

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

SEDE AMMINISTRATIVA: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA TECNICA

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

INDIRIZZO FISICA TECNICA

XXIII CICLO

---

STUDIO DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO  
IN LABORATORIO DI MATERIALI PROVENIENTI  
DA RICICLO APPLICATI ALLE STRUTTURE EDILIZIE

---

DIRETTORE DELLA SCUOLA: Ch.mo Prof. Paolo Bariani

COORDINATORE D'INDIRIZZO: Ch.mo Prof. Luisa Rossetto

SUPERVISORE: Ch.mo Prof. Antonino Di Bella

DOTTORANDO: Leonardo Luison



# Riassunto

La conoscenza delle proprietà di isolamento acustico degli elementi edilizi e dei materiali sta assumendo rilevanza sempre maggiore, a causa dei cambiamenti legislativi e normativi degli ultimi anni in materia di requisiti acustici passivi degli edifici in Italia. Il presente lavoro raccoglie le attività sperimentali e gli studi effettuati sull'isolamento dei rumori di calpestio e del rumore aereo condotti su solai e pareti mediante l'utilizzo di specifici materiali, in gran parte provenienti dal riciclo di gomme e fibre sintetiche. In particolare sono state approfondite le problematiche relative al rumore di calpestio di solai, anche in relazione alle caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati. La sperimentazione è stata condotta in un laboratorio privato di nuova costruzione, dotato di una cornice di prova per la misura del potere fonoisolante di pareti e di due solai non rimovibili in calcestruzzo ed in latero-cemento con soppressione delle trasmissioni laterali. Vengono descritte le diverse fasi della costruzione del laboratorio e la procedura adottata per la messa a punto, mediante lo studio e l'applicazione dei metodi normati di qualificazione dei campi sonori delle camere di prova. Gli ambienti del laboratorio sono stati qualificati per quanto riguarda le misure di potere fonoisolante di pareti e dell'isolamento di rumore di calpestio dei due solai; inoltre è stata affrontata la qualificazione per prove di isolamento del rumore aereo dei solai, con qualche limitazione. Lo studio dell'isolamento dei rumori di calpestio su solai è stato affrontato sviluppando diverse tematiche. Sono stati analizzati i comportamenti dei due solai nudi, mettendo in evidenza le differenze dell'emissione sonora in relazione alle caratteristiche costruttive dei due sistemi. È stata analizzata la correlazione tra riduzione di livello di pressione sonora di calpestio e rigidità dinamica dei materiali usati come sottofondo nei pavimenti galleggianti, mettendo in evidenza le criticità legate alla preparazione dei campioni ed alla scelta delle formule previsionali teoriche. Una parte dei dati disponibili sono stati utilizzati per studiare l'influenza della stagionatura del massetto gettato in laboratorio sulla determinazione degli indici di valutazione del livello di rumore di calpestio e di riduzione del rumore di calpestio, per verificare la possibilità di ridurre i tempi di esecuzione delle prove in laboratorio. Sono state studiate le proprietà di isolamento del rumore di calpestio per sistemi di riscaldamento a pavimento dotati di caratteristiche resilienti: i prodotti sono stati misurati sui due solai, per verificare l'influenza della struttura di base ed i metodi di valutazione. Nell'analisi è stata inclusa anche l'influenza della finitura superficiale dei pavimenti. Lo studio sull'isolamento del rumore aereo di pareti è stato affrontato con l'obiettivo di indagare le prestazioni dei materiali in gomma e fibre sintetiche provenienti da riciclo applicati a pareti leggere in cartongesso ed a pareti in muratura rifoderate. Per alcune soluzioni è stata verificata l'influenza di particolari condizioni di posa in opera, ad esempio la presenza di reti impiantistiche.



# Abstract

The acoustic insulation of elements and materials for building construction is becoming more and more important in Italy due to the recent evolutions in the Italian national regulation. This work concerns the experimental studies on sound insulation and reduction of floors and walls, principally using materials made of recycled rubber and synthetic fibrous panels. In particular, impact noise of floors was investigated, taking also into account the mechanical properties of tested materials. The tests were carried out in a new laboratory, built especially for the evaluation of acoustic properties of building elements. The laboratory has an opening, for testing the transmission loss of walls, and two floors: one is a reference concrete slab and the other is a beam and clay block floor with flanking transmission suppression. The steps of the laboratory construction and the procedure adopted for the qualification of sound fields in the rooms are described in this work. The qualification was carried out for transmission loss and impact noise measurements, with some limitations for the airborne sound insulation of floors. The impact noise of floors was studied considering different issues. The two bare floors acoustic behaviour has been analyzed, pointing out the different sound emission, that is due to the technical characteristics of the building elements. The correlation between impact noise reduction and dynamic stiffness of materials used in floating floors has been studied, in particular as regarding the influence of sample preparation and the choice of the predictive formulas. For some materials, repeated measurements have been carried out, to analyze the influence of the screed aging during impact noise reduction laboratory tests, with the aim of reducing the test waiting time. Impact noise reduction of resilient underfloor heating systems has been investigated: the products have been tested on both laboratory floors to check the influence of the base structure and the evaluation methods; different floor finishings have also been tested. Furthermore, airborne sound reduction of walls was studied to improve the knowledge of the influence of recycled materials (in particular rubber and synthetic fibrous panels) on the acoustic performance of gypsum and covered brick walls. For some of the samples, the influence of electric equipments was also studied.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>9</b>
<b>1 Il rumore di calpestio</b>	<b>13</b>
1.1 Caratteristiche meccaniche dei materiali applicati ai pavimenti galleggianti	13
1.1.1 Rigidità dinamica . . . . .	13
1.1.2 Spessore . . . . .	15
1.1.3 Cedimento nel lungo periodo . . . . .	16
1.1.4 Comportamento a compressione . . . . .	17
1.1.5 Previsione della rigidità dinamica nel lungo periodo . . . . .	18
1.2 Previsione del rumore di calpestio in laboratorio su un solaio nudo omogeneo	19
1.2.1 Definizione e generazione del rumore di calpestio . . . . .	19
1.2.2 Metodi di calcolo normati . . . . .	21
1.3 Isolamento acustico di materiali e sistemi applicati ai solai . . . . .	22
1.3.1 Sistemi e materiali per l'isolamento dei rumori impattivi . . . . .	22
1.3.2 Misura in laboratorio del rumore di calpestio e della riduzione del rumore di calpestio . . . . .	27
1.3.3 Correlazione tra rigidità dinamica e prestazioni isolanti di un sistema a massetto galleggiante . . . . .	28
<b>2 Il Laboratorio Isolgomma</b>	<b>31</b>
2.1 Presentazione . . . . .	31
2.2 Progettazione e realizzazione del laboratorio . . . . .	33
<b>3 Qualificazione del laboratorio</b>	<b>45</b>
3.1 Tempi di riverberazione degli ambienti di misura . . . . .	45
3.2 Misure di potere fonoisolante di partizioni verticali secondo la norma UNI EN ISO 140-3 . . . . .	47
3.2.1 Posizioni ottimali della sorgente di rumore . . . . .	47
3.2.2 Posizioni ottimali di microfono . . . . .	54
3.2.3 Potere fonoisolante massimo . . . . .	57
3.3 Misure di rumore di calpestio sui solai secondo UNI EN ISO 140-6 . . . . .	62
3.3.1 Misure di livello di rumore di calpestio di solai secondo UNI EN ISO 140-6: solaio in calcestruzzo armato . . . . .	62
3.3.2 Misure di livello di rumore di calpestio di solai secondo UNI EN ISO 140-6: solaio in laterocemento . . . . .	69
3.4 Misure di potere fonoisolante di solai secondo UNI EN ISO 140-3 . . . . .	76

3.4.1	Solaio in calcestruzzo armato . . . . .	76
3.4.2	Solaio in laterocemento . . . . .	84
3.5	Considerazioni sulle metodologie adottate . . . . .	92
<b>4</b>	<b>Studio dei materiali per l'isolamento dei rumori impattivi su solai in laboratorio</b>	<b>95</b>
4.1	Caratterizzazione dei solai di base . . . . .	96
4.2	Influenza dello stadio di maturazione del massetto sull'isolamento del rumore di calpestio . . . . .	104
4.3	Correlazione tra rigidità dinamica dei materiali e isolamento dei solai . .	108
4.4	Rumore di calpestio e sistemi di riscaldamento a pavimento applicati a solai in laterocemento ed in calcestruzzo . . . . .	125
<b>5</b>	<b>Studio dei materiali per l'isolamento del rumore aereo di pareti</b>	<b>139</b>
5.1	Applicazione dei materiali riciclati in gomma e fibra di poliestere a strutture seriali leggere . . . . .	139
5.1.1	Considerazioni generali . . . . .	139
5.1.2	Pareti leggere a singola struttura . . . . .	144
5.1.3	Pareti leggere a struttura doppia . . . . .	149
5.2	Applicazione dei materiali riciclati in gomma e fibra di poliestere in rifoderatura di strutture in muratura . . . . .	162
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>167</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>173</b>

# Introduzione

Questo lavoro raccoglie le attività sperimentali svolte all'interno del laboratorio di acustica edilizia di proprietà di Isolgomma S.r.l., società che ha finanziato il dottorato di ricerca durante il periodo 2008-2010. Le principali tematiche affrontate riguardano lo studio delle proprietà acustiche degli elementi edilizi, in relazione alle caratteristiche meccaniche e progettuali; in particolare è stato analizzato il rumore di calpestio di solai nudi ed isolati mediante l'uso di specifici materiali. Gran parte dei materiali utilizzati ai fini dello studio provengono dal riciclo di gomme e poliesteri, ma lo studio è stato esteso ad altre soluzioni presenti sul mercato, a titolo di confronto, ma soprattutto per non limitare l'applicazione delle metodologie adottate a poche tipologie di prodotti.

La prima sezione riassume le principali conoscenze teoriche riguardanti lo studio dei sistemi e dei materiali nell'ambito della radiazione sonora di solai sollecitati da forze impulsive. Vengono analizzate le principali proprietà meccaniche dei materiali utilizzati come sottofondo nei pavimenti galleggianti: la rigidità dinamica, lo spessore sotto carico, la sua variazione nel tempo ed il comportamento in compressione, con particolare attenzione ai parametri che maggiormente ne influenzano le prestazioni durante l'utilizzo. Si riporta quindi l'analisi del generatore di rumore di calpestio normalizzato, un dispositivo ISO adottato nella maggior parte dei paesi, tra cui l'Italia; con tale descrizione si vuole mettere in evidenza come lo studio dell'isolamento dai rumori impattivi necessita di uno speciale strumento di generazione di rumore e come la conoscenza delle forze in gioco sia essenziale per una corretta analisi teorica e comprensione dei fenomeni; la verifica dei requisiti delle strutture si basa su misure di livelli di pressione sonora non differenziali ma assoluti, pertanto i modelli previsionali dipendono dal meccanismo di generazione della forza.

Viene proposto quindi il metodo di calcolo delle prestazioni acustiche dei solai secondo le norme EN 12354, principale strumento normativo previsionale attualmente esistente. Sono messi in evidenza i principali parametri strutturali e dinamici responsabili del comportamento vibroacustico dei solai, come il tempo di riverberazione strutturale ed il fattore di radiazione dei solai.

Viene riportata un'approfondita analisi, basata principalmente sui lavori di Vér [77] e Cremer [9], che prende in considerazione i sistemi di riduzione del rumore di calpestio di maggiore utilizzo, ovvero i materiali resilienti applicati sulla superficie della pavimentazione ed i materiali usati come sottofondo per pavimenti galleggianti, evidenziando le differenze di comportamento in relazione all'entità dell'impatto derivante dal sistema di generazione ed alle modalità di trasmissione delle forze attraverso gli strati. Per quanto riguarda l'utilizzo del pavimento galleggiante, si prende in considerazione la differenza tra sistemi localmente reagenti (*locally reacting*) ed a comportamento risonante (*resonantly*

*reacting*), poiché il meccanismo di riduzione produce attenuazioni di diversa entità e permette di spiegare perché l'attenuazione in frequenza ha un andamento pressoché rettilineo (in scala logaritmica) con pendenza di 30-40 dB/decade.

Si riportano quindi brevemente le modalità di misura in laboratorio delle proprietà isolanti per quanto riguarda i solai ed i materiali applicati.

Nel capitolo 2 viene presentato il laboratorio in cui si è svolta la sperimentazione durante il triennio. Il laboratorio è stato progettato con la collaborazione dell'Università degli Studi di Padova e consente la misura dell'isolamento del rumore di calpestio su due solai non rimovibili in calcestruzzo ed in laterocemento secondo la norma UNI EN ISO 140-6, la misura della riduzione del rumore di calpestio di materiali utilizzati come rivestimenti di pavimentazioni secondo la norma UNI EN ISO 140-8 e la misura dell'isolamento del rumore aereo di partizioni verticali secondo la norma UNI EN ISO 140-3, grazie alla particolare disposizione delle camere di prova. Vengono descritte brevemente le diverse fasi della costruzione, con particolare attenzione alla realizzazione dei due solai; infatti proprio la disponibilità del secondo solaio in laterocemento consente di effettuare confronti tra le diverse strutture di base e tra i materiali applicati nei pavimenti galleggianti.

Il capitolo 3 è dedicato alla qualificazione degli ambienti di misura del laboratorio. Le metodologie applicate sono state ricavate dalle norme UNI EN ISO 140-3 e UNI EN ISO 140-1 per quanto riguarda le prove di isolamento acustico di pareti, mentre per l'isolamento dei rumori di calpestio è stata adottata una procedura *ad hoc*, mutuata dagli stessi metodi. Vengono analizzati i campi sonori degli ambienti a partire dai valori del tempo di riverberazione, acquisiti al termine della costruzione come dato preliminare alla qualificazione. Quindi viene analizzata la scelta dei punti di sorgente e microfono, a partire da un numero molto elevato di punti disposti ed identificati su di un reticolo progettato per massimizzare il numero di punti nello spazio disponibile, nel pieno rispetto dei vincoli sulle mutue distanze stabiliti dalle normative.

Si riportano quindi le metodologie sperimentali relative alla misura delle prestazioni massime misurabili per pareti a base laterizio e cartongesso, per l'identificazione del massimo potere fonoisolante  $R'_{max}$  di laboratorio.

Mentre le norme stabiliscono procedure abbastanza dettagliate per le pareti, per il rumore di calpestio dei solai il processo di qualificazione degli ambienti di misura è meno noto, pertanto viene proposta una metodologia basata sulla valutazione degli scarti, rispetto al valore medio, di misure di rumore di calpestio su solaio nudo per molte misurazioni, con posizioni di generatore e microfono distribuite omogeneamente negli spazi disponibili; la procedura è stata applicata ad entrambi i solai non rimovibili del laboratorio.

Infine viene riproposto il processo di qualificazione del campo sonoro degli ambienti, relativamente alle misure di isolamento del rumore aereo per i due solai, con qualche limitazione.

Nel capitolo 4 si riportano le principali campagne di misura condotte durante il triennio sui due solai a disposizione. Una prima sezione è dedicata allo studio delle caratteristiche di emissione sonora in relazione alle formulazioni teoriche presenti nelle norme per la previsione delle prestazioni acustiche dei solai in opera, a partire dalle caratteristiche

degli elementi (EN 12354). L'analisi viene effettuata su entrambi i solai, mettendo in luce la criticità nell'applicazione delle formule, valide in genere per strutture omogenee (solai in calcestruzzo), ma di difficile utilizzo su strutture più complesse, come il solaio in laterocemento. Per questa tipologia di solaio vengono infine prese in considerazione alcune formule sperimentali ricavate da diversi gruppi di ricerca negli ultimi anni, applicandole al solaio di laboratorio.

Viene proposto successivamente uno studio condotto all'inizio dell'attività di laboratorio, volto alla verifica dei tempi di maturazione dei massetti per misure di riduzione di pressione sonora di calpestio per pavimenti galleggianti. L'intento del lavoro è quello di indagare la possibilità di accorciare i tempi di attesa delle misure di riduzione di rumore secondo la norma UNI EN ISO 140-8 (tre settimane per massetti tradizionali), mantenendo inalterata la possibilità di effettuare misure su superfici di almeno 10 m<sup>2</sup> realizzate direttamente sul campione.

La sezione successiva è dedicata allo studio della rigidità dinamica e della riduzione di pressione sonora di calpestio su solaio in calcestruzzo e la mutua dipendenza delle due grandezze fisiche. Le formule disponibili attualmente in letteratura sono di semplice applicazione, ma richiedono una conoscenza molto accurata delle condizioni di misura e di allestimento dei campioni, nonché delle problematiche metrologiche associate alle misure. Si sottolinea inoltre il pericolo di sovrastimare le proprietà dei materiali disponibili in commercio, una volta posti in esercizio. Ai fini di questa analisi sono stati presi in considerazione sedici materiali, il cui studio ha richiesto quasi due anni di sperimentazione su solaio in calcestruzzo.

L'ultima sezione del capitolo riporta uno studio condotto sull'isolamento al calpestio di sistemi integrati di riscaldamento a pavimento e riduzione dei rumori di calpestio, applicati al solaio in laterocemento, anche in funzione della finitura superficiale (massetto nudo, rivestito di piastrelle ceramiche e di parquet prefinito flottante su strato disaccoppiante). Lo studio è nato da una collaborazione tra Isolgomma S.r.l., produttrice dello strato resiliente, ed una ditta produttrice di sistemi di riscaldamento a pavimento, che ha fornito gli impianti e curato la posa in laboratorio. L'analisi è stata estesa anche al solaio in calcestruzzo ed è stata fonte di studio delle proprietà dei materiali applicati a strutture diverse e delle criticità relative all'utilizzo dei descrittori delle grandezze rilevate.

Il capitolo 5 contiene una rassegna degli studi effettuati sull'isolamento acustico di pareti contenenti materiali provenienti in gran parte da riciclo di gomme granulari e fibre polimeriche. Una prima campagna di misure è stata condotta sulle pareti leggere in cartongesso singole e doppie, mentre uno studio successivo è stato effettuato sulla rifodera di pareti in muratura (in particolare su parete in mattoni forati da 12 cm). Tali studi sono stati condotti parallelamente alla sperimentazione sui solai ed hanno permesso la ricerca di soluzioni e sistemi per l'isolamento acustico utilizzando materiali di riciclo, considerando anche problematiche relative alle esigenze produttive e all'industrializzazione di prodotto.



# Capitolo 1

## Il rumore di calpestio

### 1.1 Caratteristiche meccaniche dei materiali applicati ai pavimenti galleggianti

#### 1.1.1 Rigidity dinamica

Tra le caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati come sottofondo nei pavimenti galleggianti, la rigidità dinamica è quella che maggiormente ne determina le prestazioni isolanti. La norma UNI EN 29052-1 [73] definisce tale grandezza come il rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico di un campione di materiale resiliente, secondo la seguente formulazione:

$$s' = \frac{F/S}{\Delta d} \quad (1.1)$$

in cui  $s'$  [N/m<sup>3</sup>] è la rigidità dinamica per unità di superficie,  $S$  è l'area del provino,  $F$  è la forza dinamica che agisce perpendicolarmente sul provino,  $\Delta d$  è la variazione dinamica dello spessore di materiale resiliente che ne risulta. Il dispositivo di prova consiste in un sistema di rilevazione di forza e accelerazione su di una piastra di carico metallica posta sopra il campione in esame. Il campione, di dimensioni 20 mm x 20 mm, deve essere posizionato su una superficie piana e regolare; la piastra di carico, del peso di 8 kg (peso per unità di superficie 200 kg/m<sup>2</sup>), deve essere posizionata sopra il materiale, interponendo uno strato di intonaco di gesso di Parigi (solfato di calcio emiidrato (CaSO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O), dello spessore di circa 5 mm, per consentire al peso di distribuirsi uniformemente su tutto il materiale. La misurazione vera e propria viene effettuata quando è terminato il processo di asciugatura dello strato di gesso, ovvero dopo tre-quattro giorni dall'applicazione. Se il materiale è a cellula chiusa, il perimetro del campione in corrispondenza della superficie di appoggio deve essere sigillato mediante l'applicazione di grasso di vaselina tecnica o *petroleum jelly*. Nelle figure 1.1 e 1.2 sono rappresentate le condizioni di allestimento dei campioni. La rigidità dinamica apparente si ricava dalla misurazione della frequenza di risonanza, ottenuta dalla valutazione del modulo della funzione di trasferimento, tra accelerazione rilevata e forza impressa, del sistema massa-molla, in cui l'elemento elastico è rappresentato dal materiale in esame e la massa dalla piastra di carico. Tale quantità viene definita apparente, in quanto non tiene conto del contributo allo spostamento dinamico dato dalla vibrazione dell'aria intrappolata all'interno di alcune tipologie di materiali, specialmente i materiali fibrosi dotati di elevata porosità. In figura 1.3 è riportato

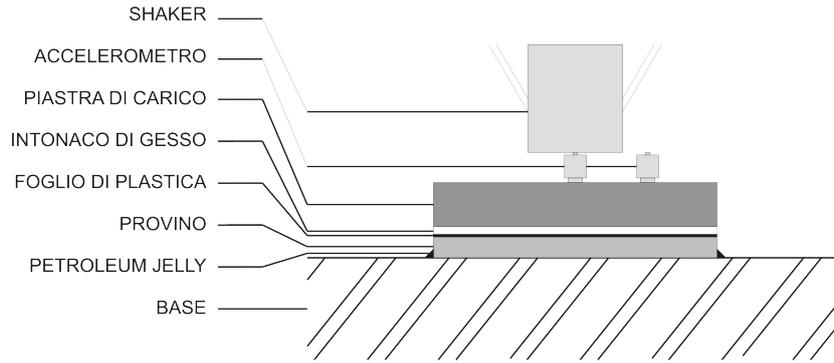


Figura 1.1: schema di allestimento di un provino per la misura della rigidità dinamica dei materiali utilizzati sotto massetto.

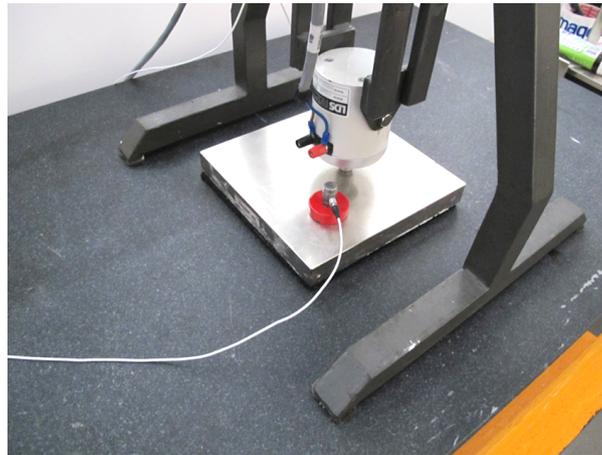


Figura 1.2: dispositivo per la misura della rigidità dinamica dei materiali.

un esempio di funzione di risposta in frequenza<sup>1</sup>. La sollecitazione viene impressa alla piastra di carico tramite uno shaker e l'accelerazione viene rilevata mediante un accelerometro posizionato in prossimità del punto di applicazione della forza (centro piastra). I valori di forza impressi tramite l'attuatore sono molto bassi, compresi tra 0.1 N e 0.8 N; la frequenza di risonanza deve essere estrapolata a forza nulla, per evitare errori derivanti da caratteristiche elastiche non lineari del materiale [18].

La rigidità dinamica si calcola in base alla frequenza di risonanza, secondo la relazione

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t (f_r)^2 \quad (1.2)$$

in cui  $s'_t$  è la rigidità dinamica apparente per unità di superficie in  $[\text{N}/\text{m}^3]$ ,  $m'_t$  è la massa per unità di superficie gravante sul materiale (comprendente i contributi della piastra di carico e dello strato di gesso),  $f_r$  è la frequenza di risonanza misurata. Per materiali porosi (ad esempio lane minerali, schiume a celle aperte) è importante che l'aria sia libera di entrare e uscire dal provino attraverso il bordo; per questo motivo l'applicazione del

<sup>1</sup>La piastra di carico ha dimensioni tali (200 mm x 200 mm x 26 mm) per cui la risonanza modale di flessione fondamentale è situata molto al di sopra della frequenza di risonanza del sistema per un buon materiale isolante, ovvero a circa 1500 Hz [18].

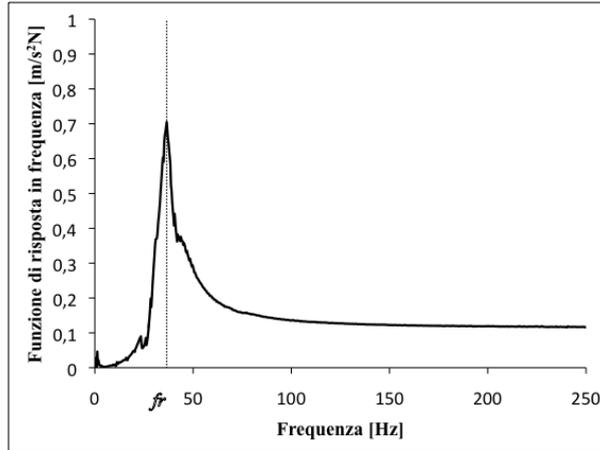


Figura 1.3: misura della rigidità dinamica: funzione di risposta in frequenza del sistema massa-molla.

film protettivo e dell'intonaco di gesso deve essere condotta in maniera molto accurata e precisa. Il contributo dell'aria contenuta nella porosità aperta del materiale viene valutato in base alla resistenza al flusso, determinata in conformità alla norma UNI EN 29053 [74]. Nel caso in cui la resistenza al flusso sia elevata, l'apporto dell'aria è trascurabile. Se invece è compresa tra  $100 \text{ kPa s}^2/\text{m}$  e  $10 \text{ kPa s}^2/\text{m}$ , la rigidità dinamica globale è la somma dei due termini  $s'_t$  e  $s'_a$  (rigidità dinamica dell'aria).

$$s' = s'_t + s'_a \quad (1.3)$$

Il termine  $s'_a$  può essere calcolato a partire dal valore di porosità del materiale, attraverso la relazione

$$s'_a = \frac{p_0}{d\epsilon} \quad (1.4)$$

in cui  $p_0$  [MPa] è la pressione atmosferica,  $d$  [mm] è lo spessore del materiale e  $\epsilon$  [-] è la porosità del provino. Se la resistenza al flusso d'aria è inferiore a  $10 \text{ kPa s}^2/\text{m}$  ed il termine  $s'_a$  (calcolato tramite la relazione 1.4) risulta basso rispetto a  $s'_t$ , allora  $s'_a$  può essere trascurato, altrimenti potrebbe risultare difficoltoso individuare il corretto valore della rigidità dinamica globale del provino.

### 1.1.2 Spessore

Lo spessore di un materiale utilizzato come sottofondo per pavimentazioni galleggianti deve essere misurato secondo una procedura normata, in quanto non si conosce a priori l'entità del cedimento in seguito all'applicazione di un carico statico. La norma di riferimento è UNI EN 12431 [72]; essa prevede l'applicazione di un ciclo di carico (figura 1.4) su di un provino di dimensioni  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  e la contemporanea misura della variazione di spessore. Dalla prova si ricavano i valori  $d_L$ ,  $d_F$  e  $d_B$ :  $d_L$  è lo spessore del provino dopo l'applicazione di un carico di  $0,25 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$ ,  $d_F$  è lo spessore del provino dopo l'applicazione di un carico di  $2 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$  e  $d_B$  è lo spessore del provino dopo l'applicazione di un carico di  $50 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$  ed il ritorno al carico di  $2 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$ . La quantità fisica di interesse è  $d_F - d_B$ , indice della cedevolezza del materiale in seguito

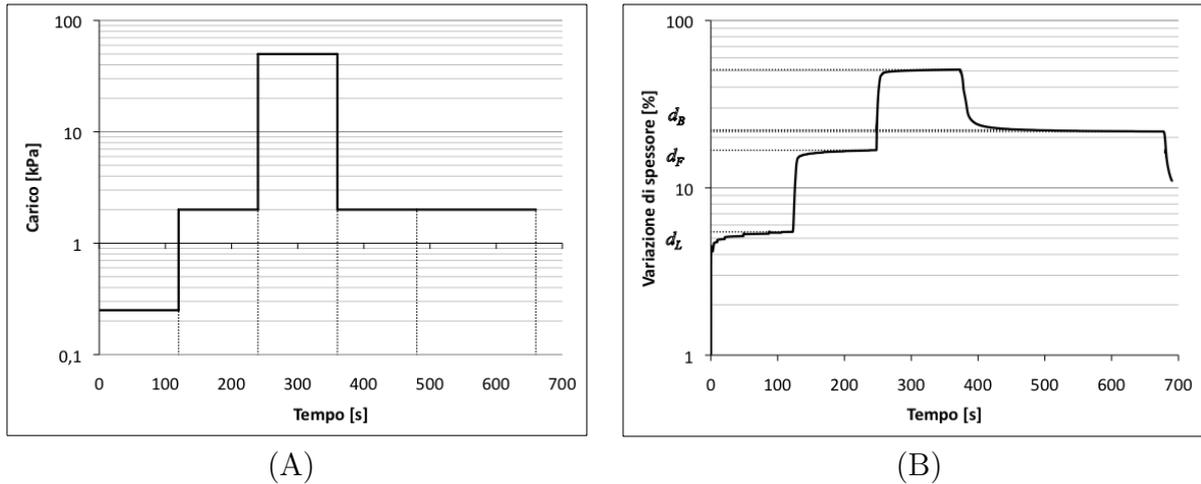


Figura 1.4: misura dello spessore di un materiale utilizzato come sottofondo per pavimentazione galleggiante: (A) ciclo di carico; (B) esempio di variazione di spessore in percentuale e valori notevoli.

all'azione di un carico elevato accidentale ed al ritorno alle condizioni ordinarie di carico. Si può ipotizzare che maggiore è la quantità  $d_F - d_B$ , maggiore sarà lo schiacciamento del materiale sotto massetto, con conseguente perdita di prestazioni dovuta alla diminuita capacità di deformarsi dinamicamente.

### 1.1.3 Cedimento nel lungo periodo

Il cedimento nel lungo periodo di un materiale utilizzato come sottofondo nei pavimenti galleggianti viene valutato mediante i metodi della norma UNI EN 1606 [69]. Tale norma prevede la misura dello spessore del materiale nell'arco di tempo di almeno 90 giorni, sotto l'azione di un determinato carico statico, che provoca un cedimento di tipo viscoso o *creep* (figura 1.5). Mediante formule di regressione contenute nell'appendice A della stessa norma si può prevedere il comportamento del materiale fino a cinque anni. La procedura di prova prevede l'applicazione di un peso morto (di peso inferiore al 10% rispetto al peso da utilizzare durante la misura) e la misura dello spessore tramite comparatore a quadrante con precisione allo 0,01 mm, rispetto ad una base di riferimento. Quando il dispositivo di misura si è stabilizzato si procede all'applicazione del carico ed al monitoraggio ad intervalli di tempo prestabiliti della variazione di spessore; l'entità del carico deve essere decisa secondo particolari criteri, in particolare considerando le caratteristiche elastiche del materiale misurate secondo la norma UNI EN 826 [68]. In figura 1.6 è raffigurato un dispositivo per la misura dei cedimenti nel tempo. La variazione di spessore dovuta al cedimento per *creep* potrebbe avere un'influenza non trascurabile sulle caratteristiche dinamiche del materiale sul lungo periodo. Per questo motivo la rigidità dinamica potrebbe essere influenzata da questa variazione.

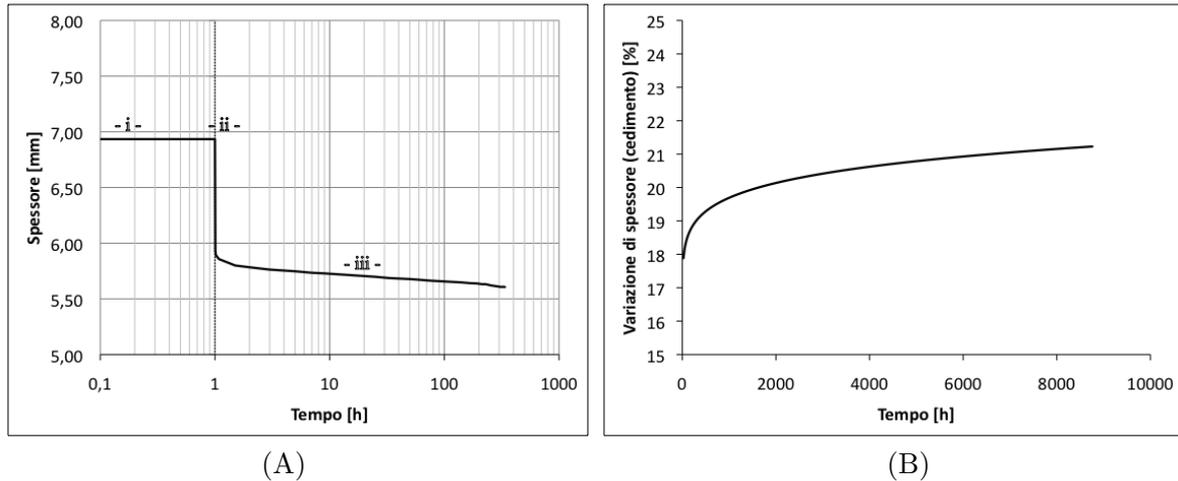


Figura 1.5: (A) misura della variazione di spessore di un materiale utilizzato come sottofondo per pavimenti galleggianti nel lungo periodo (*creep*): - i - peso morto, - ii - applicazione del carico, - iii - cedimento del provino; (B) Risultato di una prova di *creep*: variazione percentuale rispetto allo spessore originario (esempio).



Figura 1.6: dispositivo per la rilevazione dei cedimenti nel tempo dei materiali utilizzati come sottofondi in pavimenti galleggianti.

### 1.1.4 Comportamento a compressione

Il comportamento a compressione dei materiali utilizzati come sottofondo per pavimenti galleggianti può essere valutato mediante la norma UNI EN 826 [68], che prevede l'ottenimento di una curva sforzo-deformazione in fase di compressione del provino. Tra i valori usati per il confronto delle caratteristiche elastiche dei materiali è importante la resistenza a compressione  $\sigma_m$  [kPa], definita come

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A_0} \quad (1.5)$$

in cui  $F_m$  [N] è la forza massima e  $A_0$  [mm<sup>2</sup>] è l'area iniziale del provino, qualora la rottura del materiale sopraggiunga prima di una deformazione del 10%. Se tale valore di deformazione viene superato, esso viene stabilito come riferimento per il valore di

sollecitazione a compressione al 10% di deformazione relativa, definita come

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0} \quad (1.6)$$

in cui  $F_{10}$  è il valore della forza corrispondente ad una deformazione relativa del 10%. I risultati possono essere utilizzati per la definizione del carico in fase di studio del comportamento allo scorrimento viscoso dei materiali (v. sez. 1.1.3). In figura 1.7 è riportato un dispositivo per la misura di forza e cedimenti in compressione, mentre in figura 1.8 è riportata una curva sforzo-deformazione.



Figura 1.7: dispositivo per la misura di curve di carico (sforzo-deformazione) in compressione.

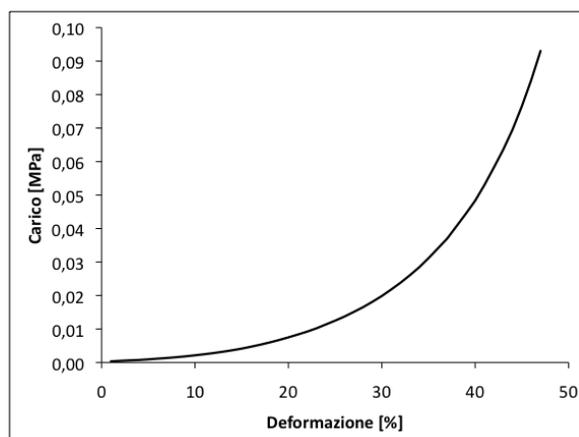


Figura 1.8: risultato di una prova di compressione secondo UNI EN 826 (esempio).

### 1.1.5 Previsione della rigidità dinamica nel lungo periodo

Recenti lavori hanno messo in luce la necessità di includere l'effetto dell'azione del carico statico nel lungo periodo, correggendo il valore della rigidità dinamica misurata, median-

te un fattore che tenga conto della variazione dello spessore del materiale nel tempo [40] [44]. A tal proposito si possono utilizzare i risultati di prove di variazione di spessore e di scorrimento viscoso a compressione per materiali usati come sottofondi in pavimenti galleggianti, misurati secondo le norme [72] e [69] rispettivamente. Adottando le metodologie discusse nel paragrafo 1.1.2, si può definire quindi un valore massimo per la rigidità dinamica, peggiorativo rispetto al dato misurato, tramite la seguente relazione:

$$s'_{MAX} = (2\pi f_{ris})^2 m' \frac{d_F}{d_B} \quad (1.7)$$

in cui  $d_F$  e  $d_B$  sono gli spessori del materiale misurati in accordo alla norma UNI EN 12431 [72]. Analogamente si potrebbe includere una valutazione del cedimento nel lungo periodo mediante le tecniche esposte nella sezione 1.1.3. Il metodo è da ritenersi valido, qualora il modulo di elasticità del materiale sia costante con l'applicazione del carico.

## 1.2 Previsione del rumore di calpestio in laboratorio su un solaio nudo omogeneo

### 1.2.1 Definizione e generazione del rumore di calpestio

Esistono diversi descrittori del rumore di calpestio dei solai. In ambito europeo, la maggioranza dei paesi utilizza il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_n$  [dB] (misure di laboratorio) ed  $L'_n$  [dB] (misure in opera) ed il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato mediante il tempo di riverberazione  $L'_{nT}$ , che in alcuni casi viene preferito nelle misure in opera, rispetto ad  $L'_n$ . Di seguito si riporta la definizione dei due termini:

$$L_n = L_i + 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (1.8)$$

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \quad (1.9)$$

in cui  $L_i$  è la media spazio-temporale dei livelli di pressione sonora misurati in ambiente ricevente, quando sul solaio agisce un generatore normalizzato di rumore di calpestio,  $A$  è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, calcolata mediante la relazione  $A = 0,16V/T$  ( $V$  [m<sup>3</sup>] è il volume dell'ambiente e  $T$  [s] è il tempo di riverberazione),  $A_0$  è l'area di assorbimento equivalente di riferimento pari a 10 m<sup>2</sup> e  $T_0$  è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 s (la formulazione di  $L'_n$  è analoga a quella di  $L_n$ ). La necessità di stabilire un dispositivo di generazione di rumore di calpestio standard, è legata al fatto che la misura non è differenziale, ma richiede l'acquisizione del solo livello di rumore in ambiente ricevente. Pertanto la sorgente del rumore impattivo deve consistere in un dispositivo atto a garantire una forza costante e riproducibile sulla pavimentazione. Le attuali norme ISO richiedono di adottare il dispositivo normalizzato composto da cinque martelli di acciaio del peso di 0,5 kg l'uno, disposti in fila e che sollecitano la pavimentazione con una frequenza di dieci colpi al secondo (figura 1.9). In altre aree geografiche, in particolare in Asia orientale, sono molto utilizzati dispositivi di diverso tipo, composti da un corpo pesante (palla di gomma o ruota gommata) che viene lasciato cadere da un'altezza standardizzata e nell'ambiente ricevente si registra



Figura 1.9: dispositivo ISO per la generazione di rumore di calpestio normalizzato.

il livello istantaneo massimo: tale metodologia alternativa mette in vibrazione il solaio in maniera differente, per cui anche il descrittore del rumore è diverso. Per quanto riguarda il generatore normalizzato ISO, poiché se ne conoscono in maniera approfondita i meccanismi di funzionamento, esso è modellizzabile in maniera abbastanza precisa [77][3]. Il problema fisico è la sollecitazione di una piastra mediante una successione di forze impulsive. Tali forze sono rappresentabili mediante un infinito numero di componenti discrete in frequenza (serie di Fourier) di ampiezza  $F_n$ , date da

$$F_n = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T_r} t\right) dt \quad (1.10)$$

in cui  $f(t)$  è la funzione nel dominio del tempo del treno di impulsi,  $n = 1, 2, 3, \dots$  e  $T_r$  è il periodo. Quando la durata dell'impatto dei martelli è breve (ad esempio sul calcestruzzo), l'ampiezza delle componenti  $F_n$  può essere approssimata mediante la relazione

$$F_n \approx \frac{2m}{T_r} \sqrt{2gh} \text{ [N]} \quad (1.11)$$

in cui  $m$  è la massa del martello,  $h$  è l'altezza di caduta e  $g$  è l'accelerazione di gravità. Il valore quadratico medio dello spettro di forza  $S_f$  è pari a

$$S_f = \frac{4}{T_r} m^2 gh = 4 \text{ [N}^2/\text{Hz]} \quad (1.12)$$

ed il valore quadratico medio della forza agente sul solaio è, in bande d'ottava,

$$F_{rms}^2 = \frac{4}{\sqrt{2}} f \text{ [N}^2\text{]} \quad (1.13)$$

ed in bande di  $1/3$  d'ottava

$$F_{rms}^2 = \frac{4(2^{1/3} - 1)}{\sqrt{2^{1/3}}} f = 4 \cdot 0.232 \cdot f \text{ [N}^2\text{]} \quad (1.14)$$

A partire dai valori della forza così calcolata e dell'ammittanza puntuale del solaio (considerato come una piastra infinita equivalente), si può ricavare la potenza introdotta dal

generatore di rumore di calpestio. Mediante un bilancio di potenza incidente sul solaio e irradiata, si può dimostrare [77] che il livello di rumore di calpestio in bande di ottava risulta

$$L_n = 10 \log_{10} \frac{4(\rho c)^2 \sigma_{rad}}{5.1 p_{ref}^2 A_0 \rho_p^2 c_L h^3 \eta} \text{ [dB]} \quad (1.15)$$

in cui  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità dell'aria,  $c$  [m/s] la velocità del suono in aria,  $\sigma_{rad}$  [-] è il fattore di radiazione del solaio,  $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  [Pa] è la pressione sonora di riferimento,  $\rho_p$  [kg/m<sup>2</sup>] è la densità del solaio,  $c_L$  [m/s] è la velocità delle onde longitudinali nel materiale del solaio,  $h$  [m] è lo spessore del solaio ed  $\eta$  [-] è il fattore di smorzamento globale del solaio. Di conseguenza il livello di potenza sonora irradiata dal solaio, in bande d'ottava, è dato approssimativamente dalla relazione

$$L_W \approx 10 \log_{10} \frac{\rho c \sigma_{rad}}{5.1 \rho_p^2 c_L \eta h^3} + 120 \text{ [dB]} \quad (1.16)$$

## 1.2.2 Metodi di calcolo normati

Le norme della serie UNI EN 12354 [70] e [71] forniscono un metodo per stimare il livello di rumore di calpestio normalizzato su di un solaio nudo omogeneo in laboratorio. Il rumore irradiato dal solaio viene descritto a livello teorico dalla relazione

$$L_n = L_F + 10 \log \frac{\Re(Y)\sigma}{m'} + 10 \log T_s + 10.6 \quad (1.17)$$

in cui  $L_n$  [dB] è il livello di rumore di calpestio normalizzato in frequenza,  $L_F$  [dB] è il livello di forza del generatore di calpestio,  $\Re(Y)$  [m<sup>2</sup>/kg] è la parte reale della mobilità del solaio,  $\sigma$  è il fattore di radiazione per le onde libere di flessione,  $m'$  [kg/m<sup>2</sup>] è la massa per unità di superficie del solaio e  $T_s$  è il tempo di riverberazione strutturale del solaio. Se il generatore di calpestio è il dispositivo normato descritto nella UNI EN ISO 140-6 [61], la 1.17 assume approssimativamente la seguente formulazione:

$$L_n \approx 155 - 30 \log m' + 10 \log T_s + 10 \log \sigma + 10 \log \frac{f}{f_{ref}} \quad (1.18)$$

in cui  $f$  [Hz] è la frequenza centrale delle bande di 1/3 d'ottava e  $f_{ref}$  è la frequenza di riferimento di 1000 Hz. Il valore del livello di rumore di calpestio normalizzato si può quindi calcolare a partire da valori noti della massa per unità di superficie, del tempo di riverberazione strutturale e del fattore di radiazione del solaio. In assenza di questi dati, le appendici B e C della norma [70] forniscono un metodo per stimare  $T_s$  e  $\sigma$ . In particolare, il tempo di riverberazione strutturale si può calcolare tramite la relazione (valida per solaio di massa inferiore a 800 kg/m<sup>2</sup>):

$$T_s = \frac{2.2}{f \eta_{tot}} \quad (1.19)$$

in cui  $\eta_{tot}$  è il fattore di smorzamento totale, conseguenza delle dispersioni interne, delle dispersioni dovute alla radiazione sonora e delle dispersioni al perimetro dell'elemento. Per un solaio installato in laboratorio, il fattore di smorzamento totale può essere approssimato tramite l'espressione:

$$\eta_{tot} \approx \eta_{int} + \frac{m'}{485 \sqrt{f}} \quad (1.20)$$

in cui  $\eta_{int}$  è il fattore di smorzamento interno del materiale, di valore 0,01. Esistono invece diverse formulazioni per il fattore di radiazione, relativo alle onde flessionali libere o forzate:

$$\sigma_F = 0.5[\ln(k_0\sqrt{l_1l_2}) - \Lambda] \quad (1.21)$$

in cui  $\sigma_F$ , fattore di radiazione le per onde forzate, soddisfa anche la condizione  $\sigma_F \leq 2$  e  $\Lambda$  è dato dall'espressione:

$$\Lambda = -0.964 - \left(0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1}\right) \ln \frac{l_2}{l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2} \quad (1.22)$$

in cui  $k_0$  [rad/m] è il numero d'onde, dato dalla

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (1.23)$$

Alternativamente, il fattore di radiazione delle onde flessionali libere, si può calcolare tramite le seguenti tre relazioni:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad (1.24)$$

$$\sigma_2 = 4l_1l_2 \left(\frac{f}{c_0}\right)^2 \quad (1.25)$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi f(l_1 + l_2)}{16c_0}} \quad (1.26)$$

in cui la frequenza critica  $f_c$ , dipendente dallo spessore  $t$  dell'elemento, dalla velocità delle onde longitudinali  $c_L$  e dalla velocità del suono in aria  $c_0$  ( $\approx 340$  m/s) è calcolata come

$$f_c = \frac{c_0^2}{1.8c_L t} \quad (1.27)$$

mentre  $l_1$  ed  $l_2$  sono le dimensioni del solaio. La scelta del più adeguato fattore di radiazione è da effettuarsi a seconda della frequenza critica del solaio, secondo la procedura esposta nella norma stessa (vedi [70], appendice B).

## 1.3 Isolamento acustico di materiali e sistemi applicati ai solai

### 1.3.1 Sistemi e materiali per l'isolamento dei rumori impattivi

La capacità di un solaio di attenuare i rumori impattivi può essere migliorata attraverso opportune scelte progettuali e tecniche. Come illustrato da Vér [77], i due principali metodi per incrementare l'isolamento sono l'utilizzo di una finitura resiliente sulla superficie della pavimentazione (ad esempio moquette o linoleum), oppure la progettazione di un sistema a pavimento galleggiante, nel quale il massetto di ripartizione dei carichi viene separato dal solaio di base mediante l'interposizione di un materiale resiliente.

L'applicazione di un rivestimento resiliente consente di ridurre il rumore di calpestio di

un solaio, poiché vengono fortemente alterate l'entità della forza e la durata dell'impulso trasmessa dal generatore al substrato. Lo studio dell'entità della riduzione associata a questo tipo di materiali si fonda sull'ipotesi che l'impedenza dello strato superficiale sia inferiore a quella del substrato. In tal caso il martello penetra parzialmente all'interno del materiale e la sua posizione può essere descritta tramite l'equazione differenziale

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - sx = 0 \quad (1.28)$$

in cui  $x$  è la posizione e  $t$  è l'istante temporale;  $s$  è la rigidità dinamica del materiale sotto l'azione del martello del generatore normalizzato, per cui la sua formulazione è

$$s = \frac{EA_h}{h} \quad (1.29)$$

in cui  $E$  è il modulo di Young dinamico,  $A_h$  è l'area del martello implicata nell'impatto e  $h$  è lo spessore originario del materiale. Per la durata dell'impatto ( $0 < t < \pi/\omega_0$ ), la velocità della superficie del materiale resiliente in funzione del tempo  $v(t)$  è

$$v(t) = v_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1.30)$$

pertanto la forza trasmessa nello stesso lasso di tempo viene descritta dalla funzione

$$f(t) = m \frac{dv}{dt} = v_0 \omega_0 m \sin(\omega_0 t) \quad (1.31)$$

e di conseguenza l'ampiezza della serie di Fourier della forza è data da

$$F'_n = F_n \frac{\pi}{4} \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \frac{\sin \beta}{\beta} \right) \quad (1.32)$$

con  $\alpha = \frac{\pi}{2}(1 - n\frac{f_r}{f_0})$  e  $\beta = \frac{\pi}{2}(1 + n\frac{f_r}{f_0})$ . La riduzione del rumore di calpestio  $\Delta L_n$ , per i materiali resilienti da rivestimento, si può calcolare mediante la relazione

$$\Delta L_n = 20 \log \frac{|F_n|}{|F'_n|} = 20 \log \left( \frac{4/\pi}{\sin \alpha/\alpha + \sin \beta/\beta} \right) \text{ [dB]}. \quad (1.33)$$

Tali valori di riduzione si applicano a partire dalla frequenza caratteristica  $f_0$ , che dipende dalle caratteristiche del materiale resiliente mediante la relazione

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_h E}{mh}} \text{ [Hz]}. \quad (1.34)$$

L'equazione 1.33 può essere riscritta, mediante opportune semplificazioni, nel seguente modo

$$\Delta L_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1 - \frac{nf_r}{f_0}}{\cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{nf_r}{f_0} \right)} \right| \text{ [dB]} \quad (1.35)$$

ed una sua rappresentazione grafica è riportata in figura 1.10 (A). Come messo in evidenza dall'immagine, la riduzione di livello di calpestio presenta un andamento medio che cresce di 40 dB ogni decade. Generalmente i picchi non sono facilmente identificabili nelle misurazioni a causa dell'utilizzo della rappresentazione per bande di frequenza (ottava o

$1/3$  d'ottava). In ascissa è riportato il rapporto tra la frequenza di interesse e la frequenza caratteristica del sistema. Pertanto, mediante l'utilizzo di materiali differenti, la curva si trasla a seconda della capacità del materiale stesso di attenuare l'urto. Nel grafico di figura 1.10 (B) sono riportati esempi di attenuazioni di ipotetici materiali diversi, aventi frequenze caratteristiche diverse. Le curve di attenuazione ottenute in tal modo riguardano materiali teorici a smorzamento nullo e sono valide per solai strutturali molto rigidi. L'effetto dello smorzamento è quello di attenuare i picchi, rendendo la funzione continua. Per i calcoli pratici, si può assumere che il comportamento dei materiali possa essere rappresentato dalla retta di pendenza 40 dB.

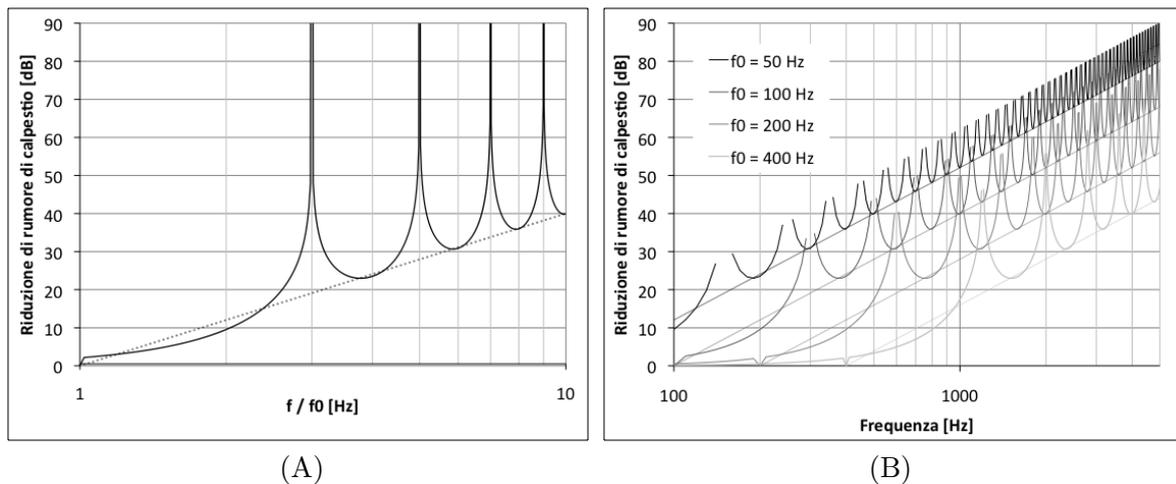


Figura 1.10: (A) andamento teorico della riduzione di rumore di calpestio fornita da uno strato resiliente posto sulla pavimentazione del solaio; si riporta il valore del  $\Delta L_n$  in funzione della frequenza normalizzata sulla frequenza caratteristica del sistema a smorzamento nullo; (B) Andamento teorico della riduzione di rumore di calpestio fornita da uno strato resiliente posto sulla pavimentazione del solaio; si riporta il valore del  $\Delta L_n$  in funzione della frequenza per diversi materiali ipotetici a smorzamento nullo (i picchi di risonanza sono stati eliminati per migliorare la leggibilità).

L'isolamento delle vibrazioni e del rumore di origine strutturale mediante sistemi a pavimento galleggiante consente di ottenere forti riduzioni di trasmissione nell'ambiente ricevente, soprattutto alle basse frequenze. Il problema può essere studiato come un sistema massa-molla in cui la massa è rappresentata dal massetto e la molla dal materiale anticalpestio. Secondo quanto teorizzato da Cremer [9] ed in seguito approfondito da Vér [77] [3], i pavimenti galleggianti possono essere suddivisi in due categorie: pavimenti *locally reacting* e *resiliently reacting*.

### Pavimento galleggiante *locally reacting*

Un pavimento galleggiante *locally reacting* (reagente localmente) gode della caratteristica che la forza impattiva impressa dal martello sul massetto viene trasmessa al solaio strutturale nelle immediate vicinanze del punto di sollecitazione, senza che si crei un campo vibratorio risonante all'interno del massetto. In questo caso, l'attenuazione di rumore di

calpestio  $\Delta L$  si può stimare mediante la semplice relazione

$$\Delta L_n = 20 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_1} \right)^2 \right] \approx 40 \log \left( \frac{f}{f_1} \right) \text{ [dB]} \quad (1.36)$$

in cui  $f_1$  è la frequenza di risonanza del sistema solaio-materiale-massetto, valutabile conoscendo la rigidità dinamica del materiale, secondo la relazione

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ [Hz]} \quad (1.37)$$

in cui  $s'$  è la rigidità dinamica del materiale e  $m'$  il peso per unità di superficie del massetto galleggiante.

