

Alessandro Cocchi*
 Angelo Farina**
 Patrizio Fausti***
 Roberto Pompoli***
 Giovanni Semprini*

Prestazioni acustiche dei solai in laterizio

Dopo una prima parte dedicata alla definizione di alcuni parametri di acustica applicata, vengono descritti e commentati i risultati di un'indagine sperimentale, con prove condotte sia in opera sia in laboratorio, su alcune tipologie costruttive di solai in laterocemento

Definizioni e grandezze Isolamento al rumore aereo

La trasmissione del rumore aereo tra due ambienti contigui, come è noto, avviene principalmente attraverso la radiazione acustica dell'elemento divisorio (parete o solaio) ed in parte minore, ma non meno importante, attraverso la radiazione acustica delle pareti laterali a cui perviene, tramite trasmissione strutturale, parte dell'energia sonora presente nell'ambiente trasmittente.

Nelle prove effettuate in laboratorio, grazie al disaccoppiamento strutturale tra ambiente trasmittente e ambiente ricevente, l'influenza delle trasmissioni laterali viene ridotta al minimo, per cui l'isolamento acustico misurato rispecchia l'effettiva prestazione acustica dell'elemento divisorio.

Nelle prove in opera, al contrario, il livello acustico misurato nella camera ricevente dipende dalle particolari condizioni di messa in opera del solaio e dalla tipologia delle pareti laterali attraverso cui si trasmette l'energia.

Per definire le prestazioni di isolamento acustico di una struttura si fa riferimento al concetto di *potere fonoisolante* R attraverso la seguente relazione:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

dove W_i è la potenza sonora incidente sulla struttura e W_t è la potenza sonora trasmessa nell'ambiente ricevente.

Per poter determinare tale grandezza si ricorre a misure effettuate nei due ambienti contigui separati dalla struttura in esame.

Si definisce quindi *isolamento acustico* D la differenza tra i livelli di pressione sonora misurati nell'ambiente trasmittente (1) ed in quello ricevente (2), ciascuno valutato come media delle rilevazioni in diversi punti delle camere (ISO 140/3 e 140/4):

$$D = L_1 - L_2 \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

Le misure in laboratorio (ISO 140/3 o corrispondente UNI 8270/3) vengono eseguite come illustrato nello schema di figura 1. In questa situazione possono essere trascurati gli effetti delle trasmissioni laterali del rumore e, nell'ipotesi in cui il campo sonoro possa essere ipotizzato uniformemente diffuso, esiste un legame tra il valore di R e quello di D :

$$R = D + 10 \log \left(\frac{S \cdot Tr_2}{0,16 \cdot V_2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

dove S è la superficie della struttura in esame, Tr_2 e V_2 sono, rispettivamente, il tempo di riverberazione calcolato in accordo con la ISO 354 ed il volume dell'ambiente ricevente.

Nelle misure effettuate in opera, come illustrato nello schema di figura 2, il valore di

D dipende dal potere fonoisolante della parete divisoria, dalla tecnica costruttiva impiegata (in particolare dalla presenza di vie di trasmissione laterali) e dalle caratteristiche acustiche degli ambienti trasmittente e ricevente.

Il parametro utilizzato maggiormente nella valutazione dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio in opera (ISO 140/4 e UNI 8270/4) è l'*isolamento acustico normalizzato* D_n che è legato alla misura di D dalla espressione:

$$D_n = D + 10 \log \left(\frac{Tr_2}{T_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

dove Tr_2 è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento (pari a 0,5 s, corrispondente al valore medio relativo ad un ambiente arredato).

La normativa consente anche di valutare il *potere fonoisolante apparente* R' con misure realizzate in opera, utilizzando le relazioni (2) e (3). Tale parametro, confrontato con il valore di R , può fornire una indicazione di quanto le condizioni di posa in opera della struttura influenzino la misura rispetto alle condizioni ideali ottenibili in laboratorio.

Isolamento al rumore di calpestio

La valutazione dell'isolamento acustico caratteristico di un solaio soggetto ad eccitazione impattiva viene effettuata tramite la determinazione del livello sonoro nell'ambiente ricevente prodotto da una sorgente normalizzata di calpestio posta sul piano superiore (ISO 140/7 e UNI 8270/4), come illustrato nello schema di figura 3. Il livello di calpestio L_i , ottenuto dalla media dei valori rilevati in più punti di misura, risente del contributo sia della radiazione acustica del solaio, sia di quella delle pareti laterali, dipendendo inoltre dalle condizioni di riverberazione dell'ambiente ricevente.

Si definisce quindi *livello di pressione sonora di calpestio normalizzato* L_n l'espressione:

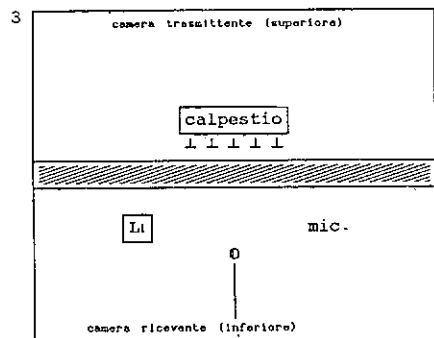
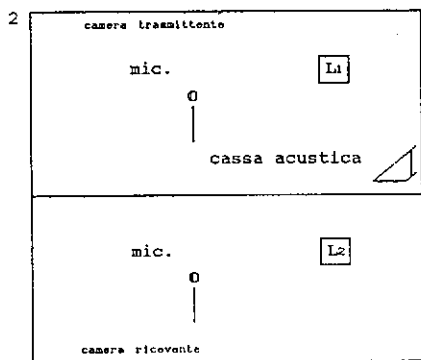
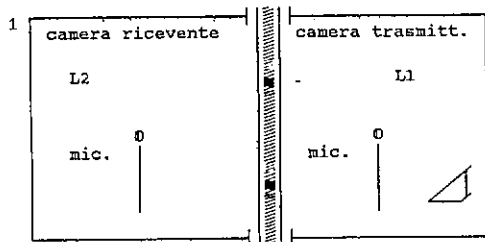
$$L_n = L_i - 10 \log \frac{Tr_2}{T_0} \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

dove L_i è il livello di pressione sonora di calpestio misurato, Tr_2 è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento (0,5 s).

Valutazione delle prestazioni acustiche

I risultati delle misure descritte precedentemente vengono generalmente espressi in forma di grafico che riporta la grandezza in funzione delle frequenze di centro di 1/3 di ottava, nel campo compreso tra 100 e 3150 Hz.

Tale rappresentazione consente una analisi dettagliata del comportamento acustico del campione in prova. Tuttavia, per una valuta-



* Istituto di Fisica Tecnica, Università di Bologna
 ** Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma
 *** Istituto di Ingegneria, Università di Ferrara

1. Misura in laboratorio dell'isolamento acustico.
2. Misura in opera dell'isolamento acustico.
3. Misura in opera del livello di calpestio.

zione globale di tale comportamento si fa ricorso ad un unico parametro, denominato *indice di valutazione*, che viene utilizzato per classificare le curve del potere fonoisolante (R_w), dell'isolamento acustico (D_{nw}) e del livello di calpestio (L_{nw}). Il metodo per determinare il valore dell'indice di valutazione è riportato nella norma ISO 717, corrispondente alla UNI 8270/7.

Come indicato nelle figure 4 e 5, il valore dell'indice di valutazione è ottenuto sovrapponendo alla curva sperimentale di R , D o L_n la corrispondente curva di riferimento (data dalla norma) in modo tale che il valore medio degli scostamenti negativi della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento sia inferiore a 2 dB. In tale circostanza il valore della curva di riferimento a 500 Hz rappresenta l'indice di valutazione della curva sperimentale e, quindi, per una data struttura, della prestazione acustica oggetto dell'esame.

