Acoustics for Architects and Engineers*

- [8] Hopkins, C., *Sound Insulation*, Butterworth-Heinemann, 2007
- [9] Inman, D. J., *Engineering vibrations*, Pearson, 2013
- [10] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [11] Newell, P., *Recording Studio Design*, Focal Press, 2008
- [12] Secchi S., Cellai G., Fausti P., Santoni A., Zuccherini Martello N., *Sound transmission between rooms with curtain wall Facades: a case study*, Journal of Building Acoustics, Vol. 22, 2015
- [13] UNI EN ISO 12354, *Acustica edilizia – Stima delle prestazioni acustiche degli edifici a partire dalle prestazioni dei componenti*, 2002
- [14] UNI TR 11175, *Acustica in edilizia - Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici - Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale*, 2005
- [15] UNI EN ISO 717-1, *Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea*, 1997
- [16] UNI EN 12758, *Vetro per edilizia - Vetrazioni e isolamento acustico per via aerea - Descrizioni del prodotto e determinazione delle proprietà*, 2011
- [17] UNI EN ISO 16283-1, *Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea*, 2014
- [18] UNI EN ISO 10848, *Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale, tra ambienti adiacenti, del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio*, 2006

Ing. Cecilia TORRACCHI, laureata come strutturista presso la Scuola di Ingegneria di Firenze con una tesi in Acustica dal titolo "Fonoisolamento e trattamento acustico di uno studio di registrazione: analisi, progettazione e misure in opera", lavora presso lo studio di progettazione acustica Studio Sound Service di Firenze ed è Tecnico Competente in Acustica Ambientale per la Regione Toscana.

Dott. Donato MASCI, laureato in Fisica a Firenze e specializzato presso l'Università di Ferrara, è iscritto all'albo dei Tecnici Competenti in Acustica Ambientale della Regione Toscana, a quello dei Consulenti Tecnici del Tribunale di Firenze e al Ruolo dei Periti ed Esperti della Camera di Commercio di Firenze. E' il titolare dello studio di progettazione acustica Studio Sound Service di Firenze che si occupa di acustica ed elettroacustica in campo architettonico, musicale, edilizio, industriale.

Simone SECCHI, Architetto e Dottore di Ricerca in "Fisica Tecnica", è ricercatore universitario confermato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze, dove è professore aggregato per il corso "Fisica Tecnica Ambientale e Impianti Tecnici" del corso di laurea magistrale in Architettura e docente del corso "Acustica Ambientale" per il corso di laurea magistrale in Ingegneria per la tutela dell'ambiente e del territorio. Svolge attività di ricerca nel campo dell'acustica, dell'illuminotecnica e della qualità ambientale negli ambienti interni ed esterni. È tecnico competente in acustica ai sensi della legge 447/95

Carla BALOCCO, Professore Associato di Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze. Si occupa di ricerca in termofisica dell'edificio e dei suoi componenti, analisi CFD e transitorie del sistema integrato edificio-impianti con particolare attenzione al microclima e alla qualità dell'aria, conservazione e tutela preventiva nonché retrofitting/refurbishment impiantistico del Cultural Heritage, Illuminotecnica, soluzioni di controllo della luce naturale ed artificiale.