### **Pavimento galleggiante *resonantly reacting***

Il modello di calcolo proposto da Vér [77] si basa sull'analisi di un pavimento galleggiante montato su travetti orizzontali, per cui i punti di appoggio sono discreti ed in numero finito, a differenza dei più comuni materiali applicati come sottofondo per pavimenti galleggianti. Le ipotesi su cui si basa il calcolo sono le seguenti: la potenza dell'impatto sul massetto è esprimibile mediante la formula  $W_{in} = F_{rms}^2 \cdot Y_1$ , poiché il massetto è un corpo rigido e l'impatto ha una durata molto breve; non c'è correlazione tra il movimento del massetto in corrispondenza dei travetti; non c'è propagazione di rumore aereo nello spazio compreso tra le due piastre rigide (massetto e solaio strutturale), l'impedenza dei travetti è quella di una molla pura; la potenza viene trasmessa dalla piastra superiore alla piastra inferiore tramite i travetti e non tramite l'aria contenuta; l'impedenza puntuale di entrambe le piastre si può esprimere mediante l'impedenza di una piastra infinita; il movimento del massetto non è influenzato dalla presenza del solaio di base, a causa dello scarso accoppiamento per frequenze sopra la risonanza; la potenza trasmessa attraverso i travetti dalle forze è preponderante rispetto alla potenza trasmessa dai momenti. Per calcolare la forza e la potenza trasmessa dal massetto al solaio strutturale ci si avvale della risoluzione del seguente sistema

$$\begin{cases} F = (v_1 - v_2)Z \\ v_1 = v_0 - Y_1 F \\ v_2 = Y_2 F \end{cases} \quad (1.38)$$

che porta all'espressione della forza in funzione delle ammittanze e delle impedenze, come

$$F = v_0 \frac{Z}{1 + ZY_1 + ZY_2} = v_0 \frac{Z + |Z|^2(Y_1 + Y_2)}{1 + (Z + Z^*)(Y_1 + Y_2) + |Z|^2(Y_1 + Y_2)^2} \quad (1.39)$$

in cui  $F$  è la forza trasmessa,  $v_0$  è la velocità di picco dell'onda incidente,  $Z$  è l'impedenza di un singolo travetto ( $Z \approx s/j\omega$ , con  $s$  rigidità dinamica del travetto),  $v_1$  e  $v_2$  sono le ampiezze del picco di velocità dell'onda sul travetto in corrispondenza al massetto e al solaio di base,  $Y_1$  e  $Y_2$  sono le ammittanze delle piastre equivalenti infinite per le due piastre e  $Z^*$  è l'impedenza complessa coniugata. La potenza trasmessa dal massetto al solaio di base si calcola tramite la relazione

$$W_{12} = \frac{1}{2} \Re(F F^* Y_2) = \langle v_0^2 \rangle_x K_{12}(\omega) \quad (1.40)$$

in cui  $\langle v_0^2 \rangle_x = v_0^2/2$  è la media spaziale della velocità normale del massetto e  $K_{12}(\omega)$  è dato dall'espressione, calcolata in funzione delle quantità precedentemente descritte,

$$K_{12}(\omega) = \frac{|Z|^2 Y_2}{1 + 2\Re\{Z\}(Y_1 + Y_2) + |Z|^2(Y_1 + Y_2)^2} . \quad (1.41)$$

Il bilancio di potenza per il massetto e per il solaio di base è dato dalle seguenti due equazioni:

$$\begin{cases} W_{in} = W_1^d + W_{12} - W_{21} \\ W_{12} = W_2^d + W_{21} \end{cases} \quad (1.42)$$

in cui  $W_1^d$  è la potenza dissipata nel massetto per il suo smorzamento interno,  $W_2^d$  è la potenza dissipata nel solaio di base a causa della trasmissione delle vibrazioni nelle strutture laterali,  $W_{12}$  e  $W_{21}$  sono le potenze trasmesse dal massetto al solaio di base e viceversa. Le equazioni 1.42 possono essere riscritte mediante i termini fisici del sistema in esame, come

$$\begin{cases} F_{rms}^2 Y_1 = \langle v_1^2 \rangle \rho_{s1} \omega \eta_1 A + \langle v_1^2 \rangle K_{12}(\omega) n' A - \langle v_2^2 \rangle K_{12}(\omega) \frac{Y_1}{Y_2} n' A \\ \langle v_1^2 \rangle K_{12}(\omega) n' A = \langle v_2^2 \rangle \rho_{s2} \omega \eta_2 A + \langle v_2^2 \rangle K_{21}(\omega) n' A . \end{cases} \quad (1.43)$$

Risolviendo il sistema ed esplicitando  $\langle v_2^2 \rangle$ , si ottiene:

$$\langle v_{2c}^2 \rangle = \frac{F_{rms}^2 Y_1}{\rho_{s2} \omega \eta_2 A} \left[ 1 + \frac{\rho_{s1} \eta_1 Y_1}{\rho_{s2} \eta_2 Y_2} + \frac{\rho_{s1} \omega \eta_1}{K_{12}(\omega) n'} \right]^{-1} \quad (1.44)$$

in cui  $\langle v_{2c}^2 \rangle$  è la velocità quadratica media del solaio completo (*composite floor*). Poiché la velocità quadratica media del solaio di base, qualora fosse sollecitato direttamente dal generatore di rumore di calpestio normalizzato, sarebbe

$$\langle v_{2s}^2 \rangle = \frac{F_{rms}^2 Y_2}{\rho_{s2} \omega \eta_2 A} \quad (1.45)$$

allora il valore della riduzione del rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L_n$  diventa

$$\Delta L_n = 10 \log_{10} \frac{\langle v_{2s}^2 \rangle}{\langle v_{2c}^2 \rangle} = \left[ \frac{Y_2}{Y_1} \left( 1 + \frac{\rho_{s1} Y_1 \eta_1}{\rho_{s2} Y_2 \eta_2} + \frac{\rho_{s1} \omega \eta_1}{K_{12}(\omega) n'} \right) \right] . \quad (1.46)$$

Una semplificazione della formula 1.46 avviene se il solaio di base ed il massetto sono fatti dello stesso materiale. In tal caso

$$\Delta L_n = 10 \log_{10} \left[ \frac{h_1^2}{h_2^2} \left( 1 + \frac{h_2 \eta_1}{h_1 \eta_2} + \frac{\rho_s \omega \eta_1}{K_{12}(\omega) n'} \right) \right] . \quad (1.47)$$

Secondo Vér, in un sistema a massetto galleggiante di questo tipo, il termine  $K_{12}$  è proporzionale all'inverso del quadrato della frequenza, secondo la relazione  $K_{12} \approx (s/\omega)^2 Y_2$  al di sopra di una certa frequenza ( $s'$  è la rigidità dinamica di un singolo travetto) e, nel caso in cui il fattore di smorzamento sia indipendente dalla frequenza, lo spettro della riduzione di rumore  $\Delta L$  in funzione della frequenza ha una pendenza di 30 dB/decade. Con queste approssimazioni, la riduzione di livello di rumore di calpestio prende la forma

$$\Delta L_n(\omega) \approx 10 \log_{10} \frac{2.3 c_{L1} h_1 \eta_1 n' \omega^3}{\omega_1^4} \text{ [dB]} \quad (1.48)$$

in cui  $c_{L1}$  è la velocità di propagazione delle onde longitudinali,  $h_1$  è lo spessore del massetto galleggiante,  $\eta_1$  è il fattore di smorzamento del massetto,  $n'$  è il numero di travetti per unità di area e  $\omega_1$  è la frequenza di risonanza fondamentale del massetto galleggiante, ricavata tramite la relazione

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{sn'}{\rho_{s1}}}. \quad (1.49)$$

Secondo tale analisi, la riduzione di rumore  $\Delta L_n$  migliora se aumenta il fattore di smorzamento  $\eta_1$  del massetto galleggiante e la curva di riduzione ha una pendenza di 30 dB/decade.

A seconda delle caratteristiche del sistema a pavimento galleggiante, i valori sperimentali di  $\Delta L_n$  dovrebbero essere compresi tra curve di pendenza 30 dB/decade e 40 dB/decade, a seconda che il massetto sviluppi un comportamento risonante o localmente reagente.

### 1.3.2 Misura in laboratorio del rumore di calpestio e della riduzione del rumore di calpestio

Le norme di riferimento per la misura del rumore di calpestio sono le UNI EN ISO 140-6 (livello di rumore di calpestio in laboratorio) [61], UNI EN ISO 140-7 (livello di rumore di calpestio in opera) [62] e UNI EN ISO 140-8 (riduzione di livello di rumore di calpestio su solaio di riferimento normalizzato in laboratorio) [63]. Per misurare il livello di rumore di calpestio, si posiziona il generatore di rumore di calpestio normalizzato su almeno quattro punti della superficie del solaio e si registra il livello di pressione sonora non ponderato in almeno quattro punti distribuiti nell'ambiente sottostante il solaio (in assenza di asta rotante) e si calcola la media logaritmica dei rilievi in bande di  $1/3$  d'ottava da 100 Hz a 3150 Hz. Le posizioni di generatore devono essere distanti almeno 0,5 m dai bordi del solaio e, nel caso di solai con nervature, il generatore deve essere allineato a  $45^\circ$  rispetto alla direzione delle travi. Le posizioni di microfono devono distare tra loro almeno 0,7 m, almeno 0,7 m dalle pareti dell'ambiente ed almeno 1,0 m dal provino. Il numero minimo di rilievi ottenuti dalle combinazioni delle posizioni di sorgente e microfono è sei. Devono essere rilevati i tempi di riverberazione ed il volume dell'ambiente ricevente, al fine del calcolo dell'area di assorbimento equivalente. Il descrittore del livello di rumore di calpestio è  $L_n$ , come precedentemente definito (formula 1.8). I livelli di rumore devono essere confrontati con il rumore di fondo presente nell'ambiente e, se di entità comparabile, devono essere opportunamente corretti. Il calcolo dell'indice mononumerico  $L_{nw}$  avviene mediante l'applicazione dei metodi contenuti nella norma UNI EN ISO 717-2 [67]: una spezzata di riferimento viene fatta traslare a passi di 1 dB positivi e negativi, in modo da sovrapporsi alla curva in bande di  $1/3$  d'ottava del livello di rumore di calpestio misurato, fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli tra la curva e la spezzata sia più vicina possibile a 32 dB, ma non superiore; il valore della spezzata a 500 Hz è l'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio.

Per misurare la riduzione del rumore di calpestio, dovuta ad esempio all'utilizzo di un pavimento galleggiante o di un materiale resiliente applicato sulla superficie della pavimentazione, sono necessarie due misurazioni: sul solaio di base non isolato e sul solaio completo (il solaio di base è un solaio omogeneo in calcestruzzo armato, possibilmente di

spessore 14 cm). Una volta ottenuti i livelli di rumore di calpestio normalizzati sull'area di assorbimento equivalente  $L_n$  per le due configurazioni, gli stessi vanno sottratti (i livelli del solaio isolato sono sottratti ai livelli del solaio nudo) e la differenza rappresenta la riduzione di livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L$ , ottenuta in bande di  $1/3$  d'ottava<sup>2</sup>. Il calcolo dell'indice di valutazione della riduzione del livello di rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L_w$  avviene mediante una particolare procedura contenuta nella norma stessa: i valori di riduzione in frequenza misurati sul solaio di laboratorio vanno sottratti ai livelli di rumore di calpestio di un solaio nudo di riferimento (i valori sono riportati in [67]), che ha indice di valutazione  $L_{nw} = 78$  dB. Si ottengono dei livelli di rumore per il solaio di riferimento ideale a cui è applicato l'effetto dell'isolamento reale ottenuto dalle misure in laboratorio. A tale solaio ideale si può applicare la procedura per il calcolo di  $L_{nw}$  e  $\Delta L_w$  si ottiene semplicemente dalla relazione

$$\Delta L_w = 78 - L_{n,r,w} \quad (1.50)$$

in cui  $L_{n,r,w}$  [dB] è l'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio normalizzato calcolato per il solaio di riferimento ideale a cui è applicata la riduzione di livello misurata in laboratorio. Tale procedura è necessaria per migliorare la qualità della stima dei materiali, anche quando testati su solai di base con differenti caratteristiche acustiche tra i diversi laboratori. Affinché tale metodo possa restituire dati significativi e confrontabili, è necessario che il campione abbia una superficie di almeno  $10 \text{ m}^2$ , per i pavimenti galleggianti, mentre per i materiali resilienti applicati sopra la pavimentazione potrebbe essere sufficiente una superficie minore.

### 1.3.3 Correlazione tra rigidità dinamica e prestazioni isolanti di un sistema a massetto galleggiante

Le prestazioni dei materiali utilizzati come sottofondo in pavimenti galleggianti vengono confrontate principalmente in base ai valori di riduzione di livello di rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L_w$  in dB e di rigidità dinamica per unità di superficie  $s'$  in  $\text{MN/m}^3$ . Queste due quantità sono in relazione tra di loro: tanto minore è  $s'$ , quanto migliore risulta  $\Delta L_w$ . Alcune formule previsionali permettono di correlare queste due grandezze come esposto in [71] e [52]. In particolare, conoscendo a priori la rigidità dinamica del materiale resiliente, si può risalire alla frequenza di risonanza  $f_0$  del solaio a cui il sistema a pavimento galleggiante è applicato<sup>3</sup>, tramite la relazione

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (1.51)$$

in cui  $m'$  è la massa per unità di superficie del massetto flottante. La riduzione dei rumori di calpestio avviene a partire da questa frequenza e per valori superiori, per cui l'entità della riduzione è maggiore, quanto minore è tale frequenza di risonanza. La riduzione dei

---

<sup>2</sup>Tale riduzione si riferisce all'intero pacchetto aggiunto al solaio di base e non al solo materiale utilizzato. Di conseguenza in un rapporto di prova devono essere specificate le caratteristiche dell'eventuale massetto galleggiante, in particolare il peso per unità di superficie e le condizioni di finitura.

<sup>3</sup>Si suppone che il solaio di base non abbia influenza sulla frequenza propria del massetto galleggiante poggiante sul materiale resiliente.

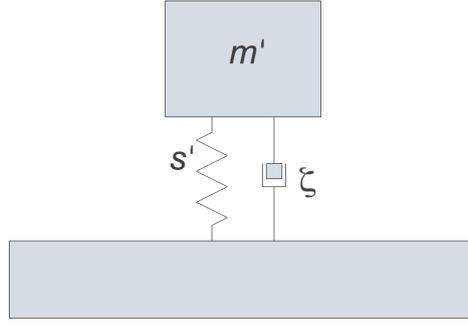


Figura 1.11: sistema ad un grado di libertà e grandezze caratteristiche.

rumori di tipo impattivo ha un andamento teorico lineare (in scala logaritmica) secondo le due relazioni

$$\Delta L_n = 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (1.52)$$

$$\Delta L_n = 30 \log \frac{f}{f_0} \quad (1.53)$$

e l'indice di riduzione del livello di rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L_w$  si può stimare per le due formulazioni mediante le relazioni

$$\Delta L_w = 20 \log \frac{m'}{s'} + 18 \quad (1.54)$$

$$\Delta L_w = 15 \log \frac{m'}{s'} + 18 \quad (1.55)$$

La pendenza di 40 dB/decade si può spiegare assimilando il solaio dotato di massetto galleggiante ad un sistema meccanico ad un grado di libertà e calcolando la trasmissibilità di forze impresse alla massa verso il telaio (figura 1.11). Per un sistema di questo tipo, la trasmissibilità assume la forma

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2}} \quad (1.56)$$

in cui  $f_0$  è la frequenza caratteristica del sistema ad un grado di libertà,  $f$  la frequenza di interesse e  $\zeta$  il rapporto di smorzamento, ottenuto tramite la relazione

$$\zeta = \frac{c}{c_{crit}} = \frac{c}{2\sqrt{s'm'}} = \frac{2.2}{2fT_s} \quad (1.57)$$

con  $c$  coefficiente di smorzamento e  $c_{crit}$  coefficiente di smorzamento critico. In forma logaritmica, la trasmissibilità diventa

$$T_{log} = 20 \log_{10} T = 20 \log_{10} \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2}} \quad (1.58)$$

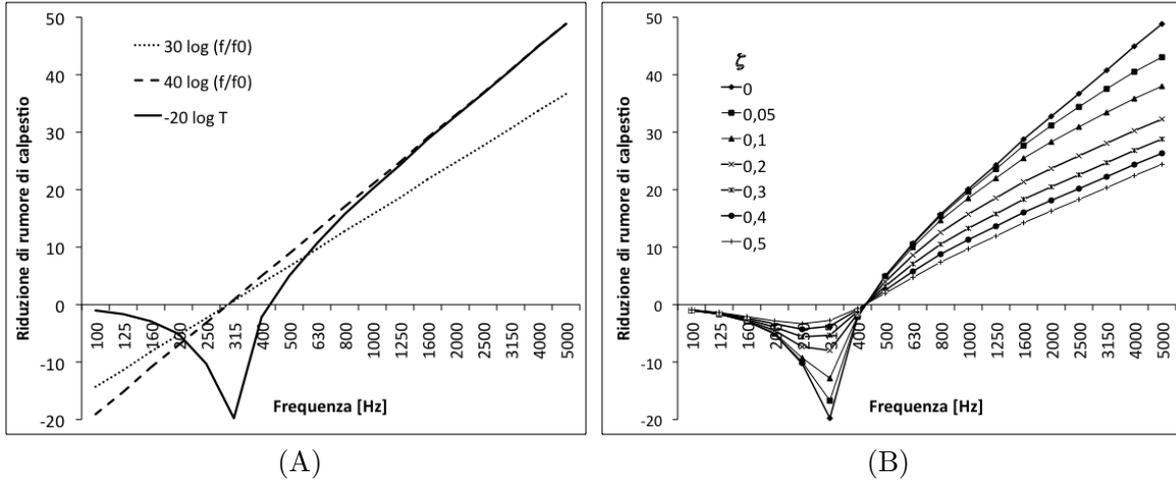


Figura 1.12: riduzione di rumore di calpestio: (A) esempio di confronto tra formulazioni; (B) influenza dello smorzamento.

e, nel caso di smorzamento nullo,

$$T_{\log, \zeta=0} = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{f_0^2}{f_0^2 - f^2} \right| \quad (1.59)$$

Nel caso in cui  $f \gg f_0$ , ovvero per frequenze molto superiori alla frequenza di risonanza del sistema, la trasmissibilità del sistema si può approssimare tramite la relazione

$$T_{\log, \zeta=0} \approx 20 \log_{10} \left| \frac{f_0^2}{f^2} \right| = 40 \log_{10} \left| \frac{f_0}{f} \right|, \quad (1.60)$$

che indica una pendenza dello spettro in scala logaritmica tendente a 40 dB/decade alle alte frequenze. Se si considera l'inverso della trasmissibilità, essa si può porre in analogia alla riduzione di rumore di calpestio, pertanto la relazione 1.52 rappresenta il comportamento vibratorio di un sistema ad un grado di libertà per frequenze superiori alla risonanza. In figura 1.12(A) si riporta un confronto tra le formulazioni della riduzione di rumore di calpestio secondo le relazioni 1.52 e 1.53 e secondo l'inverso della trasmissibilità. Si nota come, all'avvicinarsi della frequenza di risonanza, cresce la differenza tra l'inverso della trasmissibilità e l'attenuazione calcolata tramite la relazione 1.52. La formulazione basata sulla trasmissibilità ha il vantaggio di considerare l'influenza dello smorzamento; al variare del rapporto di smorzamento la forma della curva cambia, attenuando la zona di risonanza e alterando la linearità della riduzione alle alte frequenze. In figura 1.12(B) è rappresentata l'influenza dello smorzamento sulla curva di trasmissibilità in scala logaritmica. Considerando l'influenza dello smorzamento si potrebbero spiegare pendenze di curve di riduzione di rumore di calpestio che non hanno un andamento teorico a pendenza costante.

# Capitolo 2

## Il Laboratorio Isolgomma

### 2.1 Presentazione

Il laboratorio per misure di acustica edilizia di proprietà di Isolgomma S.r.l., ad Albettone (VI), è una struttura di recente realizzazione (anni 2007-2008), progettato e sviluppato con il coordinamento del Dipartimento di Fisica Tecnica - Università degli Studi di Padova, con la principale finalità di studiare le proprietà acustiche dei solai e dei materiali utilizzati per la loro insonorizzazione. Il laboratorio è una struttura situata all'interno del magazzino aziendale, composta di quattro stanze, due al piano terra e due al primo piano (Figure 2.1 e 2.2).

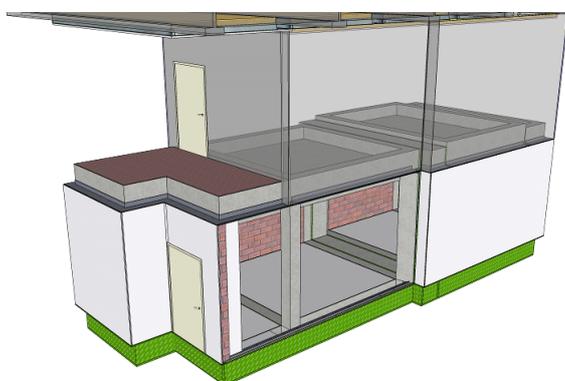


Figura 2.1: il laboratorio di acustica edilizia di Isolgomma S.r.l., Albettone (VI).

Le stanze hanno dimensioni compatibili ai requisiti della norma [59], il principale riferimento per le misure acustiche sui sistemi edilizi. La conformità costruttiva rispetto alla normativa vigente rappresenta un notevole punto di forza: l'intera struttura infatti è completamente svincolata dall'ambiente esterno, in quanto galleggiante su di uno strato disaccoppiante; tale particolare consente di ridurre fortemente l'ingresso delle vibrazioni di origine ambientale negli ambienti di prova, consentendo di condurre accurate misurazioni dei livelli sonori. Le due stanze al piano terra sono costruite a ridosso di una cornice di separazione in cemento armato e da essa sono svincolate tramite giunti elastici in gomma ad elevato grado di smorzamento: le stanze possono essere utilizzate per la misura del potere fonoisolante di partizioni verticali, in accordo alla norma [60]. La cornice stessa,

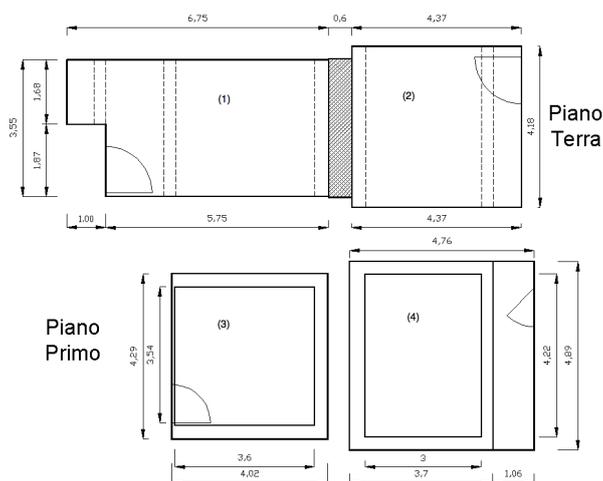


Figura 2.2: planimetria del laboratorio. La camera (1) è ricevente per le misure di potere fonoisolante e di calpestio. La camera (2) è trasmittente per le misure di potere fonoisolante e ricevente per quelle di calpestio. La camera (3) è trasmittente per le misure di rumore di calpestio ed è dotata di solaio in calcestruzzo armato, mentre la camera (4) è trasmittente per le misure di rumore di calpestio, ma dotata di solaio in laterocemento.

con un'estensione di circa  $10 \text{ m}^2$ , è anche apertura di prova per tale tipologia di misura.

Un test di potere fonoisolante prevede una fase di allestimento del provino (in genere la realizzazione di un campione di muro reale esteso quanto la cornice di prova), un periodo di stagionatura del campione, la misurazione vera e propria tramite la rilevazione di livelli di pressione sonora nelle due stanze di prova, con una sorgente di rumore aereo collocata in uno dei due ambienti, la demolizione del provino. Affinché i risultati siano precisi ed affidabili, è necessario che le camere di prova godano di un elevato grado di isolamento nei confronti delle vibrazioni e del rumore aereo ambientale. Per questo motivo, oltre al basamento flottante in gomma è stato progettato con attenzione anche il fonoisolamento delle pareti esterne e particolare cura è stata adoperata nella scelta delle porte di ingresso, molto pesanti ed a tenuta acustica e termica. Con questi accorgimenti i livelli di pressione sonora residua (livelli di fondo) misurati all'interno delle camere sono generalmente comparabili con il rumore elettrico degli strumenti di misura negli intervalli di frequenza indagati (100-5000 Hz). Le due stanze al primo piano (abbinate alle camere al piano terra) sono state progettate per la misura delle prestazioni acustiche dei solai e dei materiali isolanti utilizzati sotto i pavimenti galleggianti, in accordo con le norme UNI EN ISO 140-6 [61] e UNI EN ISO 140-8 [63]. Uno dei due solai presenti è una piastra monolitica in cemento armato di spessore 14 cm, mentre l'altro solaio è in laterocemento: entrambi i solai sono fissi, non removibili e vincolati alle strutture laterali mediante giunti in gomma ad elevato grado di smorzamento, accorgimento che permette di valutare le prestazioni reali dell'elemento edilizio e non quelle apparenti, poiché vengono eliminate le trasmissioni laterali del rumore e delle vibrazioni. La scelta delle due tipologie di solaio ed il tipo di vincolo laterale rappresenta un grande punto di forza del laboratorio: offre la possibilità di studiare i materiali per l'isolamento del rumore di calpestio su piastra armata e di confrontare i risultati con quelli ottenuti applicando gli stessi sul solaio in laterocemento, assai più diffuso nelle comuni abitazioni nazionali. Queste

scelte progettuali consentono di effettuare confronti sistematici e continuativi di materiali sulle due tipologie di solaio con un effettivo riscontro delle variazioni di prestazione in opera dovute al solo cambiamento del sistema solaio di base, nelle stesse condizioni di vincolo laterale. Un test di attenuazione di rumore di calpestio prevede la costruzione di un massetto di ripartizione dei carichi sopra il materiale anticalpestio, un periodo di stagionatura, la misurazione dei livelli di rumore nell'ambiente sottostante il solaio, sotto l'azione di un generatore di rumore di calpestio normalizzato, la demolizione del campione. Nel suo complesso il laboratorio permette quindi di misurare le prestazioni acustiche dei materiali su due tipologie di solai e le prestazioni isolanti di pareti, garantendo una continuità operativa non indifferente, nonostante i tempi di stagionatura dei provini non siano brevi. Anche dal punto di vista termico la struttura presenta delle ottime caratteristiche, in quanto è riscaldabile in inverno e climatizzabile in estate, consentendo così di mantenere la temperatura intorno ai 20 °C e favorendo la riproducibilità delle misure. Il condizionamento degli ambienti viene effettuato tramite unità mobili e l'aria umida viene espulsa attraverso fori di ventilazione ricavati sulle pareti; i dati termoigrometrici vengono controllati tramite sensori di precisione posti nelle due camere del piano terra e registrati su datalogger, per poter mantenere memoria storica delle condizioni ambientali durante tutta la vita del laboratorio.

## 2.2 Progettazione e realizzazione del laboratorio

Il laboratorio è stato realizzato nel 2007, con il coordinamento e la progettazione del Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova. I lavori sono stati ultimati all'inizio del 2008 e la qualificazione degli ambienti di misura è stata effettuata tra marzo ed ottobre dello stesso anno. Alla struttura è stata destinata una porzione del magazzino di stoccaggio del prodotto finito, lontana da fonti di rumore e vibrazioni di tipo industriale o ambientale (figura 2.3). Le fondazioni sono state realizzate all'interno di uno scavo ricavato nella pavimentazione industriale preesistente.



Figura 2.3: (A) sito di costruzione del laboratorio di misura prima dell'esecuzione dei lavori; (B) esecuzione dello scavo per le fondazioni.

All'interno dello scavo è stato quindi realizzato un magrone, rifoderato interamente di materassini antivibranti in gomma riciclata pressata, sui quali sono state realizzate

successivamente le fondazioni del laboratorio. Lo strato resiliente è stato dimensionato per fornire a tutta la struttura un buon isolamento dalle vibrazioni ambientali (figura 2.4).



(A)



(B)

Figura 2.4: (A) realizzazione del magrone e posa dello strato antivibrante; (B) completamento della posa del materiale antivibrante.



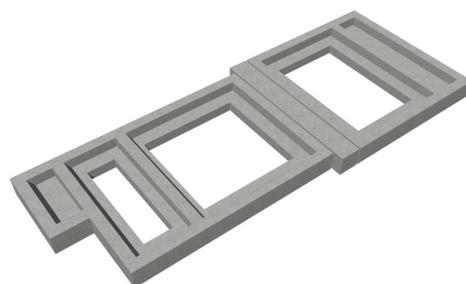
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 2.5: (A) armatura della fondazione a trave rovescia; (B) getto del calcestruzzo; (C) fondazioni a lavori ultimati; (D) modello delle fondazioni.



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)

Figura 2.6: (A) armatura della sezione orizzontale della cornice di prova all'interno del cassero in gomma, (B) getto di calcestruzzo per la cornice di prova e per il ripristino del perimetro, (C) getto del sottofondo in calcestruzzo (D) ultimazione del sottofondo, (E) rivestimento del getto ed armatura del massetto di livellamento, (F) massetti di livellamento.

Le fondazioni a trave rovescia sono state realizzate mediante un getto di calcestruzzo sullo strato di gomma, dopo il posizionamento dell'armatura. In figura 2.5 sono rappresentati alcuni dettagli relativi a queste fasi della costruzione. All'interno delle fondazioni è stato realizzato un riempimento di ghiaione, mentre lo zoccolo è stato rivestito in gomma (figura 2.6B). È stato quindi realizzato il primo segmento della cornice di prova per le misure di potere fonoisolante, mediante un getto di calcestruzzo armato in un cassero di gomma, successivamente mantenuto come giunto di separazione tra le camere di misura.

Dopo l'applicazione di uno strato di gomma anche sul lato esterno delle fondazioni, è stata quindi ripristinata la pavimentazione industriale mediante un getto di calcestruzzo lungo il perimetro delle fondazioni. È stato realizzato un getto di calcestruzzo come sottofondo di riempimento sopra il ghiaione (figura 2.6C), successivamente rifoderato mediante uno strato resiliente in gomma. Un massetto galleggiante di livellamento è stato realizzato sopra lo strato resiliente, dopo posizionamento dell'armatura in ferro.



(A)



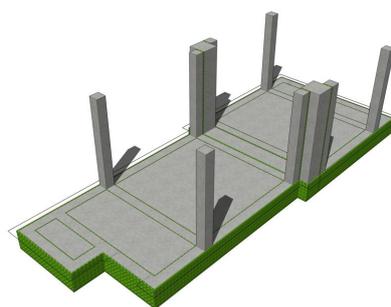
(B)



(C)



(D)



(E)

Figura 2.7: (A) dettaglio dei ferri di armatura verticale per il getto dei pilastri, (B) pilastri in calcestruzzo, (C) getto dell'architrave della cornice di prova e costruzione dei muri perimetrali in blocchi di laterizio (D) ultimazione dei muri perimetrali, (E) modello della struttura del laboratorio, dettaglio dei pilastri.

In corrispondenza della cornice di prova e dei pilastri di sostegno dei solai, sono stati inseriti degli ulteriori ferri verticali di armatura (figura 2.7). Sono quindi stati costruiti i pilastri della cornice di prova e della struttura di sostegno dei solai, con particolare attenzione al disaccoppiamento delle strutture adiacenti. Inoltre sono stati realizzati i muri perimetrali in blocchi di laterizio e l'architrave della cornice di prova in calcestruzzo armato. Sopra i pilastri e le pareti in muratura sono state gettate le travi in calcestruzzo a sostegno dei solai; le travi sono state successivamente rivestite con uno strato di gomma, per la soppressione delle trasmissioni laterali tra il solaio e le strutture sottostanti. In corrispondenza delle due stanze sono stati realizzati due solai, uno in calcestruzzo armato ed uno in laterocemento. Nelle figure 2.8, 2.9 e 2.10 sono riportati alcuni dettagli della posa dei due solai. Il solaio monolitico in calcestruzzo armato è di forma quadrata e la piastra radiante è di dimensioni 3,6 m x 3,6 m, di area totale 12,96 m<sup>2</sup>, mentre lo spessore è 14 cm. Grazie alle sue dimensioni è adatto sia alla misura del livello di rumore di calpestio in laboratorio secondo norma, sia alla misurazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio dei materiali.



Figura 2.8: solaio in calcestruzzo armato: (A) travi in calcestruzzo a sostegno dei solai; (B) reti di armatura del solaio.



Figura 2.9: solaio in laterocemento: (A) disposizione di travetti e pignatte; (B) disposizione dei ferri di armatura.



(A)



(B)

Figura 2.10: (A) dettaglio della disposizione dei ferri di armatura dei solai (in primo piano il ballatoio a servizio del solaio in calcestruzzo); (B) dettaglio del solaio in laterocemento.

Il solaio in laterocemento è stato realizzato per poter confrontare le prestazioni della struttura normata (soletta in calcestruzzo da 14 cm) con una più rappresentativa delle costruzioni più diffuse in Italia, come appunto le strutture non omogenee in laterizio e cemento. Inoltre la disponibilità dei due solai permette il confronto delle prestazioni dei materiali applicati a strutture di base differenti. Il solaio è di forma rettangolare, di dimensioni 4,2 m x 3,0 m (superficie 12,60 m<sup>2</sup>), le pignatte hanno altezza 20 cm, larghezza 48 cm e lunghezza 25 cm. I travetti, posizionati nella direzione del lato maggiore, hanno larghezza 12 cm; la cappa è di altezza 5 cm sopra le pignatte. Su questo solaio è stato realizzato un cordolo di altezza superiore a quello del solaio in calcestruzzo, per poter allestire massetti di stratigrafie complesse e analoghe a quelle presenti in opera (massetto alleggerito per il livellamento degli impianti, impianti di riscaldamento a pavimento).



(A)



(B)

Figura 2.11: (A) solaio in calcestruzzo; (B) solaio in laterocemento.

Terminata la costruzione delle parti strutturali del laboratorio, sono state realizzate alcune rifodere in cartongesso contenenti materiali diversi, al fine di aumentare il potere fonoisolante delle pareti perimetrali e come chiusura delle camere superiori. Tutti i particolari costruttivi in calcestruzzo sono stati rivestiti in gomma (figura 2.13B); è stata applicata la malta su tutte le superfici rimanenti e successivamente è stato applicato un



Figura 2.12: disposizione di travetti e pignatte nel solaio in latero-cemento.

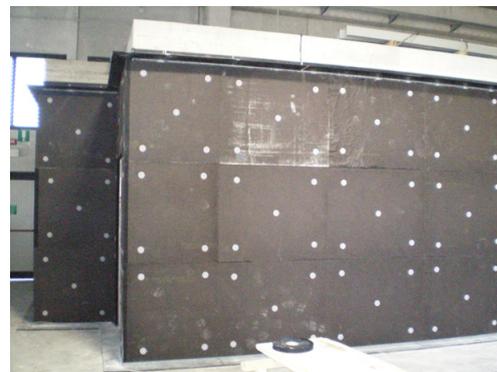


(A)

(B)



(C)



(D)

Figura 2.13: (A) pareti del laboratorio, prima dell'esecuzione degli strati di rifodera, (B) applicazione dell'angolare in acciaio lungo il perimetro superiore delle pareti e rifodera in gomma delle parti in calcestruzzo, (C) applicazione delle malte alle pareti in muratura e applicazione della rifodera in gomma (D) ultimazione della rifodera in gomma e applicazione dell'angolare.

ulteriore strato di gomma, mediante chiodi in plastica (figure 2.13C e 2.13D). Quindi sono state realizzate due strutture metalliche da cartongesso, contenenti diverse stratigrafie di materiali, tra cui lana di legno mineralizzata con cemento, pannelli di gomma riciclata pressata a caldo, lana di roccia di elevata densità ( $100 \text{ kg/m}^3$ ). Le pareti così ottenute sono state chiuse mediante pannelli di cartongesso da 1,5 cm in doppio strato e per permettere l'ancoraggio delle strutture metalliche al soffitto, è stato realizzato su tutto il

perimetro del laboratorio un angolare in ferro collegato alle parti in calcestruzzo dei solai, con l'accorgimento di mantenere scollegati i segmenti già resi discontinui dall'inserimento dei giunti in gomma. Gli stessi angolari sono necessari per la costruzione delle pareti di chiusura delle camere superiori del laboratorio, realizzate anch'esse con la tecnologia del cartongesso, ma di spessori più contenuti. Per la chiusura superiore delle camere al primo piano, è stato realizzato un controsoffitto contenente lane minerali ad alta densità, ancorato al tetto del capannone (figura 2.16). In tutte le stanze sono state installate porte tagliafuoco per l'accesso e nelle due stanze al piano terra (camere riceventi per il rumore di calpestio) è stata installata un'ulteriore porta ad elevato isolamento (figura 2.19A).



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 2.14: (A) applicazione della prima struttura da cartongesso alla parete rifoderata di gomma, (B) riempimento con lana di legno mineralizzata, (C) riempimento con lana di legno mineralizzata e lana di roccia (D) riempimento con lana di roccia e gomma riciclata pressata in pannelli.

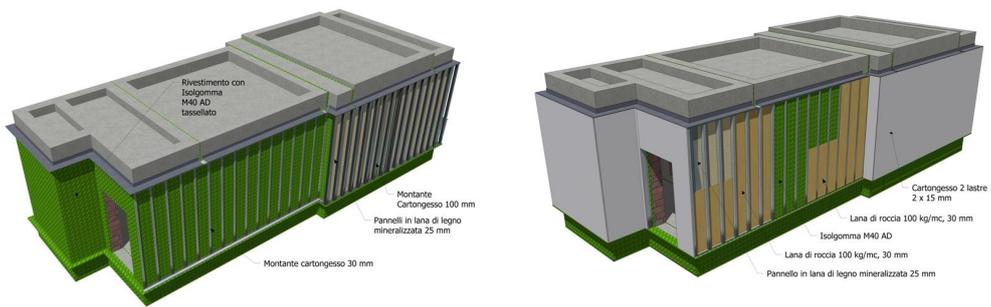
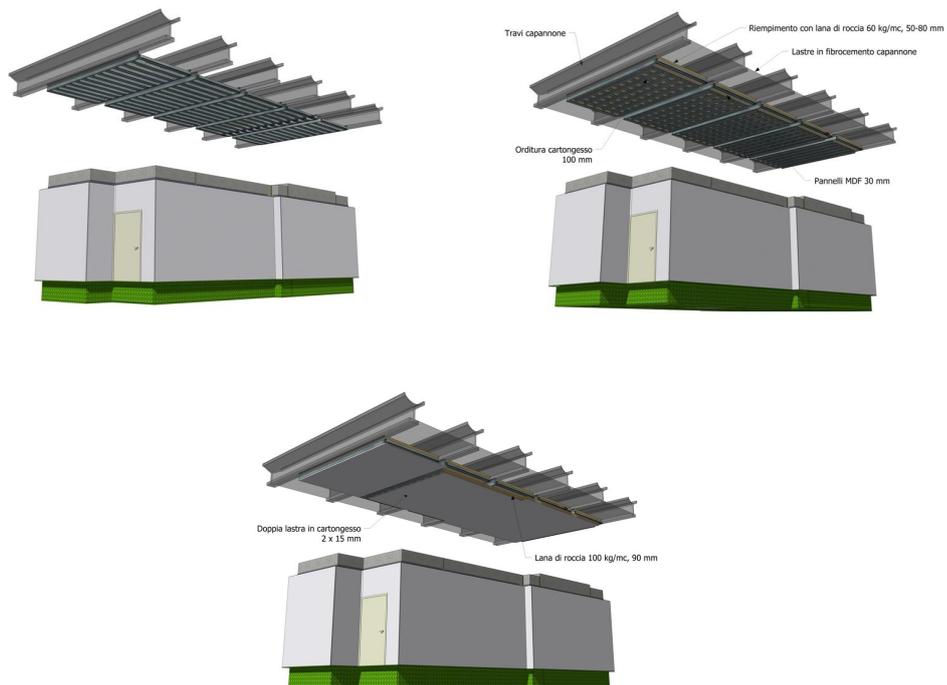


Figura 2.15: modelli con indicazione degli strati di rifodera.



(C)

Figura 2.16: fasi della realizzazione del controsoffitto.



(A)



(B)

Figura 2.17: (A) costruzione del controsoffitto; (B) controsoffitto completo e chiusura delle camere superiori mediante pareti in cartongesso.



(A)



(B)

Figura 2.18: (A) chiusura delle pareti in cartongesso, (B) stuccatura delle lastre di cartongesso e installazione delle porte tagliafuoco.



(A)



(B)

Figura 2.19: (A) porta ad elevato potere fonoisolante; (B) modello del complesso del laboratorio, visto dall'esterno.



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 2.20: (A) e (B) vista delle due camere di prova dall'interno dei locali (C) e (D) dettagli dei giunti di separazione all'interno degli ambienti di misura al piano terra.



# Capitolo 3

## Qualificazione del laboratorio

La costruzione del laboratorio presso Isolgamma S.r.l. è terminata durante i primi mesi del 2008. Successivamente è stata effettuata la qualificazione degli ambienti di misura, come primo lavoro di messa a punto delle caratteristiche di diffusività delle camere. Le procedure adottate in questa fase sono in parte contenute e descritte nelle norme della serie UNI EN ISO 140, per quanto riguarda i laboratori di misura del potere fonoisolante di elementi edilizi [60] e le massime prestazioni isolanti misurabili [59]. Per quanto riguarda la qualificazione degli ambienti per laboratori di misura del rumore di calpestio, i riferimenti normativi sono carenti, pertanto ci si è avvalsi di procedure basate sulla minimizzazione degli scarti dei livelli registrati rispetto ai valori medi su di un grande numero di misurazioni, considerando anche l'omogeneità della distribuzione spaziale dei punti di misura. I metodi utilizzati ed i principali risultati dell'analisi sono riportati nei paragrafi che seguono.

### 3.1 Tempi di riverberazione degli ambienti di misura

Le prime misurazioni effettuate in laboratorio sono state le rilevazioni dei tempi di riverberazione nelle quattro camere di prova. Le misure sono state effettuate da personale del Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova, utilizzando il software Brüel & Kjær Dirac e valutando il decadimento con sollecitazione degli ambienti mediante segnale *sinesweep*. Come sorgente sonora è stato utilizzato un diffusore omnidirezionale Brüel & Kjær 4296, collegato ad un amplificatore di segnale Brüel & Kjær 2716. I tempi di riverberazione medi nei quattro ambienti sono riportati nelle figure 3.1A, 3.1B, 3.1C e 3.1D, mentre le posizioni di sorgente sonora e di microfono sono state scelte in accordo alla norma UNI EN ISO 354 [65] e sono riportate in figura 3.2. Oltre al valore medio per ogni banda viene riportato il valore minimo e massimo e la deviazione standard. La norma UNI EN ISO 140-1 [59] prescrive degli intervalli ammessi per i tempi di riverberazione, che devono essere sempre compresi tra 1 s e  $2 \cdot (V/50)^{\frac{2}{3}}$  s in tutte le bande di frequenza ( $V$  è il volume dell'ambiente in  $m^3$ ).

Alla data di esecuzione delle misure (19 marzo 2008) le due stanze al piano terra erano separate da una parete in cartongesso composta da una sola lastra montata su una struttura metallica di spessore 5 cm, di conseguenza i volumi degli ambienti e i tempi di riverberazione massimi calcolati tramite la relazione sopra citata, sono quelli riportati in tabella 3.1. Dal confronto tra i dati in bande di frequenza ed i valori di riferimento,

Camera	Volume [m <sup>3</sup> ]	Tempo di riverb. ammesso [s]	Tempi di riverb. minimi e massimi dei singoli rilievi [s]	Tempi di riverb. medi (minimi e massimi della media spettrale) [s]
1	66,41	2,42	1,34 - 2,31	1,39 - 2,14
2	54,87	2,12	1,34 - 2,46	1,37 - 2,27
3	55,48	2,15	0,60 - 2,27	0,67 - 2,14
4	71,62	2,54	0,67 - 2,13	0,91 - 1,98

Tabella 3.1: volumi delle camere, tempi di riverberazione ottimali indicati nella norma UNI EN ISO 140-1, tempi di riverberazione rilevati in ogni ambiente (singoli valori e media tra tutti i punti misurati).

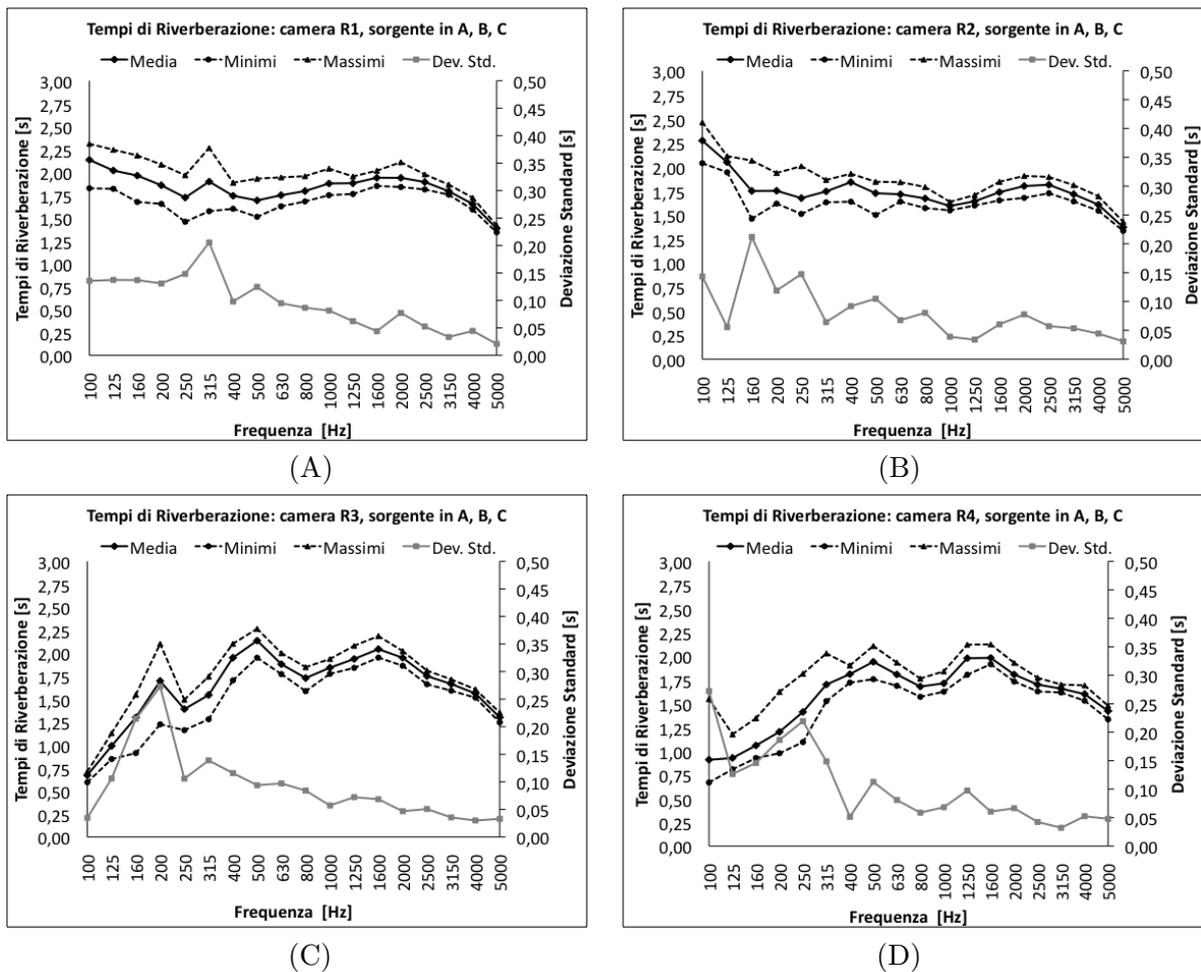


Figura 3.1: tempi di riverberazione medi, minimi e massimi registrati nelle camere di prova, con deviazione standard delle misure.

emerge una buona omogeneità dei tempi di riverbero su tutto lo spettro ed un sostanziale rispetto dei limiti imposti. In particolare per la camera di prova 1 sono pienamente soddisfatti i requisiti; per la camera 2 i tempi sono compresi entro i limiti su tutto lo spettro, eccetto a 100 Hz, ove si presenta un lieve aumento di tempi di riverberazione medi, di poco eccedente il limite. Per quanto riguarda le camere di prova 3 e 4 situate

al primo piano, i tempi di riverberazione calano sotto i limiti alle basse frequenze: ciò è dovuto alla diversa conformazione delle pareti di queste due camere, che sono realizzate in cartongesso, mentre le pareti delle due stanze al piano terra sono realizzate in muratura rifoderata di alcuni strati di materiali isolanti diversi e cartongesso. La conoscenza dei tempi di riverberazione degli ambienti di prova è necessaria per la scelta delle posizioni di sorgente e microfoni da adottare durante il processo di qualificazione del campo sonoro e per tutta la vita del laboratorio, come verrà illustrato di seguito.

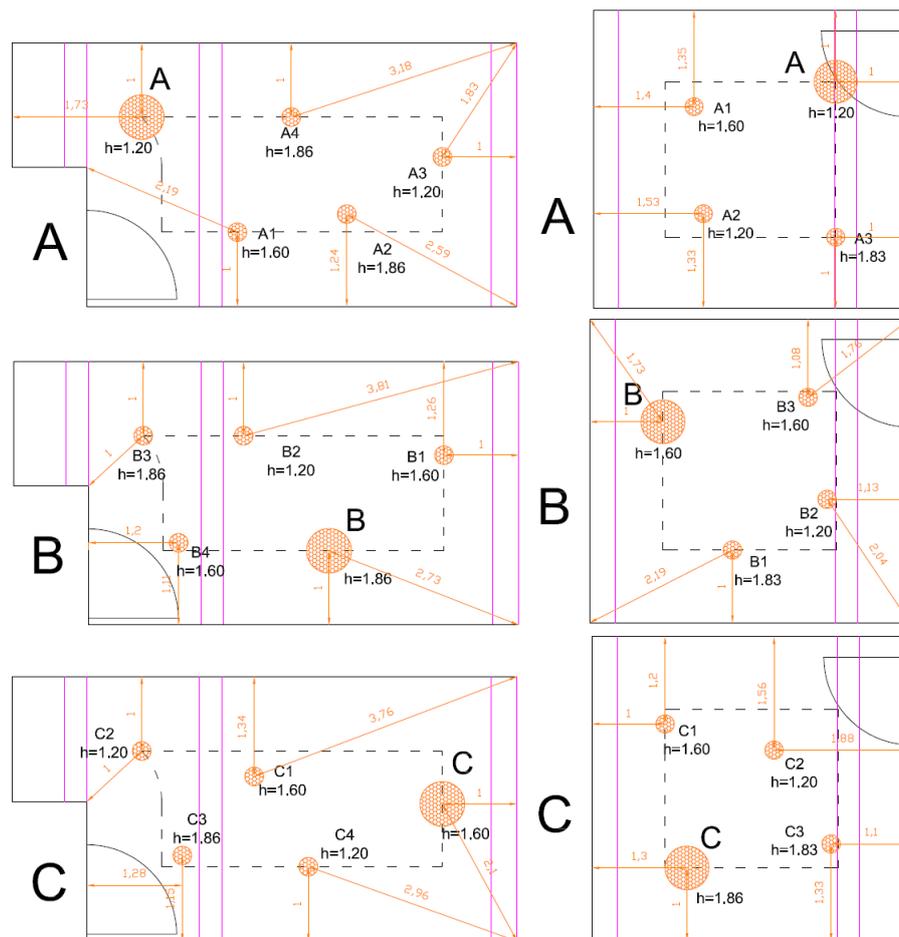


Figura 3.2: posizioni di microfono e sorgente adottate nelle due camere 1 e 2 al piano terra, per la rilevazione dei tempi di riverberazione.

## 3.2 Misure di potere fonoisolante di partizioni verticali secondo la norma UNI EN ISO 140-3

### 3.2.1 Posizioni ottimali della sorgente di rumore

La qualificazione dei campi sonori delle camere di prova per la misura del potere fonoisolante di elementi di edificio è stata realizzata secondo le indicazioni dell'appendice C

della norma [60]. Tale parte della norma fornisce buone indicazioni in merito alla metodologia di scelta del numero di posizioni di sorgente sonora nell'ambiente emittente ed il posizionamento della stessa, mentre non è del tutto esaustiva riguardo alla scelta delle posizioni di microfono. Secondo la procedura utilizzata, vengono individuate un numero elevato di posizioni di sorgente e per ognuna di esse si calcola la differenza di livelli sonori tra l'ambiente emittente e ricevente. Non essendo note a priori le posizioni microfoniche definitive, è stato necessario eseguire una fitta mappatura dei campi sonori e considerare la media energetica spaziale delle misure per ogni posizione di sorgente, ai fini del calcolo della differenza dei livelli. Sono state perciò stabilite anticipatamente delle posizioni fisse di punti microfonici e, per semplificare il processo valutativo, è stata individuata una griglia di punti omogeneamente distribuiti negli spazi disponibili, validi sia come posizioni di sorgente che come posizioni di microfono. È stata scelta una disposizione a geometria tetraedrica, con i punti collocati su tre piani e distanze reciproche tali da soddisfare le indicazioni della norma, sia per quanto riguarda le specifiche di qualificazione, sia per quanto riguarda le procedure di prova ufficiali (figura 3.3). La disposizione spaziale della griglia, formata da tetraedri complanari, ha come scopo la massimizzazione dei punti di misura e di sorgente, per ottenere una stima più accurata dell'entità e distribuzione del campo sonoro. I vincoli sulle distanze stabiliti dalla norma sono indicati in tabella 3.2.

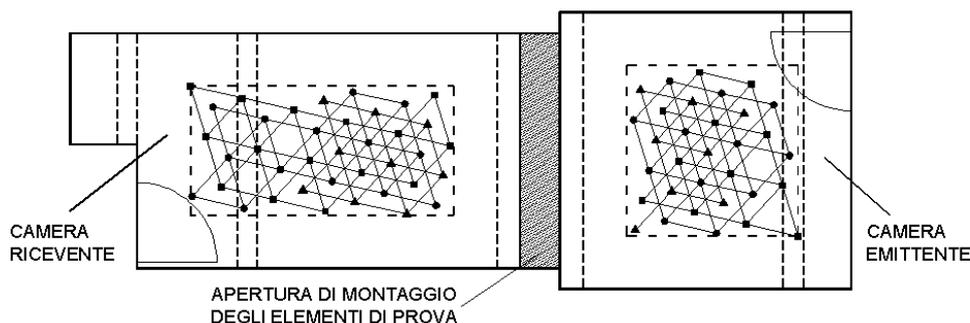


Figura 3.3: disposizione della griglia di punti all'interno degli ambienti emittente e ricevente. Proiezione in pianta dei punti di misura. A simbolo differente corrisponde altezza  $h$  differente: (■) $h = 0,8$  m; (▲) $h = 1,45$  m; (●) $h = 2,10$  m.

<i>Vincoli sulle distanze</i>	
Sorgente - provino	$> 2d_{min}$ m
Sorgente - microfono	$> 2d_{min}, > 1,0$ m
Microfono - microfono	$> 0,7$ m
Microfono - pareti della camera	$> 0,7$ m
Microfono - provino	$> 1,0$ m

Tabella 3.2: vincoli sulle distanze dei punti di microfono e sorgente.

In particolare il valore  $d_{min}$  [m] è funzione del volume degli ambienti e del tempo di riverberazione, secondo la seguente formula:

$$d_{min} = 0.1 \left( \frac{V}{\pi T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Il valore  $d_{min}$  è stato calcolato per i due ambienti al pianoterra, in quanto direttamente implicati nelle misure di potere fonoisolante di pareti. I valori ottenuti, in base ai volumi ed ai tempi di riverberazione minimi misurati, sono  $d_{min} = 0,397$  m (camera 1) e  $d_{min} = 0,361$  m (camera 2). Il vincolo sulle distanze tra sorgente e provino e tra sorgente e microfono, pari a  $2d_{min}$  è quindi rispettivamente di 0,794 m (camera 1) e 0,722 m (camera 2). In base a tali considerazioni, la distanza minima tra punti vicini nella disposizione a tetraedri è stata scelta di 0,80 m: tale valore soddisfa tutti i vincoli indicati, a parte la distanza di 1 m tra le posizioni di microfono ed il provino e tra sorgente e microfono. Per garantire che siano soddisfatti anche questi requisiti, lo spazio disponibile è stato limitato ad un solido immaginario con le superfici distanti 0,80 m dalle pareti delle camere (pareti laterali, travi a vista) e 1,00 m dalla cornice per l'installazione dei provini; inoltre, durante le fasi di campionamento del campo sonoro, sono state escluse le coppie di punti in cui sorgente e microfono erano in posizioni troppo vicine (minori di 1 m). La scelta di 0,80 m come distanza minima è risultata adeguata anche per la disposizione dei punti in altezza. Infatti per un tetraedro di lato 0,80 m, l'altezza relativa è di circa 0,65 m e la disposizione dei punti in altezza può essere effettuata secondo lo schema di figura 3.4, in cui viene garantita una distanza di 1,00 m dal solaio soprastante; gli stessi punti possono essere quindi utilizzati anche per la misura del potere fonoisolante del solaio, essendo rispettata la distanza minima nei confronti del provino.