La sperimentazione

Scopo dell'indagine

Gli scopi della sperimentazione effettuata sono stati molteplici: innanzitutto si è cercato di valutare le prestazioni acustiche di alcune tipologie di solaio, sia in opera sia in laboratorio; in secondo luogo si è voluto approfondire la conoscenza di alcuni problemi relativi alle condizioni di messa in opera. In particolare l'indagine si proponeva di valutare l'influenza delle condizioni di vincolo e delle caratteristiche realizzative del solaio (dimensioni, spessore degli elementi in laterizio, tipologia dei travetti, rigidità del complesso) sulla capacità dello stesso di irradiare l'energia sonora ricevuta, sia per via aerea che per via solida.

Prove in laboratorio

Le prove sono state effettuate presso il Laboratorio di Acustica dell'Università di Parma ed hanno riguardato la sola determinazione del potere fonoisolante delle strutture prese in considerazione. Il laboratorio, già descritto in un precedente articolo [4], è costituito da due camere riverberanti adiacenti di diversa forma e volume (55 e 50 m³) collegate tramite una apertura verticale di 10 m² in cui sono stati inseriti i solai in prova. La disposizione del campione in prova e della strumentazione sono indicati nello schema di figura 1.

È importante osservare che la disposizione in verticale dei solai non rispecchia le reali condizioni di vincolo di incastro nei quattro lati, né la reale rigidità flessionale che si ha nella disposizione orizzontale. Si è ritenuto tuttavia che, almeno ai fini della misura del potere fonoisolante, tale disposizione di montaggio dei solai potesse essere accettabile.

Nella successiva tabella I sono riportate le tipologie di solai provate con l'indicazione dello spessore e della densità di massa (kg/m²).

Tabella I - Tipologie di solai provate in laboratorio

N°	Tipologia solaio	spessore (cm)	densità (kg/m ²)
L1	Travetti a traliccio e laterizio	16+4	270
L2	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	340
L3	Travetti in cls prec. e laterizio A	16+4	269
L4	Travetti in cls prec. e laterizio A	20+4	284
L5	Travetti in cls prec. e laterizio B	16,5+4	273
L6	Travetti in cls prec. e laterizio B	20+4	362
L7	Pannello e laterizio B	16,5+4	321
L8	Pannello e laterizio B	20+4	369
L9	Lastra in cls e polistirolo	4+16+4	261
L10	Lastra in cls e polistirolo	4+20,5+4	296
L11	Lastra in cls e laterizio	4+12+4	419
L12	Lastra in cls e laterizio	4+16,5+4	458
L13	Travetti tipo sperimentale	20+4	361

Tabella II - Tipologie di solai provati nel cantiere di Fiorenzuola

N°	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)
F1	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	5,40
F2	Travetti in cls prec. e laterizio	20+4	5,40
F3	Solaio a pannelli	20+4	5,40
F4	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	3,70
F5	Travetti in cls prec. e laterizio	20+4	3,70
F6	Solaio a pannelli	20+4	3,70

Tabella III - Tipologie di solai provati nel cantiere di Poviglio

N°	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)
P1	Lastra in cls e laterizio	4+16+4	5,00
P2	Travetti in cls prec. e laterizio	16+4	3,60
P3	Travetti a traliccio e laterizio	16+4	3,60
P4	Travetti a traliccio e laterizio	20	3,60
P5	Lastra in cls e polistirolo	4+16+4	5,00
P6	Lastra in cls e polistirolo	4+12+4	3,60

Prove in opera

Descrizione degli edifici

Le misure in opera sono state condotte dall'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna in due diversi cantieri, di edilizia sperimentale, finanziati dal Ministero LLPP (Segretariato Generale del C.E.R.), sulla base dell'art. 4 della legge n. 94 del 25 marzo 1982 e coordinati da ICIE, Istituto cooperativo per l'innovazione. In entrambi sono state effettuate misure sia di isolamento al rumore aereo che di livello di rumore di calpestio.

Nel primo cantiere, situato a Fiorenzuola d'Arda (PC), sono state verificate le prestazioni acustiche di tre coppie di tipologie di solaio realizzate secondo due diverse orditure (tab. II) in modo tale che ciascuna coppia di solai da misurare presentasse una sola variabile (o grado di libertà), così da poter distinguere l'influenza di ciascuno dei parametri, di volta in volta variati, sull'isolamento acustico. La valutazione del comportamento acustico delle strutture descritte è stata effet-

tuata mediante lo svolgimento di diverse campagne di misura, eseguite nell'edificio sia in corso d'opera, sia finito.

Le prove acustiche effettuate presso il secondo cantiere di edilizia sperimentale, situato a Poviglio (RE), hanno riguardato 6 solai di diversa tipologia (tab. III) presenti all'interno di un edificio con struttura portante in cemento armato. Nel caso in esame le prove sono state condotte sui solai al grezzo, al fine di avere un quadro più ampio e di confronto con i risultati della precedente campagna. In particolare l'interesse era rivolto alla valutazione della capacità di isolamento acustico delle tipologie di solaio utilizzate e dell'influenza su di esse di alcuni parametri, quali la direzione di orditura (5 m e 3,60 m) e la presenza del primo strato di soletta in calcestruzzo.

La disposizione della strumentazione all'interno degli ambienti di misura, per le prove di isolamento acustico e del livello di calpestio, è indicata, rispettivamente, negli schemi di figura 2 e 3.

Gli ambienti di misura, dimensionalmente identici, situati sopra e sotto ciascun solaio in prova, sono stati appositamente realizzati tramite tamponamenti omogenei. L'accesso ai vari locali è stato realizzato con aperture di piccole dimensioni (60x100 cm) che in fase di misura sono state tamponate con tavolato di legno di forte spessore, posizionato su ambo i lati dell'apertura con inserimento di materiale fonoisolante nell'intercapedine.

Risultati ottenuti

Prove di laboratorio

I risultati dell'elaborazione degli indici di valutazione del potere fonoisolante sono indicati, per le diverse strutture testate, in tabella IV in cui, accanto ai valori di R misurati in laboratorio, sono riportati i valori del potere fonoisolante apparente R' misurati per i corrispondenti solai posti in opera.

I valori di R valutati nelle singole bande di 1/3 di ottava sono riportati in figura 6, per i solai a travetti, e nelle figure 7 e 8 per i solai a lastra ed a pannello.

Prove in situ

Nelle tabelle V, VI e VII sono riportati i valori degli indici di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato D_{nw} e del potere fonoisolante apparente R' , separatamente per i solai grezzi e finiti. I valori indicati riguardano le misure nelle due diverse direzioni in cui è stato valutato l'isolamento. Le figure 9 e 10 riportano gli andamenti in frequenza.

Le curve relative al potere fonoisolante apparente risultano sostanzialmente identiche a quelle di isolamento acustico normalizzato: in taluni casi tali curve risultano leggermente traslate superiormente, fornendo un indice di valutazione comunque non superiore di 0,5 dB rispetto al corrispondente indice di valu-

tazione dell'isolamento normalizzato.

I risultati sperimentali relativi alle misure del rumore di calpestio sono riportati in tabella VIII, per quanto riguarda gli indici di valutazione, ed in figura 11 e 12 per quanto riguarda gli andamenti in frequenza.

Discussione dei risultati

Isolamento al rumore aereo

Confronto tra le diverse tipologie di solaio

A) Misure in laboratorio

Il confronto tra gli indici di valutazione relativi al potere fonoisolante evidenzia come, a parità di luce e spessore, le migliori prestazioni siano fornite dai solai a lastra, con valore massimo pari a 53,5 dB, rispetto alle tipologie a travetti ed a pannello. Il valore minimo di 47,5 dB è stato ottenuto per i solai a travetti in calcestruzzo precompresso e laterizio.

