

CORRELAZIONE TRA POTERE FONOISOLANTE E RUMOROSITÀ DA PIOGGIA PESANTE IN COPERTURE CON FINITURA METALLICA

CORRELATION BETWEEN AIRBORNE SOUND INSULATION AND HEAVY RAIN NOISE ON COVERINGS WITH METALLIC FINISHING

Roberto Baruffa *

Istituto Giordano S.p.A., Gatteo (FC)

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

Via Erbosa 70/84, 47043, Gatteo (FC), Italia

e-mail: r.baruffa@giordano.it

(Ricevuto il 27/10/2016, accettato il 15/03/2017)

RIASSUNTO

Due camere riverberanti sovrapposte, con la possibilità di disporre i campioni di coperture inclinati, come nelle condizioni reali di posa, consentono di effettuare, in successione, prove di potere fonoisolante e di livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante. È quindi possibile individuare gli effetti sulle due grandezze acustiche delle differenti tipologie di coibentazione interna oppure del materiale anti-rombo impiegato. A causa della difficoltà di reperire in letteratura tecnica i dati del livello globale di intensità sonora di rumore di pioggia ponderato A, L_{IA} , si è determinata una correlazione tra L_{IA} e l'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w e la massa per unità di area dei campioni m .

ABSTRACT

Two overlying reverberation rooms, with the possibility to place the roof's sample tilted, as in the real installation conditions, allow to carry out in succession, the tests of sound insulation and of sound intensity level of heavy rain noise. So is possible to identify the effects on the two acoustics quantities of the different internal insulation or of the dumping materials used. Due to the difficulty of finding in technical literature the values of the weighted A overall sound intensity level of rain noise L_{IA} , a correlation between L_{IA} and the single number rating of sound insulation R_w and the mass per unit area of samples m was determined.

Parole chiave: isolamento acustico, rumore pioggia, coperture metalliche.

Keywords: airborne sound insulation, rain noise, metallic coverings.

1. Introduzione

Le coperture con strato di finitura metallico sono in genere associate a tipologie costruttive prefabbricate, come i pannelli sandwich, oppure a tetti in legno o interamente metallici. Per queste tipologie costruttive, il rumore da pioggia costituisce una potenziale fonte di disturbo per il comfort acustico degli ambienti interni. La possibilità di eseguire prove di laboratorio utilizzando un generatore di pioggia artificiale standardizzato, ha spinto sempre più produttori di coperture e materiali isolanti a sottoporre a prova i propri manufatti. Nel seguente lavoro sono analizzati i risultati di una serie di misurazioni di intensità sonora di rumore di pioggia pesante, eseguite nel corso degli ultimi cinque anni, selezionando le sole coperture per le quali siano state eseguite anche prove di potere fonoisolante, con lo scopo di individuare una possibile correlazione tra le due grandezze.

2. Descrizione delle prove

La struttura di prova è costituita da due camere, di cui quella superiore costituisce l'ambiente emittente e quella inferiore, interrata, l'ambiente ricevente; le camere hanno rispettivamente un volume di 126 m³ e 105 m³ circa. In figura 1 è riportata la configurazione degli ambienti di prova nel caso di misurazione del potere fonoisolante e successivamente del livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante col metodo indiretto, senza utilizzare la sonda intensimetrica (metodo diretto).