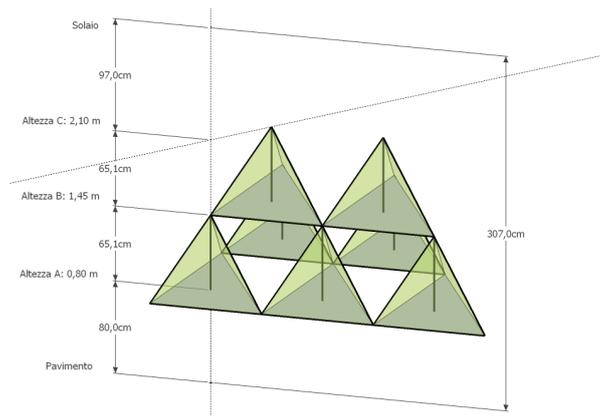


Figura 3.4: schema geometrico della disposizione dei punti negli ambienti di prova. I punti di sorgente e microfono sono collocati ai vertici di tetraedri complanari, complessivamente a tre altezze differenti.

Secondo i criteri esposti, sono stati individuati 32 punti nella camera emittente e 38 punti nella ricevente, distribuiti omogeneamente negli spazi disponibili e disposti su tre altezze differenti (figura 3.3). Per individuare quante e quali posizioni ottimali di sorgente sonora si debbano utilizzare nell'ambiente emittente, la scelta deve avvenire tra un numero sufficientemente elevato di posizioni. Il numero minimo  $m$  suggerito nell'appendice C della norma [60], al paragrafo C.2.3, dipende dal volume degli ambienti e si può ricavare dalla relazione

$$m = \frac{152}{V^{\frac{2}{3}}} \quad (3.2)$$

Per la camera ricevente  $m = 9,27$ , mentre per la camera emittente  $m = 10,53$ ; il numero di posizioni identificate tramite la griglia di punti proposta in questo lavoro ha permesso

quindi di valutare le differenze di livelli sonori tra gli ambienti di misura in un numero molto maggiore di punti, rispetto alle indicazioni presenti nella norma. Una volta individuati i punti univocamente, si è proceduto alla misurazione dei livelli di rumore nelle due camere, posizionando la sorgente omnidirezionale in ognuno dei 32 punti e registrando i livelli nei rimanenti 31 (ambiente emittente) e 38 (ambiente ricevente), esclusi quelli attigui alla sorgente, non soddisfacenti il vincolo di distanza minima di 1 m. In totale sono stati eseguiti quasi duemila singoli rilievi. Per ogni posizione di sorgente, sono stati calcolati i livelli medi energetici nelle due camere e la differenza  $D$  tra i due livelli medi su ogni banda di  $1/3$  d'ottava (le prescrizioni di norma sono limitate all'analisi delle basse frequenze da 100 Hz a 315 Hz). È stato quindi calcolato lo scarto tipo delle differenze di livelli, secondo la relazione

$$s_i = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (D_{j,i} - \mu_i)^2 \right]^2 \quad (3.3)$$

in cui:  $D_{j,i}$  è la differenza di livello per la  $j$ -esima posizione di altoparlante alla  $i$ -esima banda di terzo d'ottava;  $\mu_i$  è la media aritmetica delle differenze nei livelli nella  $i$ -esima banda di terzo d'ottava e  $m$  è il numero di posizioni di altoparlante esaminate. Il numero di posizioni di sorgente viene determinato in base al soddisfacimento delle seguenti tre condizioni:

$$N \geq 2 \quad (3.4)$$

$$N \geq \left( \frac{s_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$N \geq \left( \sum_i \frac{s_i}{4.8} \right)^2 \quad (3.6)$$

in cui:  $s_i$  è lo scarto tipo delle differenze tra i livelli secondo la (3.3) e  $\sigma_i$  è lo scarto tipo massimo prescritto del valore medio per  $N$  posizioni di altoparlante, i cui valori sono riportati nella tabella 3.3.

<i>Frequenza [Hz]</i>	$\sigma_i$
100	1,4
125	1,2
160	1,0
200	0,8
250	0,8
315	0,8

Tabella 3.3: valore nominale dello scarto tipo prescritto per il valore medio della differenza di livello misurata per  $N$  posizioni di altoparlante).

Di seguito si riportano le differenze  $D$  tra i livelli di pressione sonora, associate alle singole posizioni di sorgente (tabella 3.4). Su base di tali dati, sono stati calcolati i parametri per la verifica delle tre condizioni (3.4), (3.5) e (3.6); ne è risultata la necessità di adoperare sei posizioni di sorgente. I calcoli sono riportati in tabella 3.5. Il numero di posizioni risultante non è stato ritenuto soddisfacente, in quanto molto dispendioso in

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente										
	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A9$	$A10$	$A11$
100	12.6	11.8	12.5	10.7	14.0	10.5	11.3	14.6	12.7	13.4	13.2
125	20.2	19.2	19.4	15.9	14.3	14.5	15.2	21.7	19.6	24.2	19.3
160	17.1	16.5	18.4	16.7	13.7	19.3	15.3	15.6	17.9	18.8	17.1
200	19.5	15.6	19.2	19.4	16.0	18.0	18.9	17.3	18.0	18.9	15.7
250	20.5	18.5	19.4	19.2	18.4	18.8	19.1	17.7	18.0	19.9	18.2
315	19.7	19.9	19.6	19.0	18.9	19.1	19.9	19.1	19.5	20.2	19.1
400	21.3	20.0	20.7	21.1	20.7	20.5	20.8	20.8	20.8	19.5	20.1
500	22.2	21.5	21.9	21.6	20.6	22.0	21.7	21.6	22.1	22.0	21.8
630	24.2	24.1	23.9	24.0	23.8	24.1	24.4	23.4	23.8	23.7	24.0
800	25.2	26.0	25.1	25.4	25.5	25.4	25.4	25.1	25.2	25.1	25.3
1000	26.0	26.4	26.4	26.3	26.0	26.3	26.2	25.7	26.3	26.0	26.3
1250	27.8	27.8	27.9	28.0	27.7	27.9	27.7	27.6	27.8	27.1	27.1
1600	28.6	28.6	28.5	28.4	28.3	28.3	28.2	28.0	28.2	28.1	28.0
2000	29.0	28.7	28.7	28.6	28.4	28.4	28.5	27.8	28.2	28.0	28.2
2500	24.3	24.4	24.2	24.4	23.8	23.8	24.3	23.8	23.8	23.4	23.6
3150	21.4	21.5	21.5	21.7	21.5	21.6	21.7	21.2	21.4	21.7	22.0
4000	24.5	24.5	24.9	24.9	24.7	24.6	24.8	24.5	24.5	25.1	25.0
5000	28.7	28.2	28.3	28.3	28.1	28.3	28.2	28.0	28.1	28.5	28.0

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente										
	$A12$	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$	$B8$	$B9$	$B10$
100	13.5	14.4	11.8	13.1	12.3	9.8	11.3	12.5	11.1	9.6	12.7
125	20.0	21.1	20.4	20.2	17.0	16.7	13.8	16.4	16.0	19.2	19.3
160	17.0	18.3	17.2	16.5	16.5	17.0	14.8	15.9	16.7	17.6	14.9
200	17.0	18.9	17.5	17.3	17.2	17.0	16.3	16.7	16.9	19.5	16.1
250	18.5	20.5	20.4	19.8	18.4	19.6	19.5	17.3	18.4	20.3	19.6
315	18.5	20.9	20.1	21.1	20.2	20.0	20.0	19.9	19.6	20.8	20.2
400	19.7	21.2	20.7	20.5	19.2	21.0	21.0	21.3	20.6	20.7	20.7
500	21.9	22.3	21.6	21.6	22.2	21.9	22.0	21.1	21.7	22.0	22.3
630	23.0	24.6	23.8	23.9	23.9	24.2	23.8	23.6	23.9	24.3	24.2
800	25.3	25.3	25.1	25.2	25.2	25.4	25.7	25.1	25.3	25.6	25.8
1000	25.9	26.2	25.9	25.9	25.8	26.1	26.3	25.8	26.1	26.2	26.4
1250	27.3	27.7	27.4	27.2	27.4	27.4	27.6	27.3	27.3	27.4	27.6
1600	27.8	28.2	27.9	27.6	28.2	27.9	27.8	27.7	28.0	28.1	28.0
2000	27.8	27.8	27.8	27.9	28.1	27.9	28.0	27.9	28.2	28.2	28.2
2500	23.2	23.2	23.3	23.1	23.2	23.1	23.1	22.8	23.0	23.2	23.2
3150	21.4	21.6	21.6	21.4	21.6	21.6	21.6	21.3	21.4	21.3	21.3
4000	24.7	25.0	24.8	24.7	25.0	24.8	24.9	24.7	24.9	24.7	24.5
5000	27.4	27.8	27.8	27.4	28.4	28.3	28.2	28.3	28.8	28.6	28.4

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente									
	$B11$	$B12$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$C5$	$C6$	$C7$	$C8$
100	13.2	12.3	11.2	13.7	12.0	12.2	11.4	12.5	12.6	11.6
125	20.7	19.4	21.6	20.4	17.3	13.5	13.6	20.1	22.2	18.2
160	17.7	16.9	18.3	16.6	16.8	18.1	16.7	17.7	16.7	17.6
200	18.4	18.0	19.4	17.0	18.7	17.7	15.8	17.8	17.2	19.4
250	19.3	20.6	18.6	19.9	19.6	20.0	19.7	20.5	19.5	18.4
315	20.2	20.0	20.7	19.7	20.3	20.8	19.2	19.7	20.6	20.0
400	21.4	21.3	20.5	21.0	20.9	20.3	19.8	20.4	21.0	20.7
500	22.1	21.6	22.0	22.0	22.2	21.7	21.1	22.3	21.7	21.5
630	24.1	23.8	23.6	23.9	23.7	24.0	23.2	23.4	23.9	23.5
800	25.4	25.2	25.3	25.1	25.3	25.5	25.6	25.2	25.2	25.0
1000	26.1	26.2	26.2	26.1	26.0	26.2	26.0	26.1	26.0	26.2
1250	27.7	27.6	27.1	27.3	27.2	27.2	27.1	27.5	27.7	27.3
1600	28.0	28.0	27.3	27.6	27.7	27.6	27.6	27.7	27.7	27.6
2000	28.2	27.9	27.4	27.7	27.7	27.9	27.9	27.9	27.9	27.8
2500	23.2	23.1	22.5	22.9	22.8	22.8	22.9	23.0	22.8	22.7
3150	21.5	21.3	21.1	21.2	21.2	21.4	21.1	21.6	21.2	21.3
4000	24.7	24.5	24.6	24.5	24.4	24.8	24.4	24.7	24.5	24.7
5000	27.4	27.8	27.8	27.4	28.4	28.3	28.2	28.3	28.8	28.6

Tabella 3.4: differenze  $D$  rilevate per le singole posizioni di sorgente sonora.

termini di tempo in fase di prova, per cui ricorsivamente sono state eliminate dall'analisi le posizioni di sorgente più problematiche, ricalcolando i diversi parametri. Si riporta in tabella 3.6 il riepilogo, analogo a quello presentato in tabella 3.5, relativo all'analisi dopo eliminazione di dieci posizioni di sorgente (A10, C4, C5, B6, A5, A6, A7, A2, A4, B8).

$f [Hz]$	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	1,22	1,40	0,76	0,25
125	2,79	1,20	5,40	0,58
160	1,21	1,00	1,46	0,25
200	1,23	0,80	2,36	0,26
250	0,90	0,80	1,26	0,19
315	0,63	0,80	0,63	0,13
$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$				2,76
$N =$				6 (5,40)

Tabella 3.5: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando tutti i punti analizzati. Sono riportati, nell'ordine, le frequenze di interesse (basse frequenze), i valori degli scarti tipo per ogni banda, il confronto con gli scarti tipo raccomandati ed il quadrato del rapporto tra i due valori, il quadrato del rapporto tra lo scarto tipo e 4,8 dB, con la somma sulle sei bande considerate ed infine il valore minimo di posizioni di sorgente da utilizzare in base alle tre condizioni stabilite dalla normativa, arrotondato per eccesso.

$f [Hz]$	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	1,22	1,40	0,76	0,25
125	1,60	1,20	1,78	0,33
160	0,88	1,00	0,77	0,18
200	1,13	0,80	1,99	0,24
250	1,01	0,80	1,60	0,21
315	0,63	0,80	0,62	0,13
$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$				1,82
$N =$				2 (1,99)

Tabella 3.6: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando 22 punti, ottenuti dopo eliminazione delle posizioni caratterizzate da scarti tipo molto elevati su singole bande di frequenza.

Il risultato dell'operazione ricorsiva di eliminazione è l'ottenimento di due sole posizioni di sorgente nell'ambiente emittente ( $N = 2$ ), ovvero il rispetto della condizione più restrittiva. La scelta delle posizioni da eliminare è stata effettuata in base al più elevato valore dello scarto tipo su di una singola banda e l'analisi è stata ripetuta ricorsivamente, dopo ogni eliminazione. Il valore di  $m$  (numero di posizioni oggetto di indagine) relativo all'ultima esclusione, è risultato pari a 22, un valore ancora molto elevato rispetto a quello ottenuto tramite la relazione (3.2). Per quanto riguarda l'oggetto di prova, durante le misure di qualificazione, esso deve essere caratterizzato da basso potere fonoisolante, in

particolare alle basse frequenze non deve superare i valori riportati in tabella 3.7. Secondo le indicazioni contenute nell'appendice C della norma (sezione C.2.4), l'oggetto di prova raccomandato è una parete singola composta da un pannello multistrato laminato di acciaio, montato su telaio ad U, di dimensioni pari a quelle previste per elementi vetrati; in alternativa si può utilizzare un provino rappresentativo di quelli normalmente testati (Appendice C, sezione C.2.4, nota 12). Nell'ambito di questa indagine è stato sottoposto a misurazione un provino in cartongesso montato su struttura metallica, sigillato ai bordi, il cui potere fonoisolante misurato è riportato in tabella 3.7 ed è inferiore ai limiti stabiliti.

<i>Frequenza [Hz]</i>	<i>R [dB] massimo</i>	<i>R [dB] provino</i>
100	27	15,6
125	28	22,6
160	29	18,7
200	30	20,2
250	31	22,2
315	32	22,8

Tabella 3.7: potere fonoisolante massimo ammesso per il provino e potere fonoisolante del provino misurato).

Una volta stabilito il numero di posizioni di sorgente, è necessario scegliere quali posizioni siano le ottimali, ovvero descrivano più accuratamente i campi sonori degli ambienti di prova. Il procedimento indicato in appendice C della norma si basa sul calcolo della somma degli scarti tipo sulle sei bande di frequenza di terzi d'ottava da 100 Hz a 315 Hz, secondo la relazione

$$S_j = \sum_{i=1}^6 (D_{j,i} - \mu_i)^2 \quad (3.7)$$

e le posizioni selezionate devono essere quelle per cui tale somma è minima. In figura 3.5 sono riportate le sei posizioni migliori individuate, mentre in tabella 3.8 sono riportate le somme degli scarti tipo sulle bande di frequenza considerate.

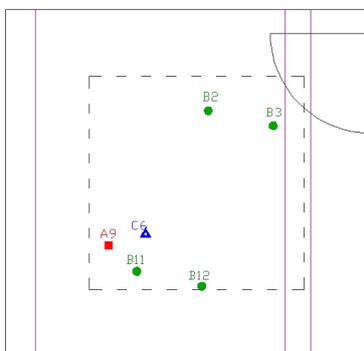


Figura 3.5: ambiente emittente: posizioni di altoparlante più favorevoli.

<i>Posizione di altoparlante</i>	<i>Somma degli scarti <math>S_j</math></i>
B12	1,75
C6	2,18
B2	2,56
A9	2,68
B11	2,71
B3	2,91

Tabella 3.8: classifica delle posizioni di altoparlante e relativi valori di  $S_j$ .

Le posizioni di altoparlante scelte sono B12 e B3. La prima è stata selezionata perché presenta il valore di  $S_j$  più favorevole; come seconda posizione è stata invece selezionata B3, in quanto C6, A9 e B11 sono troppo vicine a B12 e non rispettano la distanza minima di 1,4 m, mentre B2 giace praticamente sullo stesso piano di B12 e questo va evitato, secondo quanto indicato nella sezione C.2.2.

### 3.2.2 Posizioni ottimali di microfono

Contrariamente a quanto indicato per le posizioni di altoparlante, per le posizioni microfoniche la norma UNI EN ISO 140-3 [60] non suggerisce una procedura univoca. Si riassume qui di seguito il metodo adoperato nell'ambito della qualificazione, basata sull'analisi degli scarti dei livelli di pressione rispetto al valore medio di tutti i punti individuati. Per ognuna delle due posizioni di altoparlante selezionata nelle precedenti fasi del lavoro (B12 e B3) sono stati considerati i singoli rilievi ed i valori medi energetici sia per l'ambiente ricevente che emittente. Successivamente, per ogni rilievo microfonico sono state calcolate le differenze al quadrato tra il valore puntuale ed il valore medio energetico banda per banda e ne è stata derivata la somma degli scarti su tutto lo spettro. In base a tali valori, per ogni ambiente di misura è stata stilata una classifica di preferibilità dei punti microfonici disponibili. In tabella 3.9 sono riportati i quindici migliori punti per ogni camera. In figura 3.6, invece, sono riportati in pianta i punti più favorevoli, secondo la classifica stilata.

<i>Preferibilità</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Camera emittente</i>	C6	B5	A3	C1	C2	C8	A7	B4	B8	A9	C4	A8	B1	C5	A4
<i>Camera ricevente</i>	A4	B5	A3	C1	B11	A11	C9	A6	C8	A13	B7	B14	A10	A15	B12

Tabella 3.9: classifica dei punti microfonici per i due ambienti di misura (primi quindici valori).

Come si può notare dall'immagine, le posizioni migliori sono localizzate in alcuni volumi circoscritti dello spazio a disposizione, si vedano ad esempio i blocchi 1-2-3-4 o 5-6-7-9. Poiché le posizioni microfoniche da adottare durante le misure di potere fonoisolante devono essere distribuite entro il massimo spazio ammissibile e posizionate uniformemente, come indicato nella sezione 6.2.2 della norma [60], è necessario tenerne conto in fase di scelta delle posizioni più rappresentative e non basarsi solamente sul conteggio degli scarti

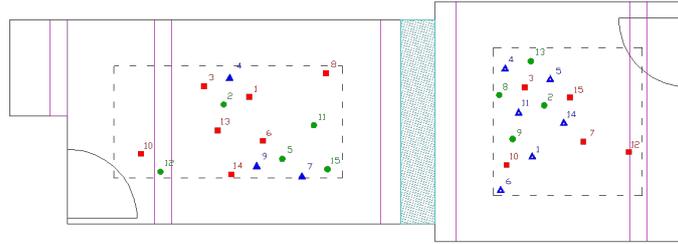


Figura 3.6: posizionamento nello spazio dei punti più favorevoli.

minori. Tra tutti i punti a disposizione ne sono stati selezionati sei (la norma prescrive almeno cinque punti). Delle numerose combinazioni possibili, sono state individuate le seguenti:

ambiente emittente: C6 - B5 - C2 - C8 - A7 - A8;

ambiente ricevente: A4 - A3 - B11 - C9 - A6 - B14.

La disposizione di tali punti è riportata per via grafica in figura 3.7.

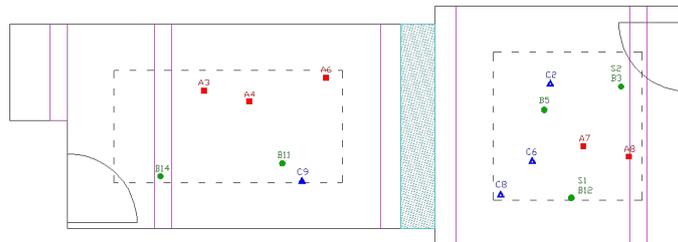


Figura 3.7: posizioni di microfono selezionate, con indicazione delle due posizioni di sorgente sonora in ambiente emittente.

Le due combinazioni risultanti sono tali da soddisfare un ulteriore requisito, non definito dalla normativa ma scelto arbitrariamente. I livelli di rumore dei sei punti selezionati in ogni ambiente sono stati mediati energeticamente ed il risultato è stato confrontato con la media energetica dei livelli globali relativi alle due posizioni di sorgente B12 e B3. È stato quindi imposto che il valore assoluto delle differenze dei livelli in ogni banda di frequenza sia inferiore a 0,5 dB. Nelle tabelle 3.10 e 3.11 sono riportati i risultati di tale analisi, rispettivamente per la camera emittente e ricevente.

$f$ [Hz]	Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]							Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]			Scarti tra valori medi [dB]
	$C6$	$B5$	$C2$	$C8$	$A7$	$A8$	Media	$B12$	$B3$	Media	
100	87.3	86.7	84.6	88.0	85.4	85.3	86.4	87.1	85.6	86.4	0.0
125	99.7	99.1	100.0	97.1	96.4	98.1	98.6	97.9	98.9	98.4	0.1
160	98.0	100.0	99.6	98.0	98.0	97.4	98.6	98.5	99.2	98.8	0.2
200	101.6	101.2	101.8	101.5	100.7	101.4	101.4	101.1	101.1	101.1	0.3
250	102.7	102.2	101.9	102.5	102.2	101.7	102.2	102.3	101.5	101.9	0.3
315	100.1	100.4	98.6	100.5	99.5	99.1	99.7	99.4	99.7	99.6	0.2
400	97.8	97.9	96.4	96.9	94.9	95.7	96.7	96.4	96.5	96.5	0.3
500	94.7	94.8	94.4	94.4	94.9	95.4	94.8	94.7	94.6	94.6	0.1
630	93.9	93.7	93.0	93.9	93.5	92.6	93.5	93.2	93.5	93.3	0.1
800	91.9	92.2	91.8	92.6	92.5	92.4	92.2	92.2	92.0	92.1	0.2
1000	90.0	91.1	90.1	91.5	91.0	90.5	90.8	90.7	90.4	90.6	0.2
1250	91.0	90.8	90.8	90.7	90.9	90.9	90.9	90.9	90.7	90.8	0.0
1600	93.6	93.4	93.1	93.3	93.7	93.7	93.5	93.5	93.3	93.4	0.1
2000	92.9	92.8	92.7	92.3	92.7	92.8	92.7	92.6	92.6	92.6	0.1
2500	90.8	90.9	91.0	91.0	90.8	90.7	90.9	90.8	90.9	90.9	0.0
3150	91.8	91.5	91.1	91.0	91.6	91.2	91.4	91.3	91.3	91.3	0.1
4000	91.5	91.5	91.1	91.6	91.3	91.6	91.4	91.3	91.5	91.4	0.1
5000	87.0	86.9	86.5	86.9	86.6	87.0	86.8	87.1	86.6	86.8	0.0

Tabella 3.10: camera emittente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

$f$ [Hz]	Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]							Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]			Scarti tra valori medi [dB]
	$A4$	$A3$	$B11$	$C9$	$A6$	$B14$	Media	$B12$	$B3$	Media	
100	73.3	75.1	72.3	73.3	73.0	73.0	73.4	74.8	72.5	73.8	0.4
125	78.1	78.1	79.1	77.4	78.8	79.6	78.6	78.5	78.7	78.6	0.1
160	81.2	83.2	82.5	82.7	79.4	83.7	82.3	81.6	82.6	82.2	0.2
200	84.3	83.0	84.1	82.6	83.1	82.3	83.3	83.2	83.8	83.5	0.2
250	81.0	81.4	81.2	82.2	82.0	83.1	81.9	81.8	81.7	81.7	0.2
315	78.2	79.9	78.8	78.9	79.0	79.0	79.0	79.4	78.7	79.1	0.0
400	75.9	74.5	76.8	75.5	75.9	74.9	75.7	75.1	76.0	75.6	0.1
500	73.0	72.8	74.4	72.0	73.9	72.0	73.1	73.0	73.0	73.0	0.1
630	69.1	69.6	69.7	69.9	69.9	69.1	69.6	69.4	69.6	69.5	0.1
800	67.0	67.5	67.6	67.4	67.6	66.7	67.3	67.0	66.8	66.9	0.4
1000	65.2	64.7	64.7	64.2	64.9	64.2	64.7	64.5	64.6	64.5	0.1
1250	63.8	63.6	63.5	63.0	63.7	63.2	63.5	63.3	63.5	63.4	0.1
1600	65.6	65.6	65.7	65.1	66.0	65.8	65.6	65.5	65.7	65.6	0.0
2000	64.8	64.6	64.9	64.5	64.7	64.7	64.7	64.7	64.7	64.7	0.1
2500	68.1	67.9	67.7	68.0	68.1	67.8	67.9	67.7	67.8	67.8	0.2
3150	69.9	69.8	70.1	70.6	69.9	69.9	70.0	70.0	69.9	69.9	0.1
4000	66.9	66.8	66.9	66.8	66.9	66.9	66.9	66.8	66.8	66.8	0.1
5000	58.9	58.9	59.0	58.9	59.3	58.8	58.9	58.7	59.1	58.9	0.0

Tabella 3.11: camera ricevente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

### 3.2.3 Potere fonoisolante massimo

Successivamente al processo di identificazione dei punti di misura, è stato eseguito un collaudo volto all'identificazione del massimo potere fonoisolante misurabile in condizioni di assenza di trasmissione laterale attraverso le pareti del laboratorio. Le linee guida di questo tipo di sperimentazione sono contenute nella norma UNI EN ISO 140-1 [59] (appendice A). Sono state condotte alcune misurazioni su pareti di base rifoderate con strutture in cartongesso fino al completo riempimento della cornice di prova in cemento armato, spessa 60 cm. In un primo collaudo è stata verificata la prestazione massima misurabile per pareti leggere in cartongesso, struttura analoga al tipo A (sezione A.2.1 della predetta norma), mentre in un secondo collaudo è stata verificata la prestazione massima misurabile per una parete in muratura rifoderata con cartongesso del tipo C (sezione A.2.1).

#### Pareti leggere in cartongesso (tipo A)

A settembre ed ottobre 2008 sono state effettuate le misure per la valutazione del potere fonoisolante massimo misurabile in laboratorio per pareti leggere in cartongesso. In totale è stato ripetuto il test di potere fonoisolante su sei strutture in cartongesso, aggiungendo rifodere ad una parete di partenza ed incrementando così lo spessore totale della parete. In figura 3.8 si riporta la stratigrafia della parete a più alta prestazione.

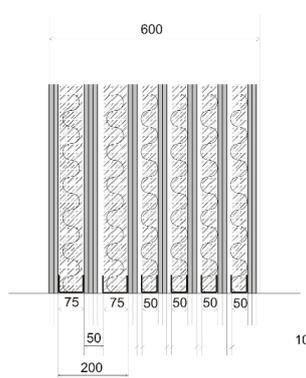


Figura 3.8: potere fonoisolante massimo: parete in cartongesso misurata, con completo riempimento della cornice di prova; ogni rifodera è realizzata con lastre di cartongesso da 1,25 m in più strati e le intercapedini delle strutture metalliche contengono lana minerale di spessore 5 cm e densità 70 kg/m<sup>3</sup>.

Le misure sono state eseguite dapprima sull'intero pacchetto parete e, dopo rimozione di una rifodera alla volta, sono state ripetute per le pareti di spessore minore. Questa metodologia ha causato purtroppo alcuni problemi in fase di misurazione, derivanti da una posa non del tutto corretta degli strati intermedi. Infatti i bordi del campione sono stati sigillati mediante silicone sulle due rifodere più esterne, ma tale accorgimento non è stato adoperato per le rifodere più interne; gli spettri di potere fonoisolante calcolati a partire dalle misurazioni effettuate risentono pertanto di perdite localizzate alle frequenze medio-alte, ma solo per alcuni allestimenti intermedi: per quanto riguarda il pacchetto parete globale, invece, la sigillatura è stata effettuata correttamente e la prestazione

risultante, anche se risentisse di perdite localizzate in frequenza, sarebbe comunque a vantaggio di sicurezza. Una metodologia di montaggio dei provini di tipo incrementale sarebbe stata quindi più corretta dal punto di vista formale, più controllabile, ma meno vantaggiosa dal punto di vista economico. Gli spettri di potere fonoisolante relativi alle sei pareti misurate sono riportati in figura 3.9A, mentre in figura 3.9B si riportano i valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, all'aumentare del numero di rifodere eseguite. Dai risultati emerge un forte aumento di prestazione in seguito all'esecuzione delle prime rifodere, invece dopo il quarto intervento sulla parete di base l'indice di valutazione tende ad assestarsi a 80 dB.

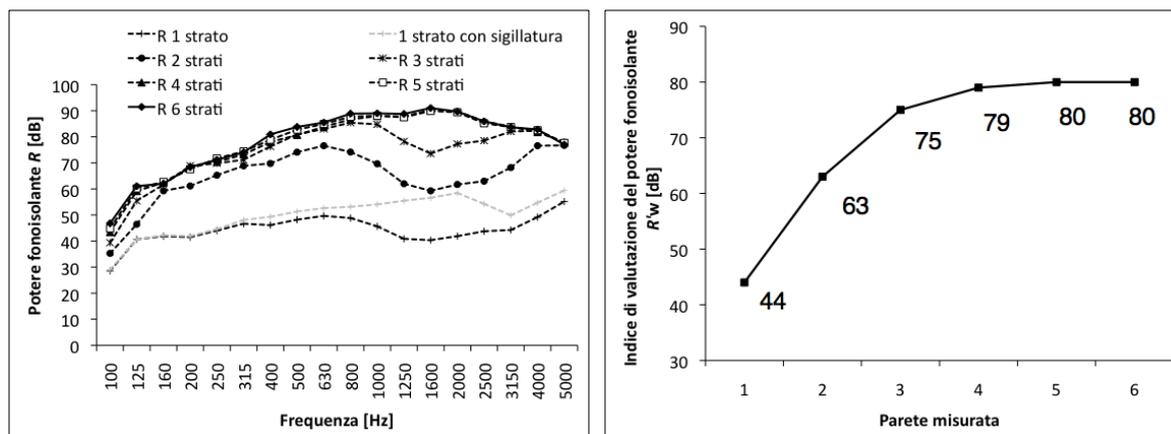


Figura 3.9: (A) potere fonoisolante delle pareti misurate, in ordine di spessore. La serie di dati in grigio rappresenta il provino di base con sigillatura accurata del perimetro; (B) indice di valutazione del potere fonoisolante, all'aumentare degli strati di rifodera.

Dai risultati emerge che all'aumentare del numero di strati di rifodera, aumenta il potere fonoisolante su tutto lo spettro, fino ad assestarsi all'ultima misura effettuata. I valori massimi misurati non possono essere associati esclusivamente al provino in esame, bensì sono apparenti, in quanto sono influenzati dalle trasmissioni laterali e dalle caratteristiche della strumentazione utilizzata e, all'aumentare ulteriore dello spessore della parete, non si riscontra un ulteriore aumento di prestazione. Si sottolinea che le curve spettrali riportate in figura presentano un andamento anomalo e sottostimano le prestazioni, poiché in fase di posa non sono stati sigillati in maniera efficace i bordi dei campioni mediante silicone. Ciononostante si raggiungono valori molto elevati di potere fonoisolante, che potrebbero essere forse incrementati mediante utilizzo di un sistema di amplificazione del rumore più potente. In figura 3.10 sono riportati gli intervalli di misurazione di potere fonoisolante reale ed apparente per il laboratorio, relativamente alle pareti leggere in cartongesso.

Il valore di  $R'_{w,max} = 80$  dB è un valore che non rappresenta la prestazione della parete misurata, che sarebbe certamente superiore, bensì il limite misurabile nel laboratorio per pareti leggere in cartongesso. La conoscenza di questo valore è fondamentale, poiché, come indicato nella norma UNI EN ISO 140-3 [60], se i valori di potere fonoisolante misurati sono compresi tra  $R'_{w,max}$  e  $R'_{w,max} - 15$  dB, allora tale misura potrebbe essere affetta da trasmissione laterale e si sottostimerebbe la prestazione dell'elemento edilizio

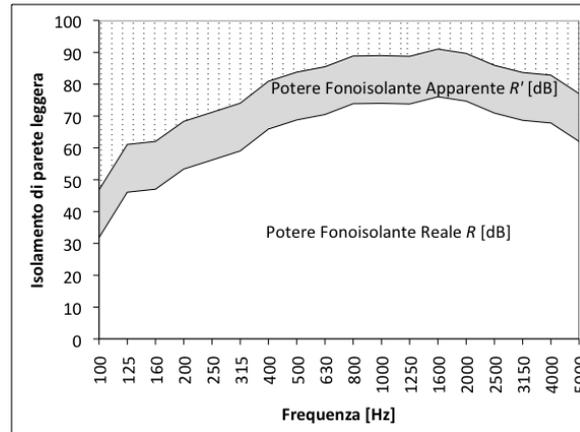


Figura 3.10: intervalli di misurabilità del potere fonoisolante reale ed apparente e della trasmissione laterale, relativamente a pareti leggere in cartongesso.

sottoposto a prova. In conclusione, nel laboratorio di Isolgamma, oggetto della presente qualificazione, il potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso è da considerarsi reale, se di entità inferiore ad  $R'_{w,max}-15$  dB in ogni banda di frequenza, invece è da considerarsi apparente ed influenzato dalle trasmissioni laterali, qualora superi tale valore. Considerando l'indice di valutazione, si possono misurare valori di potere fonoisolante fino a  $R_w = 65$  dB.

### Tramezzo pesante (tipo C)

La procedura di verifica del potere fonoisolante massimo è stata ripetuta anche per le pareti in muratura pesante, rifoderate con strati di lana di roccia e cartongesso. La parete in muratura è stata realizzata mediante blocchi in laterizio forniti dalla ditta CisEdil di Luzzara (RE), di tipo P90IS, con malta sulle giunzioni sia orizzontali che verticali ed intonaco su entrambi i lati. Il peso complessivo della parete (blocchi e malte) è di circa  $460 \text{ kg/m}^2$ . In figura 3.11 sono rappresentati alcuni dettagli costruttivi della parete. In figura 3.12 è invece rappresentata la stratigrafia della parete a più elevate prestazioni, utilizzata per il computo del massimo potere fonoisolante apparente misurabile. Essa è composta dal muro di base intonacato, con una rifodera sul lato ricevente, composta da un telaio metallico da 5 cm contenente lana di roccia di densità  $70 \text{ kg/m}^3$  e due strati di cartongesso di spessore 1,25 cm, con tre rifodere identiche alla prima poste sul lato emittente. In figura 3.13B si riporta l'indice di valutazione del potere fonoisolante, all'aumentare del numero di rifodere eseguite. I risultati sono simili a quanto già visto per le pareti leggere e  $R'_w$  si assesta a 82 - 83 dB già alla seconda - terza rifodera. I dati spettrali sono riportati in figura 3.13A. Il potere fonoisolante aumenta con l'aggiunta degli strati di rifodera generalmente su tutto lo spettro. In alcune bande di frequenza (ad esempio 100-125 Hz) la misura sulla parete più spessa non ha fornito il risultato migliore e questo ha determinato una variazione dell'indice di valutazione a regime tra 82 e 83 dB, attribuibile verosimilmente ad errore di misura. Considerando quindi questi valori come i massimi indici di valutazione misurabili nel laboratorio per pareti pesanti di tipo C, tutte le misure con esito inferiore a  $R'_{w,max}-15$  si potranno considerare esenti da trasmissione laterale, mentre tutte misurazioni con esito superiore ad  $R'_{w,max}-15$  dovranno essere interpretate

come prestazioni minime dell'oggetto di prova. Analogamente a quanto fatto per le pareti leggere, si possono individuare degli intervalli di valutazione dell'influenza della trasmissione laterale, come illustrato in figura 3.14.



Figura 3.11: dettagli costruttivi della parete di partenza, per la misura del potere fonoisolante massimo apparente relativo a pareti pesanti in muratura di tipo C; (A) dettaglio di posa di blocchi e giunzioni, (B) e (C) riempimento bordo superiore mediante malta e blocchi frammentati, (D) applicazione dell'intonaco.

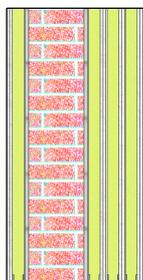


Figura 3.12: stratigrafia della parete in muratura utilizzata per la valutazione del massimo potere fonoisolante apparente.

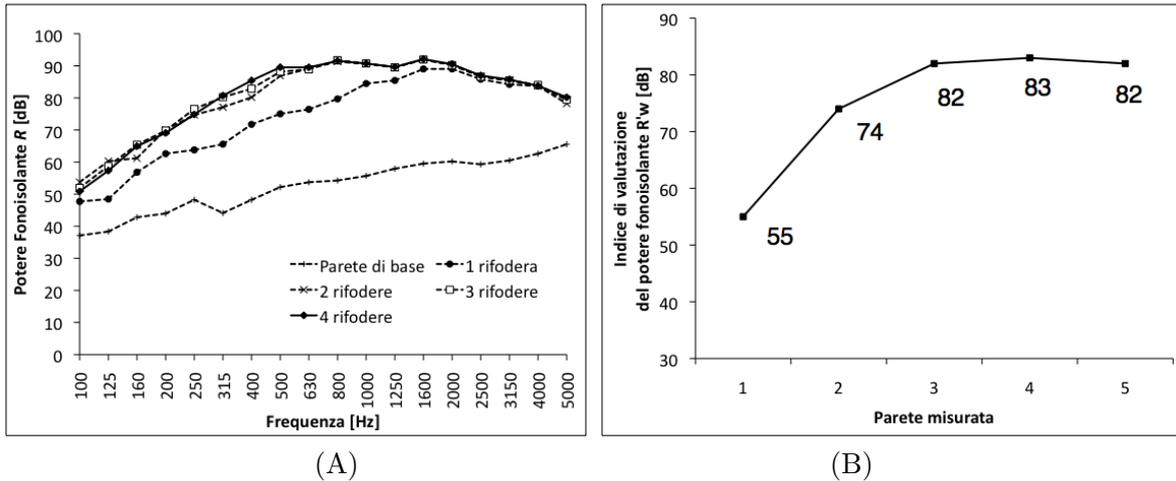


Figura 3.13: indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, all'aumentare dello spessore della parete allestita.

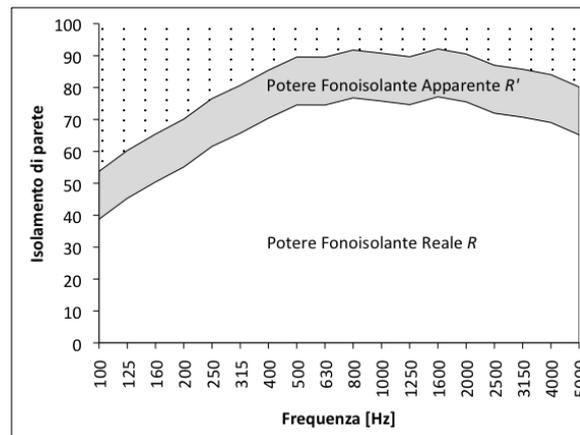


Figura 3.14: intervalli di misurabilità del potere fonoisolante reale ed apparente e della trasmissione laterale, relativamente a pareti pesanti in muratura.

### Confronto tra tipologie di pareti A e C

Dall'analisi effettuata emerge una certa dipendenza della capacità di misurazione di un laboratorio rispetto alla tipologia di oggetto di prova. Sebbene l'indice di valutazione  $R'_{w,max}$  presenti una variazione compresa entro 2 dB, a livello spettrale si può notare che le differenze sulle singole bande arrivano anche a 7-8 dB alle frequenze medie e basse. Confrontando graficamente le curve di massimo potere fonoisolante per le tipologie di parete A e C, si ottiene quindi il grafico di figura 3.15, in cui sono messi in evidenza gli intervalli in cui le grandezze misurate sono esenti o affette da trasmissione laterale e le fasce di sovrapposizione.

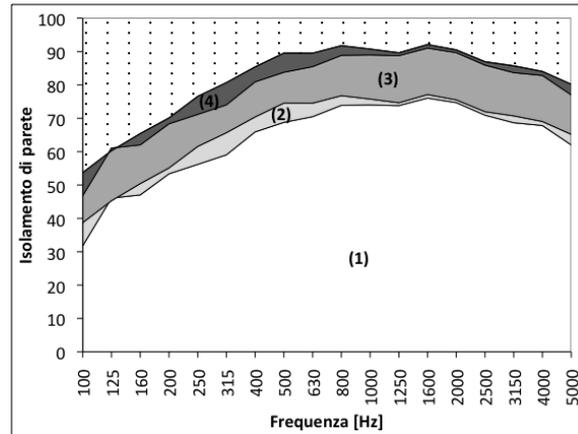


Figura 3.15: intervalli di misurazione del potere fonoisolante di laboratorio; (1) potere fonoisolante reale; (2) potere fonoisolante reale per pareti C e apparente per pareti A; (3) potere fonoisolante apparente; (4) potere fonoisolante apparente per pareti C.

### 3.3 Misure di rumore di calpestio sui solai secondo UNI EN ISO 140-6

Per quanto riguarda la qualificazione del campo sonoro per misure di rumore di calpestio, le normative di riferimento non forniscono indicazioni sulla scelta delle posizioni di generatore normalizzato e di microfono. Prima dell'effettiva entrata in esercizio del laboratorio, si è ritenuto comunque opportuno studiare una procedura per la selezione dei punti di misura, per evitare, in fase di misurazione, eventuali problemi di diffusività del campo sonoro. La metodologia utilizzata si basa sul campionamento dei livelli di rumore di calpestio in tutto lo spazio dell'ambiente ricevente, sotto l'azione del generatore di rumore di calpestio sul solaio nudo, calcolando il livello medio spaziale e valutando gli scarti dei livelli registrati sui singoli punti, rispetto alla media energetica globale. Come oggetto di prova è stato scelto il solaio nudo e non isolato, per escludere dall'analisi alcune variabili, eventualmente influenti sui livelli di rumore prodotti, come ad esempio spessore, composizione e stagionatura del massetto galleggiante, tipologia di materiale isolante, eventuale disomogeneità della superficie su cui impattano i martelli del generatore. La qualificazione è stata condotta sui due solai non rimovibili del laboratorio, uno in calcestruzzo armato ed uno in laterocemento; le modalità di analisi sono riportate nei seguenti due paragrafi, per i due solai.

#### 3.3.1 Misure di livello di rumore di calpestio di solai secondo UNI EN ISO 140-6: solaio in calcestruzzo armato

La norma di riferimento per la misura in laboratorio del livello di rumore di calpestio prevede la rilevazione di livelli di rumore in un ambiente posizionato sotto il solaio, quando su di esso agisce un generatore normalizzato: tale strumento è una macchina dotata generalmente di un meccanismo a canne (o elettromagnetico) che movimentava cinque martelli di massa pari a 0,5 kg l'uno, che colpiscono la superficie dell'oggetto di prova dieci volte al secondo, cadendo da un'altezza fissa di 4 cm. Come per le misure di potere fonoisolante

te, anche per la misura del rumore di calpestio sono stabiliti dei vincoli per le posizioni di sorgente e microfono (nel caso di microfono fisso ed in assenza di asta rotante); tali imposizioni sono riassunte in tabella 3.12.

<i>Vincoli sulle distanze</i>	
Sorgente - bordo del solaio	> 0,5 m
Microfono - microfono	> 0,7 m
Microfono - pareti della camera	> 0,7 m
Microfono - provino	> 1,0 m

Tabella 3.12: vincoli sulle distanze dei punti di microfono e sorgente.

Nel caso di solai anisotropi, con nervature o travi, ai vincoli definiti in tabella 3.12, si aggiunge la necessità di posizionare il generatore di calpestio con un angolo di  $45^\circ$  rispetto alla direzione delle travi (ad esempio solai in legno od in laterocemento). I punti in cui valutare i livelli sonori, in camera ricevente, sono stati scelti coincidenti a quelli utilizzati per la qualificazione dei campi sonori per misure di potere fonoisolante di partizioni verticali (v. figura 3.5). Tale decisione è stata presa per semplificare l'attività di laboratorio, essendo rispettati tutti i vincoli previsti. Per quanto riguarda l'ambiente emittente, è stata progettata una griglia tridimensionale di punti analoga a quella presente nella camera ricevente ed il generatore è stato posizionato in corrispondenza della proiezione in pianta di tali punti. Le posizioni individuate possono essere valide sia per il generatore che per un eventuale disposizione di microfoni; l'utilizzo di microfoni nell'ambiente emittente è stato previsto, per la possibilità di effettuare misure di potere fonoisolante del solaio, che verrà discussa in seguito. Le posizioni troppo vicine ai bordi del solaio sono state quindi utilizzate solo come posizioni di microfono e non di sorgente di rumore di calpestio.

### Posizioni ottimali del generatore normalizzato

Sono stati rilevati i livelli di rumore di calpestio in camera ricevente sulle 38 posizioni microfoniche, per ognuna delle 24 posizioni del generatore di calpestio (figura 3.16).

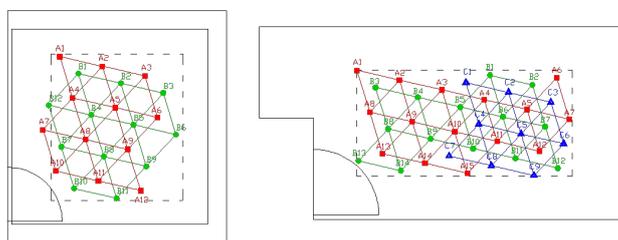


Figura 3.16: posizioni del generatore normalizzato di rumore di calpestio sul solaio (a sinistra) e posizioni di microfono in camera ricevente (a destra).

Per ogni posizione di sorgente è stata quindi calcolata la media energetica dei livelli di rumore e lo scarto rispetto al valore medio. Tali valori sono riportati in tabella 3.13.

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
100	60.6	63.7	64.3	64.7	63.5	66.2	62.6	65.8	65.6	61.8	63.6	64.3
125	66.1	65.0	65.9	68.0	66.1	65.7	65.6	65.4	65.2	65.9	65.4	64.3
160	68.9	69.7	70.9	69.0	67.0	67.5	65.5	65.6	70.2	70.0	69.1	70.4
200	72.2	71.3	69.3	67.8	73.5	69.5	70.4	72.4	67.8	69.9	71.8	70.0
250	73.9	73.0	73.4	73.3	72.2	71.0	71.3	71.9	72.6	72.5	72.7	73.5
315	73.7	75.5	72.8	71.9	74.5	73.3	69.9	71.1	73.8	72.3	73.7	73.1
400	73.0	74.2	73.1	72.4	73.7	71.7	73.0	73.1	73.5	73.5	72.5	72.9
500	76.1	75.7	74.6	76.5	74.3	74.9	73.4	73.8	74.5	74.6	74.1	74.6
630	76.0	76.2	77.8	76.2	78.8	76.0	78.1	77.4	78.1	76.9	74.7	78.7
800	76.4	76.5	76.4	76.1	77.6	76.7	77.1	76.9	75.8	76.6	76.3	75.7
1000	77.2	77.5	77.4	77.1	77.4	76.6	76.6	77.4	76.7	75.6	77.1	76.3
1250	76.1	77.5	77.3	76.3	77.0	76.6	76.7	76.9	77.4	77.4	76.8	77.5
1600	78.5	79.4	78.8	78.1	79.2	78.6	78.0	78.8	78.5	77.4	78.4	78.8
2000	78.9	79.3	78.9	78.3	79.7	78.9	78.2	79.2	78.5	77.7	78.6	79.1
2500	79.5	80.2	79.1	78.7	80.3	79.6	78.7	79.7	79.1	78.6	79.2	78.9
3150	78.8	79.2	78.6	77.9	79.0	78.4	77.7	78.5	77.9	77.4	78.1	78.2
4000	76.9	77.1	76.0	75.6	76.7	76.3	75.5	76.2	75.6	75.3	75.8	75.8
5000	74.6	74.8	73.5	72.6	74.4	73.7	72.5	73.8	72.9	72.6	73.2	73.5

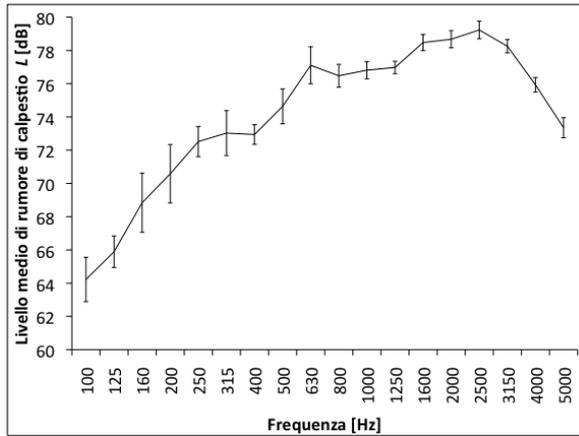
  

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
100	63.3	64.9	64.3	63.6	64.0	65.0	63.6	62.9	66.0	60.8	63.8	64.2
125	67.2	63.6	66.4	66.4	66.6	65.0	65.9	66.3	66.5	65.2	62.0	65.9
160	70.1	68.4	70.6	65.7	66.0	67.9	68.5	66.5	70.1	69.8	68.5	68.6
200	68.6	72.2	68.1	71.7	71.7	68.9	69.9	73.3	68.3	69.3	68.3	69.3
250	73.2	71.7	72.7	71.7	70.2	73.4	71.4	72.9	73.4	73.0	73.3	72.6
315	73.2	72.7	73.3	71.3	72.3	75.3	73.3	71.4	71.5	72.3	74.4	73.6
400	72.6	72.6	73.5	73.0	72.7	72.6	72.7	73.3	71.8	72.7	73.1	72.9
500	73.8	74.3	75.0	73.6	72.8	76.6	73.6	73.7	76.6	74.5	74.9	73.8
630	77.1	76.6	77.2	77.5	77.9	75.1	76.1	77.3	75.5	77.8	75.8	76.4
800	75.5	77.3	77.1	76.8	77.1	75.7	76.7	77.0	75.7	75.3	77.0	75.3
1000	76.5	76.9	77.3	76.8	76.7	76.4	76.3	77.3	77.3	76.0	76.4	76.2
1250	77.2	76.7	77.6	77.0	76.6	76.9	76.7	76.8	76.7	77.1	76.2	76.5
1600	78.0	78.5	78.5	78.4	78.1	78.5	77.7	78.9	79.0	78.1	78.7	78.2
2000	78.2	78.7	78.5	78.7	78.6	78.8	78.1	79.0	79.2	77.7	78.7	78.2
2500	79.0	79.8	79.2	79.2	79.4	79.6	78.6	79.6	79.0	78.4	79.6	78.4
3150	78.1	78.4	78.4	78.2	78.2	78.6	77.8	78.4	78.2	77.9	78.4	78.1
4000	75.9	76.3	75.8	75.6	75.8	76.2	75.7	75.9	75.9	75.3	76.2	75.7
5000	73.3	73.8	72.8	72.9	73.3	73.7	73.2	73.5	73.3	72.3	74.3	73.0

Tabella 3.13: media energetica dei livelli di rumore di calpestio (solaio in calcestruzzo armato) relativi alle singole posizioni di generatore di calpestio; le posizioni A1 e B12 sono state escluse dall'analisi a causa dell'eccessiva vicinanza con i bordi del solaio.

In figura 3.17 è invece riportato lo spettro medio energetico relativo a tutte le sorgenti, con indicazione della deviazione standard.

Per ogni posizione di generatore normalizzato sono state quindi calcolate le differenze al quadrato, su ogni banda, dei livelli medi energetici rispetto alla media delle misure e, dopo aver sommato le differenze quadratiche così ottenute, è stata stilata una classifica delle posizioni di generatore di calpestio; in base a tale classifica sono state scelte le sei posizioni migliori (la norma prevede almeno quattro posizioni), tenendo anche in considerazione il criterio di distribuzione spaziale. Sono state quindi scartate alcune posizioni a favore di altre meno preferibili, ma distribuite più uniformemente sulla superficie del solaio. In figura 3.18A sono rappresentate le posizioni del generatore normalizzato sul solaio, con indicazione della preferibilità (posizione in classifica). Dall'analisi è emerso che le posizioni migliori sono collocate principalmente in una porzione di solaio compresa tra



$f$ [Hz]	$L$ [dB]	$\sigma_{st}$
100	64.2	1.33
125	65.9	0.95
160	68.8	1.78
200	70.6	1.76
250	72.5	0.91
315	73.0	1.35
400	72.9	0.59
500	74.6	1.05
630	77.1	1.11
800	76.5	0.69
1000	76.8	0.52
1250	77.0	0.37
1600	78.5	0.48
2000	78.7	0.51
2500	79.2	0.53
3150	78.3	0.40
4000	75.9	0.43
5000	73.4	0.60

Figura 3.17: livelli di rumore di calpestio medi relativi a tutte le posizioni di generatore di calpestio, con indicazione della deviazione standard.

il centro ed il bordo (punti 1 - 9). Se si sceglissero semplicemente le prime sei posizioni, si trascurerebbe la sollecitazione del solaio nei punti centrali, dove gli spostamenti e le vibrazioni del solaio sono maggiori, pertanto nella fase di selezione è stato deciso di mantenere quattro posizioni di generatore normalizzato disposte nella fascia perimetrale e due posizioni centrali, per ottenere livelli di rumore maggiormente rappresentativi dell'intera superficie del solaio. In figura 3.18B sono rappresentate le sei posizioni di generatore normalizzato, scelte secondo i criteri esposti.

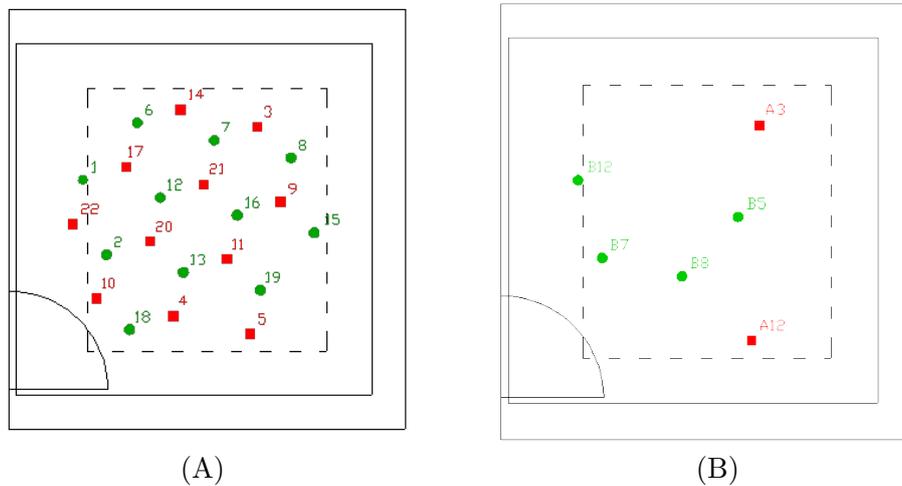
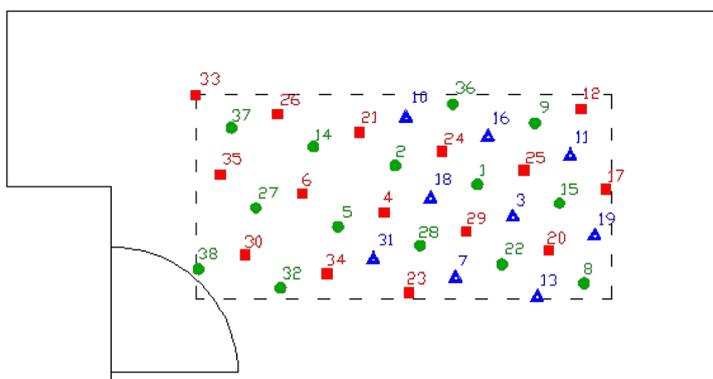


Figura 3.18: (A) classifica delle posizioni di generatore sul solaio in calcestruzzo; (B) posizioni scelte.

### Posizioni ottimali del microfono

Per ognuna delle sei posizioni di generatore di rumore di calpestio, sono stati mediati energeticamente i livelli di rumore registrati in camera ricevente sui trentotto punti di microfono distribuiti nello spazio, ottenendo quindi dei livelli medi puntuali comprensivi

del contributo simultaneo delle sei differenti posizioni di sorgente selezionate. Tali livelli medi sono stati confrontati con i livelli medi globali di tutte le posizioni della sorgente di rumore e sono state calcolate le differenze al quadrato. Tali valori sono stati sommati sull'intero spettro per ogni posizione di microfono, al fine di individuare una classifica di preferibilità dei punti di rilievo, analogamente a quanto già svolto per le posizioni di generatore e nell'ambito della qualificazione del campo sonoro degli ambienti per misure di potere fonoisolante. Nelle tabelle 3.14 e 3.15 sono riportati rispettivamente i livelli di rumore medi relativi alle sei posizioni di sorgente e gli scarti al quadrato rispetto alla media calcolata sulle sei posizioni di generatore e tutte le posizioni di microfono. La media globale è riportata al termine della tabella 3.14. In figura 3.19 è riportata la mappa dei punti di misura, con indicazione della preferibilità.