L'analisi degli spettri in frequenza del potere fonoisolante mostra andamenti piuttosto omogenei, crescenti con la frequenza, anche se con locali fluttuazioni. In particolare si può notare come per i solai a travetti (fig. 6) vi sia un effetto di coincidenza alla frequenza di 2500 Hz, non riscontrabile invece nei solai a pannelli ed a lastra, imputabile probabilmente alla rigidità flessionale dovuta all'armatura metallica dei travetti stessi. In ogni caso si evidenziano gli elevati valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante per tutte le tipologie.

B) Misure in opera

Tra le cinque diverse tipologie di solaio al grezzo, provate complessivamente nei due edifici, quella realizzata con lastre in cls e laterizio ha fornito un maggiore valore di isolamento acustico con un indice di valutazione di 54 dB. Tra gli altri solai non esistono sostanziali differenze, con valori che si aggirano sui 48-50 dB, con valore minimo per le lastre in cls e polistirolo.

L'analisi in frequenza conferma come la lastra in cls e laterizio presenti il migliore isolamento a tutte le frequenze, sia se confrontata con i solai di pari luce (fig. 13) sia con quelli di luce inferiore.

Dalle figure 9 e 10 si evidenzia come a 250 Hz i solai a traliccio ed a pannello assumano un piccolo positivo che li porta ad avere un valore di isolamento uguale ed anche maggiore di quello dei solai a lastra. Alle frequenze più basse si hanno andamenti diversificati: mentre i solai a travetti ed a pannello assumono valori di isolamento uniformi tra 100-165 Hz, le due tipologie a lastra presentano valori oscillanti.

Influenza delle condizioni di vincolo e delle caratteristiche dimensionali (misure effettuate in opera)

Per ogni tipologia di solaio, i due parametri che influiscono direttamente sui risultati del-

Tabella IV - Indici di valutazione del potere fonoisolante di solai in laterocemento in laboratorio e in opera

Tipologia solaio	spessore (cm)	Laboratorio			In opera		
		N	luce(m)	Rw	N	luce(m)	R'w
Travetti a traliccio e laterizio	16+4	L1	3,3	49,0	P3	3,60	49,0 50,5
Travetti a traliccio e laterizio	20+4	L2	3,3	50,0	F4	3,70	49,5 50,0
Travetti in cls precompresso e laterizio tipo A	16+4	L3	3,3	48,5			
Travetti in cls precompresso e laterizio tipo A	20+4	L4	3,3	47,5			
Travetti in cls precompresso e laterizio tipo B	16,5+4	L5	3,3	47,5			
Travetti in cls precompresso e laterizio tipo B	20+4	L6	3,3	50,0	F5	3,70	51,5 51,0
Pannello e laterizio tipo B	16,5+4	L7	3,3	48,5			
Pannello e laterizio tipo B	20+4	L8	3,3	52,5	F6	3,70	51,0 50,5
Lastra in cls e polistirolo	4+16+4	L9	3,3	50,5	P5	5,00	49,0 48,5
Lastra in cls e polistirolo	4+20,5+4	L10	3,3	53,5			
Lastra in cls e laterizio	4+12+4	L11	3,3	51,5			
Lastra in cls e laterizio	4+16,5+4	L12	3,3	53,5	P1	5,00	54,5 55,5
Solaio sperimentale	20+4	L13	3,3	51,5			

Tabella V - Indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato Dnw e del potere fonoisolante apparente R'w di solai grezzi in laterocemento (Fiorenzuola)

Loc.	N	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)	sorg. ric.	Dnw	R'w
F	1	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	5,40	s/i i/s	50,0 49,5	50,0 50,0
F	2	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	5,40	s/i i/s	49,5 49,5	50,0 50,0
F	3	Pannello	20+4	5,40	s/i i/s	49,5 49,5	50,0 50,0
F	4	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	3,70	s/i i/s	49,5 49,5	49,5 50,0
F	5	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	3,70	s/i i/s	51,0 50,5	51,5 51,0
F	6	Pannello	20+4	3,70	s/i i/s	50,5 50,0	51,0 50,5

piano superiore = s; piano inferiore = i
esempio: sorgente superiore-ricevente inferiore = s/i

Tabella VI - Indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato Dnw e del potere fonoisolante apparente R'w di solai finiti in laterocemento (Fiorenzuola)

Loc.	N	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)	sorg. ric.	Dnw	R'w
F	1	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	5,40	s/i i/s	51,0 51,5	51,5 52,0
F	2	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	5,40	s/i i/s	51,5 50,5	51,5 50,5
F	3	Pannello	20+4	5,40	s/i i/s	50,5 51,0	51,0 51,5
F	4	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	3,70	s/i i/s	53,0 52,0	53,5 52,5
F	5	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	3,70	s/i i/s	53,5 53,5	54,0 53,5
F	6	Pannello	20+4	3,70	s/i i/s	54,0 52,5	54,0 53,0

piano superiore = s; piano inferiore = i
esempio: sorgente superiore-ricevente inferiore = s/i

le misure di isolamento sono la luce e lo spessore del solaio in prova.

Analizzando il comportamento di ciascuna tipologia di solaio si possono fare le seguenti considerazioni:

1) il solaio a lastra in cls e laterizio (fig. 13) presenta il maggiore grado di isolamento a tutte le frequenze superiori a 400 Hz; buono anche l'isolamento a 125 Hz, pari a 45 dB;
 2) il solaio a lastra in cls e polistirolo (fig. 14) assume un comportamento differenziato rispetto a tutte le altre tipologie a causa di un "buco" di isolamento riscontrabile a 630 e 800 Hz. Oltre tali frequenze si notano due diversi andamenti a seconda della luce del solaio: il solaio con luce 500 cm presenta un andamento in frequenza analogo agli altri; il solaio con luce 360 cm assume invece valori crescenti con la frequenza;
 3) il solaio a travetti a traliccio e laterizio è stato provato in diverse tipologie dimensionali (fig. 15). Il solaio di spessore 20 + 4 cm provato con due diverse luci nei due cantieri presenta valori di isolamento acustico identici sopra i 400 Hz. Al di sotto si hanno valori simili con scostamenti di 1-3 dB. Questo fatto non incide sostanzialmente sull'indice di valutazione dell'isolamento acustico Dnw, per cui si ottengono in ogni caso valori pari a 49,5 dB.

Il solaio con spessore 16 + 4 cm assume invece valori inferiori tra 200-800 Hz e valori superiori tra 1000-2000 Hz. L'indice di valutazione presenta valori differenziati con la direzione di misura, ma mediamente risulta analogo al valore di quelli di spessore maggiore.

Le misure hanno inoltre evidenziato la grande importanza dello spessore della soletta: lo strato di copertura determina infatti un notevole aumento della massa superficiale del solaio, tale da influenzare la misura in modo preponderante rispetto alla tipologia del solaio stesso ed alle caratteristiche dimensionali. A conferma di questo si può notare come nel solaio a travetti a traliccio di spessore 20 cm, privo di soletta, l'isolamento al rumore aereo è circa 10-15 dB inferiore rispetto ai corrispondenti solai con soletta di 4 cm;

4) il solaio a travetti in cls precompresso e laterizio è pure stato analizzato per due diverse conformazioni di spessore e di luce (fig. 16). In generale il solaio di luce 540 cm presenta valori più bassi di 1-3 dB in tutto il campo di frequenze analizzato; anche l'indice di valutazione risulta inferiore di circa 1 dB;

5) il solaio a pannelli (fig. 17) è quello che meno risente delle disposizioni dell'orditura. Tuttavia valori leggermente superiori di 1-3 dB alle medio-alte frequenze sono stati ottenuti per i solai con luce inferiore, fatto che non incide sostanzialmente sul valore dell'indice di valutazione (50 dB).