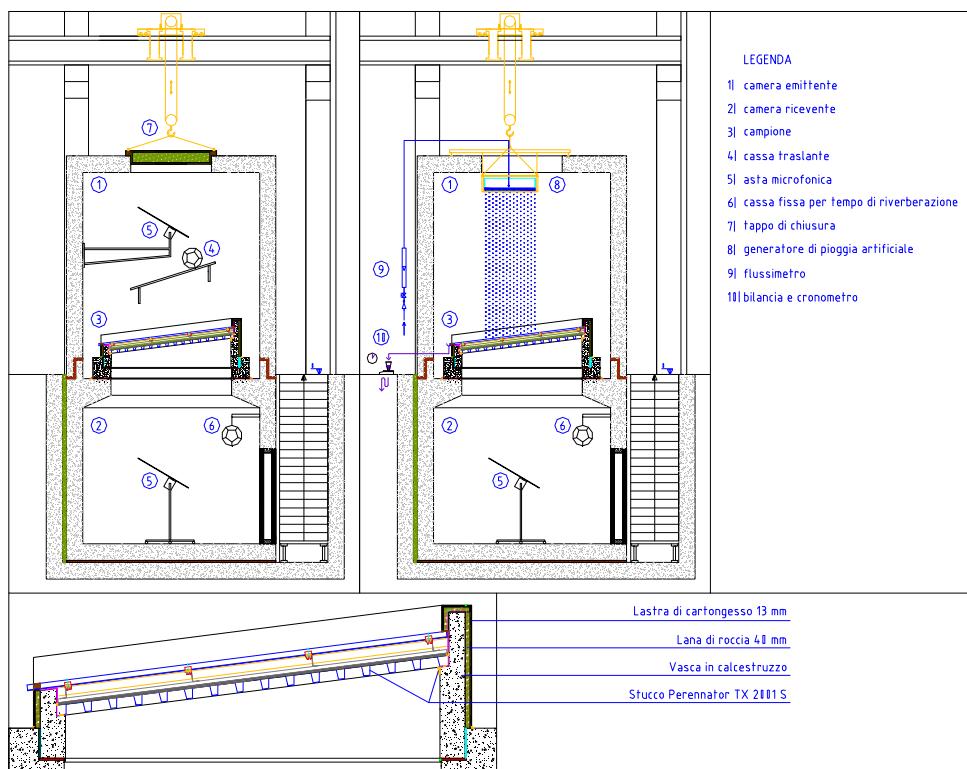


Figura 1 - Configurazione delle camere di prova, per il potere fonoisolante (sinistra), per il rumore della pioggia (destra) e posizionamento del campione fra le 2 camere (basso) - Configuration of the testing rooms, for airborne sound insulation (left), for rain noise (right) and of sample positioning inside test opening between the 2 rooms (bottom).

Il campione è montato all'interno di una vasca aperta su un lato, per consentire il drenaggio della pioggia artificiale, e realizzata con blocchi di calcestruzzo intonacati; la vasca è inserita, con interposizione di materiale resiliente, nella cornice mobile in cemento armato per mezzo della quale il campione viene trasportato all'interno della struttura di prova. Per ridurre i fenomeni di trasmissione laterale, le pareti della vasca sono rivestite con uno strato di lana di roccia e lastre di cartongesso. Le dimensioni della superficie di appoggio del campione sono 5.12×3.30 m, mentre l'apertura di prova, vista dalla camera ricevente, ha dimensioni di 5.0×3.0 m. In accordo con le norme di prova, l'inclinazione dei campioni è compresa tra 7° e 7.5° . Effettuata la prova del potere fonoisolante [1,2], il tappo presente sul tetto della camera emittente è rimosso, per consentire l'inserimento, tramite carroponete, del generatore di pioggia artificiale costituito da una vasca in plexiglass avente dimensioni di 1.25×1.30 m, con 100 fori di diametro 1 mm e che produce gocce aventi un diametro compreso tra 2 e 5 mm. Registrata la sua altezza dal campione pari a 3.5 m circa, si regola la portata in ingresso e quindi il battente d'acqua all'interno del generatore, in modo tale che la portata d'acqua raccolta nella sezione terminale della gronda di scarico sia uguale a (40 ± 2) mm/h corrispondente alla pioggia pesante; raggiunte tali condizioni si rileva in camera ricevente il livello di pressione sonora. Questa operazione è ripetuta per altre due posizioni del generatore di pioggia artificiale, non sovrapposte tra loro [3-5]. In figura 2 sono riportate alcune fotografie del campione n. 10.



Figura 2 - A sinistra, gli ambienti di prova; a destra il campione del test n. 10 visto dalla camera emittente e da quella ricevente - On the left, the test environment; on the right the n. 11 test sample viewed from the source room and from the receiving one.

Pur non essendo prevista dalle norme di misura vigenti, su richiesta di un produttore di manti di copertura metallici, è stato misurato anche il livello di pressione sonora irradiato dal campione in camera emittente, il cui valore è stato normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, per tener conto del campo sonoro riverberato nella camera emittente, parzialmente aperta per consentire il deflusso d'acqua.

Il potere fonoisolante R [1], il livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante L_1 [3], determinato con il metodo indiretto, e il livello di pressione sonora

irradiato di pioggia pesante normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $L_{r,nT}$ sono stati calcolati utilizzando le seguenti relazioni:

$$(1) \quad R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad [\text{dB}]$$

$$(2) \quad L_1 = L_{2p} - 10 \cdot \log\frac{T_2}{T_0} + 10 \cdot \log\frac{V}{V_0} - 14 - 10 \cdot \log\frac{S_e}{S_0} \quad [\text{dB}]$$

$$(3) \quad L_{r,nT} = L_{1p} - 10 \cdot \log\frac{T_1}{T_e} \quad [\text{dB}]$$

dove:

L_1 = livello di pressione sonora in camera emittente [dB];

L_2 = livello di pressione sonora in camera ricevente [dB];

L_{1p} = livello di pressione sonora in camera emittente dovuto alla pioggia [dB];

L_{2p} = livello di pressione sonora in camera ricevente dovuto alla pioggia [dB];

T_0 = tempo di riverberazione di riferimento in camera ricevente, pari a 1,0 s;

T_e = tempo di riverberazione di riferimento in camera emittente, pari a 0,5 s;

T_1 = tempo di riverberazione in camera emittente [s];

T_2 = tempo di riverberazione in camera ricevente [s];

A = area di assorbimento acustico equivalente della camera ricevente [m^2];

S = superficie del campione [m^2];

S_e = superficie del campione eccitata dal generatore artificiale di pioggia [m^2];

S_0 = superficie di riferimento, pari a 1 m^2 ;

V = volume della camera ricevente [m^3];

V_0 = volume di riferimento, pari a 1 m^3 .

3. Risultati

In tabella 1, assieme a una breve descrizione dei campioni, sono riportati i risultati delle prove effettuate, mentre in figura 3 sono mostrati i grafici in bande di 1/3 d'ottava. Confrontando le curve del potere fonoisolante con quelle del livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante emerge come in corrispondenza dei fenomeni risonanti, in cui si riscontrano i valori minimi di isolamento acustico per via aerea, si abbia una esaltazione delle emissioni sonore generate dalla pioggia pesante. A modesti incrementi dell'isolamento acustico, riconducibili all'interposizione di materiali antirumore (test 6-7 e 10-11), si evidenzia un decremento più consistente del livello di intensità sonora di rumore da pioggia pesante. La sostituzione dello strato di coibentazione interno in lana di roccia con uno in poliuretano (test 8-9) produce, sulla stessa tipologia di copertura, un decremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w [2] pari a 11 dB a cui corrisponde parimenti un innalzamento del livello globale di livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante ponderato A, L_{IA} [3] uguale a 9 dB(A). Per i pannelli prefabbricati (test 1-5), aventi configurazioni simili tra loro, in corrispondenza del deciso incremento del potere fonoisolante che si manifesta nell'intervallo di bande di 1/3 d'ottava comprese tra 630 e 1250 Hz, si concentrano le massime emissioni sonore dovute alla pioggia battente pesante.

Tabella 1 - Caratteristiche fisiche dei campioni (spessore max e min, massa areale strato esterno m_1 e totale m) e valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w , del livello di intensità sonora del rumore di pioggia pesante pesato L_{IA} e del rumore irradiato di pioggia pesante ponderato A normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $L_{r,nT,A}$ - Physical characteristics of samples (max and min thickness, external layer m_1 and overall m mass per unit area) and values of the weighted sound insulation index R_w , of the weighted A intensity level of heavy rain L_{IA} and of the weighted A radiated heavy rain noise normalized to reverberation time $L_{r,nT,A}$.