Punto	Diff.	Punto	Diff.
B6	5,3	A12	27,0
B5	7,6	A3	27,4
C5	10,3	B11	27,7
A10	10,9	A15	28,6
B9	11,7	A4	28,8
A9	15,0	A5	28,9
C8	15,3	A2	32,3
B12	16,5	B8	33,0
B2	16,6	B10	34,3
C1	16,6	A11	34,4
C3	17,2	A13	39,4
A6	18,2	C7	40,1
C9	18,8	B14	41,5
B4	20,6	A1	52,0
B7	21,3	A14	59,1
C2	23,1	A8	59,5
A7	25,8	B1	66,0
C4	26,2	B3	75,4
C6	26,4	B13	75,9

Figura 3.19: classifica di preferibilità delle posizioni microfoniche: a numero minore corrisponde posizione microfonica migliore; in tabella a destra sono riportate le posizioni, con indicazione dei valori delle differenze al quadrato, sommate sull'intero spettro, tra livelli medi relativi alla singola posizione microfonica e la media globale.

Sono state selezionate sei posizioni di microfono, tenendo conto della posizione in classifica e della uniformità di disposizione nello spazio disponibile. Inoltre la media dei trentasei singoli livelli di rumore (sei posizioni di generatore di rumore di calpestio e sei posizioni di microfono) è risultata differente al più di 0,5 dB rispetto alla media dei livelli campionati sull'intero spazio e relativi alle sei posizioni di generatore, in ogni banda di terzo d'ottava. In tabella 3.16 è riportato un riassunto dei risultati ottenuti. Dai risultati emerge che la combinazione di posizioni di generatore e microfono scelte permettono di ottenere livelli di rumore di calpestio molto vicini ai livelli ottenuti campionando il rumore su tutti i punti di misura adottati in fase di qualificazione, con deviazione dei livelli che in ogni banda di terzo d'ottava è compresa tra -1 e +1 dB.

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono												
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
100	66.3	62.9	63.0	62.1	65.6	63.6	64.9	66.1	64.4	63.8	63.7	66.7	60.4
125	65.0	64.3	62.4	64.6	62.2	64.5	63.6	61.4	65.5	64.8	62.5	63.7	63.8
160	66.5	70.0	65.9	67.0	67.1	67.8	67.4	70.2	66.2	69.1	66.1	69.6	68.3
200	70.5	70.8	72.4	68.1	70.8	69.7	71.5	70.1	70.8	70.4	69.6	68.7	70.9
250	73.9	71.1	72.9	73.5	72.5	73.5	72.3	73.4	73.0	71.2	70.3	73.4	71.7
315	72.8	73.0	71.9	73.5	72.1	73.0	72.0	74.1	73.2	73.7	72.7	72.8	72.2
400	71.4	71.6	72.5	72.2	72.2	71.6	71.0	70.9	72.8	71.9	72.2	71.8	72.7
500	74.3	74.0	74.6	75.0	74.8	74.3	75.2	73.3	74.0	75.0	75.6	74.5	74.0
630	73.6	73.8	77.2	75.2	77.1	75.1	75.8	76.0	75.6	75.8	76.9	76.2	74.4
800	76.6	75.0	76.5	77.0	78.1	77.0	75.6	75.7	75.2	76.4	77.4	76.7	75.0
1000	75.5	75.7	77.0	77.3	76.6	77.6	77.2	74.5	76.0	76.5	76.6	77.3	75.5
1250	75.6	76.4	77.6	77.0	76.9	77.8	77.9	75.2	76.2	77.3	77.4	77.1	76.6
1600	76.4	76.9	78.4	79.1	79.5	78.4	79.8	76.4	77.8	78.8	78.9	79.3	77.4
2000	76.5	77.5	78.4	79.3	79.6	79.7	79.3	76.9	78.0	78.8	79.4	80.0	77.2
2500	77.1	77.5	79.4	79.2	79.5	79.4	79.8	77.2	78.4	79.3	79.8	79.4	77.6
3150	76.8	77.5	78.3	79.1	79.2	79.1	79.3	76.9	78.0	78.9	79.2	78.7	76.9
4000	74.8	75.3	76.5	76.8	76.6	76.8	76.9	74.9	76.0	76.5	76.6	76.6	74.9
5000	72.0	72.9	74.0	74.6	74.4	74.2	74.4	72.1	73.3	74.1	74.3	74.5	72.3

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono												
	A14	A15	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
100	67.7	63.9	56.8	64.8	61.2	63.1	62.5	63.0	65.3	63.6	63.5	58.8	64.6
125	60.6	63.9	68.7	67.2	67.7	67.8	66.6	66.7	67.5	68.1	67.0	66.7	66.8
160	68.9	66.2	68.6	67.8	72.4	70.0	68.4	69.9	70.3	69.4	70.1	69.5	67.4
200	69.6	69.3	69.4	71.9	71.0	71.6	69.4	70.6	70.4	71.8	70.5	68.7	72.0
250	75.3	70.2	72.4	70.4	73.0	70.8	72.5	72.2	71.1	73.0	73.2	73.9	72.7
315	72.9	72.0	73.2	72.7	72.6	72.8	71.9	72.9	72.4	72.4	73.9	72.7	71.6
400	72.2	72.5	73.9	74.0	73.5	72.6	73.1	72.9	73.6	72.8	73.8	72.8	73.7
500	73.6	74.8	73.5	73.2	72.7	73.7	73.3	73.4	73.4	73.4	73.4	73.9	73.3
630	75.6	75.3	76.1	79.2	73.9	75.2	77.0	78.4	79.3	75.5	75.9	77.2	81.4
800	75.9	76.8	76.8	77.9	74.2	75.3	76.2	76.4	78.0	75.7	75.2	76.1	77.9
1000	75.2	77.3	77.5	77.0	74.7	75.8	76.7	77.0	78.4	75.7	75.7	76.9	77.9
1250	76.3	78.0	77.7	76.8	75.3	76.1	77.5	76.9	77.6	75.7	76.7	77.2	76.6
1600	77.5	78.6	78.4	79.1	76.5	77.6	78.9	79.0	79.9	76.9	78.0	78.4	79.1
2000	78.4	78.8	78.8	78.6	76.9	78.1	78.7	79.4	78.9	77.2	78.3	79.0	78.8
2500	78.6	79.7	79.8	79.2	77.2	78.2	79.0	79.7	79.4	77.3	78.9	79.2	79.7
3150	78.5	78.5	78.8	78.0	76.3	77.3	77.9	78.5	78.4	76.4	77.8	77.7	78.3
4000	76.0	76.5	75.3	75.5	73.5	74.9	75.4	75.8	75.6	74.0	75.3	75.7	75.6
5000	73.6	74.0	73.1	73.1	70.7	72.4	73.0	73.4	73.0	71.1	72.9	73.0	73.4

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono												
	B12	B13	B14	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Media
100	62.8	60.0	64.8	63.8	63.4	65.2	62.0	65.6	62.0	60.9	63.2	65.0	63.9
125	69.1	67.8	69.5	62.9	65.5	65.0	64.8	66.1	64.7	62.3	65.8	65.7	65.9
160	68.9	68.5	69.8	67.4	68.5	69.4	68.7	69.4	70.8	69.7	67.2	69.2	68.9
200	71.4	70.6	69.5	71.2	71.7	72.3	71.7	71.2	72.1	72.9	72.1	69.2	70.9
250	73.0	72.5	71.6	72.9	72.8	70.6	70.3	71.7	70.0	73.0	72.4	73.6	72.5
315	72.5	75.4	72.0	72.0	72.8	72.0	72.2	74.1	73.3	72.4	71.8	72.7	72.8
400	73.8	73.3	72.8	74.0	74.9	72.5	72.8	71.6	74.5	72.9	74.6	73.8	72.9
500	73.5	73.8	73.4	72.3	74.0	73.7	72.4	73.0	74.0	73.4	72.9	74.0	73.9
630	76.3	75.0	74.9	77.4	81.4	78.9	80.8	78.1	78.0	80.8	78.1	79.4	77.4
800	76.5	74.0	75.5	76.6	76.8	77.2	75.3	76.5	76.9	76.0	76.4	77.0	76.4
1000	77.3	73.9	75.4	77.4	77.9	77.2	77.0	76.8	77.6	77.5	76.8	77.1	76.7
1250	77.9	75.2	75.7	76.9	76.8	77.4	77.1	76.8	77.6	77.0	77.0	77.8	76.9
1600	79.1	76.3	76.8	78.8	78.9	79.0	77.9	79.3	79.6	78.5	78.7	79.1	78.5
2000	79.1	76.5	77.4	78.6	79.2	79.7	78.7	78.8	79.3	78.8	79.0	79.9	78.7
2500	79.0	76.8	77.6	79.1	79.6	79.8	79.0	79.7	80.1	79.0	79.9	80.4	79.0
3150	78.3	76.2	76.9	77.8	78.5	78.9	78.3	78.6	79.1	78.2	79.4	79.1	78.2
4000	75.7	74.1	74.3	75.4	75.8	76.8	75.5	75.6	76.8	75.5	77.0	77.0	75.8
5000	73.0	70.9	71.8	72.7	73.3	74.5	73.0	73.1	74.6	73.1	74.7	74.7	73.4

Tabella 3.14: livelli di rumore di calpestio (media di sei posizioni di generatore sul solaio) in ogni punto di rilievo.

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono												
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
100	5.6	1.0	0.8	3.3	2.8	0.1	0.9	4.7	0.2	0.0	0.1	7.8	12.6
125	0.7	2.4	11.9	1.5	13.2	1.7	5.2	20.4	0.1	1.2	11.4	4.6	4.2
160	5.4	1.3	9.0	3.4	3.1	1.2	2.1	1.9	7.0	0.0	7.7	0.5	0.3
200	0.1	0.0	2.4	7.5	0.0	1.4	0.4	0.6	0.0	0.2	1.6	4.7	0.0
250	1.9	1.9	0.2	1.0	0.0	1.0	0.0	0.8	0.2	1.7	4.7	0.8	0.5
315	0.0	0.0	0.9	0.5	0.6	0.0	0.6	1.6	0.2	0.9	0.0	0.0	0.4
400	2.3	1.8	0.2	0.6	0.5	1.7	3.7	4.0	0.0	1.1	0.6	1.3	0.1
500	0.2	0.0	0.5	1.3	0.8	0.2	1.8	0.3	0.0	1.3	2.8	0.4	0.0
630	15.1	13.3	0.0	4.8	0.1	5.4	2.8	2.1	3.5	2.7	0.2	1.6	9.0
800	0.0	2.1	0.0	0.3	2.8	0.4	0.7	0.5	1.4	0.0	1.1	0.1	1.9
1000	1.5	1.1	0.1	0.4	0.0	0.8	0.2	4.9	0.6	0.1	0.0	0.4	1.5
1250	1.7	0.3	0.4	0.0	0.0	0.7	1.0	2.9	0.4	0.1	0.2	0.0	0.1
1600	4.0	2.5	0.0	0.4	1.1	0.0	1.9	4.1	0.4	0.1	0.2	0.7	1.2
2000	4.8	1.3	0.1	0.4	1.0	1.0	0.4	3.3	0.4	0.0	0.6	1.9	2.0
2500	3.9	2.4	0.1	0.0	0.2	0.1	0.6	3.2	0.4	0.1	0.5	0.1	1.9
3150	2.0	0.6	0.0	0.7	0.9	0.7	1.2	1.8	0.0	0.5	1.0	0.2	1.7
4000	1.1	0.2	0.4	0.9	0.7	0.9	1.2	0.8	0.0	0.4	0.7	0.6	0.8
5000	1.8	0.2	0.4	1.5	1.1	0.6	1.0	1.7	0.0	0.5	0.9	1.3	1.2

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono												
	A14	A15	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
100	14.2	0.0	50.1	0.8	7.2	0.6	2.1	0.9	2.0	0.1	0.2	25.8	0.5
125	27.3	4.0	8.2	1.8	3.4	3.6	0.5	0.7	2.7	4.9	1.3	0.6	0.9
160	0.0	7.2	0.1	1.2	12.3	1.2	0.2	1.0	2.0	0.3	1.6	0.5	2.2
200	1.5	2.4	2.0	1.1	0.0	0.6	2.3	0.0	0.2	0.8	0.1	4.5	1.2
250	7.8	5.3	0.0	4.2	0.2	2.7	0.0	0.1	1.9	0.3	0.5	2.0	0.0
315	0.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.2	0.2	1.3	0.0	1.5
400	0.6	0.2	0.9	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.7	0.0	0.5
500	0.1	0.8	0.2	0.4	1.3	0.0	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.0	0.3
630	3.3	4.8	1.8	2.9	12.6	4.8	0.2	0.9	3.5	3.9	2.3	0.1	15.9
800	0.2	0.1	0.2	2.3	5.0	1.2	0.0	0.0	2.6	0.6	1.4	0.1	2.2
1000	2.2	0.4	0.6	0.1	4.3	0.8	0.0	0.1	2.7	0.9	1.1	0.0	1.4
1250	0.4	1.2	0.6	0.0	2.6	0.7	0.4	0.0	0.5	1.6	0.1	0.1	0.1
1600	1.0	0.0	0.0	0.4	3.8	0.7	0.2	0.3	2.1	2.3	0.2	0.0	0.4
2000	0.1	0.0	0.0	0.0	3.0	0.3	0.0	0.6	0.0	2.3	0.1	0.1	0.0
2500	0.2	0.5	0.6	0.0	3.5	0.6	0.0	0.4	0.1	2.9	0.0	0.0	0.4
3150	0.1	0.1	0.3	0.1	3.8	0.8	0.1	0.1	0.0	3.4	0.2	0.3	0.0
4000	0.1	0.5	0.2	0.1	5.2	0.9	0.2	0.0	0.0	3.2	0.3	0.0	0.1
5000	0.1	0.4	0.1	0.1	6.9	0.9	0.1	0.0	0.1	4.9	0.2	0.1	0.0

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono											
	B12	B13	B14	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
100	1.3	15.4	0.7	0.0	0.2	1.5	3.8	2.9	3.8	9.4	0.6	1.1
125	10.3	3.7	13.2	8.6	0.1	0.8	1.1	0.1	1.3	12.6	0.0	0.0
160	0.0	0.1	0.8	2.1	0.1	0.3	0.0	0.3	3.6	0.7	2.7	0.1
200	0.4	0.1	1.9	0.1	0.7	2.1	0.8	0.1	1.5	4.4	1.5	2.6
250	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	3.7	4.8	0.6	6.2	0.3	0.0	1.3
315	0.1	6.6	0.6	0.6	0.0	0.7	0.4	1.6	0.2	0.2	1.0	0.0
400	0.8	0.2	0.0	1.1	3.7	0.2	0.0	1.9	2.3	0.0	2.7	0.7
500	0.2	0.0	0.2	2.4	0.0	0.0	2.1	0.8	0.0	0.2	1.0	0.0
630	1.2	6.0	6.2	0.0	15.7	2.2	11.4	0.5	0.3	11.6	0.4	4.0
800	0.0	5.9	0.8	0.1	0.2	0.6	1.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.3
1000	0.3	7.7	1.7	0.5	1.3	0.2	0.1	0.0	0.7	0.5	0.0	0.2
1250	0.9	2.9	1.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.7
1600	0.5	4.8	2.6	0.1	0.2	0.3	0.3	0.8	1.2	0.0	0.0	0.4
2000	0.2	4.6	1.5	0.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	1.6
2500	0.0	5.1	2.2	0.0	0.3	0.7	0.0	0.5	1.1	0.0	0.7	1.9
3150	0.0	4.1	1.9	0.2	0.1	0.5	0.0	0.1	0.7	0.0	1.4	0.7
4000	0.0	2.9	2.3	0.2	0.0	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	1.4	1.3
5000	0.2	5.9	2.6	0.4	0.0	1.2	0.1	0.1	1.5	0.1	1.7	1.8

Tabella 3.15: differenze al quadrato tra i livelli di rumore di calpestio (media di sei posizioni di generatore sul solaio) in ogni punto di rilievo rispetto alla media complessiva.

$f$ [Hz]	Posizioni di microfono						Sorg. selezionate		Tutte le sorgenti		
	B6	A10	B4	C8	A6	B7	Media	Media	Diff.	Media	Diff.
100	63.0	63.8	63.1	63.2	63.6	65.3	63.7	63.9	0.2	64.2	0.5
125	66.7	64.8	67.8	65.8	64.5	67.5	66.4	65.9	0.5	65.9	0.5
160	69.9	69.1	70.0	67.2	67.8	70.3	69.2	68.9	0.3	68.8	0.3
200	70.6	70.4	71.6	72.1	69.7	70.4	70.9	70.9	0.0	70.6	0.3
250	72.2	71.2	70.8	72.4	73.5	71.1	72.0	72.5	0.5	72.5	0.5
315	72.9	73.7	72.8	71.8	73.0	72.4	72.8	72.8	0.0	73.0	0.2
400	72.9	71.9	72.6	74.6	71.6	73.6	73.0	72.9	0.0	72.9	0.0
500	73.4	75.0	73.7	72.9	74.3	73.4	73.9	73.9	0.0	74.6	0.8
630	78.4	75.8	75.2	78.1	75.1	79.3	77.3	77.4	0.1	77.1	0.2
800	76.4	76.4	75.3	76.4	77.0	78.0	76.7	76.4	0.3	76.5	0.2
1000	77.0	76.5	75.8	76.8	77.6	78.4	77.1	76.7	0.4	76.8	0.3
1250	76.9	77.3	76.1	77.0	77.8	77.6	77.1	76.9	0.2	77.0	0.2
1600	79.0	78.8	77.6	78.7	78.4	79.9	78.8	78.5	0.3	78.5	0.3
2000	79.4	78.8	78.1	79.0	79.7	78.9	79.0	78.7	0.3	78.7	0.3
2500	79.7	79.3	78.2	79.9	79.4	79.4	79.3	79.0	0.3	79.2	0.1
3150	78.5	78.9	77.3	79.4	79.1	78.4	78.7	78.2	0.4	78.3	0.4
4000	75.8	76.5	74.9	77.0	76.8	75.6	76.1	75.8	0.3	75.9	0.2
5000	73.4	74.1	72.4	74.7	74.2	73.0	73.7	73.4	0.3	73.4	0.3

Tabella 3.16: livelli di rumore di calpestio registrati nelle singole posizioni microfoniche selezionate (media del contributo delle sei posizioni di generatore scelte), valore medio energetico delle misure e confronto con i livelli medi energetici comprensivi di tutto lo spazio campionato e con tutti i rilievi eseguiti (le differenze tra medie di valori sono espresse in valore assoluto).

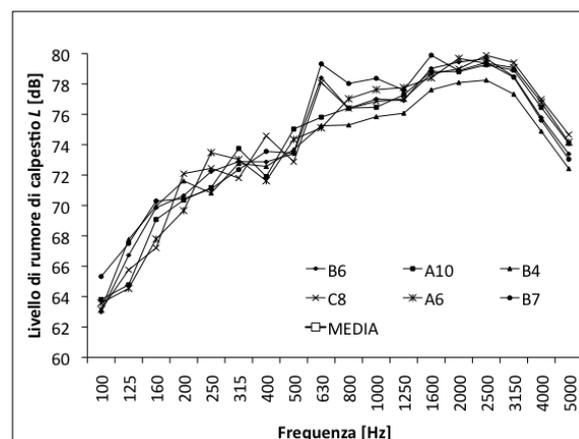


Figura 3.20: livelli di rumore di calpestio  $L$  relativi alle sei posizioni di generatore selezionate sul solaio in calcestruzzo armato non rivestito.

### 3.3.2 Misure di livello di rumore di calpestio di solai secondo UNI EN ISO 140-6: solaio in laterocemento

La qualificazione del campo sonoro in laboratorio per una misura di rumore di calpestio su solaio in laterocemento è stata effettuata secondo le medesime metodologie utilizzate per il solaio in calcestruzzo armato. È stata quindi identificata una griglia di punti distribuiti nello spazio disponibile nella camera sovrastante il solaio e per identificare le posizioni del generatore normalizzato sul solaio sono state considerate le proiezioni in pianta di tali punti. In camera ricevente, invece, sono stati utilizzati i trentadue punti già adottati per la qualificazione del campo sonoro per misure di potere fonoisolante in laboratorio. Nei prossimi due paragrafi si riporta una breve sintesi dei risultati ottenuti

## Posizioni ottimali del generatore normalizzato

Le posizioni utilizzate per la qualificazione del campo sonoro sono indicate in figura 3.21.

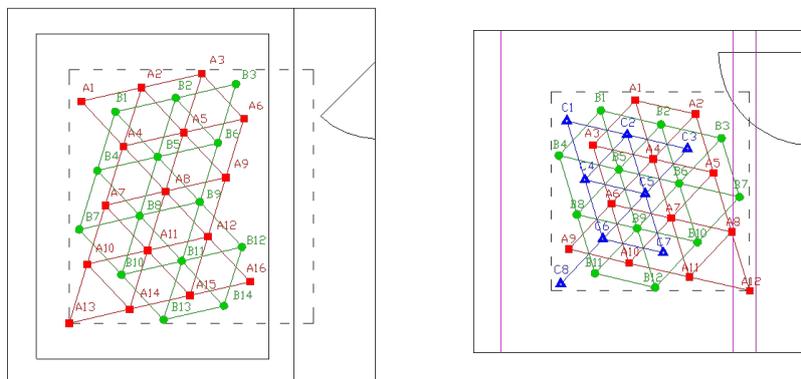
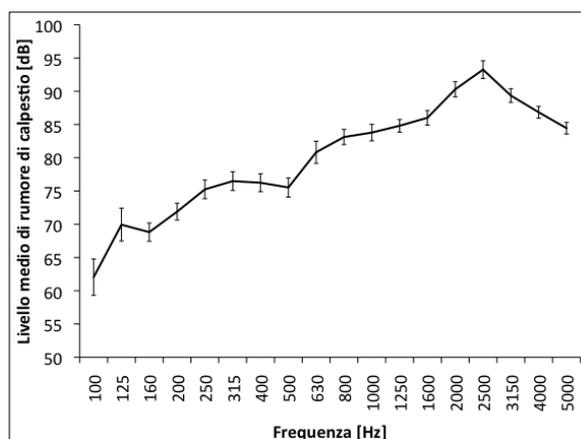


Figura 3.21: posizioni di generatore di calpestio e di microfono analizzate in fase di qualificazione.

Per ogni posizione di sorgente è stata calcolata la media energetica dei livelli di rumore e lo scarto rispetto al valore medio. Tali valori medi sono riportati in tabella 3.17. In figura 3.22 è invece riportato lo spettro medio energetico relativo a tutte le sorgenti, con indicazione della deviazione standard.



$f$ [Hz]	$L$ [dB]	$\sigma_{st}$
100	62.0	2.72
125	69.9	2.46
160	68.8	1.37
200	71.9	1.25
250	75.2	1.40
315	76.5	1.40
400	76.2	1.34
500	75.5	1.43
630	80.8	1.66
800	83.1	1.14
1000	83.8	1.24
1250	84.8	0.95
1600	86.0	1.09
2000	90.3	1.14
2500	93.3	1.34
3150	89.3	1.01
4000	86.8	0.89
5000	84.5	0.87

Figura 3.22: livelli di rumore di calpestio medi relativi a tutte le posizioni di generatore di calpestio, con indicazione della deviazione standard.

Dai risultati emerge che il solaio in laterocemento è caratterizzato da una maggiore variabilità dei livelli di rumore prodotti sotto l'azione del generatore di rumore di calpestio normalizzato, rispetto al solaio in calcestruzzo armato. Ciò potrebbe dipendere in parte dalla maggiore regolarità dell'ambiente ricevente, ma soprattutto dalla disomogeneità intrinseca del solaio; infatti, essendo composto da travetti e pignatte, l'impatto dei martelli metallici del generatore in diverse posizioni potrebbe causare un'emissione sonora completamente differente in ambiente ricevente. Risulta quindi essenziale, in particolare per questo solaio, identificare delle posizioni di misura che descrivano al meglio il campo

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente											
	A1	A2	A3	A4	A5	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A14
100	58.8	59.3	57.6	62.7	61.5	65.0	61.0	65.1	62.5	61.1	62.9	58.9
125	67.3	72.1	68.6	71.2	72.8	66.4	65.6	67.0	69.0	70.8	68.6	71.0
160	69.1	65.9	69.4	69.3	68.7	68.5	71.2	66.4	69.9	67.7	68.7	66.4
200	72.9	72.6	72.4	70.9	71.9	71.2	69.5	73.4	72.6	69.7	70.9	72.1
250	78.6	75.0	76.8	74.9	74.0	76.9	74.6	75.5	74.1	74.1	72.9	74.6
315	78.1	77.5	77.0	76.8	78.2	72.2	76.9	77.1	76.0	74.7	74.8	76.5
400	75.3	78.0	75.1	73.8	74.5	74.6	76.5	75.8	76.1	75.1	74.9	78.7
500	75.5	77.9	75.2	77.0	74.9	73.1	74.9	75.1	74.2	76.4	74.3	77.8
630	80.4	82.8	81.5	81.3	81.4	81.9	81.6	78.2	80.2	81.5	80.4	78.8
800	81.9	84.5	85.3	82.9	82.0	84.6	83.4	82.0	81.7	83.3	84.0	80.7
1000	84.7	85.7	85.1	84.0	83.5	84.8	83.2	82.0	82.9	83.4	83.0	81.9
1250	84.3	85.6	86.1	85.2	83.9	85.8	85.1	83.7	83.3	84.9	85.7	82.7
1600	86.4	87.3	86.7	86.2	84.9	86.5	85.7	84.1	85.5	86.1	85.7	84.5
2000	89.7	92.5	90.6	88.9	90.4	91.6	90.1	88.6	89.3	91.0	91.3	88.4
2500	92.5	93.6	94.4	93.5	92.1	94.8	94.7	91.7	91.2	93.7	94.0	90.5
3150	90.2	89.9	90.5	88.9	89.8	89.9	88.8	87.9	88.3	88.8	89.6	87.6
4000	87.9	87.8	87.8	86.2	86.8	87.1	86.9	86.0	86.0	86.1	86.9	85.2
5000	85.3	85.2	85.5	83.8	84.9	84.7	84.6	84.2	83.6	83.6	84.6	82.9

$f$ [Hz]	Posizioni di sorgente											
	A15	B1	B2	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B14
100	57.4	61.2	59.1	64.7	61.3	63.2	65.5	62.5	63.2	62.3	60.4	54.5
125	71.0	71.8	72.6	67.1	70.6	69.7	68.8	65.7	66.5	72.4	71.3	65.2
160	68.1	68.7	67.7	68.4	69.9	69.9	68.2	71.4	68.9	67.5	69.1	67.6
200	72.6	72.9	73.0	72.4	69.7	73.2	73.0	69.8	70.2	72.5	71.1	70.9
250	74.2	75.4	75.1	76.2	73.9	73.8	75.8	74.0	76.8	74.2	72.6	76.2
315	76.0	76.3	77.7	75.2	74.8	76.3	76.3	77.2	74.1	77.4	77.1	76.7
400	78.1	75.2	78.9	75.0	75.3	76.5	76.7	76.1	75.7	77.1	75.9	75.8
500	75.2	73.7	76.8	74.6	76.3	75.7	76.4	76.6	72.2	73.5	75.1	74.8
630	77.3	83.9	80.3	80.1	81.7	81.4	79.2	79.1	81.0	81.5	80.7	76.7
800	83.3	84.6	82.9	82.9	83.8	82.5	82.6	82.3	83.6	83.2	81.6	81.5
1000	82.9	86.5	84.0	84.2	84.5	84.2	82.3	82.7	83.5	83.8	82.3	81.4
1250	84.9	85.8	84.2	84.7	86.3	84.8	83.6	83.9	85.7	84.9	84.1	83.9
1600	84.6	88.4	86.9	85.9	87.7	85.6	85.8	85.1	85.8	86.7	84.6	84.4
2000	90.9	90.6	90.5	89.4	91.8	90.5	89.9	88.9	90.1	91.3	89.1	88.3
2500	91.8	94.8	93.1	92.3	95.2	93.6	91.9	92.6	94.8	93.5	91.7	91.4
3150	88.0	90.6	90.3	89.4	91.1	89.0	89.2	88.3	90.2	89.1	88.8	87.4
4000	85.7	87.4	87.7	86.3	88.4	87.4	87.0	86.4	87.6	86.5	86.2	84.9
5000	83.5	84.6	85.8	83.3	85.4	84.9	84.9	83.7	85.2	83.8	84.2	82.6

Tabella 3.17: media energetica dei livelli di rumore di calpestio (solaio in latero-cemento) relativi alle singole posizioni di generatore di calpestio; alcune posizioni sono state escluse dall'analisi a causa dell'eccessiva vicinanza con i bordi del solaio.

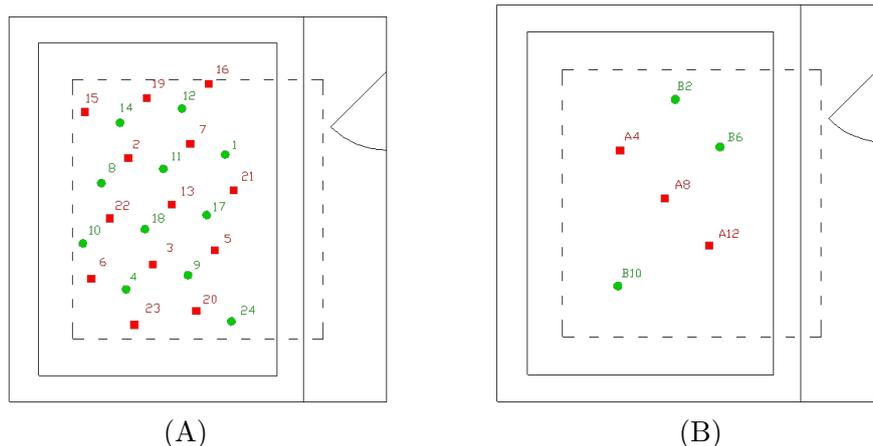
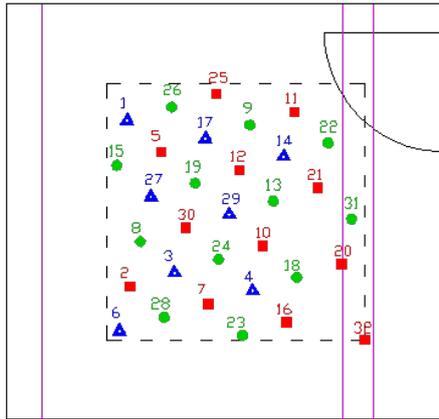


Figura 3.23: (A) classifica delle posizioni di generatore sul solaio in laterocemento; (B) posizioni scelte.

sonoro nell'ambiente ricevente, anche mediante un'eccedenza di posizioni di generatore e microfono rispetto alle indicazioni di norma. Per ogni posizione di generatore normalizzato sono state quindi calcolate le differenze al quadrato, su ogni banda, dei livelli medi energetici rispetto alla media delle misure e, dopo aver sommato le differenze quadratiche così ottenute, è stata stilata una classifica delle posizioni di generatore di calpestio; in base a tale classifica sono state scelte le sei posizioni migliori (la norma prevede almeno quattro posizioni), tenendo anche in considerazione il criterio di distribuzione spaziale. Sono state quindi scartate alcune posizioni a favore di altre meno preferibili, ma distribuite più uniformemente sulla superficie del solaio. In figura 3.23A sono rappresentate le posizioni del generatore normalizzato sul solaio, con indicazione della preferibilità (posizione in classifica); sono state selezionate sei posizioni tra le migliori. Analogamente a quanto già eseguito per il solaio in calcestruzzo armato, come criteri sono stati adottati la posizione in classifica, l'uniformità di distribuzione sulla superficie del solaio e la presenza di almeno due posizioni a centro solaio. In figura 3.23B sono rappresentate le sei posizioni di generatore normalizzato, scelte secondo i criteri esposti. Tali posizioni sono B6, A4, B10, A12, B2 e A8.

### Posizioni ottimali del microfono

Per ognuna delle sei posizioni di generatore di rumore di calpestio, sono stati mediati energeticamente i livelli di rumore registrati in camera ricevente sui trentadue punti di microfono distribuiti nello spazio, ottenendo quindi dei livelli medi puntuali comprensivi del contributo simultaneo delle sei differenti posizioni di sorgente selezionate. Tali livelli medi sono stati confrontati con i livelli medi globali di tutte le posizioni della sorgente di rumore e sono state calcolate le differenze al quadrato. Le differenze sono state sommate sull'intero spettro per ogni posizione di microfono, al fine di individuare una classifica di preferibilità dei punti di rilievo, analogamente a quanto già svolto per le posizioni di generatore e nell'ambito della qualificazione del campo sonoro degli ambienti per misure di potere fonoisolante. Nella tabella 3.18 sono riportati i livelli di rumore medi relativi alle sei posizioni di sorgente, con indicazione della media globale. In tabella 3.19 sono



Punto	Diff.	Punto	Diff.
C1	6,0	C2	18,5
A9	6,5	B10	19,2
C6	7,3	B5	20,6
C7	7,9	A8	23,2
A3	8,3	A5	25,2
C8	9,6	B3	27,4
A10	10,4	B12	27,7
B8	10,6	B9	30,8
B2	11,1	A1	34,9
A7	11,8	B1	44,4
A2	12,1	C4	44,7
A4	12,9	B11	46,5
B6	15,6	C5	50,4
C3	16,7	A6	54,3
B4	17,3	B7	61,9
A11	18,3	A12	128,6

Figura 3.24: classifica di preferibilità delle posizioni microfoniche (ambiente ricevente per solaio in laterocemento): a numero minore corrisponde posizione microfonica migliore; in tabella a destra sono riportate le posizioni, con indicazione dei valori delle differenze al quadrato, sommate sull'intero spettro, tra livelli medi relativi alla singola posizione microfonica e la media globale.

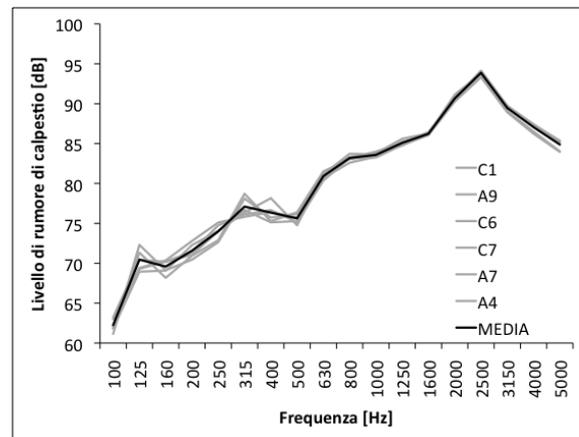


Figura 3.25: livelli di rumore di calpestio  $L$  relativi alle sei posizioni di generatore selezionate sul solaio in latero-cemento non rivestito.

invece riportati gli scarti al quadrato rispetto alla media calcolata sulle sei posizioni di generatore e tutte le posizioni di microfono. In figura 3.24 è riportata la mappa dei punti di misura, con indicazione della preferibilità. Sono state selezionate sei posizioni di microfono, tenendo conto della posizione in classifica e della uniformità di disposizione nello spazio disponibile. Inoltre la media dei trentasei singoli livelli di rumore (sei posizioni di generatore di rumore di calpestio e sei posizioni di microfono) è risultata differente al più di 0,5 dB rispetto alla media dei livelli campionati sull'intero spazio e relativi alle sei posizioni di generatore, in ogni banda di terzo d'ottava. In tabella 3.20 è riportato un riassunto dei risultati ottenuti; le posizioni selezionate sono: C1, A9, C6, C7, A7 e A4. Dai risultati emerge che la combinazione di posizioni di generatore e microfono scelte permettono di ottenere livelli di rumore di calpestio molto vicini ai livelli ottenuti campionando il rumore su tutti i punti di misura adottati in fase di qualificazione, con deviazione dei livelli che in ogni banda di terzo d'ottava è compresa tra -1.2 e +1.2 dB.

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>										
	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A9$	$A10$	$A11$
100	61.7	62.5	63.2	61.2	62.9	63.7	62.1	61.8	63.2	60.2	62.9
125	67.1	73.8	70.9	72.3	69.9	64.3	71.3	71.3	70.4	71.4	73.8
160	67.3	69.8	69.7	69.1	67.8	70.6	68.2	65.6	70.2	68.8	68.3
200	69.0	71.8	70.5	70.4	68.9	70.9	70.9	69.2	71.1	69.9	72.1
250	73.1	74.9	73.6	72.6	74.9	72.7	72.9	74.0	74.0	74.5	74.8
315	74.9	76.5	75.2	78.1	77.9	78.5	78.7	76.5	76.7	76.8	76.4
400	74.5	76.2	75.6	75.7	73.8	75.8	75.3	75.1	75.1	76.1	74.6
500	75.9	76.1	75.3	76.2	76.4	74.5	76.4	75.4	75.3	75.3	76.4
630	80.7	81.5	81.3	80.5	82.4	80.7	81.5	80.9	80.7	80.5	81.7
800	82.6	82.7	82.7	83.2	83.5	83.0	83.0	83.0	82.6	82.4	83.4
1000	83.6	83.7	83.5	84.0	83.7	83.8	83.4	83.9	83.3	83.8	83.9
1250	85.4	84.6	85.1	85.1	84.5	85.0	85.3	85.2	84.9	85.6	84.8
1600	86.0	86.1	86.3	86.4	86.1	86.2	86.1	86.2	86.2	86.0	86.0
2000	90.2	90.5	90.4	90.6	90.7	90.8	90.6	90.3	90.6	90.7	90.8
2500	94.0	93.6	94.1	94.1	93.7	94.3	94.1	93.3	93.7	94.0	94.0
3150	89.8	89.6	89.5	89.6	89.6	89.7	89.7	89.3	89.7	89.7	89.7
4000	87.3	87.3	87.1	87.4	87.4	87.3	87.4	87.2	87.3	87.4	87.3
5000	85.0	84.9	85.1	85.4	85.2	85.1	85.2	84.9	85.3	85.3	85.3

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>										
	$A12$	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$	$B8$	$B9$	$B10$
100	59.2	59.2	60.3	60.0	62.1	60.6	62.8	61.1	63.1	58.5	62.0
125	61.2	75.0	69.7	71.1	69.5	66.9	67.4	64.1	68.9	68.9	70.9
160	64.9	69.5	69.6	71.6	69.2	68.3	68.2	66.9	69.2	69.0	71.2
200	71.3	75.3	70.1	75.1	68.8	72.4	71.5	69.8	70.1	69.8	74.1
250	74.8	73.5	75.0	75.0	73.3	73.7	73.6	75.3	73.5	74.5	76.8
315	76.8	74.9	76.1	78.0	75.7	76.2	76.5	76.6	76.1	78.2	76.4
400	73.4	76.7	77.8	77.1	76.5	77.7	77.1	78.4	77.1	79.2	76.6
500	74.8	75.1	75.9	76.0	75.7	75.3	74.5	75.1	76.4	75.3	74.8
630	80.5	81.1	81.4	81.6	79.8	80.9	81.5	81.7	80.8	80.8	80.0
800	83.5	83.9	83.0	82.4	83.5	83.1	83.1	83.3	83.4	84.3	82.8
1000	82.9	83.9	84.3	83.5	84.0	84.3	83.6	83.5	84.3	84.0	83.5
1250	84.8	84.4	85.4	84.6	85.0	85.4	85.0	84.4	84.6	85.2	84.5
1600	85.7	86.3	86.1	85.6	86.1	86.1	86.0	85.6	85.9	86.5	86.1
2000	90.0	90.3	90.5	90.1	90.2	90.7	90.4	89.8	90.4	90.7	90.1
2500	93.2	93.6	93.7	93.0	93.5	94.1	93.6	92.9	93.5	93.7	93.4
3150	89.1	89.1	88.9	88.5	88.8	89.1	88.9	88.5	89.1	89.1	88.9
4000	87.2	86.4	86.5	86.3	86.2	86.6	86.3	86.2	86.4	86.8	86.3
5000	84.9	84.0	83.9	83.4	83.6	84.0	84.0	83.7	83.9	84.2	83.9

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>										
	$B11$	$B12$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$C5$	$C6$	$C7$	$C8$	<i>Media</i>
100	60.6	59.9	61.8	59.0	65.0	65.5	62.4	63.0	61.8	62.3	62.1
125	75.6	73.7	69.3	68.9	70.8	66.1	63.9	69.4	68.9	69.0	70.6
160	69.4	66.6	70.2	69.0	70.3	70.7	69.2	70.4	69.1	70.5	69.2
200	75.6	69.6	71.4	72.3	73.3	73.8	71.4	72.8	72.3	70.5	71.9
250	72.8	74.4	74.8	75.4	73.8	75.7	73.5	75.1	74.1	74.4	74.3
315	75.1	76.7	76.1	77.2	77.1	76.6	77.5	75.8	76.4	76.2	76.8
400	76.2	77.1	76.7	77.6	77.4	75.8	78.0	76.4	78.2	75.5	76.6
500	75.6	76.1	75.1	75.9	74.2	76.8	74.9	75.7	74.8	74.7	75.5
630	81.3	81.8	80.4	81.1	82.0	81.6	81.0	81.1	81.2	80.7	81.1
800	83.9	82.8	83.2	83.1	82.6	83.5	83.2	83.7	83.3	83.6	83.2
1000	83.7	83.8	83.3	83.8	83.4	84.1	83.7	83.7	83.8	83.8	83.7
1250	85.1	85.1	84.8	85.0	85.0	85.1	85.6	84.8	85.6	85.3	85.0
1600	86.3	86.2	86.1	86.7	86.4	86.4	86.3	86.2	86.3	86.3	86.2
2000	90.5	90.4	90.3	90.8	90.5	90.9	90.7	90.8	91.1	90.7	90.5
2500	93.6	93.8	93.3	94.4	93.6	94.3	94.1	94.1	93.8	94.2	93.8
3150	89.3	89.1	88.9	90.0	89.0	89.8	89.2	89.7	89.1	89.6	89.3
4000	86.6	86.5	86.2	88.0	86.5	87.7	87.0	87.4	86.5	87.5	87.0
5000	84.2	84.1	84.0	85.8	84.1	85.5	84.8	85.2	84.0	85.4	84.6

Tabella 3.18: livelli di rumore di calpestio (media di sei posizioni di generatore sul solaio in laterocemento) in ogni punto di rilievo.

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>										
	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A9$	$A10$	$A11$
100	0.1	0.2	1.2	0.8	0.8	2.8	0.0	0.1	1.3	3.3	0.7
125	12.2	10.0	0.1	2.8	0.6	40.2	0.5	0.4	0.0	0.6	10.3
160	3.8	0.3	0.2	0.0	2.0	1.8	1.2	13.0	0.9	0.2	0.9
200	8.1	0.0	1.9	2.0	9.1	1.0	0.8	6.9	0.6	3.9	0.0
250	1.4	0.3	0.6	2.8	0.3	2.6	2.0	0.1	0.1	0.0	0.3
315	3.3	0.1	2.5	1.9	1.3	3.2	3.8	0.0	0.0	0.0	0.1
400	4.5	0.1	1.0	0.7	7.8	0.6	1.7	2.1	2.1	0.2	4.1
500	0.1	0.3	0.0	0.4	0.7	1.2	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7
630	0.1	0.1	0.0	0.4	1.7	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4
800	0.4	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.1
1000	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0
1250	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.1
1600	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
2500	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0
3150	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1
4000	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
5000	0.1	0.1	0.2	0.5	0.3	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.4

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>										
	$A12$	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$	$B8$	$B9$	$B10$
100	8.1	8.0	3.1	4.1	0.0	2.2	0.5	1.0	1.0	12.5	0.0
125	88.4	18.9	0.9	0.2	1.3	13.9	10.6	42.1	3.0	3.0	0.1
160	18.9	0.0	0.1	5.8	0.0	0.9	1.1	5.6	0.0	0.0	4.0
200	0.3	11.5	3.0	10.2	9.6	0.3	0.1	4.2	3.0	4.1	5.1
250	0.2	0.7	0.4	0.5	1.0	0.4	0.5	0.9	0.7	0.0	6.1
315	0.0	3.4	0.4	1.5	1.1	0.3	0.1	0.0	0.4	2.1	0.1
400	9.9	0.0	1.5	0.2	0.0	1.2	0.3	3.4	0.2	7.1	0.0
500	0.5	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	1.2	0.2	0.7	0.0	0.6
630	0.4	0.0	0.1	0.3	1.9	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	1.3
800	0.1	0.5	0.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.1
1000	0.8	0.0	0.3	0.1	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0
1250	0.1	0.4	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.4	0.1	0.0	0.3
1600	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0
2000	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2
2500	0.4	0.0	0.0	0.6	0.1	0.1	0.0	0.8	0.1	0.0	0.1
3150	0.0	0.0	0.2	0.6	0.2	0.1	0.2	0.6	0.1	0.0	0.2
4000	0.0	0.3	0.2	0.5	0.6	0.1	0.4	0.5	0.3	0.0	0.5
5000	0.1	0.4	0.6	1.5	1.2	0.4	0.5	0.9	0.6	0.2	0.6

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>									
	$B11$	$B12$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$C5$	$C6$	$C7$	$C8$
100	2.1	4.5	0.0	9.0	8.9	11.7	0.1	0.9	0.1	0.1
125	24.3	9.3	1.8	2.9	0.0	20.6	45.7	1.5	2.9	2.6
160	0.0	7.1	0.9	0.1	1.0	2.3	0.0	1.2	0.0	1.5
200	13.8	5.0	0.2	0.2	2.1	3.7	0.2	0.9	0.2	1.8
250	2.4	0.0	0.2	1.1	0.3	1.8	0.7	0.6	0.1	0.0
315	2.9	0.0	0.4	0.2	0.1	0.0	0.5	0.9	0.2	0.3
400	0.1	0.2	0.0	1.0	0.7	0.6	2.2	0.0	2.5	1.1
500	0.0	0.3	0.2	0.2	1.7	1.5	0.4	0.0	0.6	0.7
630	0.0	0.5	0.6	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
800	0.5	0.2	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2
1000	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.3	0.1
1600	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	0.0
2500	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1
3150	0.0	0.1	0.2	0.4	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1
4000	0.1	0.2	0.5	1.1	0.2	0.6	0.0	0.2	0.2	0.3
5000	0.2	0.3	0.5	1.4	0.3	0.8	0.0	0.4	0.4	0.5

Tabella 3.19: differenze al quadrato tra i livelli di rumore di calpestio (media di sei posizioni di generatore sul solaio in laterocemento) in ogni punto di rilievo rispetto alla media complessiva.

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di microfono</i>							<i>Sorg. selezionate</i>		<i>Tutte le sorgenti</i>	
	$C1$	$A9$	$C6$	$C7$	$A7$	$A4$	$Media$	$Media$	$Diff.$	$Media$	$Diff.$
100	61.8	63.2	63.0	61.8	62.1	61.2	62.2	62.1	0.2	62.0	0.2
125	69.3	70.4	69.4	68.9	71.3	72.3	70.5	70.6	0.2	69.9	0.5
160	70.2	70.2	70.4	69.1	68.2	69.1	69.6	69.2	0.3	68.8	0.8
200	71.4	71.1	72.8	72.3	70.9	70.4	71.6	71.9	0.3	71.9	0.3
250	74.8	74.0	75.1	74.1	72.9	72.6	74.0	74.3	0.3	75.2	1.2
315	76.1	76.7	75.8	76.4	78.7	78.1	77.1	76.8	0.4	76.5	0.6
400	76.7	75.1	76.4	78.2	75.3	75.7	76.4	76.6	0.2	76.2	0.1
500	75.1	75.3	75.7	74.8	76.4	76.2	75.6	75.5	0.1	75.5	0.1
630	80.4	80.7	81.1	81.2	81.5	80.5	80.9	81.1	0.2	80.8	0.1
800	83.2	82.6	83.7	83.3	83.0	83.2	83.2	83.2	0.0	83.1	0.1
1000	83.3	83.3	83.7	83.8	83.4	84.0	83.6	83.7	0.2	83.8	0.2
1250	84.8	84.9	84.8	85.6	85.3	85.1	85.1	85.0	0.1	84.8	0.3
1600	86.1	86.2	86.2	86.3	86.1	86.4	86.2	86.2	0.1	86.0	0.2
2000	90.3	90.6	90.8	91.1	90.6	90.6	90.7	90.5	0.1	90.3	0.4
2500	93.3	93.7	94.1	93.8	94.1	94.1	93.9	93.8	0.1	93.3	0.6
3150	88.9	89.7	89.7	89.1	89.7	89.6	89.5	89.3	0.1	89.3	0.1
4000	86.2	87.3	87.4	86.5	87.4	87.4	87.1	87.0	0.1	86.8	0.2
5000	84.0	85.3	85.2	84.0	85.2	85.4	84.9	84.6	0.2	84.5	0.4

Tabella 3.20: livelli di rumore di calpestio registrati nelle singole posizioni microfoniche selezionate (media del contributo delle sei posizioni di generatore scelte) su solaio in latero-cemento, valore medio energetico delle misure e confronto con i livelli medi energetici comprensivi di tutto lo spazio campionato e con tutti i rilievi eseguiti (le differenze tra medie di valori sono espresse in valore assoluto).

### 3.4 Misure di potere fonoisolante di solai secondo UNI EN ISO 140-3

Il laboratorio per la misura delle prestazioni acustiche di elementi edilizi di Isolgomma è stato progettato principalmente per la misurazione del rumore di calpestio di solai e del potere fonoisolante di pareti. È stata condotta comunque una dettagliata indagine, per stabilire se sia misurabile anche il potere fonoisolante dei due solai fissi in dotazione, qualificando i campi sonori degli ambienti e verificando il potere fonoisolante massimo degli elementi edilizi. La procedura utilizzata è simile a quella già adottata per le pareti, con la differenza che il provino utilizzato non soddisfa la condizione imposta sul limite del potere fonoisolante contenuta nel paragrafo C.2.4 della norma UNI EN ISO 140-3 [60]. Infatti l'oggetto di prova è un solaio non rimovibile e, nella configurazione di minimo isolamento, supera abbondantemente il potere fonoisolante massimo consentito. Nonostante questa deviazione dalle indicazioni di norma sono state indagate le posizioni di misura ed è stato verificato il massimo isolamento raggiungibile con le strutture in esame.

#### 3.4.1 Solaio in calcestruzzo armato

Obiettivo dello studio presentato in questo paragrafo è la determinazione delle posizioni di altoparlante e microfono ottimali da utilizzare in una prova di potere fonoisolante del solaio in calcestruzzo armato. Le combinazioni di posizioni risultanti sono tali da minimizzare le differenze dei parametri descrittivi rispetto ai valori medi, tenute in considerazione tutte le indicazioni di posizionamento. La disposizione di punti, utilizzata nell'ambito dello studio, è la medesima delle casistiche precedenti. In ambiente emittente

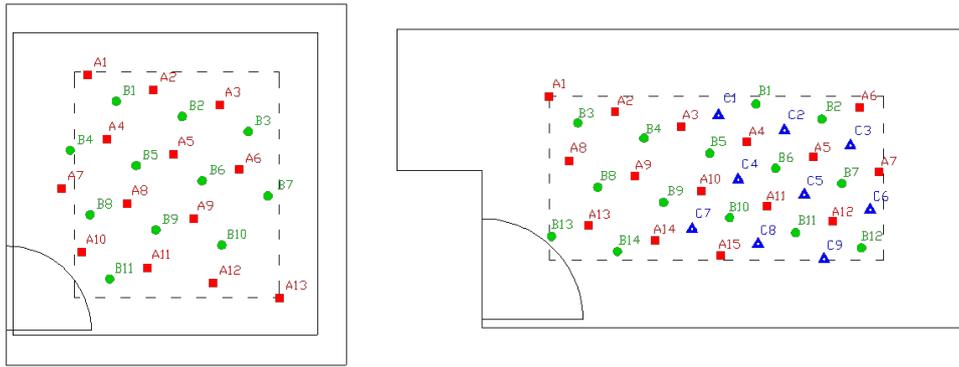


Figura 3.26: solaio in calcestruzzo armato: posizioni di sorgente e microfono adottate durante il campionamento dei livelli.

i punti sono disposti su due livelli, il primo all'altezza di 1,40 m al di sopra della superficie del solaio, il secondo a 2,05 m. Tali altezze sono state scelte in modo che la condizione di minima distanza della sorgente e microfono al provino sia maggiore di 1 m, per qualsiasi altezza del pacchetto solaio in esame; inoltre la differenza in altezza tra i due livelli rispecchia la disposizione a geometria tetraedrica già adottata nell'ambiente inferiore. In figura 3.26 si riporta la disposizione dei punti negli spazi disponibili.