Il confronto tra i valori di isolamento otte-

nuti, per uno stesso solaio, nelle due opposte direzioni (vedere le tabelle degli indici di valutazione) mostra una buona simmetria delle prestazioni di isolamento acustico e; in alcuni casi, una perfetta coincidenza dei due valori che si ottengono invertendo l'ambiente sorgente con quello ricevente.

Le maggiori differenze tra le misure di isolamento effettuate nei due sensi si verificano alle basse frequenze (100÷315 Hz), mentre la maggiore confrontabilità si ha nel campo delle medie frequenze (315÷1250 Hz).

Differenza tra misure in laboratorio ed in opera (R ed R')

Il potere fonoisolante apparente valutato in opera risulta in generale inferiore a quello di laboratorio a causa della trasmissione attraverso le pareti laterali.

Si nota tuttavia come per alcune tipologie di solaio, ad esempio per quella a lastra in cls e laterizio (fig. 18), si abbia (in opera) un maggiore isolamento alle medio-alte frequenze. Tale fatto può essere spiegato sia a causa del minor spessore degli strati di malta

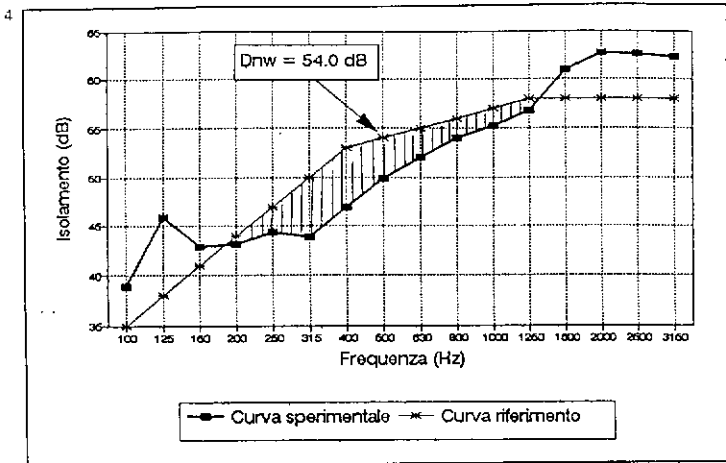
Tabella VII - Indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato Dnw e del potere fonoisolante apparente R'w di solai grezzi in laterocemento (Poviglio)

Loc.	N	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)	sorg. ric.	Dnw	R'w
P	1	Lastra in cls e laterizio	4+16+4	5,00	s/i	54,0	54,5
					i/s	54,0	55,5
P	2	Travetti in cls precompresso e laterizio	16+4	3,60	s/i	50,0	50,5
					i/s	50,0	50,0
P	3	Travetti a traliccio e laterizio	16+4	3,60	s/i	48,5	49,0
					i/s	50,0	50,5
P	4	Travetti a traliccio e laterizio	20	3,60	s/i	38,5	39,0
					i/s	39,0	39,5
P	5	Lastra in cls e polistirolo	4+16+4	5,00	s/i	48,5	49,0
					i/s	48,0	48,5
P	6	Lastra in cls e polistirolo	4+12+4	3,60	s/i	50,0	50,5
					i/s	50,0	50,0

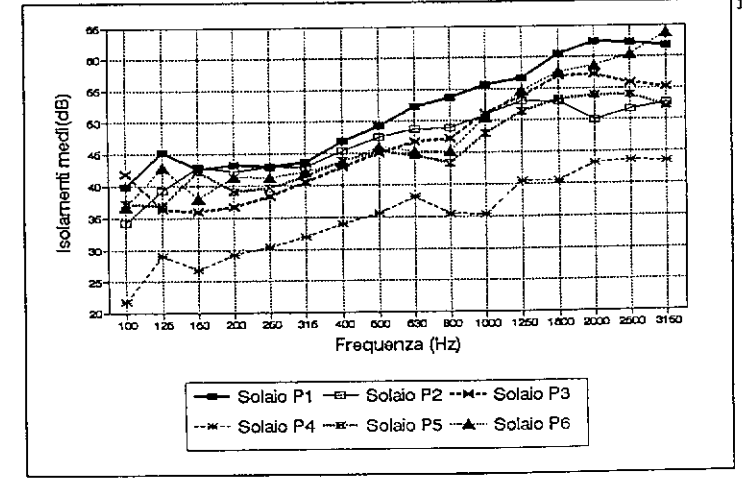
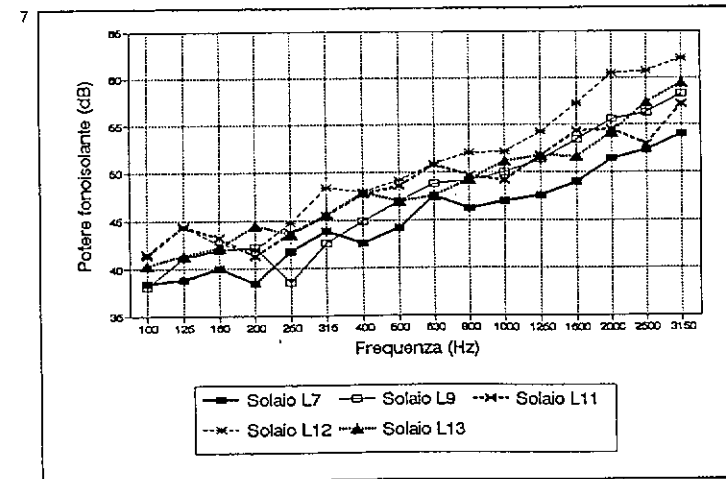
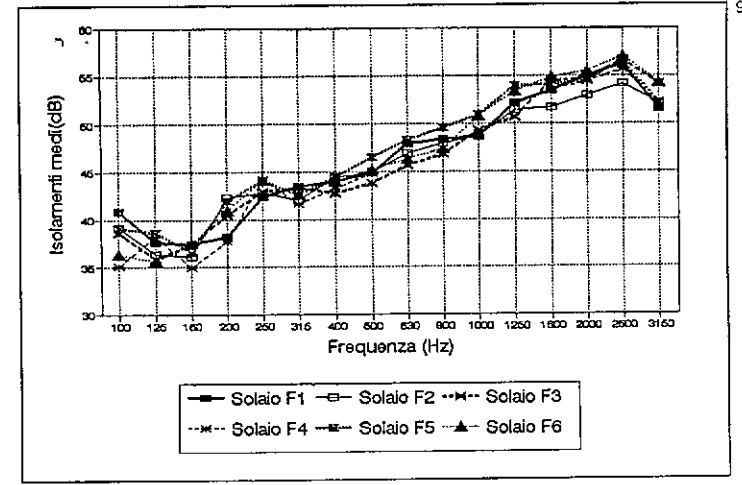
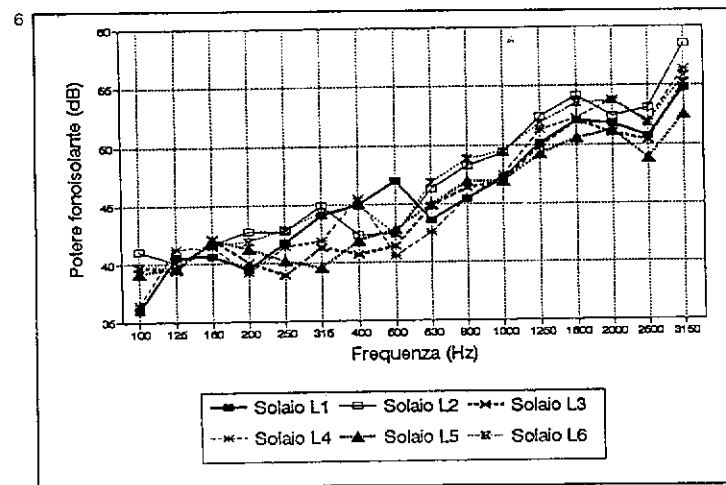
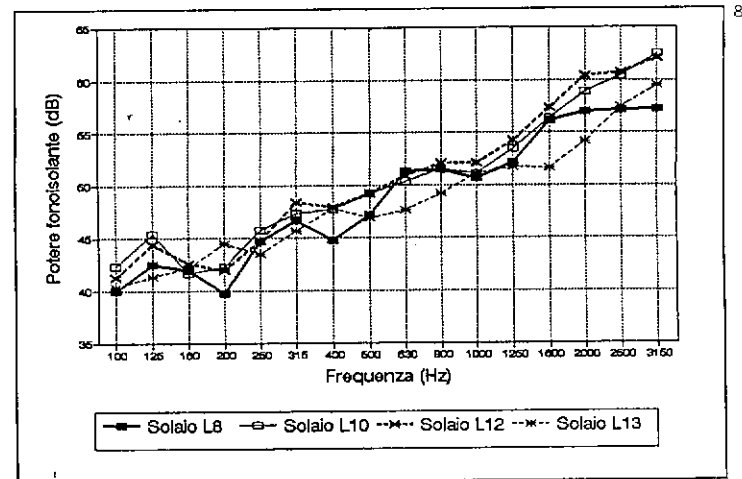
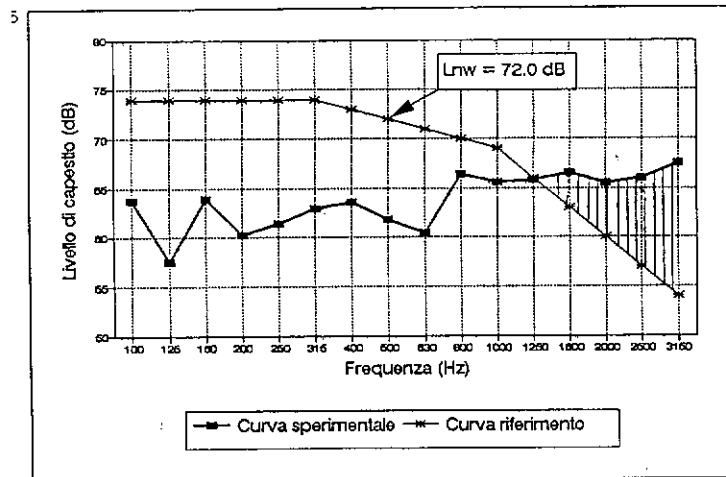
piano superiore = s; piano inferiore = i
 esempio: sorgente superiore-ricevente inferiore = s/i