Test	Descrizione del campione (strato esterno/strato intermedio/strato interno)	Spess. min-max	
		m_1	L_{IA}
		m	$L_{r,nT,A}$
1	Lamiera grecata in acciaio	40 - 70 mm	26 (-1, -3) dB
	Polistirene espanso sinterizzato	3.9 kg/m ²	53 dB(A)
	Lamiera in acciaio	8.5 kg/m ²	//
2	Lamiera grecata in acciaio rivestita con bitume elastomerico	40 - 70 mm	28 (-1, -3) dB
	Polistirene espanso sinterizzato	6.3 kg/m ²	51 dB(A)
	Lamiera in acciaio	10.4 kg/m ²	//
3	Lamiera grecata in acciaio	120 - 150 mm	24 (-1, -3) dB
	Polistirene espanso sinterizzato	3.9 kg/m ²	53 dB(A)
	Lamiera in acciaio	9.3 kg/m ²	//
4	Lamiera grecata in acciaio rivestita con bitume elastomerico	120 - 150 mm	26 (-1, -3) dB
	Polistirene espanso sinterizzato	6.3 kg/m ²	51 dB(A)
	Lamiera in acciaio	11.2 kg/m ²	//
5	Lamina alluminio/Strato bituminoso/Lamiera acciaio zincato	40 - 72 mm	26 (0, -2) dB
	Polistirene espanso sinterizzato	9.6 kg/m ²	54 dB(A)
	Lamiera in acciaio	11.2 kg/m ²	//
6	Lamiera di acciaio zincato	488 - 513 mm	44 (-2, -8) dB
	Isolante in filamento di polipropilene incollato TNT	5.2 kg/m ²	33 dB(A)
	Assito in abete/Lana di legno/Membrana/Assito in abete	68.5 kg/m ²	//
7	Lamiera di acciaio zincato	480 - 505 mm	43 (-2, -7) dB
	Senza isolante test n. 6	4.7 kg/m ²	37 dB(A)
	Assito in abete/Lana di legno/Membrana/Assito in abete	68.0 kg/m ²	//
8	Lamiera in alluminio	322 - 372 mm	42 (-2, -8) dB
	Lana di roccia	2.2 kg/m ²	41 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	32.0 kg/m ²	//
9	Lamiera in alluminio	322 - 372 mm	31 (-2, -6) dB
	Poliuretano	2.2 kg/m ²	50 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	17.0 kg/m ²	//
10	Lamiera in alluminio con sottostante lana di vetro	220 - 262 mm	51 (-4, -10) dB
	Lana di roccia su strato di pannelli in gesso-fibra	2.6 kg/m ²	25 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	58.0 kg/m ²	//
11	Lamiera in alluminio con sottostante lana di vetro	220 - 262 mm	52 (-3, -9) dB
	Lana di vetro su strato di pannelli in gesso-fibra	2.6 kg/m ²	24 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	45.0 kg/m ²	64 dB(A)
12	Lamiera in alluminio con antirombo	220 - 262 mm	//
	Lana di vetro su strato di pannelli in gesso-fibra	5.0 kg/m ²	23 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	44.5 kg/m ²	62 dB(A)
13	Lamiera in alluminio	220 - 262 mm	//
	Lana di vetro su strato di pannelli in gesso-fibra	2.2 kg/m ²	30 dB(A)
	Lamiera grecata in acciaio zincato	44.0 kg/m ²	68 dB(A)

Correlazione tra potere fonoisolante e rumorosità da pioggia pesante in coperture con finitura metallica
Correlation between airborne sound insulation and heavy rain noise on coverings with metallic finishing

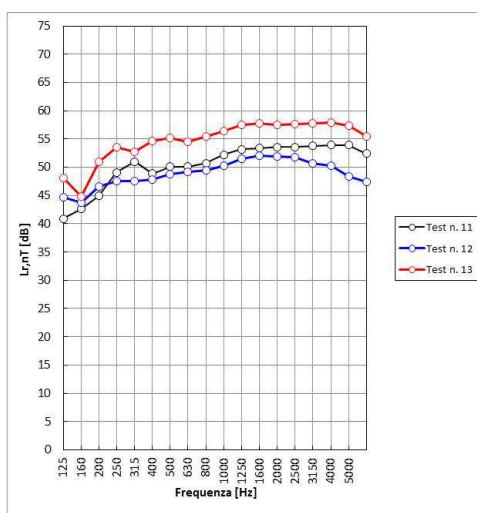
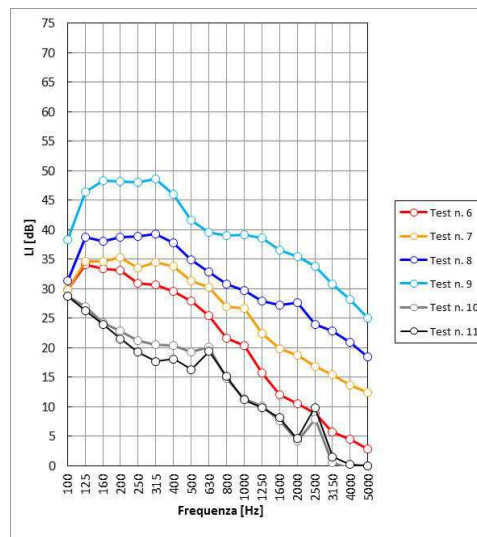
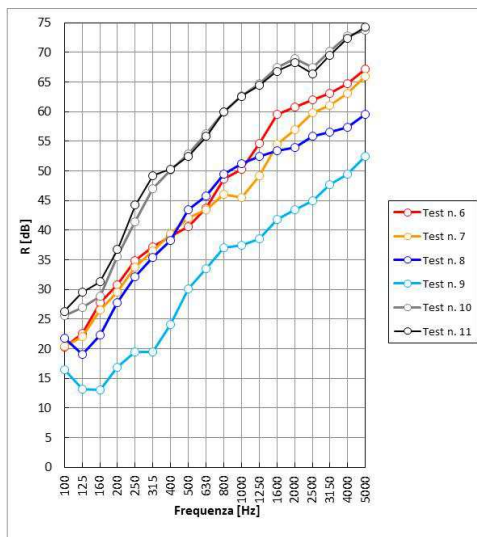
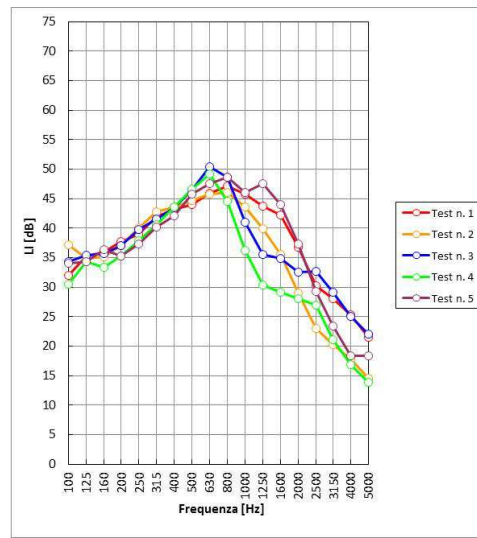
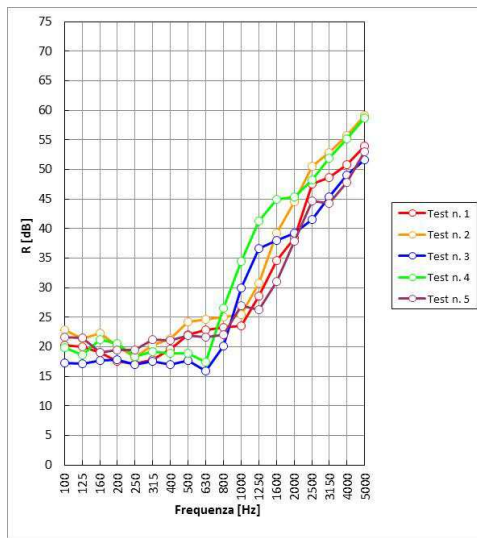