### Posizioni ottimali della sorgente di rumore

La sorgente sonora omnidirezionale è stata posizionata in ognuno dei punti in camera emittente ed i livelli sonori sono stati registrati in tutti i rimanenti punti (esclusi quelli attigui alla sorgente) ed in tutti i punti della camera ricevente. Quindi sono stati mediati energeticamente i livelli nelle due camere ed è stata calcolata la differenza aritmetica. Di seguito si riportano le differenze  $D$  tra i livelli di pressione sonora, associate alle singole posizioni di sorgente (tabella 3.21). Analogamente a quanto già eseguito per le pareti, su base di tali dati, sono stati calcolati i parametri per la verifica delle condizioni sulla scelta delle posizioni di sorgente (v. formule (3.4), (3.5) e (3.6)); ne è risultata la necessità di adoperare tre posizioni di sorgente. I calcoli sono riportati in tabella 3.22. Il numero di posizioni risultante è buono, ma non ottimale; non è stato quindi ritenuto soddisfacente, per cui ricorsivamente sono state eliminate dall'analisi le posizioni di sorgente più problematiche, ricalcolando i diversi parametri. Si riporta in tabella 3.23 il riepilogo, analogo a quello presentato in tabella 3.22, relativo all'analisi dopo eliminazione di due posizioni di sorgente (A10, B4). Il risultato dell'operazione ricorsiva di eliminazione è l'ottenimento di due sole posizioni di sorgente nell'ambiente emittente ( $N=2$ ), ovvero il rispetto della condizione più restrittiva. La scelta delle posizioni da eliminare è stata effettuata in base al più elevato valore dello scarto tipo su di una singola banda e l'analisi è stata ripetuta ricorsivamente, dopo ogni eliminazione. Una volta stabilito il numero di posizioni di sorgente, è necessario scegliere quali posizioni siano le ottimali, ovvero descrivano più accuratamente i campi sonori degli ambienti di prova. Tali posizioni sono quelle per cui la somma degli scarti  $S_j$  risulta minima. In figura 3.27 sono riportate le sei posizioni migliori individuate, mentre in tabella 3.24 sono riportate le somme degli scarti tipo sulle bande di frequenza considerate. Le posizioni di altoparlante selezionate

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>								
	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A9$
100	38.6	41.0	41.6	41.3	43.4	41.5	40.8	43.4	40.4
125	38.4	36.8	39.4	39.3	37.0	39.6	37.6	38.1	38.6
160	37.7	39.0	38.0	37.8	39.3	40.0	40.6	39.1	36.8
200	38.8	39.1	39.3	37.4	37.8	37.8	39.3	38.4	36.7
250	39.9	41.1	41.3	40.2	39.6	40.8	39.6	39.9	39.9
315	45.0	44.4	44.4	44.5	45.2	44.5	44.5	44.6	43.6
400	45.0	46.9	45.7	44.8	43.8	45.5	45.8	45.5	45.4
500	46.9	47.4	48.0	47.7	46.5	47.5	47.2	47.6	47.4
630	49.9	50.2	49.5	49.3	48.6	50.1	49.2	49.2	50.7
800	52.8	51.5	51.5	51.8	52.0	52.8	52.1	51.5	52.4
1000	54.6	54.5	54.0	54.7	54.2	54.2	54.5	55.0	54.5
1250	57.7	57.3	57.3	56.6	57.2	57.6	57.3	57.8	57.6
1600	58.6	57.5	58.6	58.6	57.9	58.4	58.7	59.6	58.3
2000	60.9	60.5	60.3	60.7	59.5	61.1	61.1	60.9	60.8
2500	62.0	61.7	61.1	61.6	61.0	61.9	62.0	61.6	62.3
3150	64.3	63.8	63.5	63.9	63.4	64.1	63.9	63.9	64.3
4000	68.2	67.6	67.8	67.7	67.9	68.2	68.2	67.7	67.7
5000	69.9	69.8	70.1	70.2	69.6	71.2	71.0	70.9	71.2

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>								
	$A10$	$A11$	$A12$	$A13$	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$
100	39.7	41.5	40.5	37.4	41.9	40.5	39.8	42.8	39.0
125	37.0	38.3	40.0	37.5	40.0	38.1	39.4	38.7	38.7
160	35.9	40.5	38.3	37.8	41.1	38.3	41.1	42.4	38.7
200	37.2	39.2	39.6	38.9	37.2	36.9	40.0	38.7	38.1
250	40.6	41.6	39.0	40.5	40.8	42.3	40.5	41.3	41.9
315	43.8	44.7	43.0	45.0	43.0	44.4	44.0	45.1	44.1
400	45.1	44.9	46.6	44.8	46.1	45.7	45.1	47.1	46.8
500	47.5	46.7	47.4	47.2	46.5	47.8	48.1	48.0	48.0
630	50.4	49.6	51.0	49.0	49.6	50.5	50.5	50.7	49.9
800	52.0	50.6	52.5	52.4	52.1	51.4	52.0	52.5	51.5
1000	54.4	54.0	54.5	55.2	54.1	54.7	54.6	53.8	52.9
1250	58.0	56.7	56.9	57.2	56.5	57.4	57.4	57.2	57.1
1600	58.8	58.3	58.3	58.7	58.8	59.0	58.5	57.6	58.0
2000	60.6	60.4	60.8	60.7	60.2	61.3	60.5	60.7	60.4
2500	62.4	60.9	61.6	61.8	61.3	62.0	61.4	61.5	61.6
3150	63.9	63.3	63.8	64.3	63.9	64.1	63.7	63.9	64.0
4000	67.7	67.9	67.9	68.2	67.7	68.0	67.7	67.9	68.2
5000	71.1	69.7	69.7	70.5	69.9	71.8	71.2	71.2	71.2

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>							<i>Media</i>
	$B6$	$B7$	$B8$	$B9$	$B10$	$B11$		
100	38.1	42.0	41.0	39.9	43.0	39.3	40.8	
125	39.8	39.2	38.5	39.9	38.8	37.6	38.6	
160	40.4	38.4	38.7	41.7	40.4	38.4	39.2	
200	37.4	38.6	38.5	37.8	37.3	37.5	38.2	
250	40.0	40.3	40.6	40.8	41.3	40.3	40.6	
315	41.6	42.7	44.4	43.5	42.8	41.1	43.9	
400	46.8	44.5	44.6	46.1	45.5	46.5	45.6	
500	48.2	47.8	47.8	47.5	47.0	47.9	47.5	
630	50.3	50.0	49.9	51.1	49.8	48.6	49.9	
800	51.9	52.1	51.7	52.6	52.1	52.1	52.0	
1000	54.1	54.7	52.8	53.7	54.2	53.3	54.2	
1250	57.4	57.5	56.1	56.8	56.4	56.6	57.2	
1600	58.3	58.5	57.1	56.1	57.7	56.5	58.2	
2000	60.8	61.5	60.0	60.1	60.8	59.8	60.6	
2500	61.4	62.5	61.4	61.5	62.2	61.6	61.7	
3150	64.0	63.9	63.7	63.8	64.5	64.3	63.9	
4000	67.9	68.1	68.3	68.2	68.5	68.3	68.0	
5000	70.9	71.3	71.1	70.7	70.8	70.2	70.6	

Tabella 3.21: differenze  $D$  rilevate per le singole posizioni di sorgente sonora e media aritmetica delle differenze.

$f [Hz]$	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	1,61	1,4	1,32	0,34
125	0,99	1,2	0,68	0,21
160	1,59	1,0	2,51	0,33
200	0,93	0,8	1,34	0,19
250	0,78	0,8	0,94	0,16
315	1,07	0,8	1,79	0,22
$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$				2,10
$N =$				3 (2,51)

Tabella 3.22: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando tutti i punti analizzati. Sono riportati, nell'ordine, le frequenze di interesse (basse frequenze), i valori degli scarti tipo per ogni banda, il confronto con gli scarti tipo raccomandati ed il quadrato del rapporto tra i due valori, il quadrato del rapporto tra lo scarto tipo e 4,8 dB, con la somma sulle sei bande considerate ed infine il valore minimo di posizioni di sorgente da utilizzare in base alle tre condizioni stabilite dalla normativa, arrotondato per eccesso.

$f [Hz]$	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	1,61	1,40	1,33	0,34
125	0,98	1,20	0,66	0,20
160	1,32	1,00	1,74	0,28
200	0,94	0,80	1,37	0,20
250	0,79	0,80	0,98	0,17
315	1,09	0,80	1,85	0,23
$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$				1,97
$N =$				2 (1,97)

Tabella 3.23: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando ventidue punti, ottenuti dopo eliminazione delle posizioni caratterizzate da scarti tipo molto elevati su singole bande di frequenza.

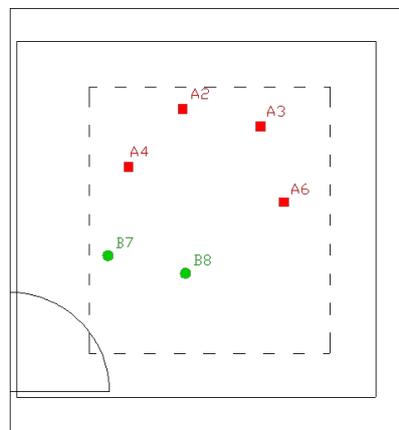


Figura 3.27: posizioni di altoparlante più favorevoli nell'ambiente emittente.

<i>Posizione di altoparlante</i>	<i>Somma degli scarti <math>S_j</math></i>
B8	0,70
A6	2,81
B7	3,90
A4	3,97
A3	4,49
A2	4,78

Tabella 3.24: classifica delle posizioni di altoparlante e relativi valori di  $S_j$ .

sono A2 e B7. In questo la scelta è stata condizionata fortemente dalla necessità di avere un numero sufficiente di posizioni microfoniche disponibili in ambiente emittente. Infatti, se si fossero prese in considerazione ad esempio B8 ed A6, lo spazio disponibile per il posizionamento dei microfoni sarebbe stato molto ridotto, anche a causa della presenza di soli due livelli di punti e la media energetica dei livelli in ambiente emittente avrebbe avuto una dispersione piuttosto marcata.

### Posizioni ottimali di microfono

Per ognuna delle due posizioni di altoparlante selezionata nelle precedenti fasi del lavoro (A2 e B7) sono stati considerati i singoli rilievi e i valori medi energetici sia per l'ambiente emittente che ricevente. Successivamente, per ogni rilievo microfonico sono state calcolate le differenze al quadrato tra il valore puntuale ed il valore medio energetico banda per banda e ne è stata derivata la somma degli scarti su tutto lo spettro. In base a tali valori, per ogni ambiente di misura è stata stilata una classifica di preferibilità dei punti microfoniche disponibili. In tabella 3.25 sono riportati i quindici migliori punti per ogni camera. Nella figura 3.28 sono riportati in pianta i punti più favorevoli, secondo la classifica stilata.

<i>Preferibilità</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Camera emittente</i>	B3	A11	B12	A12	A6	B5	B6	A10	A8	B9	A13	-	-	-	-
<i>Camera ricevente</i>	C8	B12	B9	A10	C3	C2	B5	B11	B7	A12	B6	A3	A15	A5	A4

Tabella 3.25: classifica dei punti microfoniche per i due ambienti di misura (primi quindici valori).

Come si può notare dall'immagine, le posizioni microfoniche fisse in ambiente emittente sono disposte in circa metà ambiente disponibile, a causa della vicinanza delle due sorgenti di rumore aereo ed alla scelta di disporre i punti di qualificazione su due livelli di altezza. In ambiente ricevente i punti più rappresentativi del campo sonoro sono localizzati in corrispondenza del solaio, mentre nello spazio attiguo all'apertura della porta le posizioni risultano meno adeguate. Tra tutti i punti a disposizione ne sono stati selezionati sei (la norma prescrive almeno cinque punti). Delle numerose combinazioni possibili, sono state individuate le seguenti:

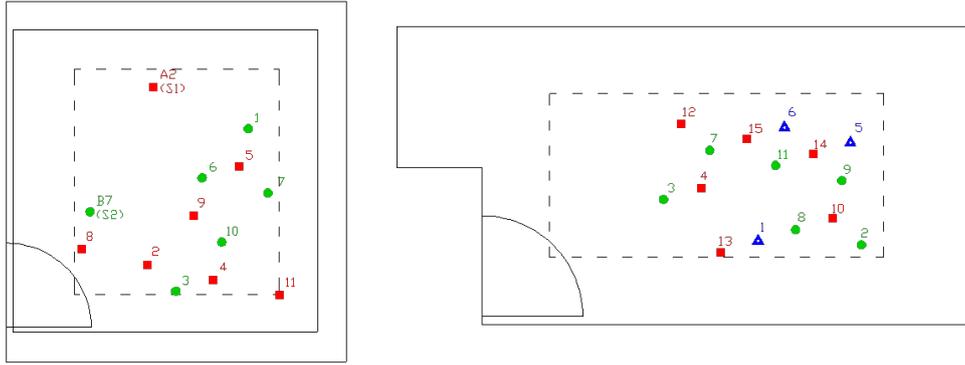


Figura 3.28: posizionamento nello spazio dei punti più favorevoli.

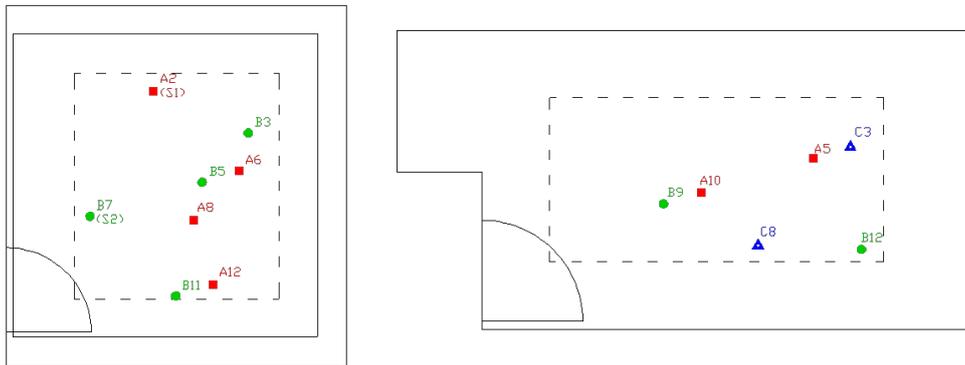


Figura 3.29: posizioni di microfono selezionate, con indicazione delle due posizioni di sorgente sonora in ambiente emittente.

ambiente emittente: B3 - A8 - B11 - A12 - A6 - B5;

ambiente ricevente: C8 - B12 - B9 - A10 - A5 - C3.

La disposizione di tali punti è riportata per via grafica in figura 3.29.

Le due combinazioni risultanti sono tali da soddisfare un ulteriore requisito, non definito dalla normativa ma scelto arbitrariamente. I livelli di rumore dei sei punti selezionati in ogni ambiente sono stati mediati energeticamente ed il risultato è stato confrontato con la media energetica dei livelli globali relativi alle due posizioni di sorgente A2 e B7. È stato quindi imposto che il valore assoluto delle differenze dei livelli in ogni banda di frequenza sia inferiore a 0,5 dB nelle bande di bassa frequenza. Nelle tabelle 3.26 e 3.27 sono riportati i risultati di tale analisi, rispettivamente per la camera emittente e ricevente.

$f$ [Hz]	Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]							Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]			Scarti tra valori medi [dB]
	B3	A8	B11	A12	A6	B5	Media	A2	B7	Media	
100	88.5	91.1	90.6	89.3	90.5	89.2	90.0	89.1	89.8	89.5	0.5
125	94.8	94.7	92.8	94.3	93.3	93.3	93.9	93.0	94.0	93.5	0.4
160	100.0	98.2	99.1	97.9	98.9	101.2	99.4	98.6	99.9	99.3	0.1
200	100.5	100.0	100.1	102.6	99.4	103.1	101.2	101.5	100.8	101.2	0.0
250	100.4	100.4	102.2	101.9	99.6	100.9	101.0	101.2	101.0	101.1	0.1
315	100.2	100.8	99.5	100.1	99.4	98.6	99.8	99.7	99.6	99.7	0.1
400	99.5	101.4	99.3	100.1	98.7	99.4	99.8	99.8	99.7	99.7	0.1
500	98.3	98.9	97.2	98.1	97.5	97.4	97.9	97.9	97.8	97.8	0.1
630	95.3	96.2	94.7	96.6	96.0	95.5	95.8	95.5	95.9	95.7	0.0
800	93.9	93.4	93.4	94.4	93.0	94.5	93.8	93.6	93.6	93.6	0.2
1000	92.5	92.1	92.1	93.0	91.9	93.0	92.4	92.4	92.3	92.3	0.1
1250	92.9	93.0	92.6	93.3	92.9	92.9	92.9	92.9	92.7	92.8	0.1
1600	95.1	95.1	94.7	95.2	94.9	94.7	94.9	95.0	95.0	95.0	0.1
2000	94.5	94.3	93.5	94.0	94.1	93.9	94.1	93.8	94.2	94.0	0.1
2500	91.3	91.3	91.5	91.2	91.5	91.4	91.4	91.2	91.5	91.4	0.0
3150	91.6	91.6	91.1	91.5	91.6	91.6	91.5	91.4	91.5	91.5	0.0
4000	91.0	90.6	90.7	90.3	90.6	90.5	90.6	90.6	90.8	90.7	0.1
5000	90.2	89.7	89.5	89.6	89.2	89.8	89.7	89.0	90.1	89.6	0.1

Tabella 3.26: camera emittente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

$f$ [Hz]	Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]							Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]			Scarti tra valori medi [dB]
	C8	B12	B9	A10	A5	C3	Media	A2	B7	Media	
100	49.8	46.5	49.2	46.8	48.6	48.0	48.3	48.1	47.8	48.0	0.3
125	55.6	57.4	57.2	53.9	53.7	55.5	55.8	56.2	54.8	55.6	0.2
160	61.1	60.3	60.5	60.6	59.9	62.2	60.8	59.6	61.5	60.7	0.2
200	63.0	62.6	60.3	62.7	60.5	62.4	62.0	62.4	62.2	62.3	0.3
250	60.6	59.3	59.4	59.2	61.6	59.8	60.1	60.1	60.7	60.4	0.3
315	56.4	57.3	57.5	55.1	56.0	54.7	56.3	55.3	56.9	56.2	0.1
400	54.5	54.0	54.4	52.0	54.5	52.7	53.8	52.9	55.2	54.2	0.4
500	49.5	49.9	50.4	50.3	51.1	50.4	50.3	50.5	50.0	50.3	0.0
630	45.8	45.1	45.4	45.8	46.4	45.4	45.7	45.3	45.9	45.6	0.0
800	41.5	42.2	42.5	42.2	42.3	41.5	42.1	42.1	41.5	41.8	0.2
1000	38.1	37.9	37.0	37.7	39.0	38.9	38.2	37.9	37.5	37.7	0.5
1250	36.2	36.0	35.2	35.6	35.7	36.2	35.8	35.6	35.1	35.4	0.5
1600	37.2	37.3	36.9	36.9	38.0	38.0	37.4	37.5	36.6	37.1	0.3
2000	33.6	33.8	33.4	33.2	33.0	33.8	33.5	33.3	32.7	33.0	0.5
2500	29.9	30.1	29.3	29.1	30.8	30.5	30.0	29.6	29.0	29.3	0.7
3150	28.0	28.3	27.8	28.2	28.1	28.0	28.1	27.6	27.7	27.6	0.4
4000	23.2	23.3	22.8	23.2	23.4	23.3	23.2	23.0	22.7	22.9	0.3
5000	19.4	19.2	19.3	19.1	19.5	19.6	19.4	19.3	18.8	19.0	0.3

Tabella 3.27: camera ricevente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

## Potere fonoisolante massimo del solaio in calcestruzzo armato

Per quanto riguarda il solaio in calcestruzzo armato, si è cercato di stimare il massimo potere fonoisolante misurabile in laboratorio, secondo una metodologia simile a quella adottata per le pareti. Utilizzando i punti di misura risultanti dalla qualificazione, è stato misurato il potere fonoisolante del solaio nudo; la misura è stata ripetuta dopo aver aggiunto al solaio uno strato superficiale di un materiale assorbente pesante, composto da uno strato di fibra di poliestere accoppiato con uno strato di gomma pressata rigida, ricoprendo il materiale con uno strato di cartongesso, non vincolato ai bordi e semplicemente appoggiato. Tale allestimento è stato ripetuto fino al completo riempimento dello spazio a disposizione (bordo del solaio) e dopo l'aggiunta di ogni strato è stata rieseguita la misurazione del potere fonoisolante. In figura 3.30 si riporta la stratigrafia relativa all'allestimento più isolante ed in figura 3.31 l'andamento degli spettri all'aumentare del numero di strati di materiale, mentre in tabella 3.28 si riportano i valori numerici in frequenza del potere fonoisolante.



Figura 3.30: stratigrafia del pacchetto solaio in calcestruzzo armato, nell'allestimento con il maggior numero di strati di materiale sovrapposti.

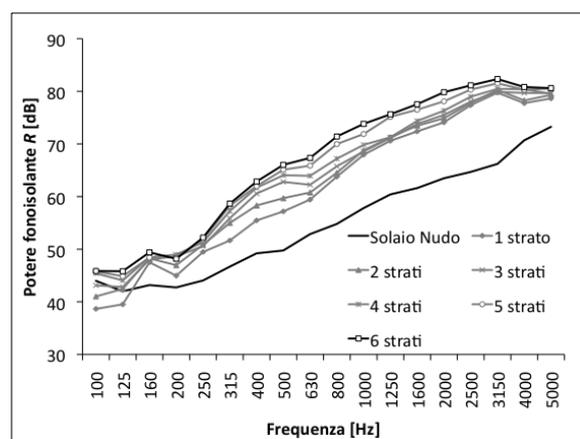


Figura 3.31: potere fonoisolante del solaio in latero-cemento: incremento di isolamento all'aumentare del numero di strati di materiale.

Dai risultati emerge che il potere fonoisolante del solaio ha un valore di partenza piuttosto elevato ( $R_w = 55$  dB). L'aumento dello spessore del pacchetto solaio, mediante l'aggiunta di strati successivi di materiale assorbente pesante ha l'effetto di aumentare il potere fonoisolante dell'elemento in prova su tutto lo spettro da 100 a 5000 Hz. Con l'applicazione degli ultimi due strati di rifodera si raggiunge il valore di  $R_w = 66$  dB. In frequenza tuttavia non si arriva ad una stabilizzazione degli spettri, come nello studio del potere fonoisolante massimo delle pareti, per cui aggiungendo ulteriori strati di materiale, oppure adottando tecniche di allestimento differenti, si potrebbero ottenere isolamenti

$f$ [Hz]	Solaio nudo	1 strato di materiale	2 strati di materiale	3 strati di materiale	4 strati di materiale	5 strati di materiale	6 strati di materiale
100	44.0	38.7	41.0	43.1	45.4	45.8	45.8
125	42.0	39.5	42.4	42.8	44.1	44.9	45.8
160	43.2	47.5	48.3	48.0	48.5	48.4	49.4
200	42.7	45.0	47.0	48.6	49.0	48.5	48.2
250	44.1	49.5	50.9	50.6	51.3	51.8	52.2
315	46.7	51.6	55.0	55.9	57.2	58.2	58.6
400	49.2	55.5	58.3	60.6	61.7	62.0	62.9
500	49.8	57.2	59.7	62.8	64.1	65.1	66.0
630	52.9	59.4	60.8	62.2	63.9	65.9	67.3
800	54.8	63.8	64.5	65.7	67.2	70.0	71.4
1000	57.8	67.9	68.8	68.6	69.8	71.9	73.8
1250	60.4	70.6	71.3	71.1	71.3	75.2	75.6
1600	61.6	72.4	73.5	73.8	74.4	76.5	77.5
2000	63.5	74.1	74.9	75.5	76.3	78.1	79.8
2500	64.7	77.4	77.8	78.0	79.0	80.3	81.1
3150	66.2	79.7	80.3	79.9	80.5	81.5	82.3
4000	70.7	77.8	78.3	79.7	80.4	80.3	80.8
5000	73.3	78.6	79.3	79.7	79.5	80.5	80.6
$R_w$ [dB]	55	60	62	63	65	66	66

Tabella 3.28: potere fonoisolante del solaio in calcestruzzo armato all'aumentare del numero di strati di materiale assorbente nel pacchetto solaio: valori spettrali e indici di potere fonoisolante  $R_w$ .

misurabili anche superiori. I valori ottenuti sono comunque piuttosto soddisfacenti e consentono di misurare strutture anche molto performanti. Le trasmissioni laterali sembrano essere molto basse e ininfluenti rispetto ai livelli misurati in ambiente ricevente.

### 3.4.2 Solaio in laterocemento

Analogamente a quanto svolto per il solaio in calcestruzzo armato, in questo paragrafo si è cercato di determinare le posizioni di altoparlante e microfono ottimali da utilizzare in una prova di potere fonoisolante del solaio in laterocemento. Le combinazioni di posizioni risultanti sono tali da minimizzare le differenze dei parametri descrittivi rispetto ai valori medi, tenute in considerazione tutte le indicazioni di posizionamento. La disposizione di punti, utilizzata nell'ambito dello studio, è la medesima delle casistiche precedenti. In ambiente emittente i punti sono disposti su due livelli, il primo all'altezza di 1,60 m al di sopra della superficie del solaio, il secondo a 2,25 m. Tali altezze sono state scelte in modo che la condizione di minima distanza della sorgente e microfono al provino sia maggiore di 1 m, per qualsiasi altezza del pacchetto solaio in esame; inoltre la differenza in altezza tra i due livelli rispecchia la disposizione a geometria tetraedrica già adottata nell'ambiente inferiore. In figura 3.32 si riporta la disposizione dei punti negli spazi disponibili.

#### Posizioni ottimali della sorgente di rumore

La sorgente sonora omnidirezionale è stata posizionata in ognuno dei punti in camera emittente e i livelli sonori sono stati registrati in tutti i rimanenti punti (esclusi quelli

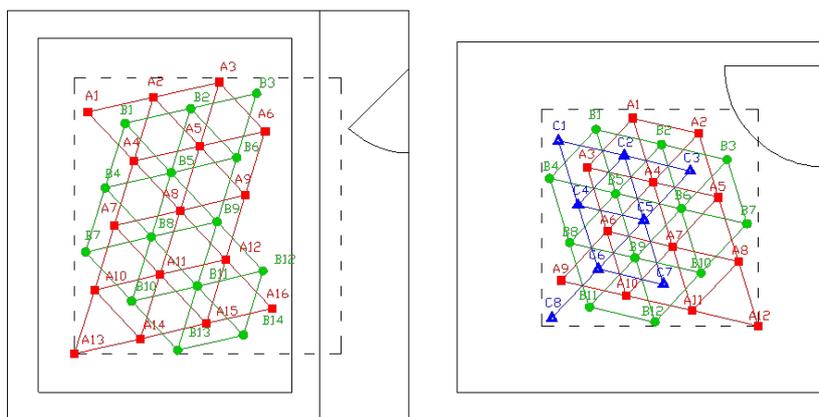


Figura 3.32: solaio in laterocemento: posizioni di sorgente e microfono adottate durante il campionamento dei livelli.

attigui alla sorgente) e in tutti i punti della camera ricevente. Quindi sono stati mediati energeticamente i livelli nelle due camere ed è stata calcolata la differenza aritmetica. In tabella 3.29 si riportano le differenze  $D$  tra i livelli di pressione sonora, associate alle singole posizioni di sorgente. Analogamente a quanto già eseguito in precedenza, sulla base di tali dati, sono stati calcolati i parametri per la verifica delle condizioni sulla scelta delle posizioni di sorgente (v. formule (3.4), (3.5) e (3.6)); ne è risultata la necessità di adoperare otto posizioni di sorgente. I calcoli sono riportati in tabella 3.30. Il numero di posizioni risultante non è soddisfacente, per cui ricorsivamente sono state eliminate dall'analisi le posizioni di sorgente più problematiche, ricalcolando i diversi parametri. Si riporta in tabella 3.31 il riepilogo relativo all'analisi dopo eliminazione di 19 posizioni di sorgente (A11, B9, A6, A9, B3, A16, B12, A12, A8, A7, B6, A13, A4, A2, A15, A1, B13 e A3). È stato necessario eliminare molte posizioni di sorgente, per trovare il numero minimo ammesso. Il risultato dell'operazione ricorsiva di eliminazione è l'ottenimento di tre posizioni di sorgente nell'ambiente emittente ( $N = 3$ ), mantenendo al contempo un numero sufficiente di punti da studiare, compatibile con le indicazioni di norma. La scelta delle posizioni da eliminare è stata effettuata in base al più elevato valore dello scarto tipo su di una singola banda e l'analisi è stata ripetuta ricorsivamente, dopo ogni eliminazione. Una volta stabilito il numero di posizioni di sorgente, è necessario scegliere quali posizioni siano le ottimali, ovvero descrivano più accuratamente i campi sonori degli ambienti di prova. Tali posizioni sono quelle per cui la somma degli scarti  $S_j$  risulta minima. In figura 3.33 sono riportate le sei posizioni migliori individuate, mentre in tabella 3.32 sono riportate le somme degli scarti tipo sulle bande di frequenza considerate. Le tre posizioni di altoparlante selezionate sono B10 (1), B4 (2) e B2 (8). La scelta è stata condizionata dalla necessità di avere un numero sufficiente di posizioni microfoniche disponibili in ambiente emittente e dai vincoli sulle distanze tra le posizioni di sorgente.

### Posizioni ottimali dei microfoni

Per ognuna delle tre posizioni di altoparlante selezionate nelle precedenti fasi del lavoro (B10, B4 e B2) sono stati considerati i singoli rilievi e i valori medi energetici sia per l'ambiente emittente che trasmittente. Successivamente, per ogni rilievo microfonico sono

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>									
	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A9$	$A10$
100	38.1	42.9	38.6	43.6	40.0	32.4	42.4	38.9	33.2	40.7
125	37.1	38.0	34.5	40.7	37.5	33.3	41.0	42.4	37.1	35.7
160	39.0	38.2	37.8	31.9	35.7	35.7	31.8	34.5	31.5	36.5
200	40.6	41.3	40.4	37.2	40.1	38.9	39.0	39.4	36.7	38.9
250	37.3	39.1	40.6	37.1	38.4	36.3	37.5	33.8	37.7	37.8
315	37.4	36.6	41.9	41.0	39.3	39.0	38.8	39.2	39.9	39.2
400	42.8	41.6	43.0	43.8	42.9	42.3	41.9	44.8	43.4	43.6
500	46.7	46.2	45.9	46.4	48.0	47.1	46.5	47.6	46.5	47.4
630	45.5	46.0	45.5	45.6	45.2	45.2	44.8	46.1	45.9	45.2
800	44.8	45.6	44.7	44.3	45.1	45.2	44.5	44.8	44.5	44.8
1000	46.1	45.7	47.4	46.9	45.9	47.0	46.0	47.3	47.4	47.3
1250	48.0	49.6	48.6	49.3	48.7	49.2	48.6	48.6	49.5	48.1
1600	50.0	51.4	50.7	50.8	51.1	50.9	51.3	50.9	51.4	51.0
2000	49.0	49.9	49.3	49.1	49.3	49.5	49.5	49.3	49.7	49.2
2500	46.1	47.1	47.1	46.2	46.9	47.3	46.2	46.2	47.2	46.1
3150	53.0	53.7	53.5	53.6	53.4	53.6	53.6	53.7	53.4	53.5
4000	57.8	57.9	58.2	58.4	58.2	58.4	58.3	57.9	58.0	58.2
5000	60.1	62.7	61.1	61.3	61.1	61.6	61.4	61.8	62.0	62.2

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>									
	$A11$	$A12$	$A13$	$A14$	$A15$	$A16$	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$
100	41.1	34.9	35.2	42.0	41.7	33.8	40.4	41.4	33.7	40.9
125	38.3	36.6	32.6	36.4	36.0	33.8	38.4	38.4	32.2	39.2
160	30.3	36.1	40.0	38.3	37.0	37.5	40.8	39.8	40.3	39.0
200	37.5	39.7	40.7	42.1	39.7	39.1	39.8	41.3	40.3	39.5
250	38.6	39.8	41.0	37.5	37.0	36.3	39.6	39.9	35.3	40.4
315	39.9	39.4	40.8	39.4	40.6	38.9	40.7	41.3	41.8	40.0
400	43.8	42.2	42.6	42.5	42.3	42.4	42.9	43.5	43.0	43.3
500	46.5	45.8	44.9	46.3	47.2	47.3	45.8	47.3	46.4	47.2
630	45.6	45.8	44.1	46.0	45.7	46.1	45.5	46.3	45.0	45.6
800	44.6	44.4	44.9	45.2	45.3	44.0	44.5	45.5	45.6	45.0
1000	46.0	46.3	46.9	46.6	46.6	46.4	47.3	46.7	47.1	46.9
1250	49.0	48.4	48.4	49.1	49.1	49.0	48.5	48.5	49.6	48.3
1600	50.7	51.2	51.2	50.9	51.0	51.0	50.7	50.9	51.3	51.0
2000	49.4	49.6	49.5	49.5	49.2	49.5	48.6	49.0	49.5	49.4
2500	46.3	47.0	46.7	46.2	46.8	47.2	46.2	46.7	47.4	46.4
3150	53.5	53.8	53.7	53.6	53.6	53.7	53.2	53.6	53.8	53.6
4000	58.1	58.1	58.0	57.9	58.1	58.3	57.9	58.2	58.4	57.9
5000	61.8	62.0	62.3	61.9	62.0	62.2	59.8	60.2	60.5	60.8

$f$ [Hz]	<i>Posizioni di sorgente</i>									
	$B5$	$B6$	$B7$	$B8$	$B9$	$B10$	$B11$	$B12$	$B13$	$B14$
100	38.6	34.9	41.3	37.2	30.6	39.8	38.8	34.5	37.1	35.0
125	38.2	32.7	35.8	39.8	36.7	37.0	35.9	32.3	36.9	32.3
160	38.1	38.9	38.4	36.7	38.7	39.6	39.4	35.7	38.1	40.1
200	39.7	39.5	38.9	38.6	40.5	39.2	39.3	39.7	40.4	38.6
250	41.1	36.4	38.3	40.3	38.3	39.7	39.7	39.6	41.0	36.4
315	40.2	40.7	39.9	40.4	39.7	40.1	39.9	40.6	39.9	40.8
400	45.3	42.5	43.5	43.2	44.5	44.6	42.9	45.3	44.5	43.0
500	46.2	46.3	47.4	47.3	47.5	46.4	46.3	47.0	46.3	46.7
630	46.5	45.4	45.1	45.9	46.7	44.8	45.8	46.2	46.2	46.4
800	45.7	45.4	45.0	44.0	45.1	46.0	45.4	45.1	45.9	44.0
1000	46.8	46.9	46.4	46.9	46.5	47.0	46.6	47.0	47.9	46.6
1250	48.3	49.0	49.2	48.6	49.6	49.1	48.4	48.4	48.9	48.9
1600	50.0	51.3	51.0	50.6	51.2	51.0	51.2	51.2	51.1	51.3
2000	49.0	49.2	49.0	49.2	49.5	48.9	49.2	49.4	49.4	49.9
2500	46.0	47.1	46.4	46.1	46.6	45.8	46.6	46.8	46.4	46.9
3150	53.4	53.6	53.6	53.7	53.7	53.5	53.4	53.5	53.5	53.6
4000	57.9	58.2	58.2	57.9	58.3	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9
5000	60.1	60.8	60.9	61.4	61.6	61.4	61.5	61.3	61.5	62.0

Tabella 3.29: differenze  $D$  rilevate per le singole posizioni di sorgente sonora.

$f$ [Hz]	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	3,53	1,40	6,37	0,74
125	2,73	1,20	5,17	0,57
160	2,79	1,00	7,79	0,58
200	1,18	0,80	2,19	0,25
250	1,85	0,80	5,37	0,39
315	1,13	0,80	1,99	0,24
			$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$	7,58
			$N =$	8 (7,79)

Tabella 3.30: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando tutti i punti analizzati. Sono riportati, nell'ordine, le frequenze di interesse (basse frequenze), i valori degli scarti tipo per ogni banda, il confronto con gli scarti tipo raccomandati ed il quadrato del rapporto tra i due valori, il quadrato del rapporto tra lo scarto tipo e 4,8 dB, con la somma sulle sei bande considerate ed infine il valore minimo di posizioni di sorgente da utilizzare in base alle tre condizioni stabilite dalla normativa, arrotondato per eccesso.

$f$ [Hz]	$s_i$	$\sigma_i$	$(\frac{s_i}{\sigma_i})^2$	$\frac{s_i}{4,8}$
100	1,43	1,40	1,04	0,30
125	1,43	1,20	1,41	0,30
160	1,56	1,00	2,44	0,33
200	1,06	0,80	1,77	0,22
250	1,16	0,80	2,11	0,24
315	0,62	0,80	0,61	0,13
			$(\sum \frac{s_i}{4,8})^2 =$	2,31
			$N =$	3 (2,44)

Tabella 3.31: analisi degli scarti tipo, verifica delle condizioni sul numero di posizioni di sorgente sonora e numero di posizioni di sorgente risultanti, considerando 11 punti, ottenuti dopo eliminazione delle posizioni caratterizzate da scarti tipo molto elevati su singole bande di frequenza.

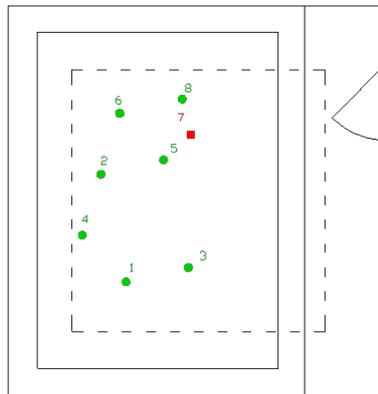


Figura 3.33: posizioni di altoparlante più favorevoli nell'ambiente emittente.

<i>Posizione di altoparlante</i>	<i>Somma degli scarti <math>S_j</math></i>
B10	2,26
B4	5,11
B11	5,67
B7	5,95
B5	6,18
B1	7,25
A5	8,81
B2	8,90

Tabella 3.32: classifica delle posizioni di altoparlante e relativi valori di  $S_j$ .

<i>Preferibilità</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Camera emittente</i>	A12	A6	A1	A9	A15	A8	A13	B9	A16	B12	B14	-	-	-	-
<i>Camera ricevente</i>	C8	C6	A9	B5	A4	B8	A8	C7	B9	A5	A10	C1	C3	A2	B2

Tabella 3.33: classifica dei punti microfonic per i due ambienti di misura (primi quindici valori).

state calcolate le differenze al quadrato tra il valore puntuale ed il valore medio energetico banda per banda e ne è stata derivata la somma degli scarti su tutto lo spettro. In base a tali valori, per ogni ambiente di misura è stata stilata una classifica di preferibilità dei punti microfonic disponibili. In tabella 3.33 sono riportati i quindici migliori punti per ogni camera. In figura 3.34 sono riportati in pianta i punti più favorevoli, secondo la classifica stilata.

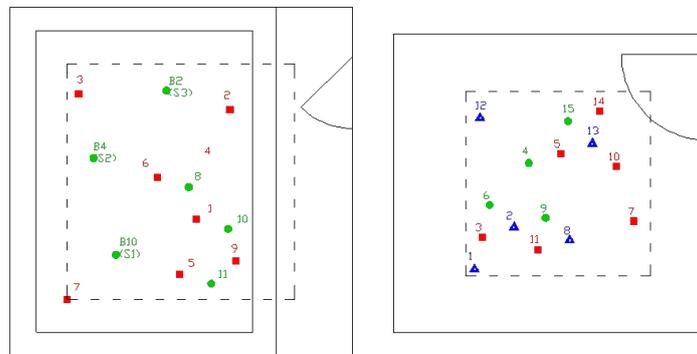


Figura 3.34: posizionamento nello spazio dei punti più favorevoli.

In ambiente emittente i punti sono equamente distribuiti nello spazio disponibile e distante dalle sorgenti di rumore; nell'ambiente ricevente la distribuzione dei punti copre in altezza e dispersione tutto il volume della camera. Tra tutti i punti a disposizione ne sono stati selezionati sei (la norma prescrive almeno cinque punti). Delle numerose combinazioni possibili, sono state individuate le seguenti:

Ambiente emittente: A8 - A6 - A1 - B9 - A15 - B12.

Ambiente ricevente: A8 - C6 - A9 - C1 - A4 - C7.

La disposizione di tali punti è riportata per via grafica in figura 3.35.

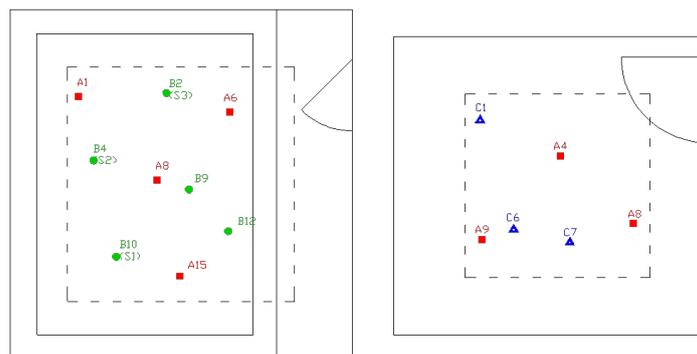


Figura 3.35: posizioni di microfono selezionate, con indicazione delle due posizioni di sorgente sonora in ambiente emittente.

Le due combinazioni risultanti sono tali da soddisfare un ulteriore requisito, non definito dalla normativa ma scelto arbitrariamente. I livelli di rumore dei sei punti selezionati in ogni ambiente sono stati mediati energeticamente ed il risultato è stato confrontato con la media energetica dei livelli globali relativi alle tre posizioni di sorgente B10, B4 e B2. È stato quindi imposto che il valore assoluto delle differenze dei livelli in ogni banda di frequenza sia inferiore a 0,5 dB su tutte le frequenze. Nelle tabelle 3.34 e 3.35 sono riportati i risultati di tale analisi, rispettivamente per la camera emittente e ricevente.

### Potere fonoisolante massimo del solaio in laterocemento

Si è cercato di stimare il massimo potere fonoisolante misurabile in laboratorio per il solaio in laterocemento, secondo una metodologia analoga a quella adottata per l'altro solaio. Utilizzando i punti di misura risultanti dalla qualificazione, è stato misurato il potere fonoisolante del solaio nudo; la misura è stata ripetuta dopo aver aggiunto al solaio uno strato superficiale di un materiale assorbente fibroso e ricoprendo il materiale con uno strato di cartongesso, non vincolato ai bordi e semplicemente appoggiato. Tale allestimento è stato eseguito in totale quattro volte e dopo l'aggiunta di ogni strato è stata rieseguita la misurazione del potere fonoisolante. In figura 3.36 si riporta la stratigrafia relativa all'allestimento più isolante ed in figura 3.37 l'andamento degli spettri all'aumentare del numero di strati di materiale, mentre in tabella 3.36 si riportano i valori numerici in frequenza del potere fonoisolante.

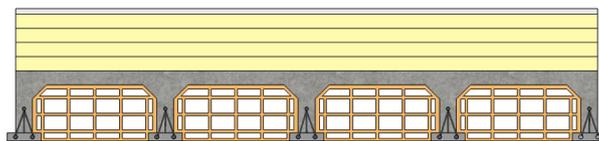


Figura 3.36: stratigrafia del pacchetto solaio in laterocemento, nell'allestimento con il maggior numero di strati di materiale sovrapposti.

Dai risultati emerge che il potere fonoisolante del solaio ha un valore di partenza abbastanza elevato ( $R_w = 52$  dB). L'aumento dello spessore del pacchetto solaio, mediante

<i>f</i> [Hz]	<i>Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]</i>							<i>Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]</i>				<i>Scarti tra valori medi [dB]</i>
	<i>A8</i>	<i>A6</i>	<i>A1</i>	<i>B9</i>	<i>A15</i>	<i>B12</i>	<i>Media</i>	<i>B10</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>Media</i>	
100	88.8	86.4	86.0	83.6	86.0	86.9	86.5	88.0	85.8	85.2	86.5	0.0
125	94.4	90.7	93.7	90.0	92.6	87.4	92.1	92.7	90.8	91.2	91.6	0.4
160	97.3	97.6	97.1	99.1	99.5	96.4	98.0	98.2	97.0	97.5	97.6	0.4
200	98.8	98.1	99.1	100.2	101.0	98.0	99.3	99.0	99.5	99.5	99.3	0.0
250	98.9	100.2	99.0	98.3	99.4	99.0	99.2	99.1	98.9	99.3	99.1	0.0
315	98.4	97.4	98.0	98.1	98.0	98.1	98.0	98.0	97.7	98.3	98.0	0.0
400	97.6	98.1	97.4	97.4	97.1	97.8	97.6	97.7	97.2	97.8	97.6	0.0
500	95.4	95.7	95.6	95.6	95.7	95.7	95.6	95.6	95.2	95.7	95.5	0.1
630	93.4	93.3	94.4	94.5	93.9	93.6	93.9	93.6	93.7	93.8	93.7	0.1
800	92.7	92.2	92.9	92.4	92.2	92.3	92.5	91.9	92.1	92.3	92.1	0.3
1000	91.9	90.8	91.2	91.0	91.0	91.0	91.2	91.2	91.2	91.4	91.3	0.1
1250	91.6	92.0	91.8	91.4	91.3	91.3	91.6	91.4	91.4	91.4	91.4	0.2
1600	93.8	93.5	93.6	94.4	94.0	93.5	93.8	93.9	93.9	93.9	93.9	0.0
2000	93.3	92.8	92.9	93.2	93.1	93.1	93.1	93.1	93.0	93.2	93.1	0.0
2500	91.0	90.4	90.5	90.4	90.9	90.9	90.7	90.6	90.6	90.7	90.6	0.0
3150	90.9	90.3	90.8	91.0	91.2	90.9	90.8	90.8	90.9	91.0	90.9	0.1
4000	91.0	90.1	90.3	90.6	91.0	90.9	90.7	90.5	90.7	90.8	90.7	0.0
5000	87.7	86.7	86.6	87.8	88.2	87.7	87.5	87.9	87.3	87.3	87.5	0.0

Tabella 3.34: camera emittente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

<i>f</i> [Hz]	<i>Livelli di rumore relativi alle singole posizioni di microfono selezionate e media energetica [dB]</i>							<i>Livelli di rumore medi per ogni posizione di sorgente, relativi a tutti i punti e media energetica [dB]</i>				<i>Scarti tra valori medi [dB]</i>
	<i>A8</i>	<i>C6</i>	<i>A9</i>	<i>C1</i>	<i>A4</i>	<i>C7</i>	<i>Media</i>	<i>B10</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>Media</i>	
100	45.9	44.7	47.9	44.4	46.6	44.9	45.9	48.2	44.9	43.8	46.0	0.1
125	53.7	52.2	54.5	51.1	54.8	53.4	53.5	55.7	51.6	52.8	53.7	0.2
160	56.5	58.0	57.4	58.0	57.8	59.2	57.9	58.6	58.0	57.7	58.1	0.2
200	56.9	59.7	59.4	60.4	58.3	60.0	59.3	59.8	60.0	58.2	59.4	0.1
250	59.0	59.7	58.5	59.6	58.0	59.9	59.2	59.5	58.5	59.4	59.2	0.0
315	57.0	57.1	58.0	58.0	58.2	56.9	57.6	57.9	57.7	57.0	57.6	0.0
400	53.0	54.4	53.0	53.8	52.2	56.3	54.0	53.1	53.9	54.3	53.8	0.2
500	48.3	48.4	48.4	47.4	49.6	48.0	48.4	49.1	48.0	48.4	48.5	0.1
630	48.2	48.3	47.3	48.0	47.4	48.1	47.9	48.9	48.1	47.5	48.2	0.3
800	46.7	46.9	45.7	46.7	46.4	47.1	46.6	45.9	47.1	46.9	46.6	0.0
1000	44.7	44.8	44.2	44.2	44.7	44.9	44.6	44.2	44.4	44.7	44.5	0.1
1250	42.4	42.9	42.3	42.4	42.5	43.4	42.7	42.3	43.1	42.9	42.8	0.1
1600	42.4	43.3	42.9	42.9	43.1	42.8	42.9	42.8	42.9	42.9	42.9	0.0
2000	43.7	44.9	44.0	44.0	44.1	43.9	44.1	44.1	43.6	44.2	44.0	0.1
2500	43.9	45.0	44.6	44.1	45.0	44.2	44.5	44.8	44.2	44.0	44.4	0.1
3150	37.3	37.6	37.5	37.1	37.7	37.0	37.4	37.2	37.3	37.4	37.3	0.0
4000	32.9	33.1	32.9	32.4	32.8	32.3	32.8	32.6	32.8	32.6	32.7	0.1
5000	27.2	27.4	26.8	26.3	27.0	26.4	26.9	26.5	26.5	27.0	26.7	0.2

Tabella 3.35: camera ricevente: differenze tra livelli medi energetici delle sei posizioni di microfono selezionate, rispetto al valore medio energetico globale relativo alle due posizioni di sorgente. I livelli delle singole posizioni di misura sono la somma dei contributi delle due sorgenti in quel punto. I livelli medi delle sorgenti comprendono i contributi di tutti i punti individuati nell'ambiente. Gli scarti tra i valori medi sono riportati come differenze, in valore assoluto, tra i livelli medi calcolati.

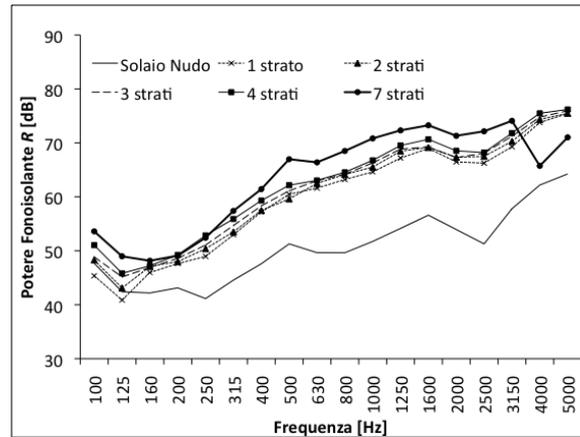


Figura 3.37: potere fonoisolante del solaio in laterocemento: incremento di isolamento all'aumentare del numero di strati di materiale.

$f$ [Hz]	<i>Solaio nudo</i>	<i>1 strato di materiale</i>	<i>2 strati di materiale</i>	<i>3 strati di materiale</i>	<i>4 strati di materiale</i>	<i>7 strati di materiale</i>
100	47.7	45.4	48.3	48.9	51.0	53.6
125	42.4	40.9	43.1	45.2	45.8	49.0
160	42.2	46.0	47.1	46.9	47.2	48.2
200	43.1	47.6	48.0	48.6	49.2	49.1
250	41.1	49.0	50.4	51.1	52.9	52.4
315	44.6	53.0	53.5	54.7	55.9	57.4
400	47.6	57.2	57.5	58.3	59.3	61.4
500	51.3	60.5	59.6	61.1	62.2	67.0
630	49.7	61.6	62.5	63.0	63.0	66.4
800	49.6	63.2	64.1	64.2	64.6	68.5
1000	51.7	64.6	65.5	66.3	66.8	70.8
1250	54.1	67.2	68.5	68.9	69.5	72.3
1600	56.6	69.0	69.2	69.2	70.7	73.3
2000	53.9	66.5	67.4	67.3	68.5	71.3
2500	51.3	66.3	67.5	68.1	68.2	72.2
3150	57.8	69.3	70.3	71.2	71.8	74.1
4000	62.2	73.8	74.4	74.8	75.5	65.7
5000	64.2	75.4	75.5	76.0	76.2	71.0
$R_w$ [dB]	52	62	62	63	64	66

Tabella 3.36: potere fonoisolante del solaio in laterocemento all'aumentare del numero di strati di materiale assorbente nel pacchetto solaio: valori spettrali e indici di potere fonoisolante  $R_w$ .

l'aggiunta di strati successivi di materiale assorbente ha l'effetto di aumentare il potere fonoisolante dell'elemento in prova su tutto lo spettro da 100 a 5000 Hz. Con l'applicazione dell'ultimo strato di rifodera si raggiunge il valore di  $R_w = 66$  dB; mancano i dati intermedi di potere fonoisolante con 5 e 6 strati di materiale, a causa di necessità organizzative nella gestione delle misure. Alle alte frequenze, per la misura relativa ai sette strati di materiale assorbente, si sono riscontrati anomalie a causa di un differente livello di rumore di fondo. I valori ottenuti sono comunque piuttosto soddisfacenti e consentono di misurare strutture anche molto performanti. Le trasmissioni laterali sembrano di bassa entità e ininfluenti rispetto ai livelli misurati in ambiente ricevente.

### 3.5 Considerazioni sulle metodologie adottate

Il laboratorio per misure di acustica edilizia è stato qualificato secondo le indicazioni contenute nelle norme della serie UNI EN ISO 140, in particolare nella parte prima e terza. Tale laboratorio permette la misura integrata di potere fonoisolante su elementi orizzontali e verticali e di livello di rumore di calpestio su due solai, uno in calcestruzzo armato ed uno in laterocemento. Come prima verifica, è stato misurato il tempo di riverberazione medio di ogni ambiente, per controllare la diffusività degli ambienti: tale verifica ha avuto esito positivo, in quanto nelle due camere riceventi (stanze al piano terra) i tempi di riverberazione medi sono risultati contenuti nei limiti di norma in tutte le bande di frequenza. Per quanto riguarda il potere fonoisolante di pareti, la procedura di qualificazione del campo sonoro presente negli ambienti di prova è stata condotta in completo accordo con le indicazioni contenute nell'Appendice C della norma UNI EN ISO 140-3 [60] ed ha consentito di individuare due posizioni di sorgente sonora omnidirezionale ottimali per la diffusività del suono nell'ambiente emittente. Mediante l'utilizzo di tali posizioni di sorgente si è quindi proceduto all'identificazione dei punti microfonicici più adeguati e rappresentativi dell'intero campo sonoro degli ambienti, effettuando un'analisi degli scarti rispetto alla media energetica dei livelli di rumore e scegliendo la combinazione di posizioni che garantiscono differenze minime. Il risultato di questa procedura ha permesso di identificare sei posizioni microfoniche in camera emittente e sei posizioni in camera ricevente. La qualificazione è stata adottata, in una forma diversa, anche per i due solai, sia per prove di potere fonoisolante, sia per prove di rumore di calpestio. I livelli di rumore di calpestio sono stati campionati negli ambienti riceventi durante l'azione del generatore normalizzato e, mediante l'analisi degli scarti rispetto ai valori medi rilevati, sono state identificate sei posizioni di generatore sopra il solaio e sei posizioni microfoniche in ambiente ricevente, la cui combinazione rappresenti in maniera soddisfacente le caratteristiche diffuse globali dell'ambiente di misura. Tra i criteri adottati nell'identificazione delle migliori posizioni, si ricorda l'uniformità di distribuzione spaziale, il minor scarto dei livelli di rumore rispetto alla media energetica spaziale e il rispetto di alcune condizioni geometriche e di non simmetria rispetto alle pareti dell'ambiente. La scelta dei punti per le misure di potere fonoisolante del solaio in calcestruzzo armato ha portato all'individuazione di sei punti in ambiente emittente e sei in ricevente. La distribuzione spaziale in ricevente è buona, mentre in emittente, a causa della scelta di posizionamento della rete di punti di indagine su due soli livelli di altezze, per rispettare le distanze minime dalle sorgenti di rumore, i punti microfonicici

scelti sono localizzati in una porzione limitata della camera. Il metodo di analisi adottato garantisce comunque una deviazione dalla media energetica spaziale di entità limitata, per cui anche la stima del potere fonoisolante del solaio dovrebbe risultare appropriata, anche grazie alla scarsità di trasmissioni laterali. Le stesse procedure sono state adottate per il solaio in laterocemento. Per quanto riguarda le misurazioni dei livelli di rumore di calpestio, sono state identificate sei posizioni di generatore sul solaio e sei posizioni microfoniche in ambiente ricevente, tali da minimizzare le differenze dei livelli rispetto alla media energetica spaziale in ambiente ricevente; invece per quanto riguarda le misure di potere fonoisolante, l'adozione dei metodi della norma UNI EN ISO 140-3, applicati nonostante le notevoli prestazioni della struttura di partenza, hanno permesso l'identificazione di tre posizioni di sorgente di rumore in ambiente emittente e sei posizioni di microfono in ciascuna camera. Le posizioni microfoniche risultanti dalle procedure di qualificazione per rumore aereo e di calpestio in ambiente ricevente sono, per questo solaio, sostanzialmente congruenti e tale fatto suggerisce la bontà delle metodologie applicate. La misura del potere fonoisolante in laboratorio è infine condizionata dalla conoscenza dei limiti di misurazione del laboratorio stesso. Tali limiti dipendono da molti parametri, tra cui la buona progettazione, i materiali usati nella costruzione, l'entità della riduzione delle trasmissioni laterali e quindi le tipologie di giunti elastici usate per la disgiunzione degli ambienti di prova, l'appropriatezza e la sensibilità della strumentazione utilizzata. Per le pareti è stato raggiunto il limite misurabile di  $R'_{w,max} = 80$  dB (pareti leggere di tipo A), che consente di misurare pareti leggere con potere fonoisolante reale fino a  $R_w = 65$  dB (con variazioni in funzione della frequenza). Per pareti pesanti di tipo C sono stati raggiunti valori di isolamento anche maggiori, pari a  $R'_{w,max} = 82$  dB, per cui possono essere misurate pareti con potere fonoisolante reale di indice pari a  $R_w = 67$  dB. Da sottolineare il fatto che tali valori limite sono stati raggiunti per l'influenza del rumore elettrico dello strumento e della scarsità di livello sonoro generato dalla sorgente di rumore. Avendo a disposizione un generatore di rumore di maggiore potenza, si riuscirebbe ad incrementare ulteriormente la prestazione massima misurabile. Anche per i due solai è stata eseguita una verifica del massimo potere fonoisolante misurabile ed i risultati ottenuti hanno messo in evidenza una certa difficoltà a raggiungere il limite fisico delle strutture del laboratorio, nonostante la metodologia equivalente adottata (rifodera del pavimento mediante strati sovrapposti di materiale assorbente). Partendo da valori di potere fonoisolante di  $R_w = 55$  dB e  $R_w = 52$  dB rispettivamente per il solaio in calcestruzzo armato e in laterocemento, si sono raggiunti valori di isolamento di  $R_w = 66$  dB in entrambi i casi. Il valore ottenuto è comunque molto elevato ed indice della bassa entità delle trasmissioni laterali delle strutture.



## Capitolo 4

# Studio dei materiali per l'isolamento dei rumori impattivi su solai in laboratorio

L'attività di ricerca condotta sui solai è concentrata principalmente sullo studio dei materiali per l'isolamento del rumore e delle vibrazioni applicati a sistemi galleggianti in laboratorio, in assenza di trasmissione laterale. Uno studio preliminare è stato effettuato per valutare una possibile influenza dello stadio di maturazione dei massetti durante le prove di rumore di calpestio sui livelli misurati in camera ricevente. Lo scopo di tale studio [28] è quello di verificare la possibilità di accorciare i tempi di prova, poiché essa richiede circa un mese di lavoro, di cui gran parte impiegata per garantire una completa asciugatura dei manufatti cementizi, secondo quanto indicato nella norma UNI EN ISO 140-8 [63]. La sperimentazione è stata condotta su sei campioni, in un arco di tempo di circa sei mesi; su ognuno dei campioni in esame è stata ripetuta l'intera misura di rumore di calpestio e di riduzione di rumore di calpestio, a distanze di tempo di circa tre giorni, fino al ventottesimo giorno di attesa. I materiali sono stati scelti tra quelli disponibili sul mercato ed hanno caratteristiche di isolamento e composizione chimica differenti.