Tabella VIII - Livello di calpestio normalizzato di solai grezzi in laterocemento: indice di valutazione Lnw e livello ponderato dB (A)

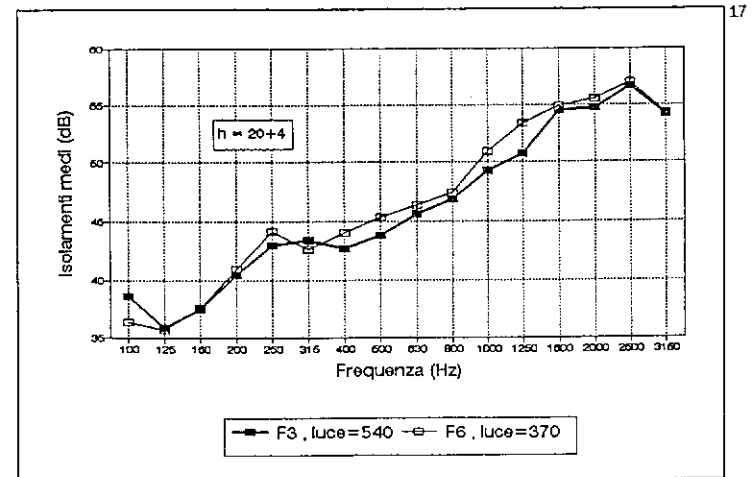
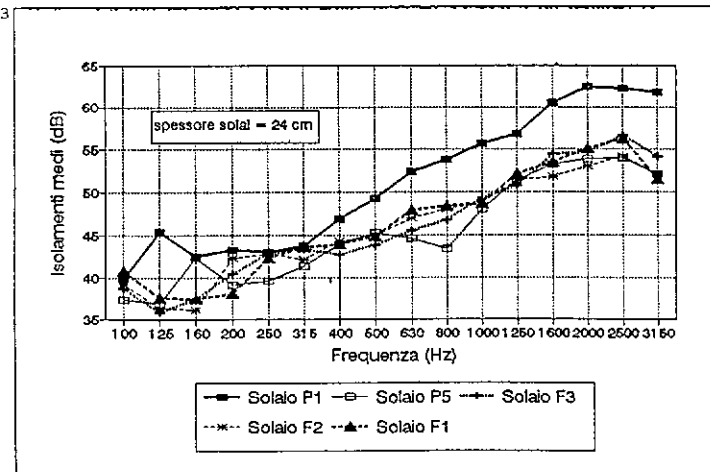
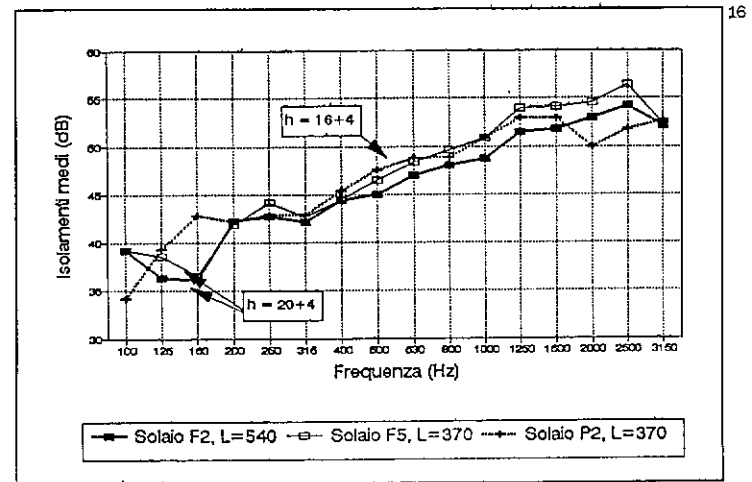
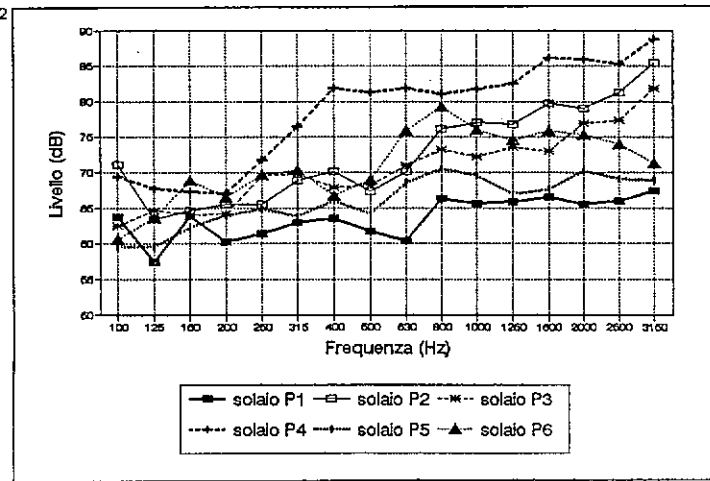
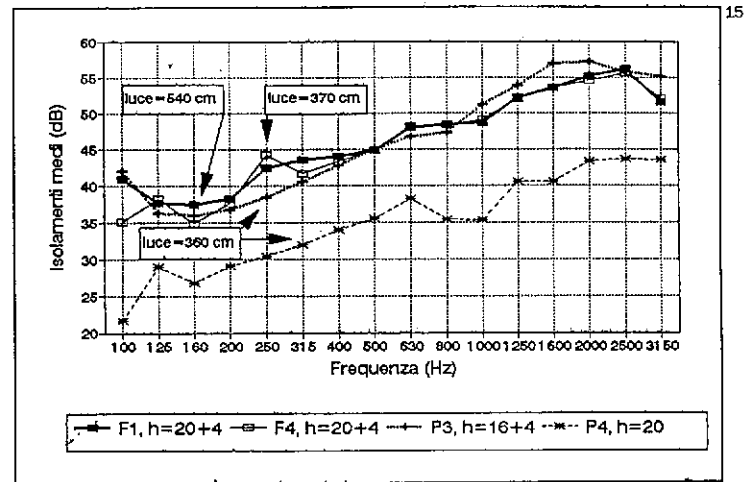
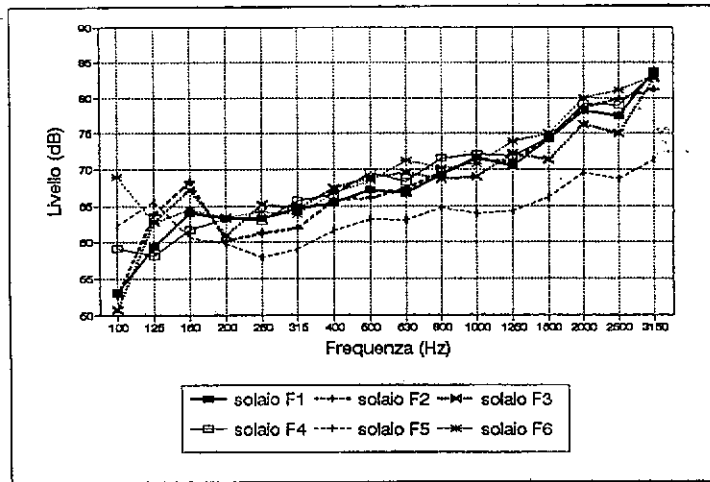
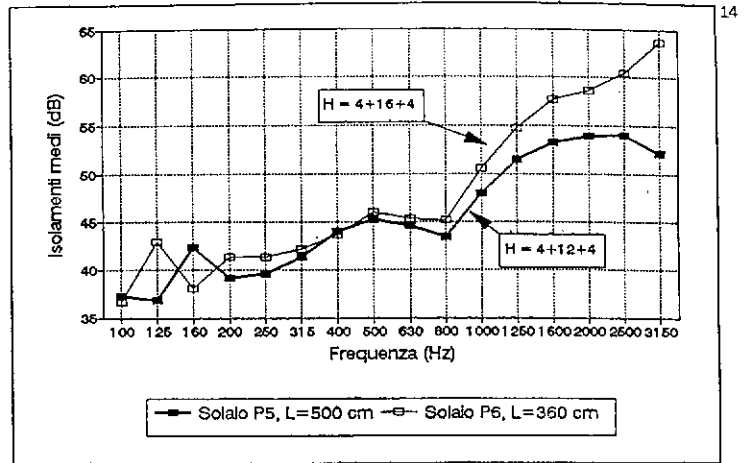
Loc.	N	Tipologia solaio	spessore (cm)	luce (m)	Lnw	dB(A)
P	1	Lastra in cls e laterizio	4+16+4	5,00	72,0	75,8
P	2	Travetti in cls precompresso e laterizio	16+4	3,60	87,0	90,2
P	3	Travetti a traliccio e laterizio	16+4	3,60	83,5	86,4
P	4	Travetti a traliccio e laterizio	20	3,60	92,0	95,0
P	5	Lastra in cls e polistirolo	4+16+4	5,00	75,0	78,8
P	6	Lastra in cls e polistirolo	4+12+4	3,60	80,5	85,1