Figura 3 – Grafici delle misurazioni - Graphs of the measurements.

Il rumore da pioggia pesante irradiato ha andamento simile per i tre campioni sottoposti a prova (test n. 11, n. 12 e n. 13) con le massime emissioni che si verificano per il manto di copertura in alluminio nudo, per poi abbassarsi progressivamente inserendo della lana di vetro al di sotto delle lamiere e successivamente sostituendole con lamiere munite inferiormente di uno strato adesivo di materiale antirombo.

Analizzando gli andamenti di R e L_1 in bassa frequenza appare probabile che i valori di L_1 siano influenzati dalla trasmissione per via aerea a causa della concomitanza di alti livelli di pressione sonora in camera emittente, dovuti all'impatto delle gocce d'acqua sullo strato di copertura metallico, amplificati dall'effetto della riverberazione in camera emittente, e di valori di potere fonoisolante R relativamente bassi. L'unico campione per il quale stato è possibile effettuare questo tipo di indagine è il n. 11, in figura 4 è infatti riportato il confronto tra il livello di pressione sonora del rumore della pioggia pesante misurato in camera ricevente L_{p2} , in camera emittente L_{p1} e $(L_{p1}-R)$. Nell'intervallo di frequenze compreso tra 125 e 250 Hz, la differenza $[L_{p2} - (L_{p1}-R)]$ è inferiore a 15 dB, ma superiore a 10 dB, e quindi L_{p2} risulta essere leggermente influenzato dalla trasmissione per via aerea. Per tenere conto di tale contributo, al posto di L_{2p} nella formula (2), dovrebbe essere inserito il seguente termine [6]:

$$(4) \quad 10 \cdot \log \left[10^{L_{2p}/10} - 10^{(L_{p1}-R)/10} \right] \quad [\text{dB}]$$

Per campioni aventi un potere fonoisolante minore di quello del test n. 11 potrebbe accadere di avere influenze più marcate della trasmissione per via aerea rendendo realistico l'utilizzo del termine prima descritto; ad esempio nella nuova versione della norma sull'isolamento acustico del rumore di calpestio, tale correzione è prevista e può raggiungere un valore massimo pari a 3.0 dB.