È stata condotta una serie di misure di rumore di calpestio in laboratorio in accordo alle norme UNI EN ISO 140-6 [61] e UNI EN ISO 140-8 [63] su solaio in calcestruzzo armato, al fine di valutare la precisione delle formule previsionali suggerite dalle normative di riferimento per la progettazione. Particolare attenzione è stata dedicata alla correlazione tra il valore della riduzione del livello di rumore di calpestio misurato in laboratorio e la rigidità dinamica dei materiali isolanti in sistemi a massetto galleggiante, misurata secondo la norma UNI EN 29052-1 [73]. Le relazioni utilizzate ai fini di tale correlazione sono contenute nelle normative di riferimento per la progettazione acustica a partire dalle prestazioni dei singoli elementi UNI EN 12354-1 [70] e UNI EN 12354-2 [71].

La presenza di due solai differenti nel medesimo laboratorio ha consentito di intraprendere alcuni studi particolari; tra questi un'interessante indagine è stata svolta sull'isolamento del rumore di calpestio di sistemi di riscaldamento a pavimento. In collaborazione con un'azienda produttrice di materiali per la realizzazione di sistemi radianti, è stato effettuato uno studio sull'abbinamento di tali prodotti con materiali specifici per l'isolamento dei rumori impattivi sui solai. Sono state valutate differenti alternative e combinazioni, mediante misure secondo la norma [61], ottimizzando il prodotto per es-

sere applicato su di un solaio laterocemento. I valori di attenuazione ricavati sono stati quindi confrontati con misure condotte su piastra armata in calcestruzzo.

Alcuni dei risultati degli studi precedentemente esposti sono stati rielaborati, con il fine di analizzare le differenze di prestazioni dei materiali, se applicati a strutture di base diverse. È stata quindi valutata l'attenuazione in frequenza per alcuni dei sistemi misurati sui due solai a disposizione, ricavando risultati solo in parte concordi. Le differenze riscontrate potrebbero derivare dal diverso solaio di base, oppure dalla complessità degli strati disaccoppianti valutati.

## 4.1 Caratterizzazione dei solai di base

I solai di base del laboratorio di Isolgomma sono due: una piastra monolitica in calcestruzzo armato (spessore 14 cm e dimensioni laterali 360 cm x 360 cm) ed un solaio in laterocemento (spessore pignatte 20 cm, spessore cappa 5 cm, dimensioni laterali 420 cm x 300 cm). Le condizioni di vincolo laterale sono le medesime; i due solai infatti appoggiano sulle partizioni verticali attraverso un giunto elastico in gomma pressata dello spessore di 2 cm. Trattandosi di solai non rimovibili, non è possibile misurare in questo laboratorio i solai leggeri in legno e le prestazioni isolanti dei materiali applicati ai solai leggeri, come previsto dalla norma UNI EN ISO 140-11 [64]. È quindi possibile misurare solai completi secondo [61] nelle due tipologie e con stratigrafie anche complesse, dato l'elevato spazio disponibile per i rivestimenti galleggianti (circa 30 cm in altezza per il solaio in calcestruzzo e circa 40 cm per il solaio laterocemento).

Poiché le misure di livello di rumore di calpestio condotte sul solaio in calcestruzzo armato nudo vengono ripetute per ogni materiale studiato, dopo la demolizione del pacchetto solaio in prova (circa una volta al mese), è disponibile una serie di dati relativi allo stesso solaio e si possono valutare le caratteristiche di radiazione sulla media delle misure. In figura 4.1 sono riportati i risultati delle misurazioni ed in figura 4.2 è riportata la deviazione standard.

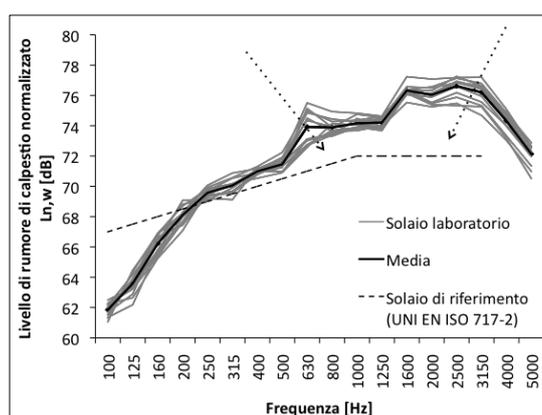


Figura 4.1: livelli di rumore di calpestio normalizzato  $L_{nw}$  rilevati sul solaio in calcestruzzo armato (singoli risultati dei rilievi e media dei rilievi, confronto con la curva di riferimento indicata in [67]).

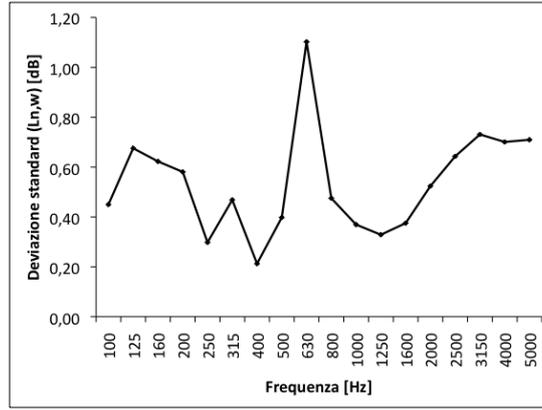


Figura 4.2: deviazione standard dei livelli di rumore di calpestio normalizzato  $L_{nw}$  misurati sul solaio in calcestruzzo armato.

Lo spettro di rumore prodotto dalla radiazione di energia sonora da parte del solaio, in seguito all'azione del generatore di rumore di calpestio normalizzato, presenta un notevole incremento di rumore alle frequenze medie ed alte, rispetto al rumore prodotto alle basse frequenze (figura 4.1). Questa caratteristica viene sottolineata anche dal confronto con il solaio indicato come riferimento dalla norma UNI EN ISO 717-2 [67]. I valori di livello di rumore di calpestio normalizzato  $L_{nw}$  sono stati misurati in tempi differenti e nell'arco di quasi due anni, mediante strumentazione calibrata e tarata. Si nota una tendenza calante tra le prime misure e le più recenti e la deviazione standard aumenta soprattutto nella banda di frequenza di 630 Hz e nell'intervallo 2500-5000 Hz.

$f$ [Hz]	$\eta_{tot}$	$T_s$ [s]	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_F$	$\sigma_{FC}$	$\sigma_{sugg}$	$\sigma_{sugg,c}$
100	0,0764	0,2880	-	4,4844	0,9119	1,0325	1,0325	1,5095	1,5095
125	0,0694	0,2537	-	7,0069	1,0196	1,1438	1,1438	15,8284	2,0000
160	0,0625	0,2200	2,3515	11,4801	1,1535	1,2670	1,2670	2,3515	2,0000
200	0,0569	0,1932	1,7033	17,9377	1,2896	1,3784	1,3784	1,7033	1,7033
250	0,0520	0,1693	1,4498	28,0277	1,4419	1,4899	1,4899	1,4498	1,4498
315	0,0474	0,1473	1,3087	44,4967	1,6185	1,6054	1,6054	1,3087	1,3087
400	0,0432	0,1273	1,2196	71,7509	1,8238	1,7248	1,7248	1,2196	1,2196
500	0,0397	0,1109	1,1642	112,1107	2,0391	1,8364	1,8364	1,1642	1,1642
630	0,0365	0,0958	1,1237	177,9870	2,2889	1,9519	1,9519	1,1237	1,1237
800	0,0335	0,0822	1,0936	287,0035	2,5793	2,0714	2,0000	1,0936	1,0936
1000	0,0310	0,0710	1,0728	448,4429	2,8837	2,1829	2,0000	1,0728	1,0728
1250	0,0288	0,0612	1,0569	700,6920	3,2241	2,2945	2,0000	1,0569	1,0569
1600	0,0266	0,0517	1,0437	1148,014	3,6477	2,4179	2,0000	1,0437	1,0437
2000	0,0248	0,0443	1,0345	1793,772	4,0782	2,5295	2,0000	1,0345	1,0345
2500	0,0233	0,0378	1,0273	2802,768	4,5596	2,6411	2,0000	1,0273	1,0273
3150	0,0218	0,0320	1,0215	4449,675	5,1181	2,7566	2,0000	1,0215	1,0215
4000	0,0205	0,0268	1,0168	7175,087	5,7675	2,8761	2,0000	1,0168	1,0168
5000	0,0194	0,0227	1,0134	11211,07	6,4482	2,9876	2,0000	1,0134	1,0134

Tabella 4.1: valori calcolati del fattore di smorzamento totale  $\eta_{tot}$ , del tempo di riverberazione strutturale  $T_s$  e del fattore di radiazione per onde libere  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  e per onde forzate  $\sigma_F$ ; la quantità  $\sigma_{sugg}$  si riferisce al valore del fattore di radiazione suggerito dalla norma, mentre  $\sigma_{F,c}$  e  $\sigma_{sugg,c}$  sono stati limitati a 2, come indicato in normativa.

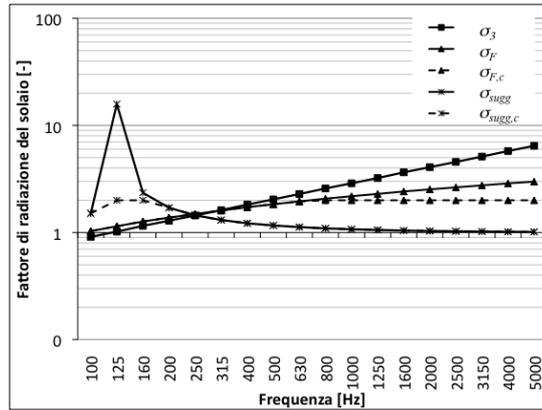


Figura 4.3: fattore di radiazione del solaio in calcestruzzo: confronto tra differenti formulazioni;  $\sigma_1$  è sovrapposto a  $\sigma_{sugg}$  a partire dalla banda di 160 Hz;  $\sigma_2$  non è raffigurato perchè molto elevato.

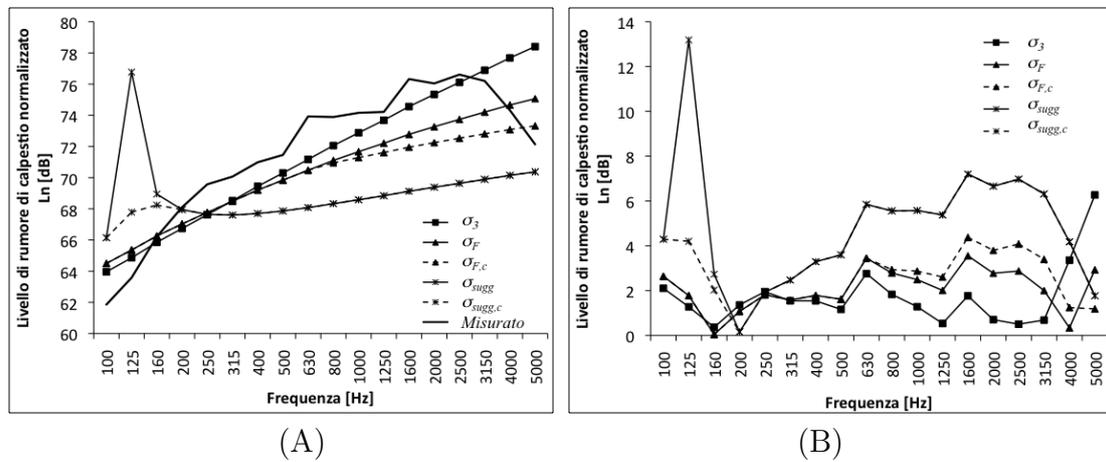


Figura 4.4: (A) livelli di rumore e differenze (B) di livelli di rumore di calpestio normalizzato misurati e calcolati per il solaio in calcestruzzo armato.

È stata applicata la metodologia previsionale normata (descritta nella sezione 1.2) per verificare la precisione del modello e validare il comportamento acustico del solaio. In tabella 4.1 sono riportati i dati necessari per il calcolo previsionale del livello di rumore di calpestio normalizzato del solaio nudo, in particolare il fattore di smorzamento totale, il tempo di riverberazione strutturale e le diverse formulazioni del fattore di radiazione, il cui confronto grafico è riportato nella figura 4.3. In tabella 4.2 è riportato lo spettro medio del livello di rumore di calpestio misurato sul solaio e le stime effettuate mediante le metodologie di norma, mentre in tabella 4.3 sono riportate le differenze in valore assoluto rispetto ai dati misurati; gli spettri del rumore sono riportati invece in figura 4.4(A), mentre le differenze tra i livelli normalizzati in frequenza sono riportate in figura 4.4(B).

Dai dati tabulati e dal confronto dei grafici emerge che la migliore approssimazione, basata sui calcoli suggeriti dalla norma, deriva dall'utilizzo del fattore di radiazione per onde libere  $\sigma_3$ , che consente di ottenere scarti quadratici per lo più inferiori a 2 dB su quasi tutto lo spettro. Alle alte frequenze le differenze aumentano, a causa del calo dei livelli di rumore per frequenze superiori a 3150 Hz. Tale diminuzione del livello di rumore

$f$ [Hz]	Livelli di rumore di calpestio normalizzato $L_n$ [dB]					
	Misurato	$\sigma_F$	$\sigma_{F,c}$	$\sigma_{sugg}$	$\sigma_{sugg,c}$	$\sigma_3$
100	61,9	64,5	64,5	66,1	66,1	64,0
125	63,6	65,4	65,4	76,8	67,8	64,9
160	66,2	66,3	66,3	68,9	68,2	65,9
200	68,1	67,0	67,0	67,9	67,9	66,7
250	69,6	67,8	67,8	67,6	67,6	67,6
315	70,1	68,5	68,5	67,6	67,6	68,5
400	71,0	69,2	69,2	67,7	67,7	69,4
500	71,5	69,8	69,8	67,9	67,9	70,3
630	73,9	70,5	70,5	68,1	68,1	71,2
800	73,9	71,1	71,0	68,3	68,3	72,1
1000	74,2	71,7	71,3	68,6	68,6	72,9
1250	74,2	72,2	71,6	68,8	68,8	73,7
1600	76,3	72,8	72,0	69,1	69,1	74,6
2000	76,0	73,3	72,2	69,4	69,4	75,3
2500	76,6	73,7	72,5	69,6	69,6	76,1
3150	76,2	74,2	72,8	69,9	69,9	76,9
4000	74,3	74,7	73,1	70,1	70,1	77,7
5000	72,1	75,1	73,3	70,4	70,4	78,4

Tabella 4.2: livello di rumore di calpestio normalizzato misurato e calcolato per il solaio in calcestruzzo armato, secondo formulazioni differenti di fattore di radiazione.

$f$ [Hz]	Differenze $L_n$ (valore assoluto) [dB]				
	$\sigma_F$	$\sigma_{F,c}$	$\sigma_{sugg}$	$\sigma_{sugg,c}$	$\sigma_3$
100	6,7	6,7	8,4	8,4	6,2
125	5,9	5,9	17,3	8,3	5,4
160	4,1	4,1	6,8	6,1	3,7
200	3,0	3,0	4,0	4,0	2,7
250	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2
315	2,5	2,5	1,6	1,6	2,6
400	2,3	2,3	0,8	0,8	2,6
500	2,5	2,5	0,5	0,5	2,9
630	0,7	0,7	1,7	1,7	1,3
800	1,3	1,2	1,5	1,5	2,3
1000	1,6	1,2	1,5	1,5	2,8
1250	2,1	1,5	1,3	1,3	3,6
1600	0,6	0,3	3,1	3,1	2,3
2000	1,3	0,3	2,6	2,6	3,4
2500	1,2	0,0	2,9	2,9	3,6
3150	2,1	0,7	2,2	2,2	4,8
4000	4,4	2,9	0,1	0,1	7,5
5000	7,0	5,3	2,3	2,3	10,4

Tabella 4.3: differenze tra livello di rumore di calpestio normalizzato misurato e calcolato per il solaio in calcestruzzo armato, secondo formulazioni differenti di fattore di radiazione.

potrebbe derivare dalle caratteristiche di sollecitazione del generatore di calpestio, per il quale l'ampiezza della forza impressa alla partizione è lineare su buona parte dello spettro, ma alle alte frequenze la forza impressa tende a diminuire (per valori superiori ad una frequenza di taglio). Una buona approssimazione si ottiene anche considerando il fattore di radiazione per onde forzate  $\sigma_F$ , mentre l'utilizzo del fattore di radiazione calcolato come suggerito dalla normativa (cfr. l'appendice B della UNI EN 12354-1) sottostima il livello alle frequenze medie ed alte e lo sovrastima alle basse frequenze.

Per quanto riguarda il solaio in laterocemento, esso gode di proprietà acustiche molto differenti rispetto alla piastra armata in calcestruzzo, soprattutto in virtù delle sue caratteristiche costruttive. È una struttura piana rinforzata in cemento, in cui la cappa è spessa circa 5 cm e i rinforzi sottostanti sono travi di altezza 20 cm solidali alla piastra. Gli elementi di alleggerimento sono blocchi in laterizio collaboranti, di dimensioni 42 cm x 25 cm x 20 cm. I travetti sono disposti nel verso della dimensione maggiore del solaio, le file di blocchi sono 5, composte ciascuna da 17 pignatte (figura 4.5).

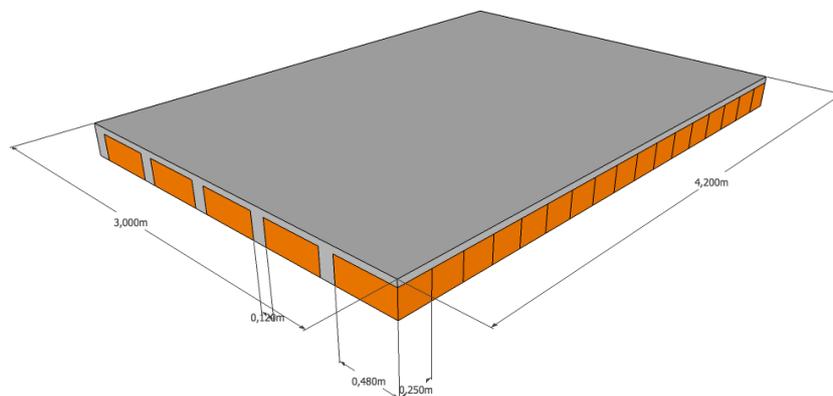


Figura 4.5: modello del solaio in latero-cemento.

I livelli di rumore irradiati sotto l'azione del generatore normalizzato di rumore di calpestio sembrano essere molto più elevati alle alte frequenze, mentre alle basse frequenze si attestano sui livelli rilevati per il solaio in calcestruzzo (figura 4.6). In particolare si nota un picco molto marcato nella banda di frequenza di 2500 Hz ed alcuni picchi di minore entità a 125, 315 e 800 Hz. La modellizzazione e la previsione del comportamento acustico del solaio risulta particolarmente complessa; se si utilizza il metodo della norma EN12354, i calcoli non forniscono un'approssimazione sufficientemente precisa, a causa della disomogeneità strutturale, poiché non è una piastra isotropa e nemmeno una semplice piastra rinforzata, in quanto le pignatte non solo alleggeriscono la struttura, ma sono elementi collaboranti. D'altronde, le differenti proprietà acustiche non possono essere ricondotte soltanto alla differenza di massa superficiale rispetto ad una soletta in calcestruzzo [6]. Per esempio, assumendo una densità per il calcestruzzo armato di 2300 kg/m<sup>3</sup>, si calcola un peso di 322 kg/m<sup>2</sup> per il solaio di riferimento, mentre si ottiene un peso di 274 kg/m<sup>2</sup> per il solaio in latero-cemento<sup>1</sup>. In figura 4.7 sono riportati per via

<sup>1</sup>I calcoli per il solaio in latero-cemento sono stati effettuati nel seguente modo: getto di completa-

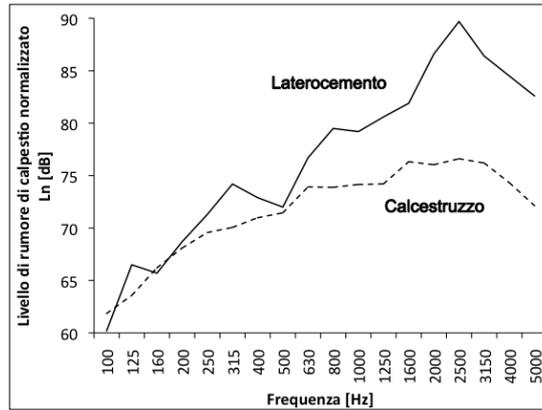


Figura 4.6: livello di rumore di calpestio normalizzato rilevato sul solaio in laterocemento e confronto con il solaio in calcestruzzo.

grafica i risultati dell'analisi teorica condotta sul solaio in laterizio; rispetto al calcolo per la soletta in calcestruzzo, è stata variata solamente la massa e, di conseguenza, le altre variabili dipendenti (tempo di riverberazione strutturale e fattore di radiazione).

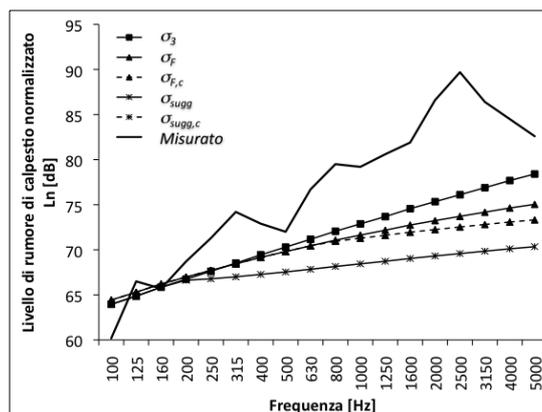


Figura 4.7: confronto tra livelli di rumore di calpestio normalizzato misurati e calcolati (solaio latero-cemento).

Appare evidente che nessuna delle previsioni effettuate a partire dalle diverse formulazioni del fattore di radiazione del solaio riescono a prevedere in maniera sufficientemente precisa il livello di rumore di calpestio. Questa difficoltà deriva essenzialmente dalla disomogeneità strutturale del solaio, a causa della quale i valori di tempo di riverberazione strutturale, il fattore di smorzamento ed il fattore di radiazione non possono essere calcolati tramite le relazioni valide per i sistemi omogenei, ma dovrebbero essere ricavati per via sperimentale. Ad esempio potrebbe essere utile studiare il comportamento in differenti punti del solaio, attraverso misure accelerometriche in corrispondenza di travetti e pignatte, per calcolare il tempo di riverberazione strutturale del sistema reale e ottenere, di conseguenza, una stima più precisa del fattore di radiazione, soprattutto alle alte frequenze. Si è quindi cercato di valutare, mediante misure accelerometriche, i tempi

mento:  $0,05 \text{ m} \times 2300 \text{ kg/m}^3 = 115 \text{ kg/m}^2$ ; nervatura:  $5 \times (0,12 \cdot 0,20 \cdot 4,20 \cdot 2300) / (3,00 \cdot 4,20) = 92 \text{ kg/m}^2$ ; blocchi:  $5 \text{ file} \times 17 \text{ blocchi per fila} \times (\approx 10) \text{ kg/blocco} / (3,00 \cdot 4,20) \approx 67 \text{ kg/m}^2$ .

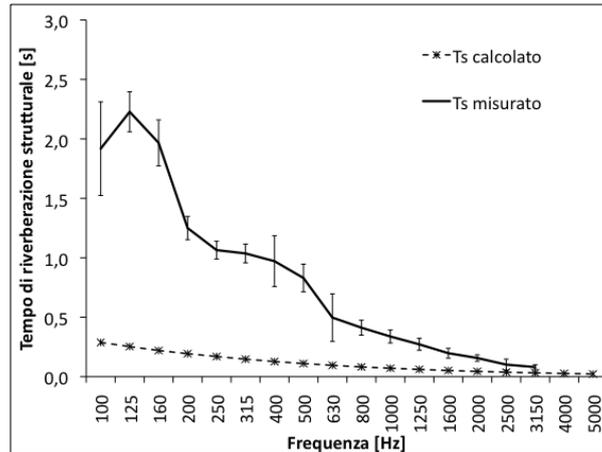


Figura 4.8: tempi di riverberazione strutturale del solaio in latero-cemento calcolati (mediante le assunzioni delle norme UNI EN ISO 12354 parti 2 e 1) e misurati mediante tecniche impulsive.

di riverberazione strutturale del solaio. Il solaio è stato sollecitato mediante un martello strumentato ed il segnale di accelerazione è stato digitalizzato e analizzato mediante software Brüel & Kjær Dirac, per il calcolo dei decadimenti in bande di terzi di ottava. In figura 4.8 è riportato il confronto tra tempi di riverberazione strutturale calcolati e misurati. Dal confronto sembrerebbe che la previsione dei tempi di riverberazione strutturale si avvicini ai risultati delle misurazioni alle alte frequenze, mentre alle basse frequenze lo scostamento diventa piuttosto importante e i calcoli sottostimano di molto i dati rilevati. La difficoltà di applicare le procedure di calcolo contenute nelle norme nasce anche dalla scelta del valore di massa superficiale. Infatti, mentre per un solaio omogeneo la stima della massa non dipende dalla posizione, per il solaio in latero-cemento il valore medio della massa superficiale non è *localmente* rappresentativo delle proprietà specifiche della struttura; in corrispondenza delle pignatte la massa superficiale su cui insiste la sorgente di rumore strutturale è certamente inferiore rispetto alla massa in corrispondenza dei travetti e, di conseguenza, la potenza meccanica in ingresso sarà differente nei due casi.

A causa di queste difficoltà previsionali, da ormai qualche anno in Italia si studiano formule previsionali basate su dati sperimentali in opera, che permettano di effettuare stime sufficientemente precise del livello di rumore di calpestio di solai in latero-cemento. Si riportano di seguito le principali.

Formula proposta da Brosio (2007):

$$L'_{n,0} \approx 15 \log f + 34 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Formula proposta dall'Università di Ferrara (2008):

$$L'_{n,0} \approx 16,4 \log f + 26 \text{ dB} \quad (4.2)$$

Negli ultimi due anni, sono state raccolte le esperienze di diversi gruppi di ricerca a livello nazionale ed è stata affinata la formulazione di un livello di rumore di calpestio normalizzato di riferimento per la previsione dei risultati sui solai in latero-cemento in opera [50]. La curva di riferimento proposta è riportata in forma numerica in tabella 4.4.

Di seguito si riporta un confronto tra le curve ottenute mediante le due formule

Frequenza $f$ [Hz]	$L'_{n,bf}$ [dB]
100	57,6
125	59,9
160	62,5
200	64,7
250	67,0
315	69,4
400	70,3
500	71,5
630	72,7
800	74,0
1000	75,2
1250	76,4
1600	77,7
2000	78,9
2500	80,0
3150	81,3
4000	77,3
5000	74,1

Tabella 4.4: valori numerici della curva di riferimento teorica proposta per la stima del livello di rumore di calpestio in opera (solaio nudo in latero-cemento).

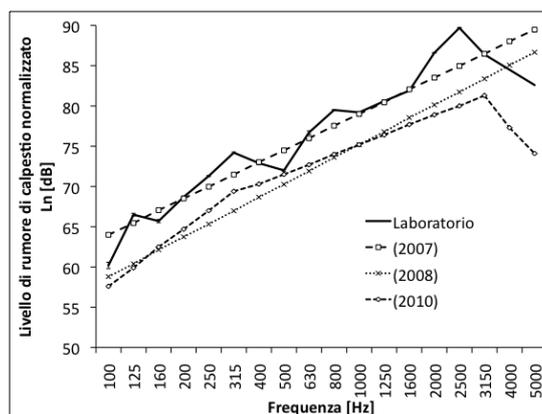


Figura 4.9: confronto tra formule previsionali e livelli misurati.

previsionali, la curva di riferimento tabulata ed i valori di livello di rumore di calpestio normalizzato relativi al solaio di laboratorio.

Il confronto mette in luce diversi aspetti interessanti, in particolare le tre previsioni forniscono dati che si avvicinano molto alle reali prestazioni del solaio. La formula sviluppata da Brosio e proposta nel 2007, fornisce attualmente la stima più precisa, mentre le altre due formulazioni stimano un livello inferiore. Il vantaggio della formulazione del 2010 è che prevede un abbassamento dei livelli in corrispondenza alle alte frequenze, caratteristica riscontrata di frequente sui solai nudi misurati in opera ed in laboratorio, mentre le formule del 2007 e 2008 sono lineari, con livelli di rumore che incrementano in frequenza, con pendenza rispettivamente di 15 dB e 16,4 dB per decade. Essendo tutte formule di origine sperimentale, il loro utilizzo per lo studio di un solaio in laboratorio ha validità limitata; comunque è plausibile che in opera i livelli di rumore siano inferiori al solaio di laboratorio, a causa della peculiarità delle condizioni di vincolo. Infatti mentre in opera il solaio è fissato alle pareti mediante incastro, in laboratorio appoggia su un giunto ela-

stico in gomma e tale differenza nella tipologia di vincolo potrebbe determinare differenti modalità di propagazione delle onde flessionali alle diverse frequenze all'interno del solaio e durante la trasmissione nell'ambiente ricevente.

## 4.2 Influenza dello stadio di maturazione del massetto sull'isolamento del rumore di calpestio

La norma UNI EN ISO 140-8 [63], per la determinazione della riduzione di rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni in laboratorio, prescrive un tempo di stagionatura di tre settimane prima della misura nel caso di massetti galleggianti in calcestruzzo. Tale raccomandazione deriva dalla necessità di sollecitare la struttura solo dopo il completamento delle reazioni chimiche di indurimento del legante cementizio ed eliminata la maggior parte dell'umidità dell'impasto. Inoltre, come sottolineato da Hopkins [18], durante l'asciugatura del massetto varia la rigidità della superficie soggetta ad impatto e, di conseguenza, anche la potenza indotta dal generatore normalizzato di rumore di calpestio. Inoltre è da notare che anche la rigidità dei collanti utilizzati per l'adesione delle piastrelle e di altre finiture superficiali potrebbe variare con l'asciugatura. Poiché il tempo di stagionatura dei massetti condiziona fortemente le tempistiche dell'attività di laboratorio, è stata condotta una verifica su alcuni allestimenti, analizzando i livelli di rumore di calpestio normalizzato per circa un mese su ciascun campione, con lo scopo di valutare se una eventuale riduzione dei tempi di attesa porti ad un risultato compreso entro l'errore di misura generalmente associato alle misure di rumore di calpestio.

Sono state condotte delle misure di rumore di calpestio e di attenuazione di rumore di calpestio in laboratorio su solaio normalizzato in calcestruzzo armato, utilizzando come campioni sei materiali per l'isolamento dei rumori impattivi specifici per applicazione come sottofondo per pavimenti galleggianti. I materiali utilizzati sono prevalentemente provenienti da riciclo di pneumatici esausti e scarti di lavorazione industriale, ma sono stati analizzati anche materiali provenienti da materie prime non riciclate presenti sul mercato. Le misure sono state condotte nel periodo novembre 2008 - maggio 2009, eseguendo test completi, in accordo alle norme UNI EN ISO 140 parte 6 e parte 8, ad intervalli di tre - quattro giorni a partire dalla seconda settimana di stagionatura del massetto galleggiante. Si è scelto di iniziare a sollecitare il massetto a partire dalla seconda settimana, per non comprometterne la resistenza meccanica, mentre si è ritenuto opportuno monitorare i livelli di rumore non più di due volte a settimana, per identificare in maniera semplice una eventuale tendenza dei risultati, considerando anche che l'incertezza associata a tali misure è molto elevata ( $\pm 1$  dB sull'indice di valutazione). I livelli di pressione sonora sono stati mediati su trentasei singoli rilievi (sei posizioni di sorgente e sei posizioni di microfono), mentre i tempi di riverberazione sono stati mediati su ventiquattro acquisizioni (tre posizioni di sorgente sonora e quattro posizioni di microfono, con due decadimenti per combinazione) mediante la tecnica del rumore interrotto.

In figura 4.10 si riportano i livelli di rumore di calpestio normalizzato, espressi in termini di indice mononumerico di valutazione  $L_{nw}$ . Dal semplice confronto degli indici di valutazione, emergono alcune considerazioni. Per i tre campioni A, D, E non si notano particolari variazioni tra le prime e le ultime misure effettuate. Per i due campioni B e

C l'andamento dell'indice di valutazione nel tempo è tendenzialmente crescente e sembra stabilizzarsi dopo circa diciotto giorni. Il campione F presenta un profilo temporale differente, in quanto il valore dell'indice diminuisce bruscamente per poi assestarsi già dopo circa dieci giorni.

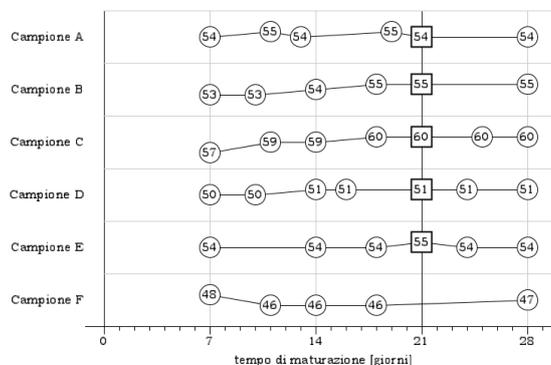


Figura 4.10: variazione dell'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio normalizzato in laboratorio  $L_{n,w}$  [dB] in funzione del tempo di stagionatura del massetto.

In figura 4.11 si riporta, invece, l'andamento temporale dei valori di attenuazione di rumore di calpestio  $\Delta L_w^2$  relativi agli stessi sei materiali testati ed alle stesse misurazioni.

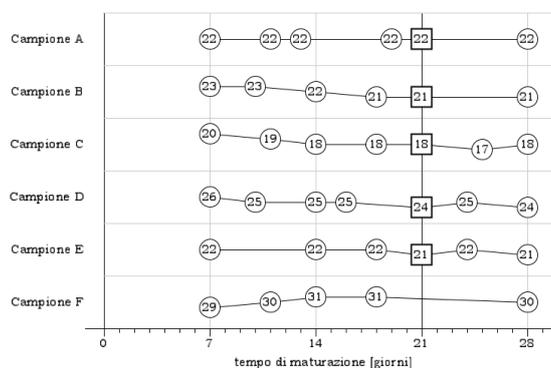
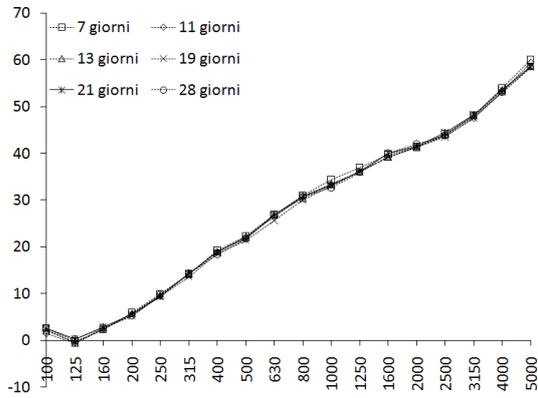


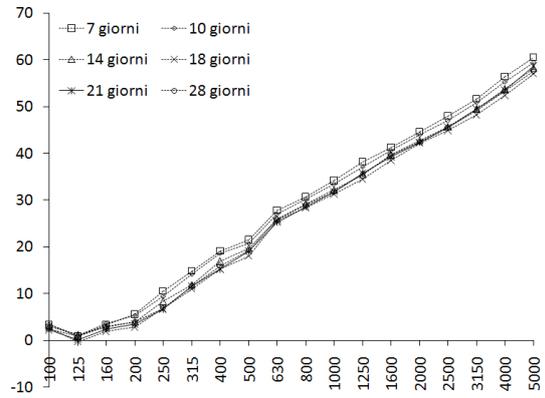
Figura 4.11: variazione della riduzione del livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L_w$  [dB] relativo ai sei materiali testati, in funzione del tempo di stagionatura del massetto.

Anche in questo caso emergono alcune differenze tra i sei test effettuati. In particolare il campione A ha mantenuto gli stessi livelli prestazionali nel corso della stagionatura del massetto, con il valore di  $\Delta L_w$  costante in tutto l'arco temporale. Anche per il campione E è stato riscontrato un andamento pressoché costante, con variazioni di 1 dB in corrispondenza delle ultime misurazioni. I campioni B, C, D hanno dimostrato una discreta variabilità con il tempo di stagionatura, con andamento decrescente delle prestazioni. Per

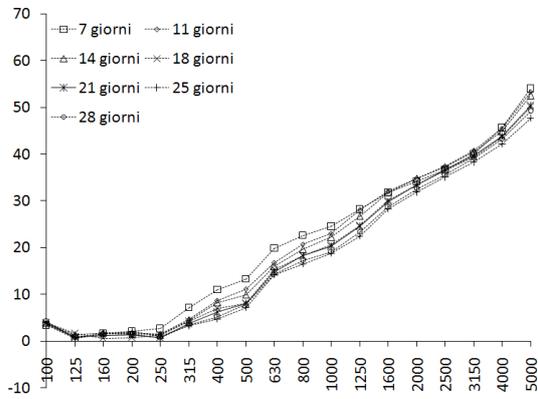
<sup>2</sup>I valori di riduzione del livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L_w$  sono stati ottenuti in completo accordo alle procedure delle norme UNI EN ISO 140 parte 6 [61] e parte 8 [63] e UNI EN ISO 717-2 [67].



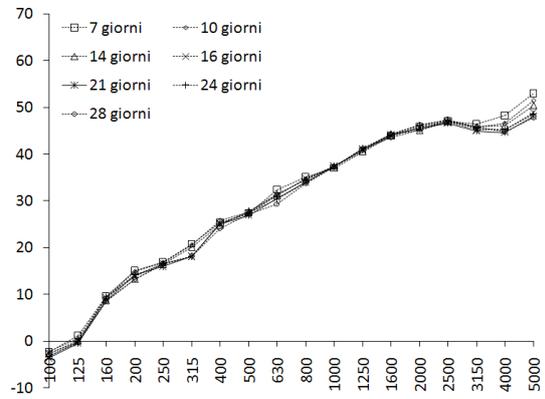
Campione A



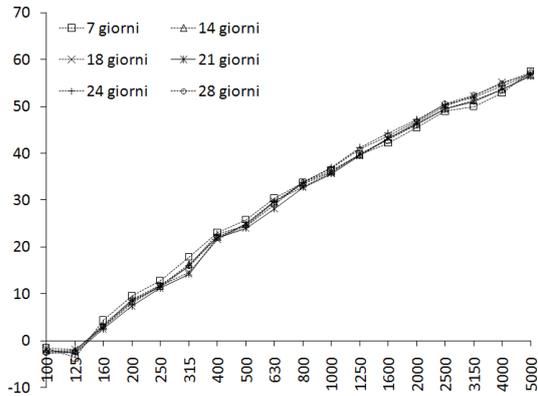
Campione B



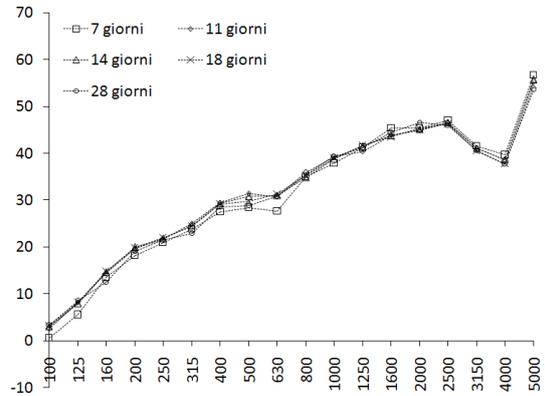
Campione C



Campione D



Campione E



Campione F

Figura 4.12: attenuazione dei campioni testati (A, B, C, D, E, F). Per ogni grafico, sull'asse delle ordinate è rappresentata l'attenuazione del rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L$  [dB], sull'asse delle ascisse le bande di frequenze in terzi d'ottava.

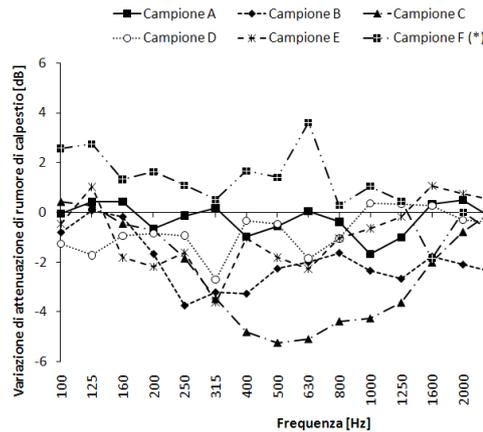


Figura 4.13: differenza di attenuazione del livello di rumore di calpestio  $\Delta L$  [dB] tra il risultato ottenuto al termine della prima settimana di stagionatura e il risultato ottenuto al ventunesimo giorno (campione F<sup>(\*)</sup> valutato al diciottesimo giorno).

il campione F è stato riscontrato un valore di attenuazione crescente durante le prime due settimane. In figura 4.12 sono rappresentati i valori spettrali dell'attenuazione del rumore di calpestio per i sei campioni analizzati.

I campioni analizzati hanno mostrato differenti variazioni prestazionali, nel periodo di stagionatura del massetto. In particolare il campione A è risultato il più stabile, con variazioni minime tra il settimo ed il ventottesimo giorno. I campioni B e C sono caratterizzati da un calo progressivo del valore  $\Delta L$ , per frequenze superiori alla risonanza, su tutto l'arco di tempo indagato. I campioni D, E ed F hanno mostrato limitate variazioni sull'intero spettro, ma alcune perdite di prestazioni localizzate. Infatti il campione D presenta un netto calo di attenuazione a 315 Hz e nelle bande di 4000 e 5000 Hz, mentre il campione F presenta un aumento di prestazione, concentrato soprattutto alle basse frequenze (100-160 Hz) e nella banda di 630 Hz. In figura 4.13 sono riportate le differenze di riduzione misurate alla fine della prima settimana di stagionatura ed al ventunesimo giorno. Tale rappresentazione mette in evidenza in particolare il calo di prestazione relativo alle alte frequenze, comune a tutti i campioni, il comportamento anomalo del campione F (incremento di prestazione) e una perdita di attenuazione del campione C di quasi 6 dB nell'intervallo 315-1250 Hz.

Dai risultati ottenuti emerge che il tempo di stagionatura del massetto galleggiante ha un'influenza non trascurabile sugli esiti delle misurazioni di livelli di rumore di calpestio e di attenuazione di rumore di calpestio secondo le norme UNI EN ISO 140, parte 6 ed 8. In generale nell'arco delle prime due settimane di maturazione si sono notate le variazioni più rilevanti, mentre già durante la terza settimana le misurazioni di livello ed attenuazione di rumore di calpestio hanno fornito risultati stabili, così da avere già a quattordici - diciotto giorni una buona stima della grandezza in esame, almeno rientrando nell'errore di misura. Pertanto l'indicazione di norma di 21 giorni di attesa, contenuta nel paragrafo 5.3.2.2 della norma UNI EN ISO 140-8 [63] e riferita a "massetti in calcestruzzo galleggianti gettati in opera", sembra appropriata ed in parte a favore di sicurezza. Invece, tempi di maturazione maggiori di ventuno giorni sembrano essere per lo più ininfluenti.

## 4.3 Correlazione tra rigidità dinamica dei materiali e isolamento dei solai

La rigidità dinamica è una proprietà molto importante dei materiali usati come sottofondo per pavimenti galleggianti ed una sua approfondita conoscenza può essere determinante per stimare in maniera esatta le prestazioni dei solai isolati, soprattutto se abbinata ad altre proprietà meccaniche dei materiali come il comportamento a compressione sotto carico e nel tempo. Tuttavia, il calcolo della riduzione di rumore di calpestio a partire dai dati di rigidità dinamica può dipendere fortemente dall'accuratezza adottata in fase di misura e dalla corretta interpretazione delle norme (UNI EN ISO 29052-1 per la misura della rigidità dinamica e EN12354-2 per il calcolo della riduzione dei livelli di pressione sonora), in particolare la presenza del gesso tra il campione e la piastra in acciaio e l'applicazione del *petroleum jelly* ai bordi risultano fondamentali ai fini di una corretta valutazione della rigidità. All'interno di questa sezione si riportano alcune valutazioni riguardo la correlazione tra la rigidità dinamica e la riduzione di rumore di calpestio per materiali in gomma riciclata ed altri materiali misurati in laboratorio in accordo alla norma UNI EN ISO 140-8, al fine di verificare la precisione e l'accuratezza delle formule previsionali disponibili in letteratura e l'influenza delle condizioni di misura. In particolare la prima parte della sezione è incentrata sullo studio delle condizioni di prova, senza considerare misure di resistenza al flusso dei materiali (non disponibili durante la fase di sperimentazione), mentre la seconda parte della sezione è incentrata sull'analisi della correlazione tra il dato misurato su piccolo campione e la previsione di prestazione sull'intero solaio, considerando anche l'effetto della compressione del materiale nel tempo sulle frequenze di risonanza del sistema solaio-materiale-massetto.

### Misura della rigidità dinamica

Alcuni materiali utilizzati come sottofondo per pavimenti galleggianti sono stati misurati in laboratorio in accordo alle norme UNI EN ISO 140-8 su piastra armata. Per gli stessi materiali sono state condotte misure di rigidità dinamica preparando i campioni in tre modi differenti: con lo strato di intonaco di gesso tra il materiale e la piastra di carico in acciaio, con lo strato di gesso e la sigillatura mediante grasso di vaselina tecnica (*petroleum jelly*) ed infine con la piastra di carico appoggiata semplicemente sopra il materiale. I materiali misurati sono di diverse tipologie e tutti reperibili sul mercato: gran parte di essi deriva dal riciclo di gomme triturate (SBR, EPDM) in rotoli ed in pannelli piani e sagomati, alcuni sono di natura fibrosa minerale e sintetica, altri sono in polietilene ed in polistirene. I tre metodi di preparazione dei campioni sono stati alternati nel seguente modo: dapprima il campione è stato adagiato sul piano di marmo ed è stato ricoperto con un sottile foglio di polietilene; poi è stato preparato l'intonaco di gesso, mescolando polvere di gesso e acqua in rapporto 2:1; quindi sopra il gesso è stato applicato un altro foglio di polietilene (per protezione della piastra di carico in acciaio<sup>3</sup>) ed infine

---

<sup>3</sup>La piastre in acciaio del peso di circa 8 kg utilizzate sono state sottoposte ad un trattamento galvanico di nichelatura come protezione alla corrosione; nonostante lo strato protettivo sia omogeneo ad occhio nudo, si è notato che il contatto con il gesso umido determina un deterioramento in corrispondenza di imperfezioni superficiali dello strato, di conseguenza si è resa necessaria l'aggiunta del secondo foglio di

è stata posizionata la piastra di carico, facendo attenzione ad una corretta planarità rispetto al basamento in marmo, controllata tramite livella a bolla. La frequenza di risonanza del sistema è stata rilevata utilizzando un attuatore elettrodinamico (*shaker*) alimentato con un segnale sinusoidale tempovariante *sine sweep* concentrato alle basse frequenze (in genere da 5 a 300 Hz). Lo *shaker* è stato posizionato al centro della piastra di carico e l'accelerazione è stata rilevata su tre punti situati accanto al centro della piastra. L'accelerometro ed il sensore di forza in serie allo *shaker* sono collegati ad un analizzatore di segnale Dactron Photon, con amplificatore di potenza per il canale di forza. Il rilievo è stato eseguito dopo circa tre giorni, per permettere la completa asciugatura del gesso. La misura è stata ripetuta sullo stesso campione, una volta applicato il cordone di sigillatura sul bordo inferiore in corrispondenza al piano di appoggio in marmo. Per la misura sul materiale, è stata rimossa la rasatura ed il bordo del campione è stato pulito dai residui di grasso di vaselina, quindi il campione è stato riposizionato e posto sotto carico per circa un'ora e poi misurato. Sono stati presi in esame dodici materiali ed i risultati di frequenza di risonanza e rigidità dinamica per i tre metodi adottati sono riassunti in tabella 4.5.

<i>Campione</i>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f_0$ [Hz]	(A)	106	42	37	47	63	70	150	26	46	72	53	52
	(B)	110	45	38	51	72	78	158	28	49	78	55	-
	(C)	107	42	36	42	51	56	106	25	44	60	43	43
$s'_t$ [MN/m <sup>3</sup> ]	(A)	90	14	11	18	31	39	179	5	17	41	22	21
	(B)	97	16	12	21	41	48	199	6	19	48	24	-
	(C)	89	14	10	14	20	25	88	5	15	28	15	14

Tabella 4.5: risultati delle misurazioni di rigidità dinamica per i materiali resilienti in esame, misurati con tre metodologie per la preparazione dei campioni: (A) strato di intonaco di gesso tra il campione e la piastra di carico, (B) strato di gesso e sigillatura con *petroleum jelly* (C) piastra di carico posata direttamente sulla superficie del materiale.

Per alcuni materiali, la differenza di frequenza di risonanza tra campioni preparati con (A) o senza (B) gesso è piuttosto rilevante: i materiali maggiormente affetti dalla presenza o assenza dello strato di gesso sono quelli con superficie disomogenea; il gesso agisce come uno strato di distribuzione del carico applicato ed ha come effetto un innalzamento della frequenza di risonanza, rispetto alla prova in appoggio. Anche l'applicazione del *petroleum jelly* influenza il valore della rigidità dinamica, incrementando la frequenza di risonanza del sistema, sia per i materiali a celle chiuse che per i materiali a celle aperte<sup>4</sup>. Secondo la norma UNI EN 29052-1, la rigidità dinamica dovrebbe essere misurata con l'applicazione dello strato di gesso e del *petroleum jelly* (solo per i materiali porosi a cella chiusa, ad esempio polietilene o polistirene espanso) e dovrebbe essere integrata con il contributo dato dalla resistenza al flusso dell'aria per i materiali con porosità aperta rilevante. In realtà queste condizioni sono ben rappresentative delle comuni tecniche realizzative dei massetti galleggianti (in sabbia e cemento o autolivellanti), ma potrebbero essere meno adatte a descrivere il comportamento del materiale in applicazioni a polietilene.

<sup>4</sup>L'applicazione di *petroleum jelly* alla base del campione andrebbe eseguita per materiali porosi a celle chiuse, poiché potrebbe formarsi una lama d'aria sotto il campione che contribuisce alla vibrazione.

Campione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta s'_t$ (gesso) [MN/m <sup>3</sup> ]	1	0	1	4	11	14	91	1	2	14	7	7
$\Delta s'_t$ (petr. jelly) [MN/m <sup>3</sup> ]	7	2	1	3	9	9	20	1	2	7	2	-
$\Delta s'_t$ (totale) [MN/m <sup>3</sup> ]	8	2	2	7	20	23	111	1	4	20	9	7
$\Delta s'_t$ (gesso) [%]	0,01	0,04	0,11	0,31	0,53	0,58	1,03	0,11	0,14	0,48	0,50	0,49
$\Delta s'_t$ (petr. jelly) [%]	0,07	0,12	0,08	0,15	0,30	0,23	0,11	0,10	0,11	0,17	0,09	-
$\Delta s'_t$ (totale) [%]	0,09	0,16	0,20	0,51	0,99	0,94	1,26	0,22	0,26	0,73	0,64	0,49

Tabella 4.6: incremento di rigidità dinamica in relazione alla presenza dello strato di gesso  $\Delta s'_t$  (in MN/m<sup>3</sup> ed in percentuale) rispetto al provino misurato senza gesso, in relazione all'aggiunta del *petroleum jelly* rispetto al provino misurato con il gesso e in relazione al provino con gesso e *petroleum jelly* rispetto al provino in appoggio semplice.

secco, come sistemi di ripartizione dei carichi prefabbricati in lastre, semplicemente appoggiati. Il calcolo di  $s'_t$  è stato effettuato mediante la relazione contenuta nella norma  $s'_t = 4\pi^2 m'_t (f_r)^2$ . Si noti che la dipendenza della rigidità dinamica dalla frequenza di risonanza è quadratica, per cui ad alti valori di  $f_r$  corrispondono valori sempre maggiori di rigidità; inoltre nelle misure effettuate con il gesso nel computo della massa per unità di superficie  $m'_t$  è compreso il contributo dello strato aggiuntivo. Nella tabella 4.6 si riportano gli effetti sulla rigidità dinamica delle tecniche di realizzazione dei campioni analizzate nel presente lavoro. In particolare si riporta l'effetto della presenza del gesso rispetto al provino preparato appoggiando la piastra direttamente sul campione e l'effetto dell'aggiunta della sigillatura mediante *petroleum jelly* rispetto al campione con strato in gesso; infine è riportato l'effetto dell'incremento globale della rigidità dinamica rispetto al campione senza gesso e senza sigillatura. In figura 4.14 sono riportati in grafico i valori tabulati.

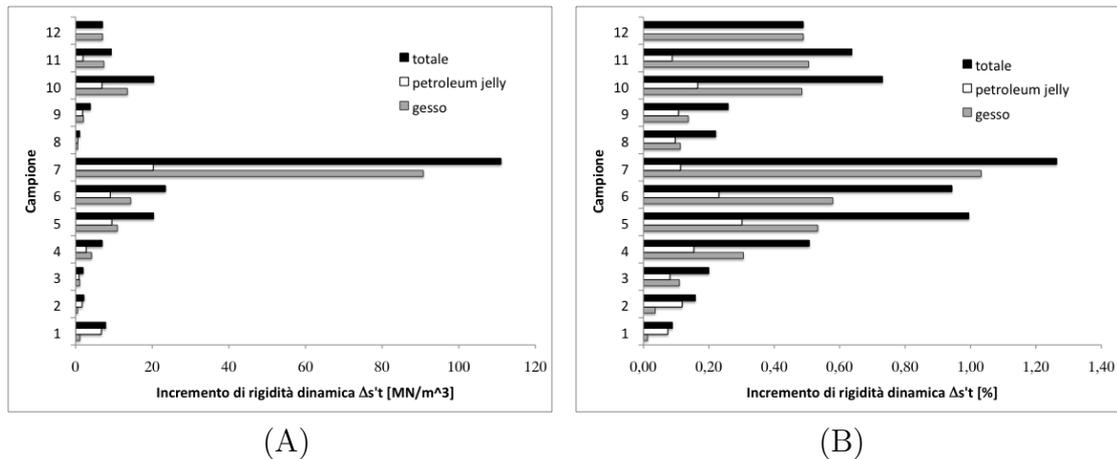


Figura 4.14: incremento di rigidità in valore assoluto (A) ed in valore percentuale (B).

Dai risultati appare evidente che la misura della rigidità dinamica è un procedimento molto delicato e la preparazione del campione deve essere effettuata in maniera molto accurata, al fine di evitare una sovrastima delle capacità dinamiche dei materiali, in particolare di quelli meno performanti (ad esempio il campione n. 7). L'uso del gesso ha

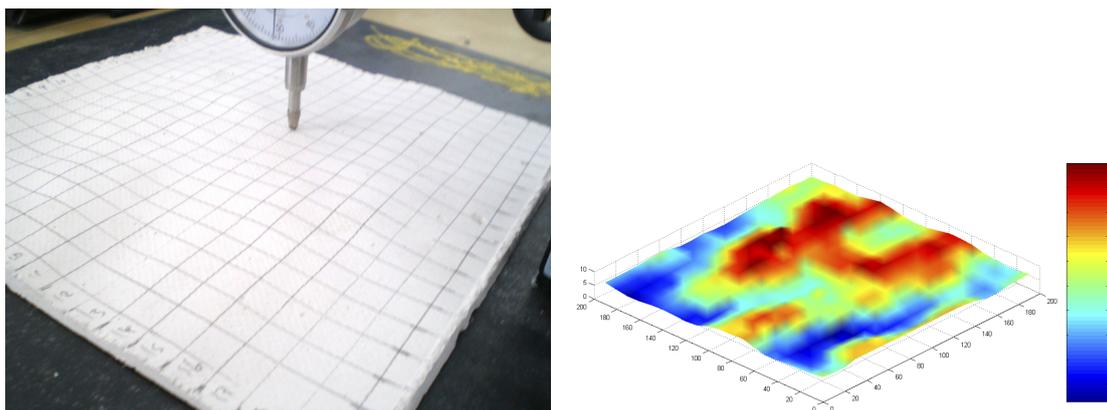


Figura 4.15: immagine e rappresentazione tridimensionale di uno strato di gesso derivante da una misura di rigidità dinamica (l'escursione tra i picchi e le valli è di circa 4 mm).

fatto incrementare la rigidità dinamica mediamente tra i 5 e 10 MN/m<sup>3</sup> ed in percentuale anche fino al 50%. L'utilizzo del *petroleum jelly* ha incrementato ulteriormente la rigidità dinamica di circa il 10-20%. In totale l'influenza dei due fattori è mediamente stimabile in un incremento della rigidità di circa 10-20 MN/m<sup>3</sup> ed in percentuale rispetto alla misura senza gesso e sigillatura del 50% circa. In figura 4.15 si riporta una rappresentazione tridimensionale di un calco in gesso di cui è stata eseguita una mappatura superficiale mediante comparatore a quadrante. L'immagine mostra come per certe tipologie di materiale le asperità superficiali possano essere molto critiche per identificare la sezione resistente sotto l'applicazione del carico. Quello riportato in figura è certamente un caso limite, di un materiale granulare posato in doppio strato, ma dimostra come in certi casi la differenza di spessore può raggiungere valori molto elevati e la presenza del gesso vada a ripristinare una condizione di carico omogeneamente distribuito su tutto il campione.