F	1	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	5,40	84,5	87,4
F	2	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	5,40	84,5	86,8
F	3	Pannello	20+4	5,40	82,5	86,1
F	4	Travetti a traliccio e laterizio	20+4	3,70	85,0	87,8
F	5	Travetti in cls precompresso e laterizio	20+4	3,70	74,5	77,5
F	6	Pannello	20+4	3,70	86,0	88,3

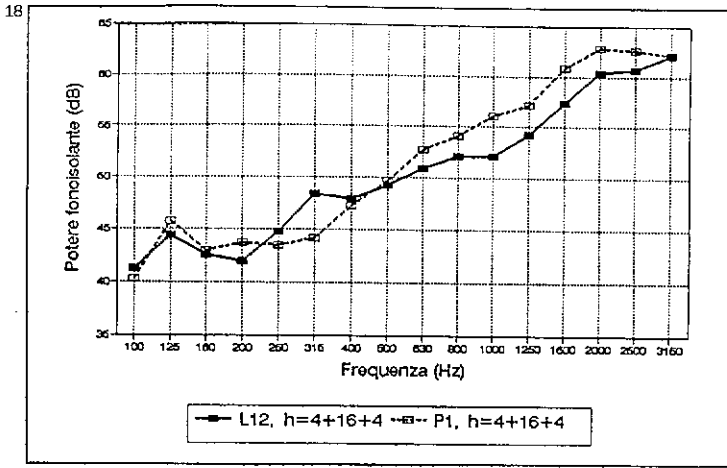


4. Isolamento acustico normalizzato. Determinazione dell'Indice di Valutazione
 5. Livello di calpestio normalizzato. Determinazione dell'Indice di Valutazione.
 6. Potere fonoisolante. Prove di laboratorio - Solai a travetti.
 7. Potere fonoisolante. Prove di laboratorio - Solai a lastra e pannelli.
 8. Potere fonoisolante. Prove di laboratorio - Solai a lastra e pannelli.
 9. Isolamento acustico normalizzato. Fiorenzuola - Solai grezzi.
 10. Isolamento acustico normalizzato. Potiglio - Solai grezzi.