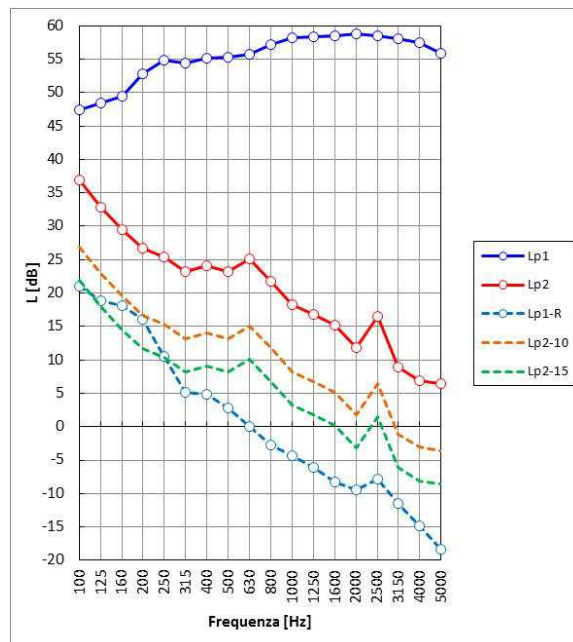


Figura 4 - Grafico di L_{p2} , L_{p1} e $(L_{p1}-R)$ rilevati nel test n. 11 - Graph of L_{p2} , L_{p1} and $(L_{p1}-R)$ measured in the test No. 11.

4. Analisi dei risultati

Al fine di individuare una semplice formula che evidenzi il collegamento tra le grandezze rilevate [7-11], l'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w è stato correlato con il livello globale di intensità sonora di rumore di pioggia pesante ponderato A, L_{IA} , ottenendo la seguente legge lineare, avente R^2 pari a 0.96:

$$(5) \quad L_{IA} = 80 - R_w \quad [\text{dB(A)}]$$

A causa della ridotta disponibilità in letteratura di dati di isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio posati in orizzontale o inclinati, i valori di R_w sono stati interpolati logaritmicamente con quelli delle corrispondenti masse unitarie m ottenendo un coefficiente di determinazione R^2 pari 0.87, allo stesso modo si è proceduto con L_{IA} ottenendo una correlazione meno efficace fermandosi R^2 a 0.81. Le due formule sono riportate di seguito:

$$(6) \quad R_w = 26.9 \cdot \log(m) - 0.6 \quad [\text{dB}]$$

$$(7) \quad L_{IA} = -27.8 \cdot \log(m) + 80.4 \quad [\text{dB(A)}]$$

Le due regressioni logaritmiche confermano la relazione esistente tra R_w e L_{IA} già individuata con l'equazione (5); in figura 5 sono riportate le interpolazioni prima descritte. L'equazione (6) si allinea alle formule disponibili in letteratura [12], anche se i coefficienti di determinazione appaiono bassi. Affinando la ricerca di una possibile interdipendenza, i dati del potere fonoisolante R e del livello di intensità sonora di pioggia pesante L_I sono stati riaggregati in bande d'ottava e, come mostrato in figura 6, diagrammati l'uno in funzione dell'altro. Considerando i valori compresi tra 500 e 4000 Hz, senza distinguerli nelle varie ottave, R_{oct} e L_{Ioct} sono legati da una relazione polinomiale di secondo grado, con coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.96. Nelle bande d'ottava di 125 e 250 Hz, in cui il potere fonoisolante è dominato da fenomeni risonanti e contemporaneamente i valori di L_{Ioct} sono potenzialmente influenzati dalla trasmissione per via aerea, non è stato possibile individuare una correlazione significativa. Un ulteriore passo è stato quindi quello di determinare i rapporti L_{Ioct}/R_{oct} e di diagrammarli in funzione dei rispettivi valori di R_{oct} ; come riportato sempre in figura 6, è emerso che tali valori sono effettivamente correlati da una relazione di tipo esponenziale avente R^2 pari a 0.94:

$$(8) \quad \frac{L_{Ioct}}{R_{oct}} = 6.583 \cdot e^{-0.052 R_{oct}} \quad [\text{dB}]$$

Nuovamente si pone però il problema della scarsa disponibilità di dati di R_{oct} relativi a coperture inclinate anche se in letteratura sono molteplici le formule che consentono di stimare l'isolamento acustico per via aerea, ma principalmente per elementi di edificio disposti in verticale. Come evidenziato in figura 7, secondo la più classica delle teorie [12], i valori di R_{oct} sono stati quindi diagrammati in funzione del prodotto tra la massa per unità d'area m e la frequenza centrale della banda d'ottava f e successivamente interpolati logaritmicamente, ottenendo la seguente relazione:

(9) $R_{oct} = 29.1 \cdot \log(m \cdot f) - 85.9$ [dB]

L'interpolazione è caratterizzata da un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.88 ed valida per valori di $(m \cdot f)$ superiori a 4000 Hz kg/m^2 , al di sotto del quale si può utilizzare un dato costante di 18.8 dB, pari al valore medio aritmetico di R_{oct} determinato per i valori di $(m \cdot f)$ inferiori a 4000 Hz kg/m^2 che ben rappresenta l'isolamento acustico in bassa frequenza misurato per campioni con massa per unità d'area inferiore a 12 kg/m^2 . Il sistema di equazioni (8) e (9) consente di stimare, con un buon grado di approssimazione, i valori in bande d'ottava del potere fonoisolante R_{oct} e del livello di intensità sonora di rumore di pioggia pesante L_{Ioct} .