In figura 4.16 si riporta per ogni campione esaminato un esempio di acquisizione di una curva per l'identificazione della frequenza di risonanza: in asse delle ascisse è riportata la frequenza sollecitata ed acquisita, mentre sull'asse delle ordinate è riportato il valore in frequenza del modulo della funzione di trasferimento  $H$  [m/s<sup>2</sup>/N] tra il segnale di accelerazione e quello di forza, comparato con il valore della funzione di coerenza tra i due segnali<sup>5</sup>. Per ogni materiale è stata considerata la metodologia di preparazione del campione stabilita dalla norma. Dai grafici emerge che materiali differenti possono avere comportamenti molto diversi. In particolare la forma delle curve suggerisce, oltre all'identificazione del valore della risonanza, anche la sua precisione, intesa come intervallo di risonanza e non come singola frequenza, in dipendenza dello smorzamento interno del materiale resiliente. Infatti per questi materiali l'influenza dello smorzamento può essere molto critica, soprattutto per l'effetto sulla trasmissibilità delle vibrazioni. Si è cercato quindi di stimare il valore del coefficiente di smorzamento  $\zeta$ , calcolato tramite la relazione

<sup>5</sup>Gli intervalli di frequenza in cui la coerenza è molto prossima all'unità sono indice di accuratezza delle grandezze misurate.

<i>Campione</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
<i>Rapporto di smorzamento</i>	0,069	0,059	0,048	0,166	0,182	0,173	0,110	0,065	0,049	0,169	0,163	0,072

Tabella 4.7: stima del rapporto di smorzamento a partire dalle curve sperimentali.

(vedi Basso [2]), valida però per bassi valori di smorzamento:

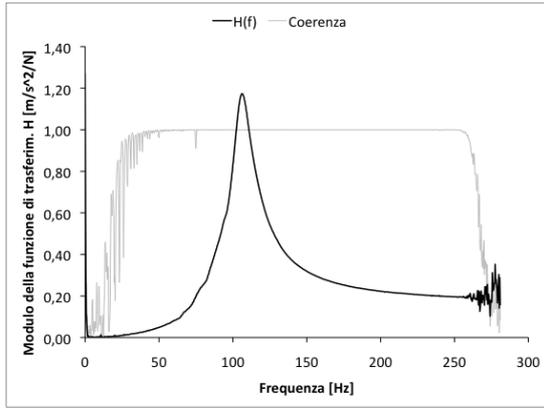
$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad (4.3)$$

in cui  $f_r$  è la frequenza di risonanza ottenuta dalla curva sperimentale,  $f_2 - f_1$  rappresenta l'intervallo di frequenza in corrispondenza ad un valore del modulo della funzione di trasferimento inferiore di 3 dB rispetto al picco di risonanza (in scala lineare ciò corrisponde ad un fattore  $0,707 \cdot H(f_r)$ ). In tabella 4.7 si riportano i valori stimati del rapporto di smorzamento in base alle curve sperimentali.

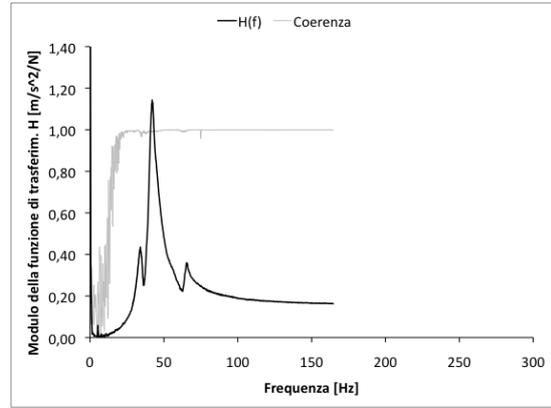
Dai valori tabulati emerge che vi sono materiali con smorzamento 15-20%, mentre altri sono più vicini al 5%. Sono valori nel complesso molto elevati e la loro precisione è messa in dubbio dal metodo di valutazione utilizzato, valido in genere per smorzamenti dell'entità del 1-2%. In generale, materiali con picchi di risonanza molto definiti (campana stretta) collocati alle basse frequenze dovrebbero garantire un migliore isolamento dei rumori di calpestio; inoltre, il calcolo teorico dello smorzamento secondo la relazione 4.3 suggerisce che la larghezza della campana sia in rapporto con il valore assoluto della frequenza relativa al picco di risonanza, a parità di smorzamento. Nell'analisi svolta, alcuni campioni sembrano suggerire un buon comportamento come anticalpestio (ad esempio i campioni 2, 3, 8, 9 e 12), ma alcuni di essi sono materiali fibrosi, per cui il comportamento globale in opera è peggiorato a causa del contributo della rigidità dinamica dell'aria contenuta nella porosità aperta (in particolare per i campioni 2, 8 e 9). Si noti anche che alcuni materiali godono di elevate proprietà smorzanti (campioni 4, 5, 6, 7, 10 e 11) ed il modulo della funzione di trasferimento tra il segnale di accelerazione e forza è inferiore all'unità sulla porzione di spettro considerata. Si noti inoltre che nell'intervallo in corrispondenza del picco di risonanza, la funzione di coerenza dei segnali è molto prossima all'unità per tutti i campioni, indice di una buona precisione del valore dei segnali rilevati.

Al fine di valutare anche l'influenza del cedimento nel tempo (o sotto l'azione di un carico concentrato) sono state condotte misure in laboratorio secondo la norma UNI EN 12431. Come già visto in 1.1, il valore della rigidità dinamica può essere aumentato di un fattore dipendente dal comportamento a compressione del materiale. In particolare, ottenuti i valori degli spessori del materiale dopo l'applicazione di 2 kPa ( $d_F$ ) e dopo l'applicazione di 50 kPa e ritorno a 2 kPa ( $d_B$ ), si può calcolare un valore di rigidità dinamica massima  $s'_{max}$  secondo la relazione:

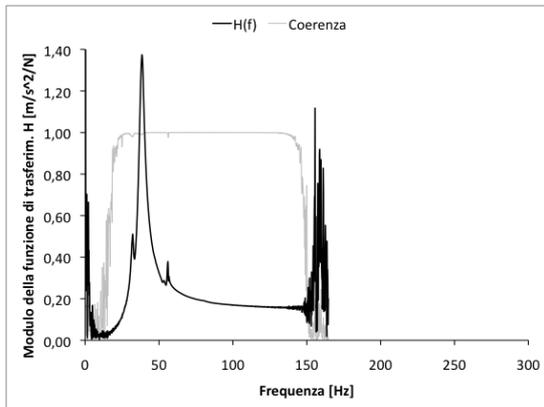
$$s'_{max} = s' \cdot \frac{d_F}{d_B} \quad (4.4)$$



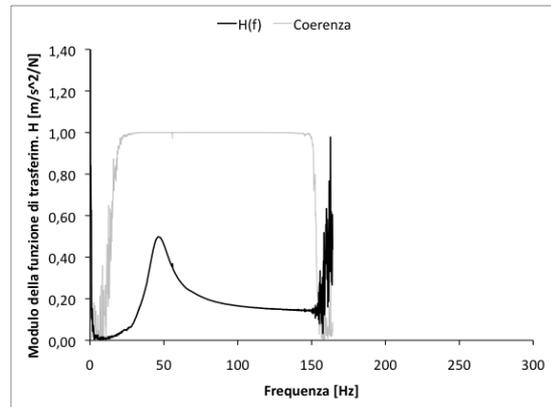
Campione 1



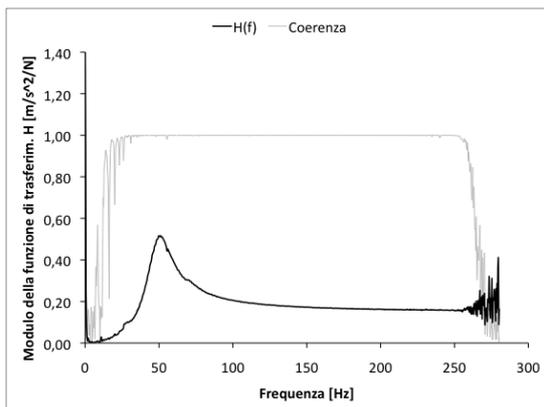
Campione 2



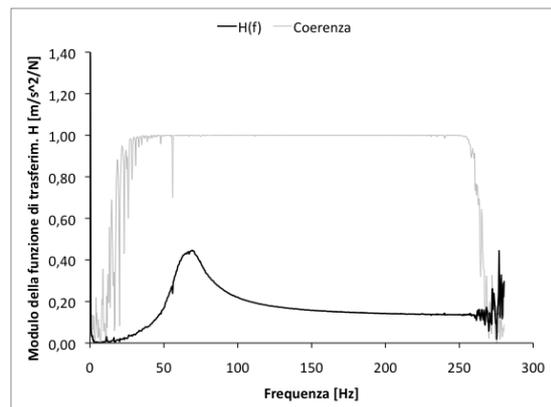
Campione 3



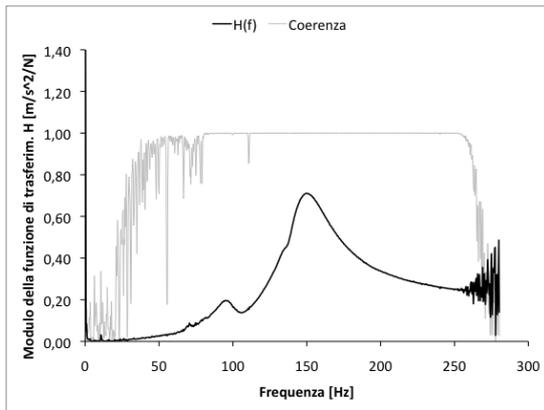
Campione 4



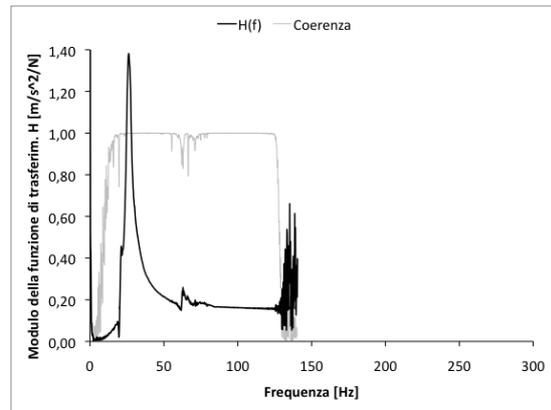
Campione 5



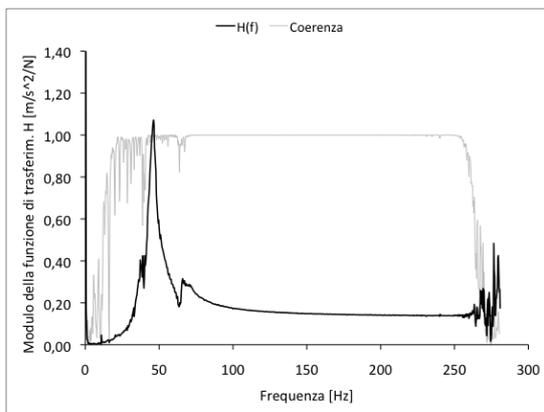
Campione 6



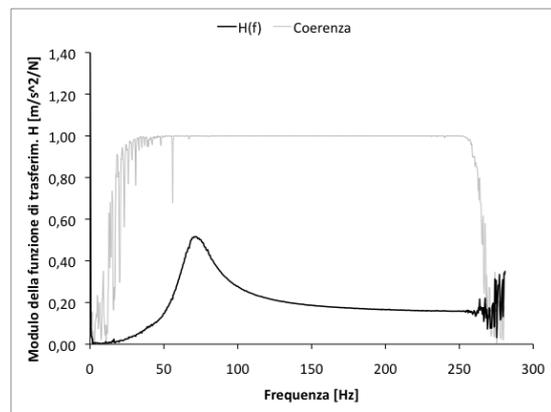
Campione 7



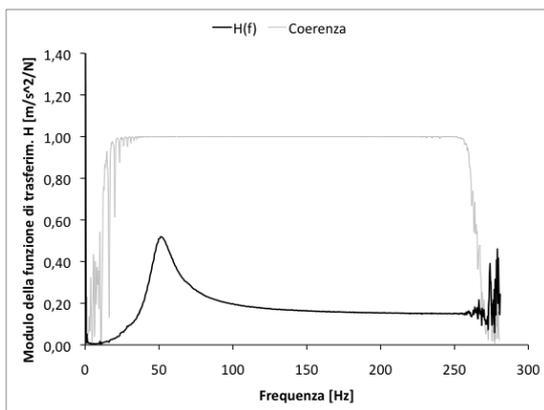
Campione 8



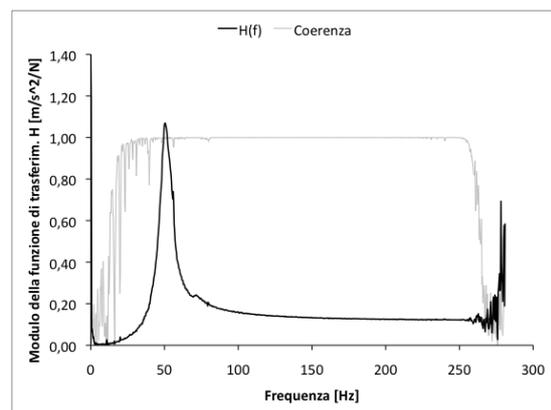
Campione 9



Campione 10



Campione 11



Campione 12

Figura 4.16: esempi di curve di risposta in frequenza per ogni campione esaminato.

In tabella 4.8 si riportano i valori nominali della rigidità dinamica dei dodici campioni misurati, i relativi valori  $d_F/d_B$  e la rigidità dinamica massima risultante. Dalla tabella emerge che mediamente l'incremento di rigidità dinamica dovuto alla comprimibilità dei materiali utilizzati come sottofondo per pavimenti galleggianti è di circa  $2,6 \pm 1,8 \text{ MN/m}^3$ , con minimi di  $0,5 \text{ MN/m}^3$  e massimi di  $6,4 \text{ MN/m}^3$ .

Campione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$s'_t \text{ MN/m}^3$	96,7	14,3	11,8	17,9	31,4	39,3	178,6	5,5	17,0	41,4	22,0	21,4
$d_F/d_B [-]$	1,021	1,238	1,129	1,086	1,071	1,081	1,013	1,166	1,374	1,131	1,081	1,021
$s'_{t,max} \text{ MN/m}^3$	98,8	17,7	13,4	19,4	33,6	42,5	181,0	6,4	23,4	46,9	23,8	21,9

Tabella 4.8: valori di  $s'_t$ ,  $d_F/d_B$  e  $s'_{t,max}$  per i campioni in esame, senza considerare l'effetto della resistività al flusso d'aria.

### Calcolo della riduzione di rumore di calpestio e formule previsionali

Le misure di riduzione di rumore di calpestio su solaio in calcestruzzo in laboratorio sono state confrontate con i risultati dei calcoli basati sulle formule previsionali disponibili nella norma EN 12354-2, che sono le seguenti:

$$\Delta L = 40 \log \frac{f}{f_0}$$

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_0}$$

in cui  $f_0$  è la frequenza di risonanza dell'intero solaio isolato, calcolata in funzione del peso del massetto soprastante il materiale resiliente e  $f$  è la frequenza centrale di banda di  $1/3$  d'ottava. Per il calcolo di  $f_0$ , la norma EN 12354-2 fornisce la seguente relazione, basata sul presupposto che le caratteristiche del solaio di base non influenzino il comportamento risonante del sistema:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (4.5)$$

in cui  $s'$  è la rigidità dinamica per unità di superficie dello strato resiliente e  $m'$  è la massa per unità di superficie del massetto galleggiante. Nell'ambito di questo lavoro è stata considerata anche un'altra formulazione della frequenza di risonanza del solaio, presente nella norma EN 12354-1, che considera anche la massa del solaio di base. Tale formula è

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (4.6)$$

in cui  $m'_1$  e  $m'_2$  sono le masse per unità di superficie del massetto e del solaio di base. La norma propone questa relazione per il calcolo della frequenza di risonanza di un sistema a pavimento galleggiante in relazione alla valutazione della trasmissione del rumore aereo e si è pensato di applicarla a questa analisi, anche in virtù della vicinanza dei valori di massa per unità di superficie degli elementi misurati. Per quanto riguarda il solaio in

calcestruzzo del laboratorio Isolgomma, il peso stimato<sup>6</sup> è di circa  $320 \text{ kg/m}^2$  e la media dei pesi dei massetti demoliti al termine delle prove di rumore di calpestio è di circa  $96 \text{ kg/m}^2$ , quindi circa un terzo del peso del solaio di base. L'effetto della scelta della formula previsionale è messo in evidenza in figura 4.17, che riporta sull'asse delle ascisse la rigidità dinamica del materiale e sulle ordinate i valori delle frequenze di risonanza del sistema solaio e la differenza tra i due.

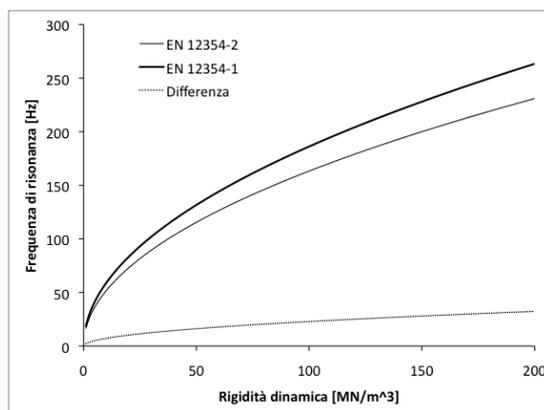


Figura 4.17: previsione della frequenza di risonanza del solaio in funzione della rigidità dinamica del materiale usato come sottofondo; è stato assunto un peso di  $320 \text{ kg/m}^2$  per il solaio in calcestruzzo e di  $96 \text{ kg/m}^3$  per il massetto galleggiante.

Dai calcoli emerge che la differenza tra i due metodi previsionali cresce con l'aumentare della rigidità dinamica del materiale. Quindi, migliore è il materiale e minore sarà la differenza determinata dalla scelta della formula. In genere i materiali, per essere dei buoni isolanti dei rumori impattivi, devono avere bassa rigidità dinamica (inferiore a  $30 \text{ MN/m}^3$ ) ma si è visto che le condizioni di misura sono piuttosto critiche e l'adozione di una metodologia di preparazione del campione può influenzare la valutazione della rigidità dinamica (aumentandone il valore), pertanto utilizzare la formula della norma EN 12354-1 potrebbe essere comunque cautelativo.

In tabella 4.9 si riporta un riepilogo dei parametri dinamici derivanti dalla precedente analisi, mentre in tabella 4.10 si riportano i risultati di  $\Delta L$  in frequenza e gli indici di valutazione  $\Delta L_w$  per tutti i campioni (l'analisi è stata estesa ad ulteriori quattro materiali). In figura 4.18 sono invece riportati i valori di  $\Delta L$  in bande di  $1/3$  d'ottava confrontati con le due formule previsionali derivanti da normativa e con la formula previsionale basata sulla trasmissibilità, mentre in tabella 4.11 si riportano gli indici di valutazione dei risultati delle misure e dei calcoli previsionali.

In generale le formule previsionali dimostrano di fornire delle stime abbastanza vicine ai valori di laboratorio, per la maggior parte dei materiali presi in esame. In particolare, per gran parte dei campioni i valori di attenuazione in frequenza sembrano essere compresi tra le due rette logaritmiche di pendenza 30 e 40 dB/decade, con curve più o meno lineari,

<sup>6</sup>Per la densità del calcestruzzo è stato considerato il valore suggerito dalla norma EN 12354 di  $2300 \text{ kg/m}^3$ , lo spessore del solaio è 14 cm, per cui il peso per unità di superficie calcolato è  $322 \text{ kg/m}^2$ .

<i>Campione</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$s'_t$ [MN/m <sup>3</sup> ]	96,7	14,3	11,8	17,9	31,4	39,3	178,6	5,5	17,0	41,4	22,0	21,4	18,6	15,6	17,9	10,1
$s'$ [MN/m <sup>3</sup> ]	96,7	30,2	11,8	17,9	31,4	39,3	178,6	11,0	39,2	41,4	22,0	21,4	18,6	15,6	17,9	28,6
$dF/dB$ [-]	1,021	1,238	1,129	1,086	1,071	1,081	1,013	1,166	1,374	1,131	1,081	1,021	1,100	1,100	1,100	1,200
$s'_{max}$ [MN/m <sup>3</sup> ]	98,8	37,4	13,4	19,4	33,6	42,5	181,0	12,9	53,9	46,9	23,8	21,9	20,5	17,1	19,7	34,4
$\zeta$ [-]	0,069	0,059	0,048	0,166	0,182	0,173	0,110	0,065	0,049	0,169	0,163	0,072	0,147	0,137	0,208	0,083
$m'$ mass. [kg/m <sup>2</sup> ]	85,3	103,8	94,5	93,0	107,9	90,7	107,5	87,7	97,6	80,2	93,0	90,7	101,2	99,9	102,8	97,2
$f_0$ (12354-2) [Hz]	172	96	60	73	89	109	208	61	119	122	81	79	72	66	70	95
$f_0$ (12354-1) [Hz]	194	110	68	83	103	124	240	69	136	137	92	89	83	76	80	109

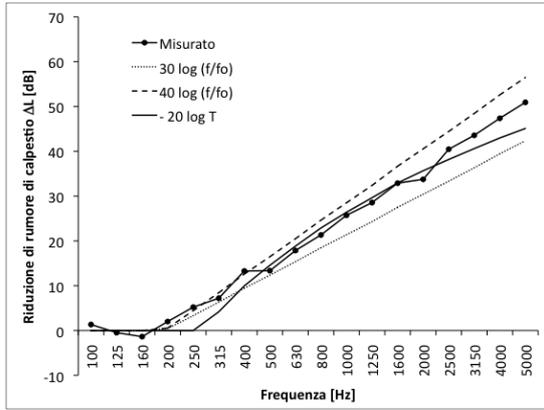
Tabella 4.9: valori di rigidità dinamica, comprimibilità, smorzamento teorico, massa per unità di superficie dei massetti demoliti e frequenza di risonanza calcolata mediante le due formule previsionali previste dalle norme EN 12354.

<i>Campione</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta L_w$ [dB]	19	24	30	25	22	21	18	33	21	23	22	25	23	25	24	26
$f$ [Hz]	$\Delta L$ in bande di $1/3$ di ottava [dB]															
100	1,3	-3,6	3,3	1,8	2,6	2,2	3,8	8,3	-2,0	2,4	0,8	0,2	1,0	1,8	1,6	-1,0
125	-0,5	-0,5	8,5	2,7	0,3	0,1	0,8	12,8	-2,6	1,9	-1,0	1,1	-0,4	1,7	1,2	1,6
160	-1,4	8,7	12,5	7,4	2,9	2,4	1,2	15,5	2,5	4,5	3,3	7,3	6,1	9,1	5,2	9,4
200	2,0	14,2	19,1	10,3	5,6	3,4	1,3	22,8	7,4	7,6	6,0	12,2	7,3	10,2	9,8	13,7
250	5,2	16,0	21,5	12,6	9,3	6,7	0,8	23,5	11,2	8,7	9,9	14,6	12,1	12,8	12,4	17,2
315	7,2	18,1	22,8	16,0	14,4	11,5	3,7	23,7	14,2	12,4	13,5	18,8	15,9	16,3	16,2	19,6
400	13,3	25,0	28,6	19,8	18,9	15,2	6,2	27,6	22,0	16,8	17,7	23,4	19,1	20,4	20,1	23,7
500	13,3	26,8	28,8	21,9	21,9	19,1	8,0	28,4	24,0	19,2	21,8	25,3	22,5	22,6	22,1	26,5
630	17,8	30,5	30,8	26,3	26,7	25,2	14,7	27,4	28,1	23,2	23,5	28,0	25,3	27,2	25,2	29,4
800	21,3	34,0	35,8	29,8	30,8	28,5	18,3	32,3	32,7	28,5	28,5	29,7	27,6	30,0	30,0	31,7
1000	25,7	37,4	39,2	32,3	33,2	31,8	20,3	34,8	35,6	32,3	31,2	32,5	28,9	31,9	33,0	35,0
1250	28,6	40,9	41,3	35,5	36,2	35,7	24,5	36,2	39,5	35,1	31,7	36,4	31,6	33,9	35,8	36,8
1600	32,9	44,2	44,4	39,7	39,9	39,2	29,8	37,1	43,2	38,5	34,4	43,2	34,1	36,5	39,5	42,7
2000	33,7	45,5	46,6	43,2	41,6	42,4	33,4	34,7	46,2	40,7	35,8	47,6	37,4	41,0	44,2	47,8
2500	40,5	46,6	46,0	48,8	44,5	45,5	36,7	41,0	49,4	44,4	38,8	53,6	43,0	48,3	49,4	52,9
3150	43,6	44,9	40,7	54,1	48,3	49,4	39,7	48,8	51,0	47,6	43,1	57,8	48,2	54,7	54,3	56,3
4000	47,4	44,7	37,7	59,0	53,6	53,5	43,9	49,6	53,6	53,4	48,6	60,0	54,8	60,4	58,3	60,1
5000	50,9	48,2	53,7	61,4	58,4	58,6	50,5	54,4	56,5	58,6	54,4	60,2	59,7	61,6	59,9	60,6

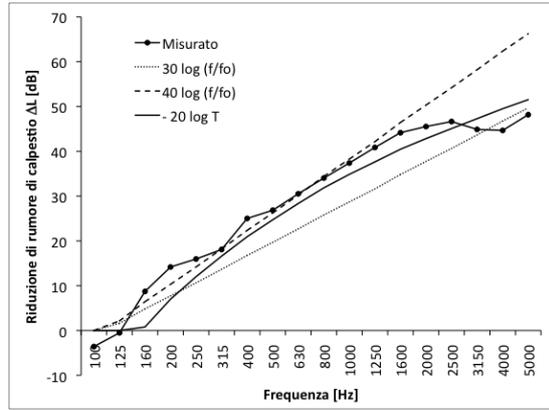
Tabella 4.10: valori di  $\Delta L$  in frequenza e  $\Delta L_w$  per i campioni misurati in laboratorio secondo le norme UNI EN ISO 140-8.

<i>Campione</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
UNI EN ISO 140-8	19	24	30	25	22	21	18	33	21	23	22	25	23	25	24	26
$30 \log \frac{f}{f_0}$	18	23	29	26	24	22	17	29	21	21	25	25	26	27	27	23
$40 \log \frac{f}{f_0}$	19	24	32	29	25	23	17	32	22	22	27	28	29	31	30	25
$-20 \log T$	17	22	29	25	22	20	16	29	20	19	24	24	25	27	25	22

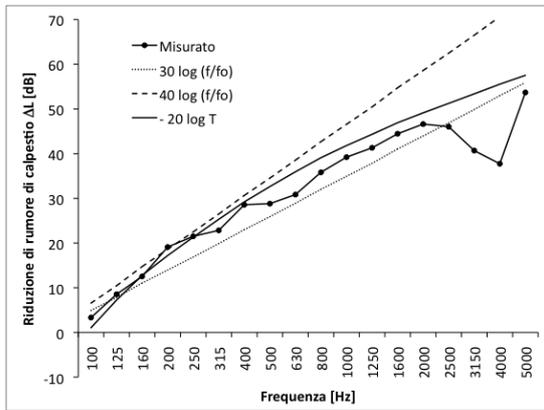
Tabella 4.11: valori di  $\Delta L_w$  misurati secondo le norme UNI EN ISO 140-8 e calcolati mediante le tre formule previsionali adottate.



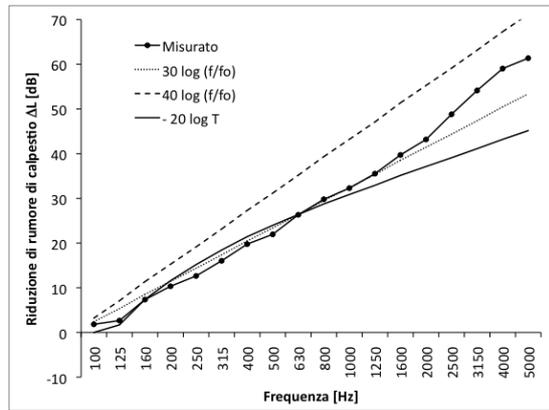
Campione 1



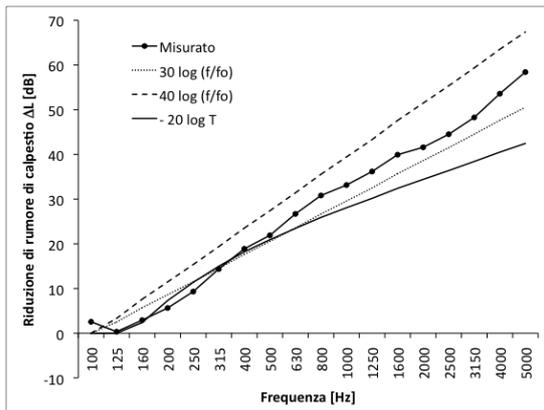
Campione 2



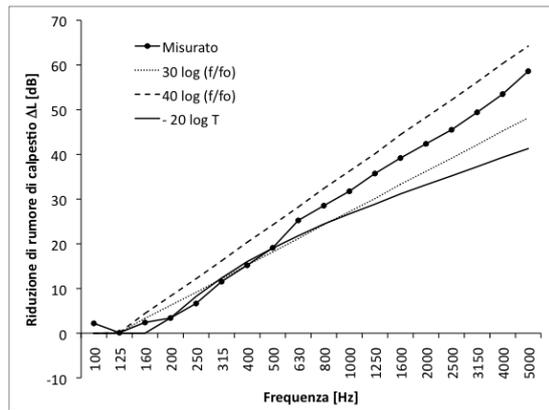
Campione 3



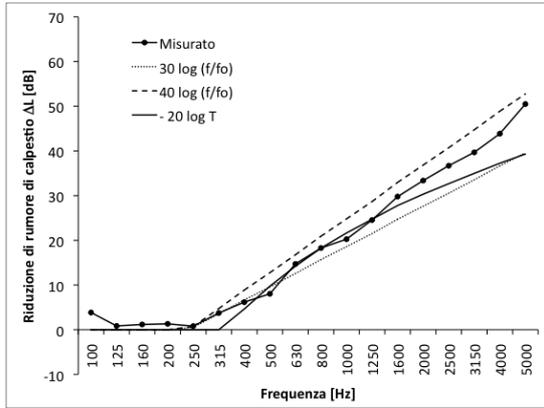
Campione 4



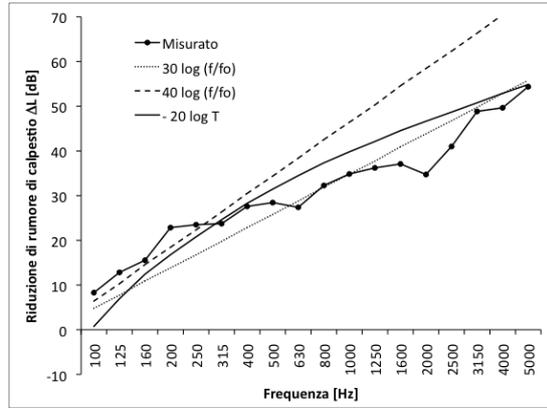
Campione 5



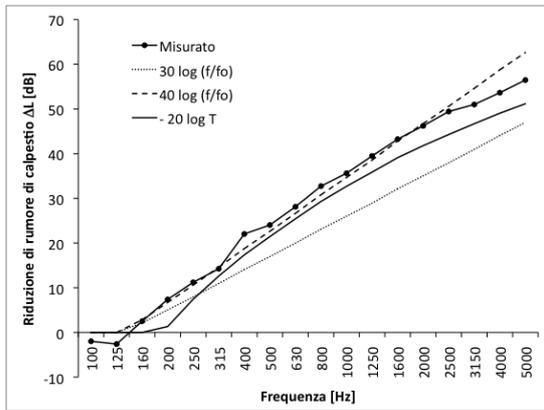
Campione 6



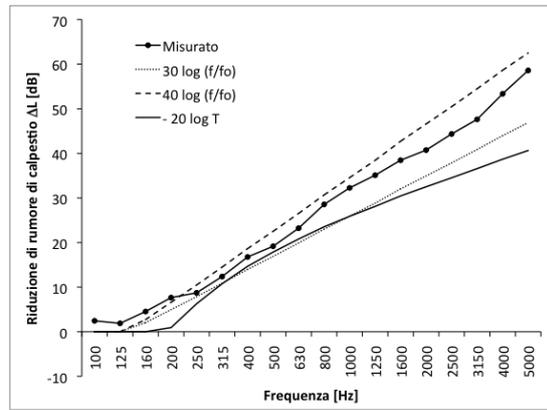
Campione 7



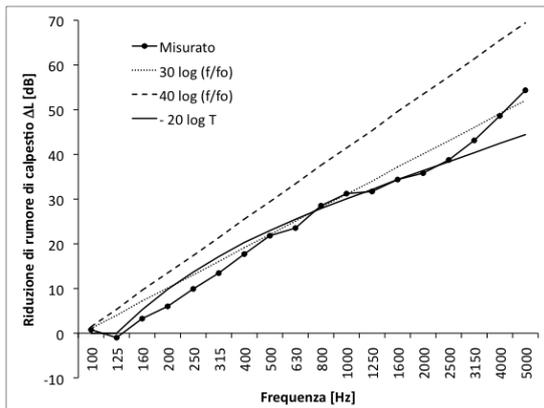
Campione 8



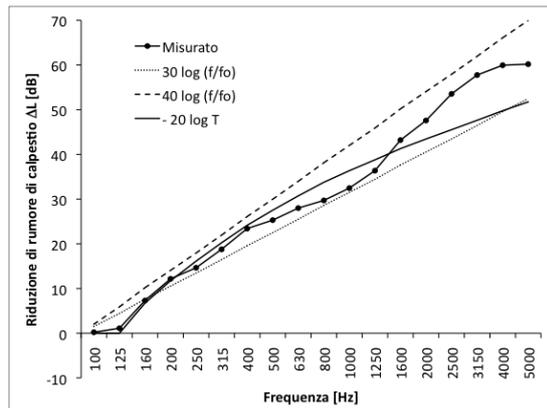
Campione 9



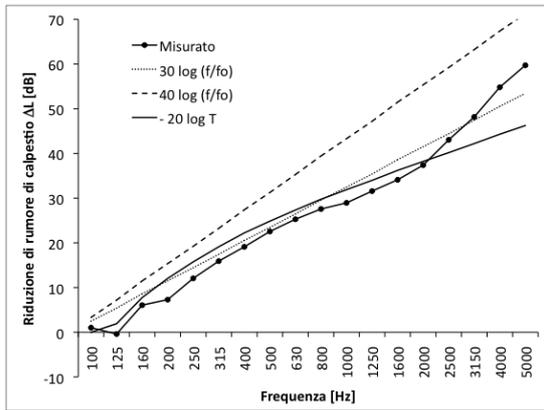
Campione 10



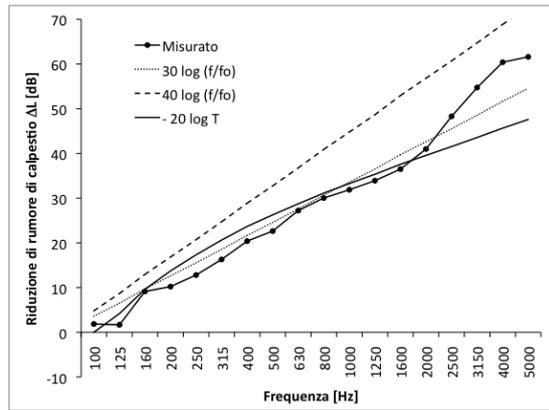
Campione 11



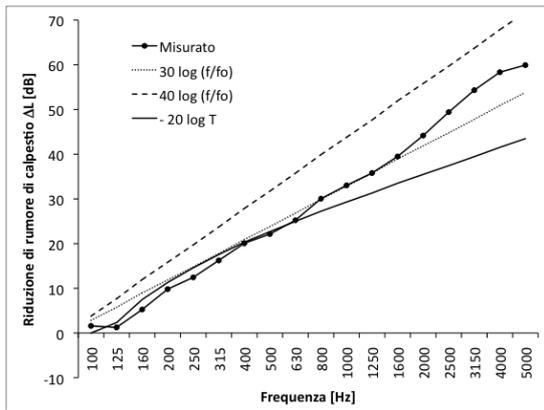
Campione 12



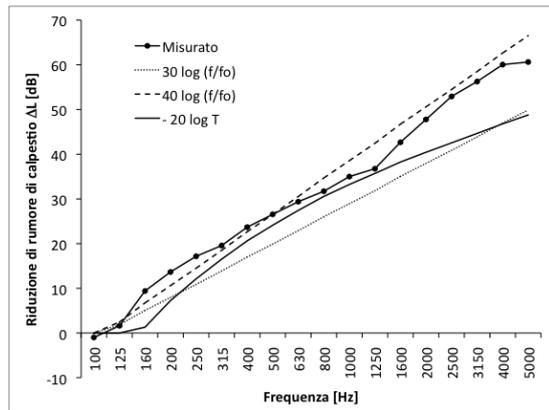
Campione 13



Campione 14



Campione 15



Campione 16

Figura 4.18: confronto tra valori di  $\Delta L$  misurati secondo UNI EN ISO 140-8 e calcolati usando le formule previsionali delle norme UNI EN 12354-2, UNI EN 12354-1 e la formulazione basata sulla trasmissibilità di un sistema massa-molla-smorzatore (valutata a smorzamento non nullo).

a seconda della natura del materiale. La previsione basata sulla trasmissibilità non sempre fornisce una stima abbastanza precisa dell'attenuazione in frequenza, poiché dipende dal rapporto di smorzamento, che nell'ambito di questo studio è stato calcolato con il metodo del fattore di qualità, con le problematiche ad esso associate (validità del metodo per bassi valori di smorzamento). Comunque l'effetto dello smorzamento è quello di abbassare la curva di attenuazione alle alte frequenze, per cui la stima è in genere cautelativa. Si riportano di seguito alcune considerazioni per ogni campione misurato.

- *Campione 1* Materiale omogeneo in polietilene monostrato, molto leggero e di spessore 5 mm. I dati misurati sono per lo più compresi tra le due rette di pendenza 30 e 40 dB/decade ed anche la curva di trasmissibilità fornisce una stima abbastanza accurata dell'attenuazione in frequenza, anche se nella parte inferiore dello spettro e sopra 2500 Hz sottostima il risultato. La frequenza di risonanza calcolata per il solaio sembra essere corretta e gli indici di valutazione calcolati sono abbastanza vicini ai valori di laboratorio (entro 1-2 dB).
- *Campione 2* Materiale multistrato in polietilene e feltro, molto leggero e di spessore circa 11-12 mm. La curva sperimentale segue la retta teorica di pendenza 40 dB/decade, a parte alle alte frequenze, dove si riporta su valori inferiori (tale effetto viene attribuito probabilmente alla natura multistrato del materiale [43]). Anche la terza formula previsionale sembra nel complesso fornire un risultato abbastanza affidabile ed inoltre la curvatura è molto simile. La frequenza di risonanza sembra leggermente sovrastimata (si ricordi che nel computo della rigidità dinamica per questo materiale si è ipotizzato un contributo dell'aria mediante calcoli approssimativi). Nel complesso, gli indici di valutazione sono abbastanza vicini ai valori di laboratorio (entro 1-2 dB).
- *Campione 3* Materiale di elevato spessore ( $> 2$  cm) in polistirene espanso. La curva sperimentale è ben rappresentata da tutte e tre le formulazioni teoriche, in particolare la formula basata sulla trasmissibilità sembra essere molto precisa su tutto lo spettro, a parte l'intervallo 2500-4000 Hz, in cui il calo di prestazione è forse dovuto ad effetti di risonanza ad alte frequenze. Per questo prodotto, caratterizzato anche da una notevole leggerezza, sembra che i valori dello smorzamento siano ben stimati ed il comportamento globale sia molto vicino a quello di un elemento elastico sotto carico (sistema massa-molla-smorzatore).
- *Campioni 4, 5, 6 e 10* Questi quattro materiali, più pesanti rispetto ai precedenti, sono molto simili e provengono dal riciclo di gomme di diversa tipologia, pertanto i valori di riduzione di livello hanno un andamento analogo. In particolare, con le frequenze di risonanza calcolate il comportamento dei materiali viene descritto mediamente dalla retta di pendenza 30 dB/decade, ma le forme delle curve di attenuazione suggeriscono una pendenza effettiva di 40 dB/decade. Le frequenze di risonanza effettive potrebbero quindi essere superiori a quelle calcolate, in tal caso le curve sperimentali sarebbero descritte in modo più accurato dalle rette di pendenza 40 dB/decade. I valori di smorzamento calcolati per questi materiali sono molto elevati (quasi 20%) e la riduzione di rumore ottenuta mediante la trasmissibilità fornisce risultati troppo discordi alle alte frequenze. Probabilmente la stima dello smorzamento non è precisa, oppure il modello basato su un semplice sistema

massa-molla-smorzatore ad un grado di libertà non è sufficiente a spiegare tutti i fenomeni. La valutazione mediante indice mononumerico fornisce risultati più dispersi e non c'è una formula preferibile rispetto alle altre; si tenga presente che, ai fini del calcolo di  $\Delta L_w$ , è molto importante che sia descritto correttamente il comportamento alle basse frequenze, quindi per i campioni 4, 5, 6 e 10 l'inverso della trasmissibilità fornisce una buona stima dell'indice, nonostante alle alte frequenze la previsione diverga dal dato sperimentale.

- *Campione 7* Materiale in gomma rigida di densità circa  $700 \text{ kg/m}^3$ , pesante e poco cedevole, di spessore 4 mm. La curva sperimentale è compresa tra le rette previsionali teoriche e la frequenza di risonanza calcolata per il solaio sembra corretta. Per questo materiale, più che in altri, si può notare l'attenuazione nulla (e non negativa) nelle bande di frequenza collocate al di sotto della risonanza e crescente linearmente a partire dalla frequenza di risonanza, con una pendenza di circa 40 dB/decade, o comunque compresa tra 30 e 40 dB/decade. Il modello basato sulla trasmissibilità sottostima la riduzione alle alte frequenze, ma alle basse risulta più coerente con i dati sperimentali. In questo caso, le due rette forniscono lo stesso indice di valutazione, pur con pendenza diversa; alle basse frequenze il comportamento ricalca quello teorico di attenuazione nulla fino alla frequenza di risonanza.
- *Campione 8* Materiale fibroso di elevato spessore (2 cm) con una densità di circa  $100 \text{ kg/m}^3$ . L'attenuazione misurata in laboratorio non viene descritta in modo sufficientemente esaustivo da nessuna delle tre formule previsionali. Nell'intervallo 100-400 Hz la retta di pendenza 40 dB/decade sembra descriverne meglio il comportamento, mentre da 630 a 5000 Hz sembra più appropriata la retta di pendenza 30 dB/decade. In realtà, considerando anche lo smorzamento e la trasmissibilità, si ottiene una curva che si sovrappone mediamente ai dati sperimentali, ma non spiega i cali di riduzione a 630 e 2000 Hz. Si ricorda che per questo materiale è stata supposta un'influenza della resistenza al flusso d'aria sul computo della rigidità dinamica. Proprio per il maggiore accordo alle basse frequenze, il  $\Delta L_w$  calcolato sulla retta di pendenza 40 dB/decade si avvicina maggiormente ai risultati sperimentali, mentre gli altri metodi sottostimano di 4 dB il valore misurato.
- *Campione 9* Materiale accoppiato formato da uno strato in feltro ed una guaina bituminosa; per lo strato in feltro (di circa 5 mm) è stata ipotizzata un'influenza della rigidità dinamica dell'aria valutata in funzione dello spessore. L'attenuazione ha un andamento pressoché rettilineo, con pendenza 40 dB/decade. Le altre due formule previsionali sottostimano il risultato, ma ciò potrebbe dipendere anche dall'incertezza del valore della frequenza di risonanza, dovuta alla non conoscenza della reale resistenza al flusso d'aria del materiale. Il valore dello smorzamento, invece, sembra in prima approssimazione coerente. Comunque i valori di  $\Delta L_w$  sono compresi in un intervallo di  $\pm 1$  dB per tutti i metodi.
- *Campioni 11, 13 e 14* Materiali composti da agglomerati di gomme riciclate in doppio strato. Per tutti e tre i campioni sembra che la previsione della frequenza di risonanza sia troppo ottimistica, in quanto le curve previsionali sono molto distanti

dai valori misurati. L'unica formula che si avvicina al risultato in modo sufficiente sembra essere la retta di pendenza 30 dB/decade. La curva di trasmissibilità potrebbe essere adeguata fino a circa 2000 Hz (se la frequenza di risonanza calcolata fosse maggiore), ma alle alte frequenze i valori di riduzione crescono rispetto alla previsione. Anche le stime di  $\Delta L_w$  sono abbastanza distanti dai risultati dei rilievi.

- *Campione 12* Materiale in gomma pressata sagomata. In frequenza, i valori di riduzione di rumore sono compresi tra le rette di pendenza 30 e 40 dB/decade, mentre l'inverso della trasmissibilità descrive più precisamente il comportamento alle basse frequenze, indice di una buona precisione nel calcolo dello smorzamento. Sopra 1250 Hz la riduzione di rumore cresce rispetto alla previsione. I valori di  $\Delta L_w$  sono compresi entro  $\pm 1$  dB per le formule considerate, eccetto che per la retta di pendenza 40 dB/decade, per cui il risultato viene sovrastimato di 3 dB.
- *Campione 15* Materiale composto da un supporto bituminoso rigido, un sottile feltro fibroso ( $< 1$  mm) e gomma riciclata in granuli. Mediamente la curva di riduzione è ben rappresentata dalla retta di pendenza 30 dB/decade, mentre alle basse frequenze sembra più precisa la stima mediante la trasmissibilità (fino a 630 Hz). L'indice di valutazione è descritto bene dalla curva di trasmissibilità, mentre gli altri metodi sovrastimano il risultato di 3-6 dB.
- *Campione 16* Materiale multistrato composto da feltro e granulo di gomma; per la parte fibrosa è stato supposto un contributo della resistenza al flusso d'aria sulla rigidità dinamica valutato sullo spessore di materiale. La retta di pendenza 40 dB/decade fornisce una buona stima della riduzione di rumore, ma anche la curva derivata dalla trasmissibilità potrebbe essere appropriata almeno da 100 a 1250 Hz, se la risonanza fosse spostata a destra. La migliore stima di  $\Delta L_w$  è data dalla retta di pendenza 40 dB/decade (con un'approssimazione di 1 dB).

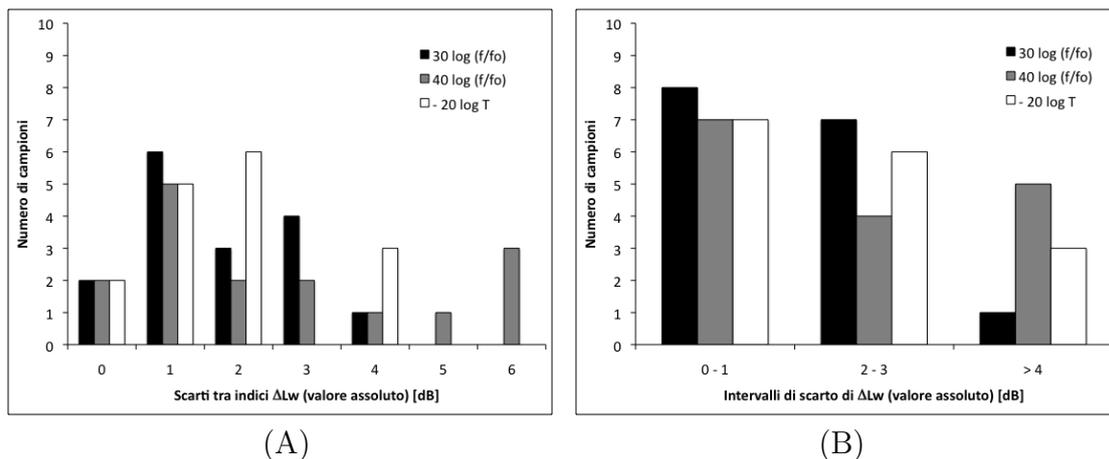


Figura 4.19: analisi riassuntiva dell'adozione delle diverse formule previsionali; (A) Conteggio dei campioni relativi ai diversi valori della differenza tra  $\Delta L_w$  calcolato e misurato; (B) Conteggio dei campioni per intervallo di valori di scarto tra indici: 0-1 buon accordo tra formule sperimentali e teoriche, 2-3 previsione approssimativa delle prestazioni,  $>4$  stima delle prestazioni insufficiente.

In figura 4.19 si riportano due istogrammi, relativi alla stima dei valori di  $\Delta L_w$  mediante le tre formule analizzate nel presente studio; nel primo grafico si riporta il conteggio dei campioni che forniscono uno specifico risultato (valutato in termini di valore assoluto della differenza tra  $\Delta L_w$  misurato e calcolato), mentre nel secondo grafico si riporta una valutazione per intervalli, in cui il primo intervallo 0-1 identifica una buona stima (compresa nell'errore di misura), il secondo intervallo 2-3 identifica una stima approssimativa ed il terzo intervallo  $>4$  una stima insufficiente.

Dall'analisi eseguita si possono trarre alcune considerazioni. Le formule utilizzate forniscono valori di  $\Delta L_w$  che per circa il 50% dei casi sono corrispondenti al  $\Delta L_w \pm 1$  dB. Analizzando invece il secondo ed il terzo intervallo di valori, sembra che le formule  $30 \log(f/f_0)$  e  $-20 \log T$  forniscano risultati più vicini alle misurazioni, rispetto alla formula  $40 \log(f/f_0)$ , la prima perché descrive mediamente le curve di riduzione, la seconda perché descrive in modo più accurato il comportamento alle basse frequenze per gran parte dei campioni. Per quanto riguarda l'analisi in frequenza, per alcuni campioni sembra che la pendenza sia descritta più precisamente da una formula previsionale, ma non sussiste sovrapposizione a causa di un calcolo forse poco preciso della frequenza di risonanza del solaio isolato. Solo per i materiali composti almeno in parte da materiale fibroso, è stata ipotizzata un'influenza non trascurabile del contributo dell'aria alla rigidità dinamica, calcolato in funzione dello spessore, secondo la formula  $s'_a = 111/d$ , presente nella norma UNI EN 29052-1. Per altri materiali, non di origine fibrosa, tale contributo è stato trascurato, perché i vuoti presenti nel materiale (di dimensioni macroscopiche) non dovrebbero contribuire all'irrigidimento del sistema; per questi materiali la frequenza di risonanza calcolata sembra tuttavia sottostimata, per cui potrebbe rendersi necessario verificarne la resistenza al flusso d'aria e l'influenza dello spessore. Si noti infatti che, ad esempio, per i campioni 11, 13 e 14 caratterizzati da un doppio strato, è maggiore lo scostamento tra la risonanza calcolata ed un plausibile valore estrapolato dalle curve grafiche). Per i materiali dotati di maggiore leggerezza (ad esempio i campioni 3 e 8), le forme delle curve di riduzione sono più particolari (irregolari o non lineari), mentre per i materiali più pesanti tendono a seguire direzioni rettilinee; sembra quindi che il calcolo dello smorzamento con il metodo del fattore di qualità sia più preciso per materiali leggeri, anche se non si possono prevedere le irregolarità emerse su singole bande di frequenza (ad esempio cali in corrispondenza a possibili risonanze alle alte frequenze). Materiali dotati di più strati o più fasi sono caratterizzati da curve di riduzione in frequenza più irregolari, rispetto a materiali omogenei, quindi non si riesce ad identificare per questi materiali un comportamento univoco. Si noti che ai fini del calcolo del  $\Delta L_w$  è importante una corretta valutazione del comportamento alle basse frequenze, piuttosto che una stima precisa di tutta la curva di riduzione di pressione sonora di calpestio, quindi si deve prestare particolare attenzione all'identificazione della frequenza di risonanza del solaio. Per questo motivo un'accurata misura della rigidità dinamica è di fondamentale importanza e con essa la scelta della formula per la previsione  $f_0$ . Anche il valore del fattore di smorzamento, ricavato dalle misure di rigidità dinamica, può essere utile ai fini degli studi sul rumore di calpestio, anche se sarebbe opportuno adottare metodologie più accurate. A titolo di confronto, in figura 4.20 si riportano due istogrammi, analoghi a quelli di figura 4.19, in cui il calcolo degli indici di valutazione è stato effettuato a partire dalla rigidità dinamica misurata senza gesso, trascurando per tutti i materiali il contri-

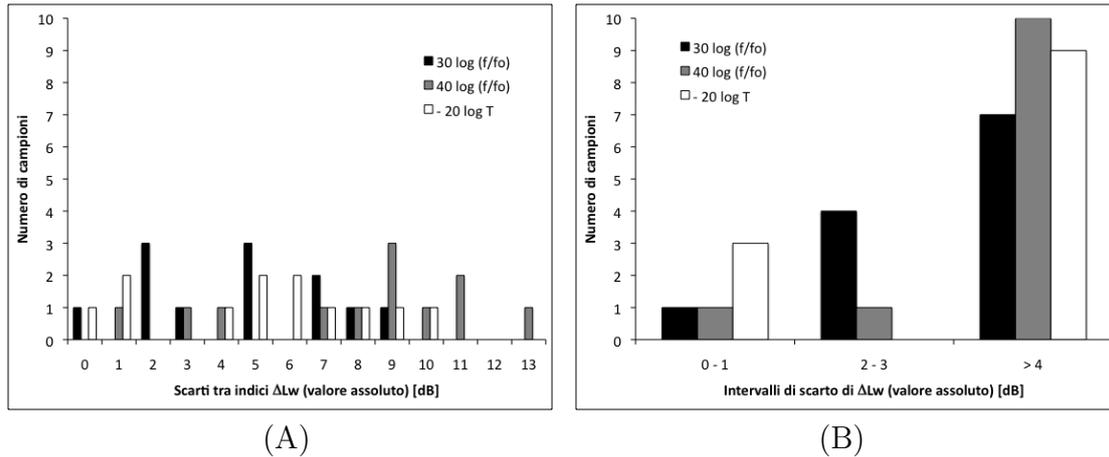


Figura 4.20: analisi riassuntiva dell'adozione delle diverse formule previsionali, utilizzando i dati di rigidità dinamica misurata senza gesso, trascurando il contributo della resistenza al flusso dell'aria e adottando la formula tratta dalla norma EN 12354-2 per il calcolo della risonanza del solaio: (A) Conteggio dei campioni relativi ai diversi valori della differenza tra  $\Delta L_w$  calcolato e misurato; (B) Conteggio dei campioni per intervallo di valori di scarto tra indici: 0-1 buon accordo tra formule sperimentali e teoriche, 2-3 previsione approssimativa delle prestazioni, >4 stima delle prestazioni insufficiente.

buto della resistenza al flusso dell'aria e utilizzando la formula della norma EN 12354-2 per il calcolo di  $f_0$ . Lo scopo è quello di simulare il comportamento del sistema facendo affidamento su dati di partenza misurati in condizioni poco accurate. Appare evidente come le tecniche di preparazione del campione per la misura della rigidità dinamica e la conoscenza approfondita dei materiali siano fattori critici nello studio delle effettive prestazioni dei sistemi isolanti in laboratorio ed in opera. Ogni procedura della norma va adottata con attenzione, in particolare l'utilizzo del gesso e la conoscenza della resistenza al flusso d'aria dei materiali (possibilmente in direzione trasversale al provino). Senza le giuste ipotesi ed i corretti metodi di prova, si rischia di sovrastimare le prestazioni dei sistemi edilizi, di ottenere risultati poco riproducibili e ridurre la validità delle formule teoriche utilizzate, che sono tanto più precise, quanto più precisi sono i dati di partenza.