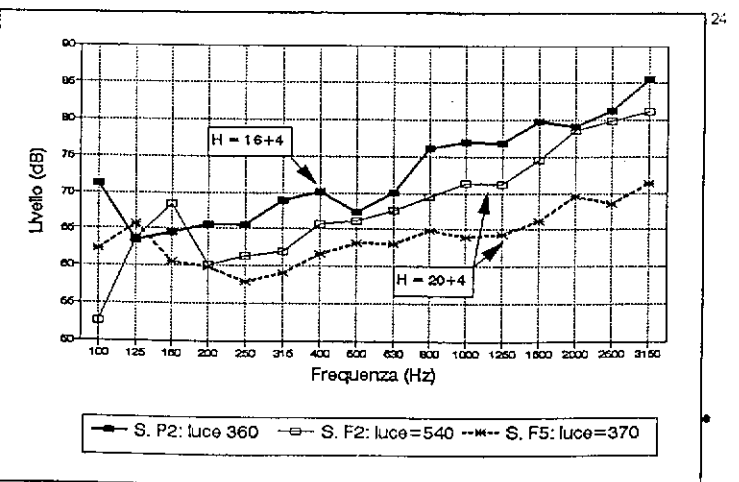
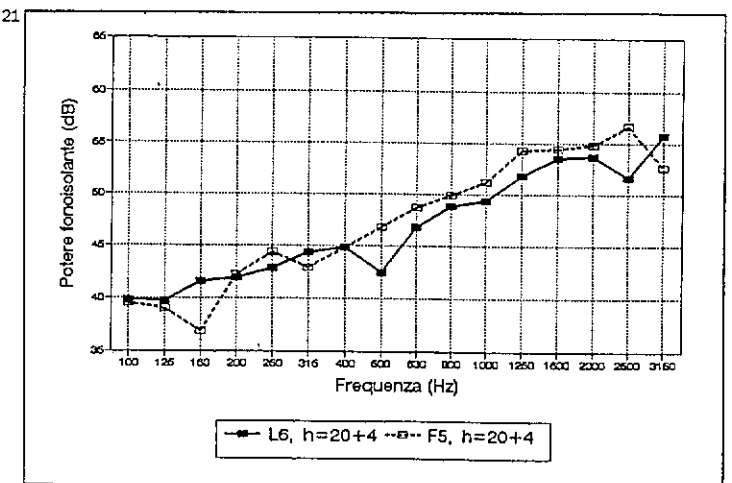
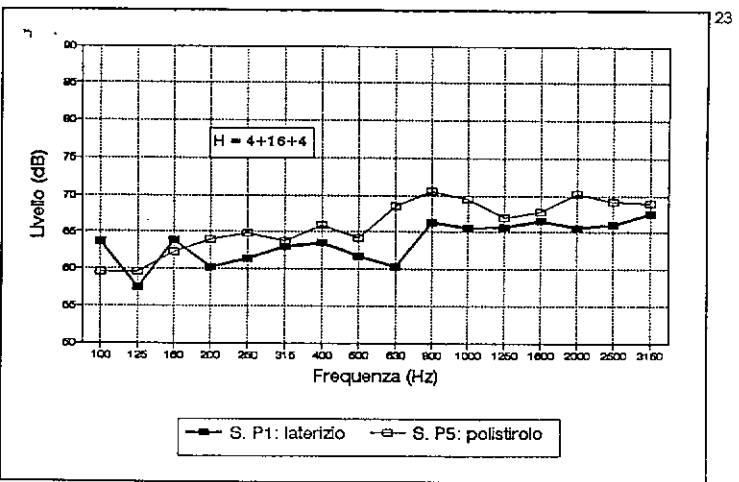
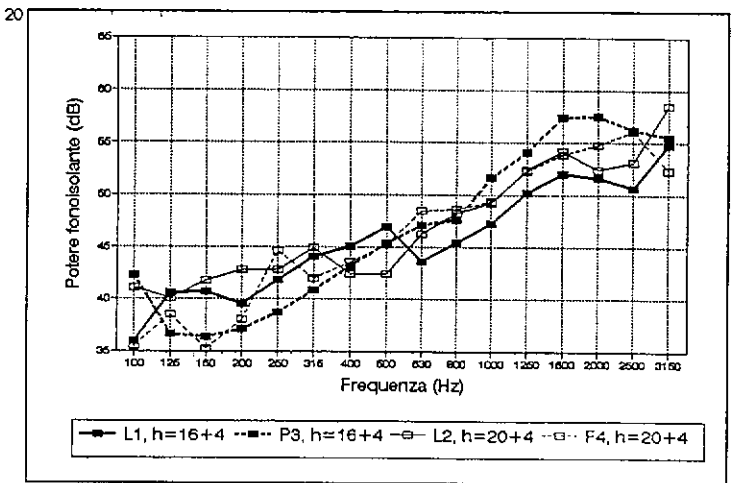
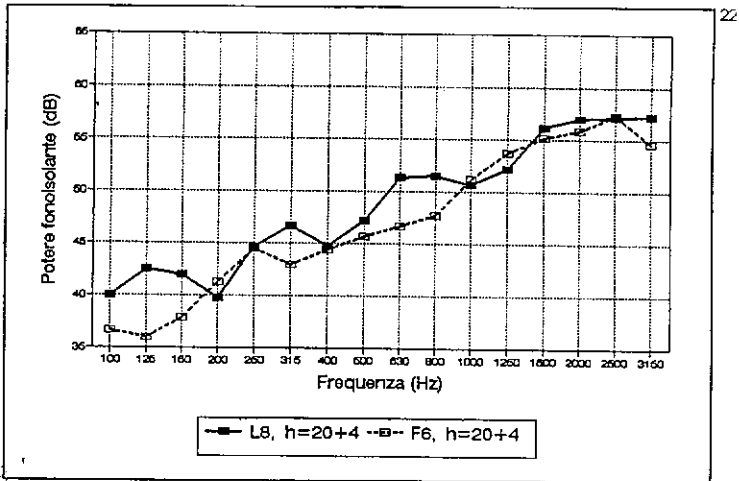
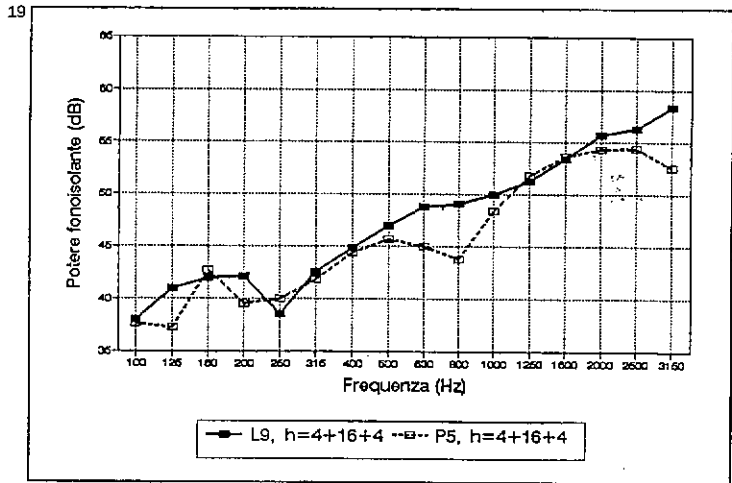


11. Livelli di calpestio normalizzato. Fiorenzuola - Solai grezzi.
12. Livelli di calpestio normalizzato. Paviglio - Solai grezzi.
13. Confronto isolamenti acustici normalizzati tra le tipologie di solaio al grezzo.
14. Confronto isolamenti acustici normalizzati. Lastre in cls e polistirolo.
15. Confronto isolamenti acustici normalizzati. Travetti a traliccio e laterizio.
16. Confronto isolamenti acustici normalizzati. Travetti in cls precompresso e laterizio.
17. Confronto isolamenti acustici normalizzati. Solai a pannelli.





19. *Potere fonoisolante (R e R'). Solai a lastra in cls e polistirolo.*
 20. *Potere fonoisolante (R e R'). Solai a travetti a traliccio.*
 21. *Potere fonoisolante (R e R'). Solai a a travetti in cls precompresso.*
 22. *Potere fonoisolante (R e R'). Solai a pannelli.*
 23. *Livelli di calpestio normalizzato in opera. Solai a lastra: laterizio e polistirolo.*
 24. *Livelli di calpestio normalizzato in opera. Solai a travetti in cls e laterizio.*



nei solai provati in laboratorio (realizzati sul posto), sia per il fatto che il comportamento acustico dei solai in posizione verticale, così come disposti per le prove in laboratorio, risulta diverso e meno efficiente rispetto a quello che compete alla posizione in orizzontale. L'indice di valutazione R_w ottenuto in laboratorio risulta in questo caso inferiore di 1 dB rispetto a quello realizzato in opera.

Il solaio a lastra in cls e polistirolo (fig. 19) mostra la presenza di un fenomeno di coincidenza a 800 Hz nella disposizione in opera, non presente invece in quello realizzato in laboratorio.