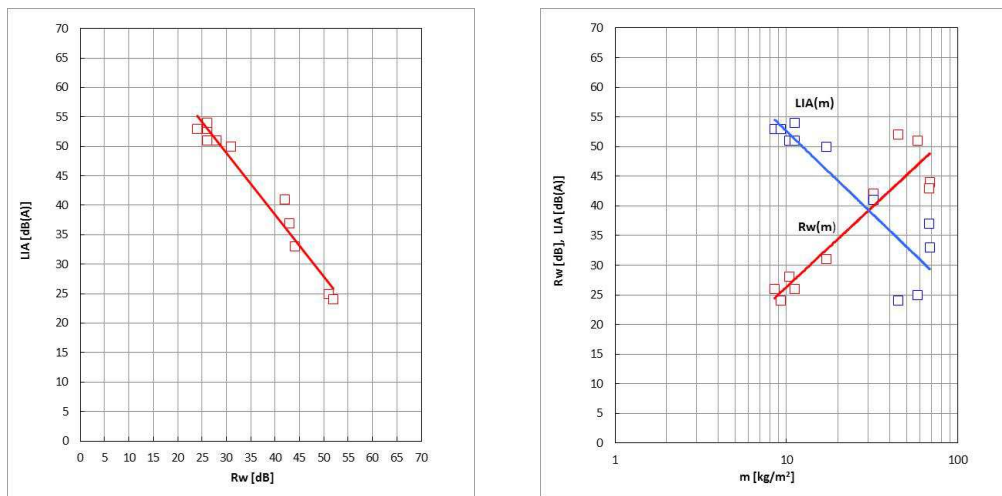


Figura 5 - Interpolazioni di R_w e L_{IA} e delle stesse grandezze con la massa per unità d'area m - R_w and L_{IA} interpolations and of the same quantities with mass per unit area.

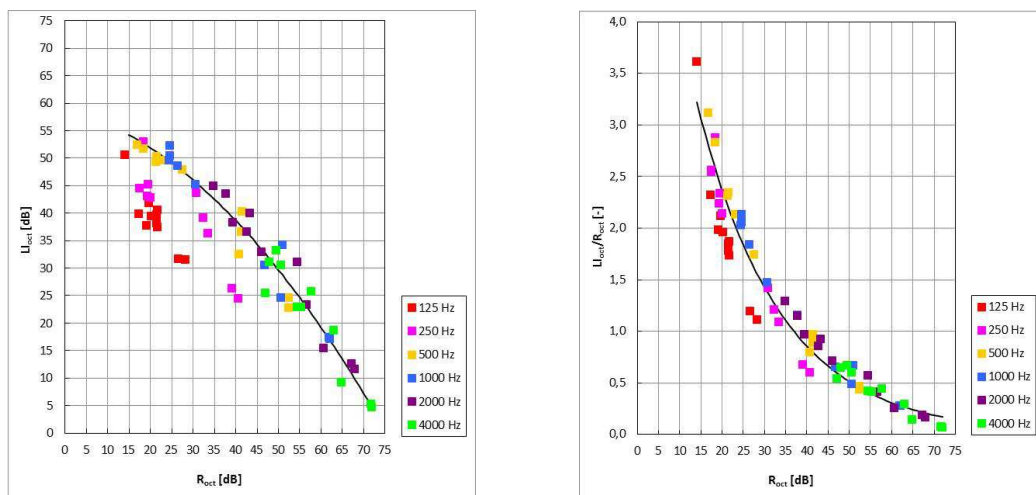


Figura 6 - Grafico di L_{Ioct} in funzione di R_{oct} e di L_{Ioct}/R_{oct} in funzione di R_{oct} - Graph of L_{Ioct} as function of R_{oct} and of L_{Ioct}/R_{oct} as function of R_{oct} .