I solai a travetti (figg. 20 e 21) presentano in generale un potere fonoisolante, misurato in laboratorio, superiore solo alle basse-medio frequenze, mentre al di sopra di 500-630 Hz sono i solai in opera ad assumere valori più elevati, probabilmente a causa di una non perfetta realizzazione in laboratorio della soletta. L'indice di valutazione tuttavia non risulta molto differenziato nelle due situazioni.

Il solaio a pannelli misurato in laboratorio presenta un indice di valutazione del potere fonoisolante R_w superiore di 1 dB rispetto a quello provato in opera, il quale tuttavia assume un andamento più regolare in tutto il campo di frequenza analizzato (fig. 22).

Confronto tra solai grezzi e solai finiti

La realizzazione definitiva della pavimentazione sui solai in prova presso il cantiere di Fio-renuola ha consentito di verificare l'influenza dell'ulteriore strato di malta e del pavimento sul valore complessivo dell'isolamento acustico per tre tipologie di solaio (travetti a traliccio, travetti in cls precompresso e a pannello). Dal confronto tra gli indici di valutazione D_{nw} si nota in generale un aumento, non uniforme, di 1-3 dB ed anche una differenziazione in funzione della direzione di misura.

L'analisi in frequenza mostra un comportamento analogo per tutte le tipologie: i solai con pavimentazione presentano, rispetto ai corrispondenti solai al grezzo, un generale aumento dell'isolamento alle basse-medio frequenze, mentre una brusca diminuzione si ha invece a partire da 1600 Hz con valori inferiori a quelli dei solai grezzi, per poi risalire a 3150 Hz. Quest'ultimo aspetto è causato dalla maggiore rigidità assunta dai solai con pavimentazione i quali presentano un chiaro effetto di coincidenza alle frequenze di 2000-2500 Hz.

Sui solai finiti influisce anche la dimensione della luce; in modo particolare alle alte frequenze, al di sopra di 1000 Hz, si hanno valori di isolamento acustico decisamente superiori per i solai con luce inferiore.

Isolamento al calpestio

Le prove riguardanti la determinazione dei livelli di rumore da calpestio sono state condotte sui solai al grezzo di entrambi i cantieri.

I risultati ottenuti hanno mostrato in generale un andamento crescente in frequenza a causa della particolare rigidità dei solai, per cui l'impatto dei martelli di acciaio sulla superficie rigida delle solette di calcestruzzo ha eccitato in modo prevalente le alte frequenze.

Gli indici di valutazione ottenuti dal confronto con la curva di riferimento sono risultati conseguentemente molto elevati a riprova di come sia importante nella riduzione della trasmissione del rumore strutturale la presenza di materiale resiliente.

I solai che hanno offerto le migliori prestazioni sono risultati quelli realizzati a lastra, meglio in cls e laterizio ($L_{nw}=72$ dB), rispetto a quelli in cls e polistirolo ($L_{nw}=75$ dB) (vedere fig. 23).

I solai a travetti ed a pannelli presentano in generale valori simili tra loro, non direttamente correlabili alle loro dimensioni, tranne che alle bassissime frequenze. Tra i solai a travetti in calcestruzzo e laterizio (fig. 24) fa eccezione il solaio F5 con bassi livelli di calpestio, fatto probabilmente causato da un migliore isolamento strutturale tra solaio stesso e pareti laterali.

Gli altri solai con travetti a traliccio presentano valori in frequenza molto simili tra loro con indice di valutazione L_{nw} pari a 84-85 dB.

L'isolamento al calpestio assume, nei solai a pannelli, valori molto simili alle basse frequenze, mentre alle alte frequenze si riscontrano sensibili differenze con indice di valutazione maggiore di 4 dB nel caso del solaio con luce inferiore.

Parallelamente alle prove normalizzate tramite macchina di calpestio con martelli in acciaio (come previsto dalle norme UNI e ISO) sono state condotte misure con martelli aventi terminazione in gomma. Tali misure sono consentite dalla norma ISO nei casi in cui i martelli di acciaio possano deteriorare la superficie di pavimentazione. Sottolineando comunque come tale ultima prova non sia standardizzabile (ad esempio le caratteristiche dinamiche della gomma sono deteriorabili nel tempo) essa risulta valida nel caso in cui le caratteristiche di smorzamento del pavimento in fase di impatto con il martello siano prevalenti rispetto a quelli degli stessi martelli. Nei casi in esame le prove condotte con martelli con terminazione in gomma hanno evidenziato una brusca diminuzione dei livelli alle medio-alte frequenze presentando quindi un andamento molto differenziato alle curve ottenute con martelli in acciaio.

Conclusioni

L'indagine sperimentale sulle diverse tipologie costruttive dei solai in laterizio, condotta attraverso misure in laboratorio ed in opera, ha permesso di trarre alcune indicazioni che si ritiene possano essere di interesse per la progettazione e la messa in opera di tali com-

ponenti edilizi.

Innanzitutto si può osservare che, per tutti i solai sottoposti a prova, i valori di isolamento acustico al rumore aereo sono risultati molto elevati: questo è sicuramente dovuto alla notevole massa che caratterizza tali strutture.

I solai realizzati in lastre di calcestruzzo e laterizio hanno fornito i valori più elevati di isolamento acustico, sia in laboratorio (R_w) che in opera ($R'w$).

Quando il solaio viene ordito secondo la luce minore si ottiene, in genere, un valore più elevato dell'isolamento acustico al rumore aereo. Allo stesso risultato si perviene quando si consideri la presenza della soletta: il valore di $R'w$ aumenta notevolmente con lo spessore dello strato di copertura in calcestruzzo.

Come era prevedibile, l'isolamento acustico al rumore aereo aumenta quando il solaio grezzo viene rifinito con il pavimento: l'aumento è comunque limitato a 2-3 dB.

Per quanto riguarda le prove relative alle misure del rumore da calpestio, si può osservare che le prestazioni fornite dalle diverse tipologie costruttive dei solai sono risultate molto limitate. I livelli di calpestio sono infatti molto elevati sia per i solai grezzi che finiti. Il risultato migliore è stato ottenuto ancora dai solai in lastre di calcestruzzo e laterizio che ha fornito un valore di L_{nw} di 72 dB: in tutti gli altri casi esaminati il livello di calpestio è risultato superiore a 80 dB. Appare pertanto evidente che, per garantire buone prestazioni di comfort acustico nei confronti del rumore da calpestio, occorre affidare al pavimento il compito di migliorare le prestazioni acustiche dell'intera struttura di separazione, prevedendo l'impiego di rivestimenti elastici o la realizzazione di pavimenti galleggianti.

L'indagine sperimentale, condotta sia in opera che in laboratorio, ha consentito di mettere in evidenza alcuni aspetti di interesse per l'esecuzione delle prove stesse.

Dal confronto tra i risultati ottenuti in laboratorio ed in opera, relativamente alle misure dell'isolamento acustico al rumore aereo, viene confermata la possibilità di montare il solaio in prova in posizione verticale. Inoltre è stato possibile verificare che, anche nel caso delle misure in opera, si può invertire la posizione delle camere ricevente e trasmittente senza modificare sensibilmente il risultato finale della prova. A questo proposito occorre però precisare che la norma ISO 140/7 prescrive che la camera superiore sia quella trasmittente.

Bibliografia

- [1] ISO 140 - *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements.*
- [2] UNI 8270 - *Misura dell'isolamento acustico in edifici ed elementi di edifici.*
- [3] ISO 717 - *Rating of sound insulation in buildings and of building elements.*
- [4] A. Farina, G. Raffellini - *Potere fonoisolante di murature in laterizio: verifiche sperimentali di laboratorio e considerazioni applicative* - "Costruire in Laterizio", n. 23, 1991.