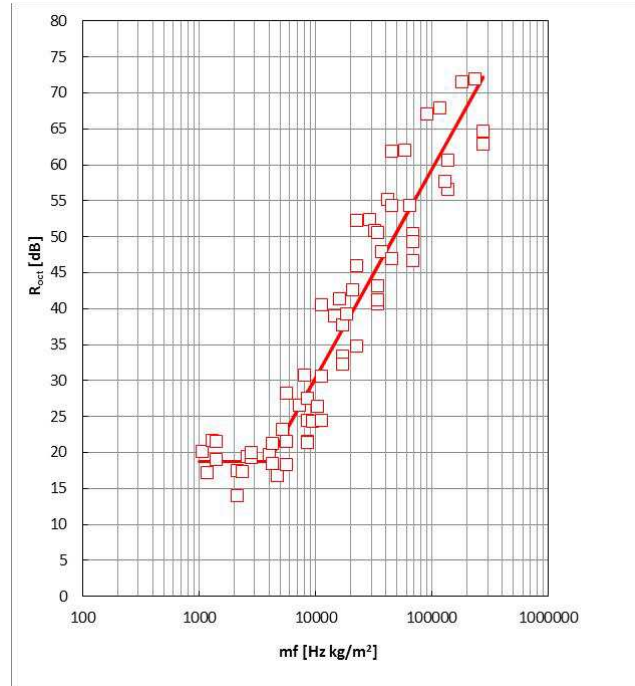


Figura 7 - Grafico dell'interpolazione di R_{oct} in funzione di $(m f)$ - Graph of R_{oct} interpolation as function of $(m f)$.

Conclusioni

Per elementi di edificio aventi manto di copertura metallica, in base ai dati raccolti da implementare in futuro, il livello globale di intensità sonora del rumore di pioggia pesante ponderato A L_{IA} può essere stimato con un certo grado di affidabilità partendo dai dati dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w se rilevati in laboratorio con il campione inclinato, come nella posa reale, oppure dai dati della massa per unità d'area m se non disponibili; la relazione tra R e L_I può essere estesa ai valori in bande d'ottava. In bassa frequenza, l'impatto delle gocce sulle lamiere metalliche genera livelli di pressione sonora in camera emittente così alti da rendere probabile l'instaurarsi di fenomeni di trasmissione per via aerea, la cui identificazione può essere condotta misurando il livello di pressione sonora da pioggia pesante in camera emittente e il potere fonoisolante del campione.

Conclusions

For building elements having a metallic covering mantle, considering the gathered data to increase in the future, the overall weighted A sound intensity level of heavy rainfall L_{IA} can be estimated, with a certain level of assurance, starting from the data of the sound insulation index R_w , if measured in laboratory with the sample tilted as in the real conditions, or from its mass per unit area data m if are not available; the relationship between R_w and L_I can be extended to the octave band values too. At low frequencies, the drops impact on metallic sheets generates in the source room a so high sound pressure level to make possible airborne sound transmission whom identification can be carried out measuring the sound pressure level in the source room and the sample sound insulation.

Bibliografia

- [1] UNI (2010). UNI EN ISO 10140-2:2010, Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Misurazione dell'isolamento acustico per via aerea.
- [2] UNI (2013). UNI EN ISO 717-1:2013, Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.
- [3] UNI (2007). UNI EN ISO 140-18:2007, Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 18: Misurazione in laboratorio del rumore generato da pioggia battente su elementi di edificio.
- [4] UNI (2014). UNI EN ISO 10140-1:2014, Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Regole di applicazione per prodotti particolari.
- [5] UNI (2014). UNI EN ISO 10140-5:2014, Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 5: Requisiti per le apparecchiature e le strutture di prova.
- [6] UNI (2015). UNI EN ISO 10140-3:2015 Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Misurazione dell'isolamento del rumore da calpestio.
- [7] Vermeir, G., Mees, P. (2000). Laboratory test set-up for the evaluation of rainfall noise. In: Proceeding of Internoise 2000, Nizza, 27-30 Agosto.
- [8] Hopkins, C. (2006). Rain noise from glazed and lightweight roofing. BRE IP 2/06, IP2 06, Watford.
- [9] Ikeda, H., Yoshida, T., Mimura, K. (2002). Measuring and predicting rainfall noise-reduction effects on Shizuka-Ace. Furukawa Review, 21, pp. 81-86.
- [10] Griffin, D., Ballough, K., (2012). A consolidated theory for predicting rain noise. Building Acoustics, 19(4),pp. 221-248.
- [11] Chene, J.B., Guigou-Carter, C., Foret, R., Langeger Larsen, M. (2010). Rainfall noise measurement: assessment and perspectives four years after EN ISO 140-18 publication. In: Proceedings of Internoise 2010, Lisbona, 13-16 Giugno.
- [12] Spagnolo, R. (2001). Manuale di acustica. Torino: UTET, pp. 598-607.