#### 4.4 Rumore di calpestio e sistemi di riscaldamento a pavimento applicati a solai in laterocemento ed in calcestruzzo

Tra febbraio 2009 e maggio 2010 è stato condotto uno studio approfondito sull'isolamento acustico dei rumori di calpestio di solai in laterocemento dotati di sistema di riscaldamento radiante a pavimento in laboratorio. Lo studio è stato condotto all'interno del laboratorio Isolgomma, in collaborazione con un'azienda produttrice di sistemi di riscaldamento a pavimento, con il fine di arrivare alla prototipazione di un nuovo prodotto ottimizzato per la riduzione dei rumori, integrato nel sistema radiante e applicato ad un solaio di base molto diffuso nell'edilizia italiana, valutando per ogni soluzione testa-

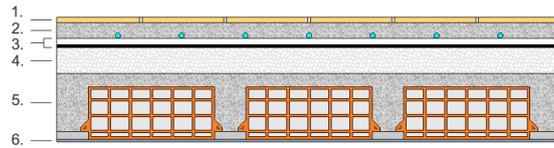


Figura 4.21: composizione dell'elemento in prova per misure di livello di rumore di calpestio su solaio in laterocemento dotato di materiale resiliente integrato al sistema di riscaldamento a pavimento.

ta anche l'influenza della finitura superficiale della pavimentazione. Il prodotto è stato studiato in più fasi, combinando due tipologie di pannelli radianti con tre prodotti per l'isolamento dei rumori di calpestio. Le due tipologie di pannelli radianti sono due prodotti in polistirene espanso grafitizzato EPS100 ed EPS140, mentre i prodotti isolanti acustici sono rotoli di gomma proveniente da riciclo di mescole differenti: gomma riciclata SBR, gomma riciclata EPDM e una miscela di gomma SBR con granuli di sughero. Per quanto riguarda le finiture, invece, le misure sono state condotte su massetto nudo, su pavimentazione ceramica in piastrelle (gres porcellanato) e su parquet in legno flottante posato a secco su uno strato disaccoppiante di cartone ondulato<sup>7</sup>.

Per ogni prova, il pannello del sistema radiante è stato accoppiato al materiale anticalpestio ed il prodotto risultante è stato posato sul solaio in laterocemento, secondo la stratigrafia visualizzata in figura 4.21:

1. rivestimento della pavimentazione (assente, ceramica, parquet).
2. massetto tradizionale in sabbia e cemento di spessore globale 6 cm (4 cm sopra tubo, 6 cm dal pannello).
3. prodotto misurato, pannello di polistirene espanso grafitizzato accoppiato a materassino isolante acustico (pannello EPS100, EPS 140; materassino SBR, EPDM, SBR misto sughero) di spessore circa 3 cm.
4. massetto di livellamento alleggerito di spessore 10 cm e densità di 370 kg/m<sup>2</sup> circa<sup>8</sup>.
5. solaio di base in laterocemento di spessore 25 cm (pignatte 20 cm, cappa 5 cm).
6. strato di intonaco di spessore circa 1 cm.

In particolare i materiali sono stati posati su uno strato di massetto alleggerito con perle di polistirene espanso di spessore totale 10 cm: lo strato di massetto alleggerito è stato inserito per simulare una reale applicazione in opera, dove questo elemento viene utilizzato per livellare le quote dopo l'applicazione degli impianti. Lo spessore di 10 cm comprende

<sup>7</sup>La scelta del cartone ondulato è stata effettuata con l'intento di inserire un materiale di basso valore, garantendo un completo disaccoppiamento senza però affidarsi ad uno specifico materiale disaccoppiante già presente in commercio. L'effettivo utilizzo in opera dello strato in cartone va valutato accuratamente anche in virtù delle proprietà termiche del sistema di riscaldamento, poiché l'inserimento di uno strato di materiale contenente grosse quantità di aria potrebbe influire negativamente sull'inerzia termica in riscaldamento.

<sup>8</sup>La stima della densità è stata effettuata misurando il peso di una porzione significativa dell'elemento.

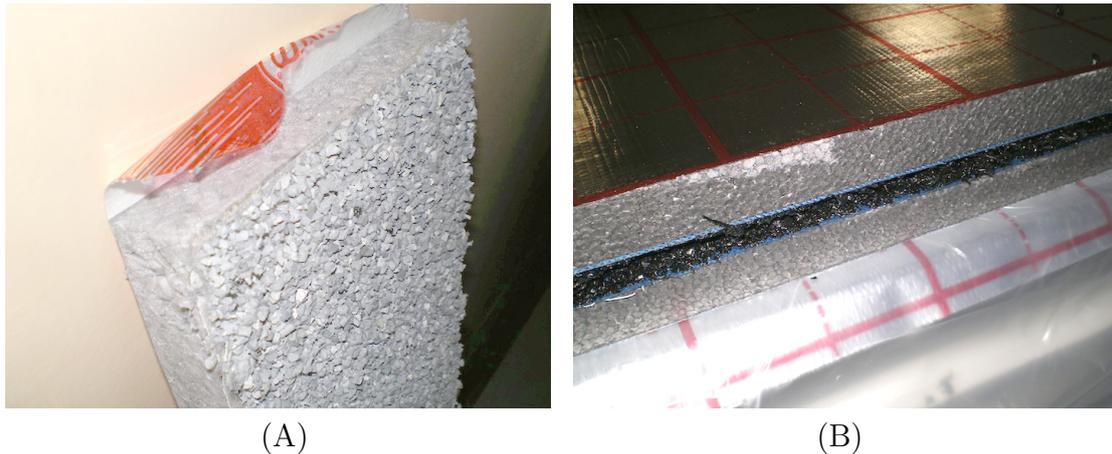


Figura 4.22: due dei prodotti testati: pannello in EPS grafitizzato con materassino in gomma riciclata EPDM (A) e SBR (B).



Figura 4.23: posa dei pannelli: (A) posa sull'intera superficie del solaio; (B) dettaglio.

anche una rasatura superficiale in cemento, inserita per garantire una buona durabilità dello strato di alleggerimento, poiché esso è stato mantenuto durante tutto l'arco della sperimentazione. I pannelli sono stati posati a secco ed in corrispondenza dei bordi del solaio sono state posizionate le fasce laterali di espansione in dotazione con i pannelli radianti (non si è resa necessaria l'adozione delle strisce perimetrali per la soppressione delle trasmissioni laterali). I pannelli sono stati giuntati tra di loro mediante nastro adesivo, anche in corrispondenza delle fasce laterali. In figura 4.22 sono riportati due esempi di prodotti accoppiati testati, mentre in figura 4.23 è rappresentata la posa dei pannelli per due allestimenti.

Successivamente è stato posato l'impianto di riscaldamento, completo di collettore (posizionato esternamente al solaio, sopra il cordolo laterale) ed acqua fredda alla pressione di circa 6 bar. Le tubazioni in materiale plastico sono state posate in due anelli (figura 4.24), mediante applicazione di clip plastiche ogni 20-30 cm circa. In corrispondenza del collettore, i tubi sono stati rivestiti da una fascia in polietilene di disaccoppiamento per limitare eventuali percorsi laterali di trasmissione, mentre il collettore stesso è sta-



Figura 4.24: (A) fase di posa delle tubazioni e (B) completamento della fase di posa.



Figura 4.25: (A) protezione delle tubazioni in corrispondenza del collettore; (B) Dettaglio della fascia laterale in corrispondenza dell'angolo del solaio.

to adagiato sopra il cordolo, senza essere vincolato, interponendo uno strato pesante in gomma.

Dopo l'applicazione dell'impianto si è proceduto alla stesura del massetto in sabbia e cemento, calcolando uno spessore totale di circa 6 cm dalla superficie del pannello (circa 4 cm sopra tubo). Durante la stesura particolare attenzione è stata riposta nel disaccoppiamento del corpo rigido del massetto rispetto alle strutture laterali e nel completo riempimento degli spazi inter-tubo. In figura 4.26 sono rappresentate alcune fasi della realizzazione del massetto.

Per quanto riguarda gli strati di rivestimento, il parquet flottante è stato posato facendo attenzione al disaccoppiamento con le strutture laterali (figura 4.27 B), mentre le piastrelle ceramiche sono state applicate direttamente sulla superficie del massetto, mediante tradizionale colla cementizia (figura 4.27 C).



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 4.26: (A, B) posa del massetto in sabbia e cemento; (C) Dettaglio di posa; (D) Dettaglio del massetto in corrispondenza del collettore.



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 4.27: (A) posa del parquet flottante e (B) particolare in corrispondenza del collettore di impianto; (C) posa delle piastrelle; (D) azione del generatore di rumore di calpestio normalizzato sulla pavimentazione ceramica.

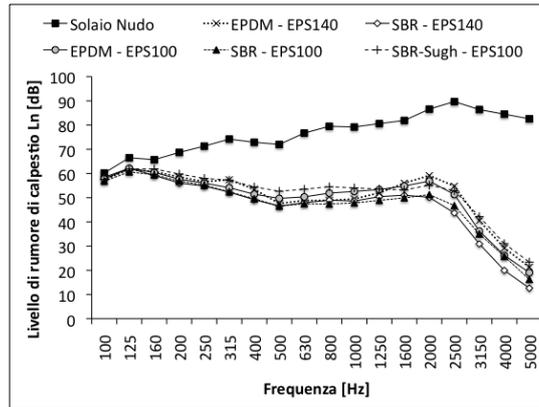


Figura 4.28: livello di pressione sonora di calpestio normalizzato misurato per tutti gli allestimenti con azione del generatore di rumore sul massetto non rivestito.

Le misure sono state effettuate in accordo alla norma UNI EN ISO 140-6 [61], aspettando circa 20 giorni per consentire una corretta asciugatura del massetto in sabbia e cemento. Delle sei combinazioni tra materiale isolante e pannello radiante, che erano state preventivate ad inizio sperimentazione, ne sono state effettivamente misurate solo cinque, a causa di diverse esigenze emerse durante il lavoro. In figura 4.28 è riportato il confronto tra i livelli di pressione sonora di calpestio misurati sul massetto nudo, per i cinque allestimenti (pannello EPS140 e materiale isolante EPDM e SBR, pannello EPS100 e materiale isolante EPDM, SBR, SBR e sughero). Come appare in figura, la rumorosità del sistema considerato nel presente studio è molto elevata alle alte frequenze, a differenza di altri sistemi, ad esempio i solai in legno, che presentano livelli di rumore molto elevati soprattutto nella parte inferiore dello spettro. In questo caso il solaio di base in laterocemento ha come propria caratteristica un'elevata rumorosità intrinseca nella parte superiore dello spettro, in particolare tra 1600 e 3150 Hz, come già evidenziato in 4.1, e tale rumorosità viene in parte mantenuta anche dopo l'applicazione dello strato resiliente e del carico del massetto. In particolare, tutti gli allestimenti misurati hanno caratteristiche di radiazione molto simile, con un picco di rumorosità attorno a 2000 Hz. Il comportamento dei diversi materiali è risultato pressoché analogo, anche se i prodotti contenenti gomma riciclata di tipo SBR hanno consentito di ottenere livelli di rumore inferiori rispetto agli altri prodotti, sia con il pannello EPS100 che EPS140. In generale l'utilizzo di questi materiali permette di ottenere una buona riduzione di livello di rumore di calpestio su tutto lo spettro, con andamento crescente all'aumentare della frequenza.

In figura 4.29 si riporta l'andamento del livello di calpestio in frequenza per gli allestimenti dotati di finitura in piastrelle ceramiche. Dalla figura emerge nuovamente l'analogia di comportamento acustico tra i diversi materiali; inoltre sembra che l'applicazione dello strato ceramico superficiale non influenzi in maniera sostanziale le caratteristiche di radiazione sonora dell'intero pacchetto, con le metodologie applicative adottate. Differenze notevoli sono state riscontrate mediante l'utilizzo della finitura superficiale in legno (parquet flottante). In figura 4.30 si riportano i livelli di rumore di calpestio normalizzato per tutte le misure effettuate su finitura in legno. Si può notare come i livelli di rumore siano notevolmente inferiori rispetto alle altre misure; le differenze tra i diversi strati

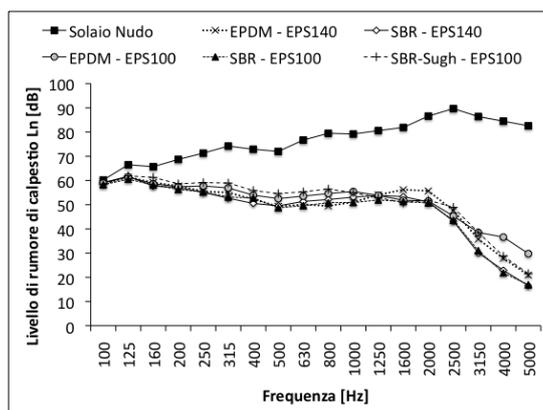


Figura 4.29: livello di pressione sonora di calpestio normalizzato misurato per tutti gli allestimenti con azione del generatore di rumore sul rivestimento in piastrelle ceramiche.

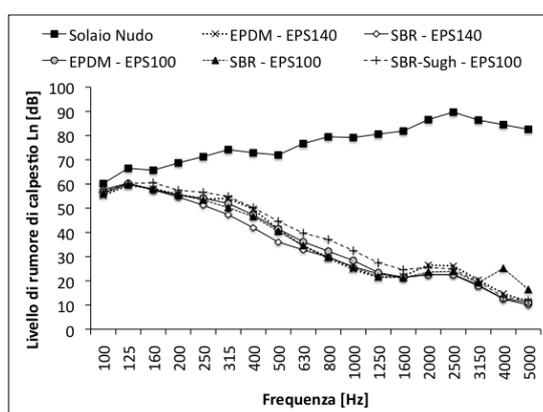


Figura 4.30: livello di pressione sonora di calpestio normalizzato misurato per tutti gli allestimenti con azione del generatore di rumore sul rivestimento in parquet flottante.

resilienti sono anche in questo caso molto limitate e un apporto notevole alla riduzione viene conferito dal disaccoppiamento della finitura superficiale e, solo in parte, dalla diversa interazione tra il martello e la finitura. Nelle due bande di frequenza di  $1/3$  d'ottava di 4000 e 5000 Hz, nella misura relativa al materiale SBR-EPDMS100, si è notato un lieve incremento dei livelli, ma tale comportamento anomalo è probabilmente da attribuirsi ad un elevato livello di fondo durante le misure o ad altre problematiche metrologiche. Delle cinque combinazioni provate, è stata selezionata quella che ha permesso di raggiungere le prestazioni migliori, anche nonostante la sostanziale analogia di comportamento. Il prodotto migliore selezionato è stato la combinazione del pannello EPS140 con il materassino anticalpestio in gomma SBR riciclata, per il quale di seguito viene riportato il confronto tra le diverse finiture, in relazione al solaio nudo di base (figura 4.31). Dal grafico emerge quanto già esposto in precedenza, in particolare l'analogia tra misure effettuate sul massetto non rivestito e sul rivestimento ceramico e la notevole attenuazione introdotta dalla finitura flottante che, nonostante il basso peso dalla stessa, consente di ridurre notevolmente i rumori impattivi, grazie all'ulteriore disaccoppiamento introdotto, particolarmente efficace alle alte frequenze, dove il solaio in laterocemento presenta picchi di rumorosità di origine strutturale. Sono stati calcolati i valori della riduzione di pressione

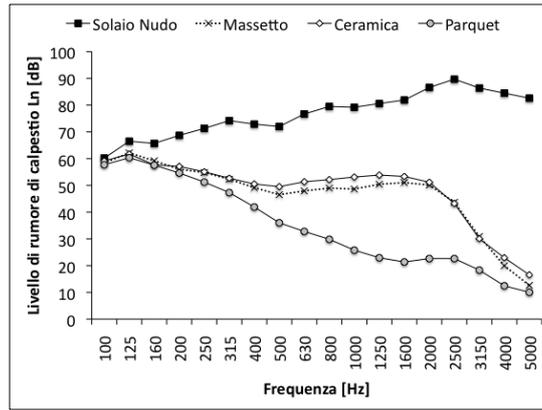


Figura 4.31: livello di pressione sonora di calpestio normalizzato misurato per il prodotto selezionato (EPS140, SBR) al variare delle finiture superficiali.

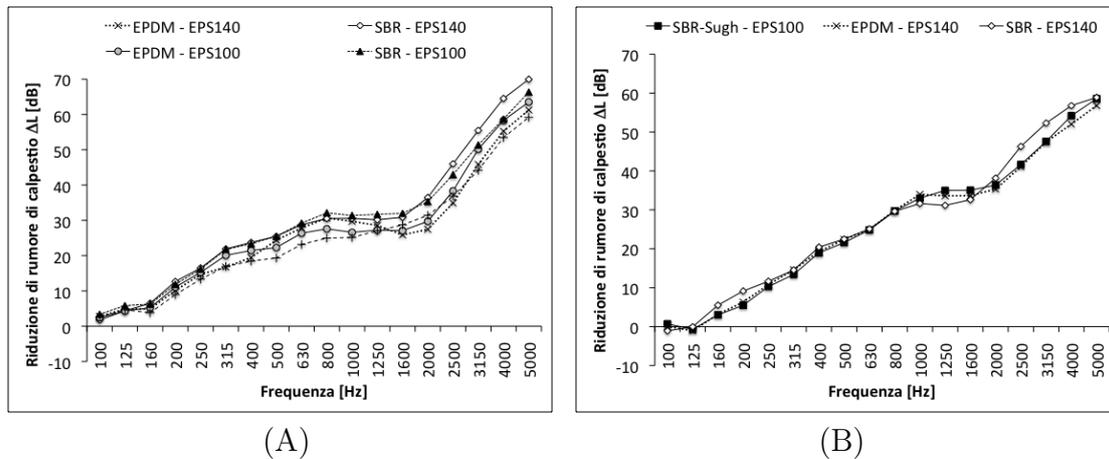


Figura 4.32: riduzione di rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L$  (A) solaio in laterocemento (B) solaio in calcestruzzo.

sonora di calpestio normalizzata sull'area di assorbimento acustico  $\Delta L$  tramite differenza in ogni banda di frequenza dei livelli di rumore rilevati per il solaio in laterocemento nudo e comprensivo di tutto il rivestimento. Tali risultati sono stati messi a confronto con i valori della riduzione del rumore di calpestio rilevata sul solaio in calcestruzzo di spessore 14 cm, relativamente ai materiali per i quali tale verifica è stata eseguita. I confronti tra misure dello stesso tipo sono riportati in figura 4.32. Dall'andamento dei grafici riportati in figura sembra che l'andamento della riduzione in frequenza cresca in maniera piuttosto lineare per il solaio in calcestruzzo, intercettando l'asse delle frequenze tra 100 e 125 Hz e con un lieve aumento di trasmissione tra 1250 e 2000 Hz. Per il solaio in laterocemento la riduzione segue un andamento più irregolare, in particolare è sempre positiva, anche alle basse frequenze, crescendo fino a 800 Hz, assestandosi fino a 1600 Hz, per poi crescere rapidamente (ed in misura maggiore rispetto al solaio in calcestruzzo) fino a 5000 Hz. La forte perdita di prestazioni nell'intervallo di frequenze identificato potrebbero derivare da differenti fattori: dalle diverse caratteristiche di emissione sonora del solaio di base, dalla presenza del massetto alleggerito, dalla presenza delle tubazioni o da trasmissioni laterali incontrollate. Per quanto riguarda la prima ipotesi, nel laboratorio sede della

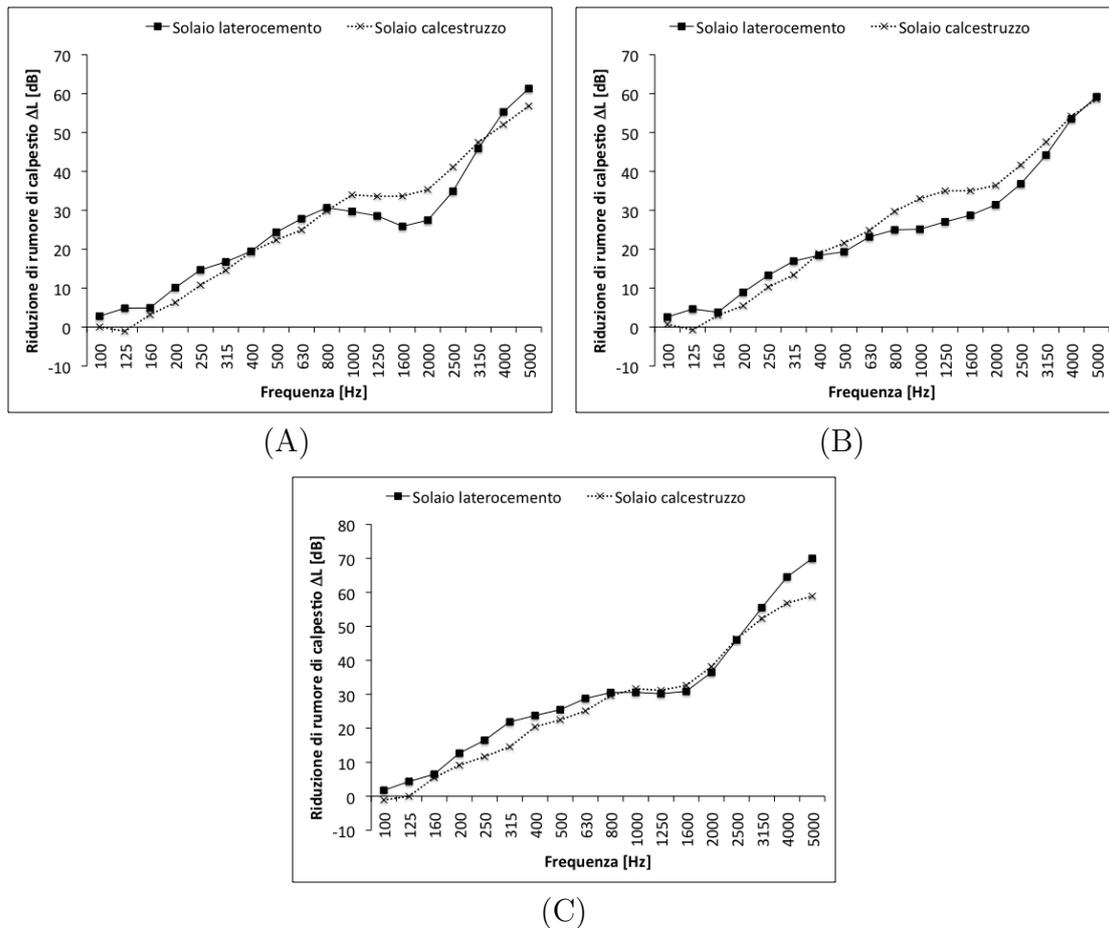


Figura 4.33: riduzione di rumore di calpestio normalizzato  $\Delta L$  in relazione al solaio di base per i prodotti (A) EPDM - EPS140; (B) SBR Sughero - EPS100; (C) SBR - EPS140.

sperimentazione non è stata ancora condotta una verifica ripetuta di una possibile dipendenza dei parametri di riduzione del rumore di calpestio dalla struttura del solaio di base a cui il materiale è applicato; del resto le proprietà di riduzione dovrebbero essere indipendenti dal supporto [9]. Per quanto riguarda la presenza dell'alleggerito, esso non dovrebbe causare distorsioni del rumore trasmesso, essendo un corpo rigido interposto tra il solaio di base ed il materiale isolante e dovrebbe contribuire alla riduzione con l'apporto di massa, peraltro limitato. Poiché la posa è stata curata nei minimi dettagli, si può ragionevolmente escludere la presenza di trasmissioni laterali favorite da una non corretta installazione dei provini, per cui è invece plausibile che la presenza di tubazioni, unità alle caratteristiche del solaio di base, possa provocare un aumento di rumorosità di un sistema del tipo in esame, tenuto conto anche della presenza dello stesso fenomeno in misura molto ridotta sull'altro solaio). In figura 4.33 si riporta il confronto tra le misure per ogni sistema testato su entrambi i solai (tre prodotti). Analizzando i risultati, non si è riusciti ad identificare una relazione univoca tra le proprietà di riduzione dei sistemi in esame misurate sui due solai differenti. Si sono riscontrate le seguenti caratteristiche: per tutti i prodotti la riduzione di rumore alle basse frequenze è risultata maggiore, seppur di poco, quando valutata sul solaio in laterocemento; inoltre per i prodotti EPDM-EPS140 e SBR Sughero-EPS100 si è registrata una perdita di isolamento sul solaio in laterocemento nelle

Materiale	Solaio in laterocemento						Solaio in calcestruzzo			
	Nudo	$L_{n,w}$ [dB]			$\Delta L_w^*$ [dB]	Diff.[dB]	Nudo	$L_{n,w}$ [dB]		
		Mass.	Piastr.	Parq.				Mass.	$\Delta L_w^*$ [dB]	Diff.[dB]
EPDM-EPS140		59	57	49	24	33		54	22	28
SBR-EPS140		55	56	48	26	37	82	53	23	29
SBR-Sugh-EPS100	92	58	57	51	25	34		54	22	28
EPDM-EPS100		58	56	49	25	34		- non misurato -		
SBR-EPS100		55	55	49	27	37		- non misurato -		

Tabella 4.12: riassunto dei risultati della sperimentazione espressi in termini di indici mononumerici.

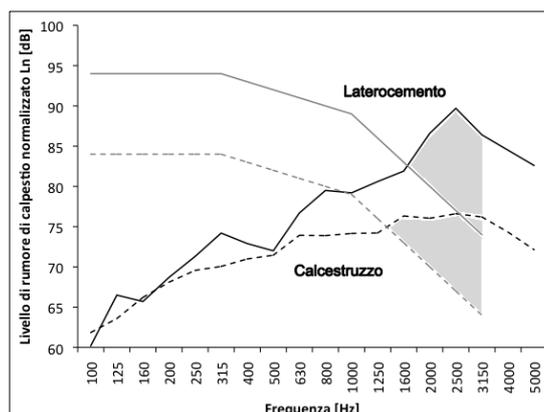


Figura 4.34: livelli di rumore di calpestio normalizzato sui due solai con in evidenza gli scarti sfavorevoli rispetto alle curve di riferimento della norma UNI EN ISO 717-2.

frequenze comprese tra circa 800-1000 Hz e 2500 Hz. Per il materiale SBR-EPS140 tale differenza di comportamento è stata registrata in misura ridotta, in quanto la valutazione effettuata su entrambi i solai ha fornito una stima dell'isolamento paragonabile (figura 4.33 C). Nel confrontare le curve si deve comunque ricordare che le stratigrafie dei solai non sono identiche, poiché sul solaio in calcestruzzo i sistemi sono stati studiati senza lo strato di alleggerimento, al fine di calcolare il  $\Delta L$  di riferimento su piastra armata. Per questo motivo il confronto deve essere inteso come differenza tra l'isolamento ottenuto secondo le norme UNI EN ISO 140-8 su piastra armata e le prestazioni, misurate in laboratorio, per un solaio ed una stratigrafia maggiormente diffusi sul territorio nazionale. Per quanto riguarda i risultati, espressi come indici di valutazione mononumerici ( $\Delta L_w$ ,  $L_{nw}$ ), in tabella 4.12 si riporta un riassunto relativo a tutta la sperimentazione. Per i due solai non rivestiti l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio  $L_{nw}$  è risultato pari rispettivamente a 92 dB per il solaio in laterocemento e 82 dB per il solaio in calcestruzzo. Questa importante differenza è da attribuire principalmente al comportamento dei due elementi alle alte frequenze ed in particolare al metodo di valutazione utilizzato, conforme alle indicazioni della norma UNI EN ISO 717-2. Infatti, la valutazione viene effettuata mediante il calcolo degli scarti sfavorevoli rispetto ad una curva di riferimento e, come evidenziato in figura 4.34, il maggiore contenuto energetico del solaio in laterocemento tra 2000 Hz e 3150 Hz determina un incremento dell'indice di valutazione di 10 dB. Anche considerando gli indici di valutazione, i prodotti misurati hanno prestazioni simili, con valori di  $L_{nw}$  compresi tra 55 e 59 dB (massetto), tra 55 e 57 dB (piastrelle) e tra 48 e 51 dB (parquet flottante) per il solaio in laterocemento

e  $L_{nw}$  pari a 53-54 dB per il solaio in calcestruzzo. Il calcolo dell'attenuazione rispetto al solaio nudo è stato effettuato in due modi diversi: secondo la procedura indicata nella norma UNI EN ISO 717-2 e come semplice differenza tra indici di valutazione. La procedura di norma prevede l'identificazione della riduzione di rumore di calpestio come differenza dei livelli misurati per il solaio nudo ed il solaio rivestito in frequenza; la curva ottenuta va sottratta dalla curva di riferimento indicata nella norma e l'indice di valutazione della riduzione del livello di calpestio si calcola come differenza tra 78 dB e il valore di  $L_{nw}$  del solaio di riferimento isolato (vedi 1.3.2). La valutazione aggiuntiva secondo la semplice differenza di indici mononumerici è stata utilizzata in questo studio, in quanto non è del tutto corretto relazionare la prestazione di un prodotto, misurato sul solaio in laterocemento, ad una curva di riferimento tipica di un solaio in calcestruzzo. Il  $\Delta L_w$ , infatti, rappresenta il miglioramento tra indici di valutazione e non tra prestazioni medie di due solai. In questo caso la differenza tra gli indici è risultata pari a 33-37 dB per il solaio in laterizio e 28-29 per il solaio in calcestruzzo, mentre il  $\Delta L_w$  calcolato secondo le procedure di norma è risultato pari a 24-27 dB (solaio in laterocemento) e 22-23 dB (piastra armata). In mancanza di curve di riferimento di laboratorio per solai differenti dalla piastra armata da 14 cm è difficile stabilire quale sia il metodo migliore per identificare la prestazione di un materiale o un sistema applicato a strutture di base alternative. Ciononostante è importante chiarire che le proprietà isolanti dei materiali sono costanti, ma diversi sono i descrittori di quelle proprietà, quando i materiali sono applicati a strutture diverse. Nel caso in esame, materiali con valori di  $\Delta L_w$  di 22-23 dB (calcolato secondo UNI EN ISO 140-8 e UNI EN ISO 717-2), hanno fornito valori di differenza di indice di valutazione di 28-29 dB (sulla stessa piastra armata di laboratorio) e di 33-37 dB (su solaio in laterocemento). I risultati riportati si riferiscono a condizioni di laboratorio e sono esenti dalle trasmissioni laterali, pertanto un loro utilizzo in fase di progettazione deve tenere conto dei relativi termini correttivi; in particolare in fase di previsione delle prestazioni in opera il dato maggiormente significativo è il termine  $L_n$  in frequenza dell'intero pacchetto solaio e non la riduzione indicata tramite l'indice mononumerico. Tale valore può essere inoltre confrontato con le previsioni basate sulle formule previsionali riportate in 4.1, derivate da studi sperimentali in opera. In particolare, in figura 4.35 ed in tabella 4.13 si riportano i dati relativi al solo materiale SBR-EPS140 (scelto al termine della sperimentazione) relativi ai valori  $L_n$  in frequenza misurati sul solaio in laboratorio e calcolati a partire dai valori di solaio nudo previsti tramite le formule sviluppate nel 2007 (Brosio), nel 2008 (Università di Ferrara) e nel 2010, utilizzando come dati di attenuazione quelli ricavati dalle misure su entrambi i solai. Considerando i dati di isolamento valutati sul solaio in calcestruzzo (grafico A di figura 4.35), sembra che le formule del 2008 e del 2010 forniscano stime abbastanza accurate alle basse frequenze, alle medie frequenze la formula del 2007 sembra più appropriata, mentre alle alte frequenze è più precisa la formula del 2010. Considerando invece i dati di attenuazione ricavati sul solaio in laterocemento (grafico B di figura 4.35), nonostante le differenze siano piuttosto limitate, in previsione del comportamento globale del solaio i risultati sono molto interessanti. Sembra infatti che tramite la formula del 2007, si possa fornire una buona stima dell'intero pacchetto solaio di laboratorio, mentre le formule del 2008 e del 2010 forniscano probabilmente una stima verosimile del comportamento del solaio in opera in cui, a causa delle differenti condizioni di vincolo, le strutture sono probabilmente

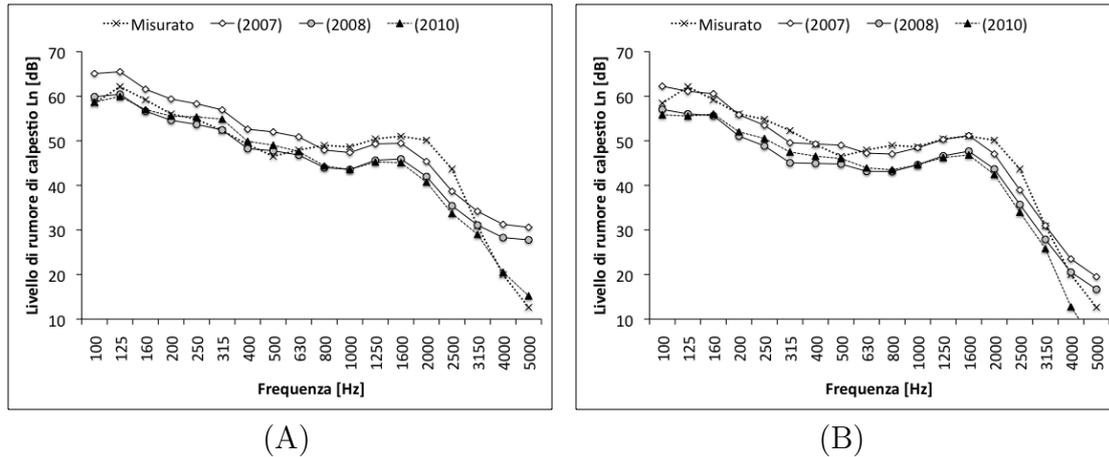


Figura 4.35: livelli di rumore di calpestio normalizzato  $L_n$  in frequenza misurati in laboratorio su solaio in laterocemento e calcolati a partire dalle formule previsionali sviluppate nel 2007 (Brosio), nel 2008 (Ferrara) e nel 2010; i dati di attenuazione sono stati ricavati da misure su solaio (A) in calcestruzzo e (B) in laterocemento.

Formula previsionale	Misurato	Indice di valutazione $L_{nw}$ [dB]	
		con $\Delta L_{CA}$	con $\Delta L_{LC}$
2007		55	54
2008	55	51	50
2010		51	49

Tabella 4.13: comparazione tra indici di valutazione  $L_{nw}$  relativi al solaio misurato e con applicazione delle formule previsionali ad oggi disponibili; i termini  $\Delta L_{CA}$  e  $\Delta L_{LC}$  si riferiscono alle attenuazioni in frequenza misurate sui due differenti solai.

meno libere di vibrare e le caratteristiche di emissione sono in parte inferiori<sup>9</sup>. Se le stime fossero plausibili, potrebbe esserci una correlazione tra il dato di laboratorio ed il dato in opera, valutabile in una traslazione delle curve di livello verso il basso di alcuni dB, oppure le diverse formule previsionali potrebbero dare la stima di un intervallo in cui i livelli di rumore si collocano sullo spettro.

### Applicazione di materiali su differenti solai di base: un caso studio

Il principale intento dello studio presentato è la verifica delle prestazioni dei sistemi di riscaldamento, applicati in particolare ai solai in laterocemento, i più diffusi nel territorio nazionale. Le stesse misure sono state però analizzate, anche al fine di un confronto tra sistemi applicati a solai di base differenti, con la peculiarità di trasportare il dato di laboratorio in opera, senza considerare l'influenza delle trasmissioni laterali e proponendo una stratigrafia comprendente lo strato di livellamento degli impianti. Pertanto le ricerche eseguite non corrispondono ad un confronto sistematico dei materiali e dei prodotti. Al termine della sperimentazione è nata la necessità di approfondire la tema-

<sup>9</sup>Sarebbe opportuno verificare le trasmissioni laterali e l'effettivo risultato in opera mediante specifici rilievi.

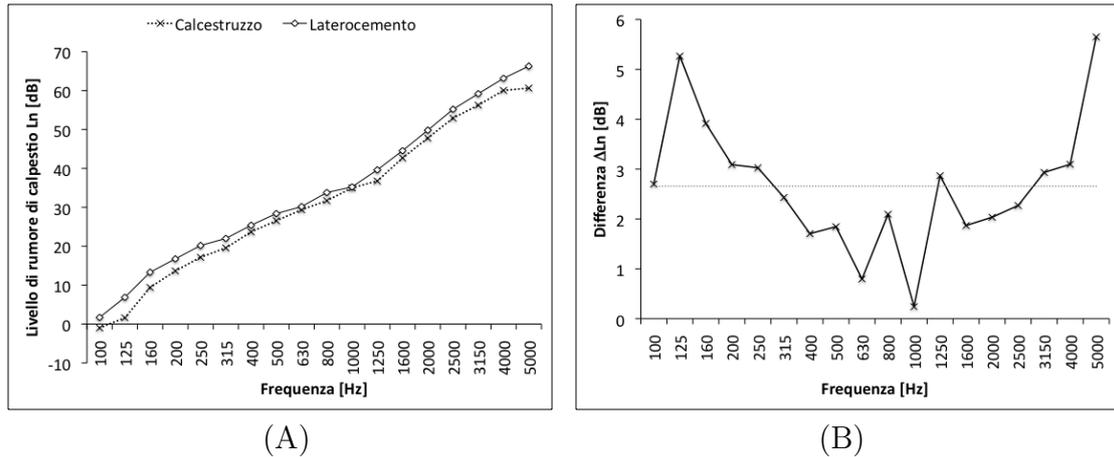


Figura 4.36: (A) confronto di un materiale sotto massetto (identica stratigrafia di rivestimento) su solai diversi e (B) differenze rilevate in valore assoluto.

tica della valutazione dei materiali applicati a solai differenti, mantenendo inalterato lo strato di rivestimento. Si riporta quindi in figura 4.36 un confronto di curve di riduzione di rumore di calpestio in frequenza ottenute sui due solai di laboratorio per un prodotto anticalepestio sotto massetto. Tale materiale è ottenuto dall'unione di un feltro agulgiato con gomma riciclata in granuli. Dai risultati emerge un'analogia molto stretta tra i dati di attenuazione di rumore misurati sulle due strutture di base per lo stesso materiale sotto massetto. La riduzione stimata sul solaio in laterocemento è però sempre maggiore rispetto a quella misurata sul solaio in calcestruzzo e tale miglioramento è mediamente di 2,7 dB sulle diverse bande di terzi d'ottava (0,2 dB minimo a 1000 Hz e 5,7 dB massimo a 5000 Hz). La differenza è certamente sensibile, ma comunque limitata, per cui potrebbe essere indice di un miglioramento di prestazione, ma anche conseguenza di un'incertezza di misura che nell'acustica edilizia è piuttosto rilevante (almeno  $\pm 1$  dB). Per ottenere conclusioni più precise è necessaria una quantità di dati molto superiore e tale studio sarà ampliato nei mesi futuri.

# Capitolo 5

## Studio dei materiali per l'isolamento del rumore aereo di pareti

### 5.1 Applicazione dei materiali riciclati in gomma e fibra di poliestere a strutture seriali leggere

#### 5.1.1 Considerazioni generali

Le pareti leggere in cartongesso sono generalmente dotate di buone prestazioni fonoisolanti in relazione al peso per unità di superficie, soprattutto se l'intercapedine viene riempita con specifici materiali assorbenti. Rispetto agli allestimenti in laboratorio, l'installazione delle pareti leggere in opera può essere accompagnata da rilevanti perdite di isolamento, dovute principalmente alle trasmissioni laterali, alla presenza degli impianti elettrici e sanitari, oppure ad errori di posa. In questa sezione sono stati raccolti dati di potere fonoisolante provenienti da misure in laboratorio, riguardanti oltre cinquanta pareti in cartongesso contenenti materiali riciclati, in particolare pannelli in gomma pressata e fibre di poliestere, per valutarne le prestazioni globali e identificare le migliori soluzioni, proponibili sul mercato. Inoltre, sono state condotte alcune verifiche sulle perdite di potere fonoisolante in laboratorio dovute all'inserimento degli impianti elettrici. Lo studio è stato condotto all'interno del laboratorio Isolgomma, parallelamente alla sperimentazione sui solai. Sono state allestite e misurate pareti in cartongesso a singolo e doppio montante, di spessori globali compresi tra 10 cm e 20 cm, vuote oppure riempite di materiali in intercapedine. I materiali scelti sono principalmente combinazioni tra pannelli di gomma rigida e fibre sintetiche provenienti da riciclo; per entrambe le tipologie di prodotto sono state scelte densità e spessori diversi. Una panoramica delle prestazioni delle pareti analizzate in funzione della massa superficiale (calcolata in base al quantitativo di materiale adoperato) è riportata in figura 5.1. Le pareti contenenti i materiali in esame hanno fornito indici di valutazione  $R_w$  compresi tra 48 e 66 dB, incrementando notevolmente le prestazioni rispetto alle strutture prive di materiale fonoassorbente in intercapedine, con valori di massa per unità di superficie compresi tra 38 e 77 kg/m<sup>2</sup>. Anche la scelta della struttura riveste una notevole influenza, con prestazioni che mediamente aumentano all'aumentare dello spessore e con il passaggio da singola a doppia struttura. Da notare che per valori simili di massa superficiale, si possono ottenere indici di valutazione  $R_w$

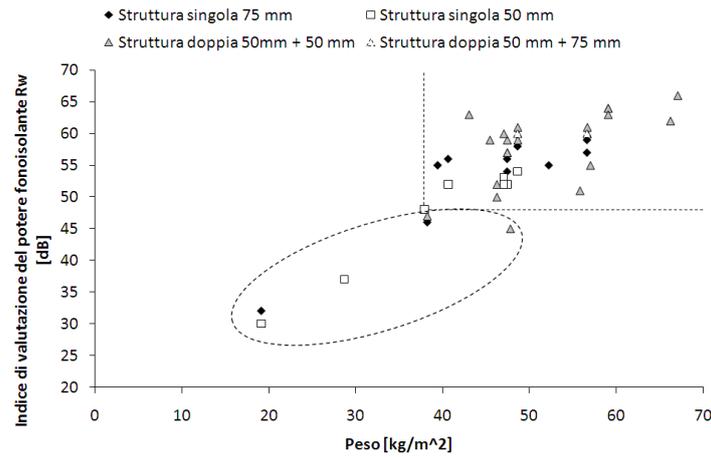


Figura 5.1: indice di valutazione del potere fonoisolante delle pareti leggere misurate, in relazione alla massa superficiale; i punti compresi nell'ovale sono relativi a pareti prive di materiali in intercapedine.

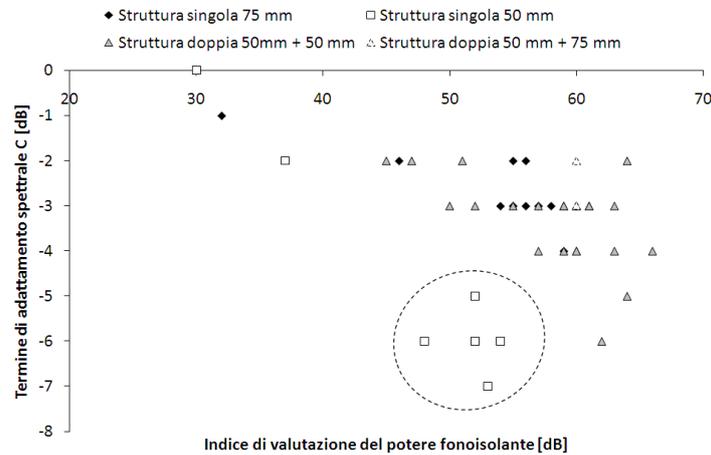


Figura 5.2: termini di adattamento spettrale in funzione degli indici di valutazione del potere fonoisolante delle pareti leggere misurate.

compresi in intervalli di 10-15 dB, a seconda delle soluzioni adottate. In figura 5.2 sono riportati i valori dei termini di adattamento spettrale  $C$  relativi alle misure effettuate, in funzione degli indici di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$ .

Dai dati emerge che, per le pareti leggere analizzate, all'aumentare dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, aumenta in valore assoluto anche il termine  $C$ . In particolare le pareti a montante singolo di spessore 50 mm hanno fornito risultati piuttosto penalizzanti, con valori di  $C$  compresi tra -5 e -7 dB, a fronte di modesti valori di  $R_w$  (serie  $\square$  in figura 5.2). Le altre tipologie di strutture (singole di spessore 75 mm e doppie) sono caratterizzate da termini di adattamento spettrale meno penalizzanti e mediamente compresi tra -2 e -4 dB, a fronte di valori decisamente più elevati di potere fonoisolante. Per quanto riguarda i termini di adattamento spettrale per rumore di traffico stradale  $C_{tr}$ , la distribuzione è molto simile alla precedente, con valori compresi mediamente tra

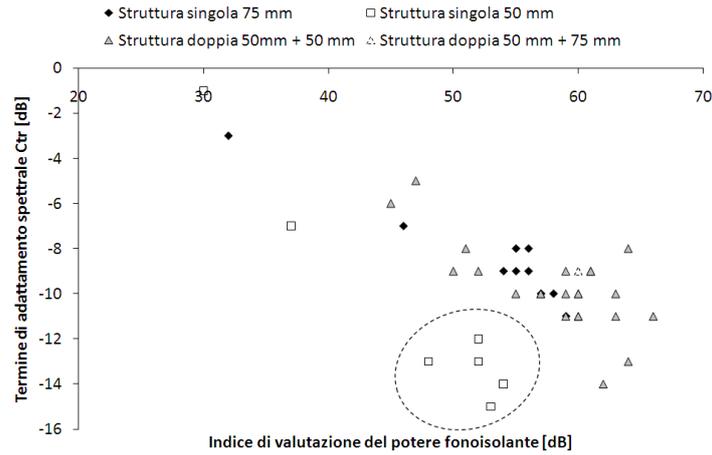


Figura 5.3: termini di adattamento spettrale per rumore da traffico in funzione degli indici di valutazione del potere fonoisolante delle pareti leggere misurate.

Parete	$R_w$ [dB]	Intervento	Variazione $R_w$ [dB]	Variazione $C$ [dB]	Variazione $C_{tr}$ [dB]
A	52	1) 7 scatole elettriche su un lato	-1	+1	-
		2) Condotti per cavi elettrici	-2	+1	+1
B	55	1) 3 scatole elettriche su un lato	-	-	-
		2) 3 scatole elettriche (fori) su un lato	-2	-	-
C	57	1) 7 scatole elettriche su un lato	-2	-	+1
		2) 14 scatole elettriche su due lati	-3	-	+1
D	60	1) 7 scatole elettriche su un lato	-2	-	-
		2) 14 scatole elettriche su due lati	-4	+1	+1

Tabella 5.1: interventi impiantistici effettuati sulle pareti e relative perdite di prestazioni (indici di valutazione del potere fonoisolante e termini di adattamento spettrale).

-12 e -15 per pareti a struttura singola da 50 mm, mentre per pareti a struttura singola da 75 mm e doppia i valori di  $C_{tr}$  sono compresi tra -8 e -11 dB (Figura 5.3).

Per alcune delle pareti misurate è stata effettuata un'indagine sulla possibile perdita di prestazioni dovuta all'installazione degli impianti elettrici. In tabella 5.1 sono riportati gli interventi impiantistici realizzati su quattro pareti e le variazioni delle relative prestazioni. Tali interventi sono principalmente l'installazione di scatole elettriche su una o entrambe le facce e la rimozione di materiale assorbente in intercapedine per l'alloggiamento dei condotti ed il passaggio dei cavi elettrici (parete A), mentre la parete B è stata misurata anche con i fori di predisposizione lasciati aperti su un lato, in assenza di scatole. Dai risultati emerge che le pareti leggere su cui vengono installati elementi impiantistici subiscono delle perdite di prestazioni da 1 dB a 4 dB sull'indice di valutazione del potere fonoisolante. In particolare, tali perdite sono più elevate su pareti dotate di maggiore potere fonoisolante. I termini di adattamento spettrale restano per lo più invariati o subiscono una variazione positiva di 1 dB. In figura 5.4 sono riportati i valori delle differenze di potere fonoisolante in frequenza, misurate sulle quattro pareti, dopo l'esecuzione degli interventi descritti in tabella 5.1. Dal grafico emerge che le perdite di isolamento, dovute all'installazione delle scatole elettriche su un solo lato delle strutture

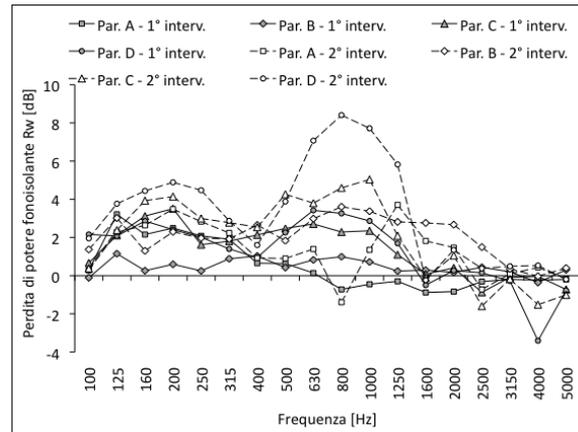


Figura 5.4: perdita di potere fonoisolante  $R$  [dB] in frequenza, in conseguenza all’inserimento degli impianti elettrici; a valori positivi corrispondono perdite di prestazioni.

misurate, sono localizzate principalmente alle frequenze medie e basse fino a 1250 Hz e raggiungono valori di circa 4 dB su singole bande. L’applicazione delle scatole elettriche su entrambi i lati della struttura peggiora ulteriormente le prestazioni globali, con perdite medie di isolamento fino a circa 5 dB, diffuse sull’intero spettro di frequenze, con picchi di 8 dB ad 800 Hz (parete D). Anche l’asportazione di materiale assorbente dall’intercapedine per l’inserimento dei condotti elettrici (parete A) influenza negativamente l’isolamento globale della struttura, infatti si sono registrate perdite superiori, rispetto alla sola applicazione delle scatole, su tutto lo spettro, ma soprattutto tra 1000 e 1600 Hz.

Le pareti leggere in cartongesso, contenenti materiali provenienti da riciclo di gomma e fibra di poliestere, hanno dimostrato di possedere mediamente delle buone caratteristiche isolanti in laboratorio, grazie all’azione combinata delle caratteristiche assorbenti delle fibre di poliestere e dell’incremento di massa delle gomme. Tali pareti riescono a garantire valori elevati di potere fonoisolante  $R$  alle frequenze medie ed alte, anche se alle basse frequenze risentono di una trasmissione più accentuata e l’indice di valutazione ne viene notevolmente influenzato. Ciononostante, in alcuni casi si sono ottenuti valori di isolamento elevati con spessori relativamente contenuti. In una previsione di prestazione in opera l’influenza degli impianti elettrici sulle pareti in cartongesso non può essere trascurata, perché unitamente alle trasmissioni laterali può determinare perdite anche significative delle prestazioni complessive. Queste ultime considerazioni devono essere viste anche in relazione alle problematiche di posa in opera delle pareti leggere, che risultano particolarmente sensibili alle variazioni locali di stratigrafia (es. riduzione dello spessore del materiale in intercapedine per l’alloggiamento di reti impiantistiche) o di connessione (es. variazione del passo dei montanti o mancato disaccoppiamento nel caso di strutture a doppio telaio indipendente).

In tabella 5.2 si riporta un riassunto delle prove eseguite, mentre nelle prossime sezioni si riportano con maggiore dettaglio le principali fasi della sperimentazione, suddivise in base alla tematica di studio, con alcune considerazioni sui risultati ottenuti. Vengono considerate dapprima le pareti a singola struttura e separatamente le pareti a doppia struttura, messe a confronto con le prime.

<i>N. parete</i>	<i>Composizione</i>	<i>Spessore [mm]</i>	<i>R<sub>w</sub> [dB]</i>	<i>C [dB]</i>	<i>C<sub>tr</sub> [dB]</i>
1	cg(x1), str75	13	27	-	-
2	cg(x2), str75	25	32	-1	-3
3	cg(x2), str75, cg(x2)	125	46	-2	-7
4	cg(x2), str75, cg(x1), gp5, cg(x1)	130	47	-1	-6
5	cg(x2), str75, cg(x1), gg5, cg(x1)	130	47	-2	-7
6	cg(x2), str75, cg(x1), gp20, cg(x1)	145	48	-2	-7
7	cg(x2), str75[fp6040], cg(x2)	125	56	-2	-8
8	cg(x2), str75[fp3040-gp10-fp3040], cg(x2)	125	58	-3	-10
9	cg(x2), str75[fm6070], cg(x2)	125	57	-4	-10
10	cg(x2), str75, gp3(su str)cg(x2)	130	46	-2	-7
11	cg(x2), str75[gp10, fp3040], cg(x2)	125	54	-3	-9
12	cg(x2), str75[fp3020, gp10, fp3020], cg(x2)	125	56	-3	-9
13	cg(x2), str75[fp6020], cg(x2)	125	55	-2	-8
14	cg(x2), str75[gp30], cg(x2)	125	48	-3	-11
15	cg(x2), str75[fp6040], cg(x1), gp20, cg(x1)	145	57	-3	-10
16	cg(x2), str75[fp6040, gp20, fp6040], cg(x2)	125	59	-4	-11
17	cg(x2), str75[gp8, fp3040, gp8], cg(x2)	125	55	-3	-9
18	cg(x2), str75[gp8, fp3040, gp8], cg(x2), se(x3)	125	55	-3	-9
19	cg(x2), str75[gp8, fp3040, gp8], cg(x2), fse(x3)	125	53	-3	-9
20	cg(x2), str50	25	30	0	-1
21	cg(x2), str50, v50, str50, cg(x2)	200	47	-2	-5
22	cg(x2), str50[fm6070], v50, str50[fm6070], cg(x2)	200	64	-3	-10
23	cg(x2), str50[fp3040, gp10], v50, str50[gp10, fp3040], cg(x2)	200	61	-3	-10
24	cg(x2), str50, v50[fp3040, gp10, fp3040], str50, cg(x2)	200	61	-3	-9
25	cg(x2), str50, cg(x1)	88	37	-2	-7
26	cg(x2), str50, v50[cg(x1)], str50, cg(x1)	200	45	-2	-6
27	cg(x2), str50[fp3040, gp10], cg(x1)	88	48	-6	-13
28	cg(x2), str50[fp3040, gp10], v[cg(x1)], str50[gp10, fp3040], cg(x2)	200	62	-6	-14
29	cg(x2), str50[fp3040, gp10], v[cg(x1)], str50, cg(x2)	200	55	-3	-10
30	cg(x2), str50[fp3040, gp10], v[gp10], str50, cg(x2)	200	51	-2	-8
31	cg(x2), str50, gp10, str50, cg(x2)	160	50	-3	-9
32	cg(x2), str50[fp4060], v50, str50[fp4060], cg(x2)	200	63	-3	-9
33	cg(x2), str50[fp4060, gp10], v50, str50[gp10, fp4060], cg(x2)	200	64	-5	-13
34	cg(x2), str50[gp10, fp4060], v50, str50[fp4060, gp10], cg(x2)	200	64	-2	-8
35	cg(x2), str50[gp10, fp4060], gp10, str50, cg(x2)	160	60	-3	-10
36	cg(x2), str50[gp10, fp4060], gp10, str50[fp4060, gp10], cg(x2)	160	66	-4	-11
37	cg(x2), str50, gp20, str50, cg(x2)	170	52	-3	-9
38	cg(x2), str50, v25, str75[fp3040, gp10, fp3040], cg(x2)	200	60	-3	-9
39	cg(x2), str50, v25[gp10], str75[fp3040, gp10, fp3040], cg(x2)	200	60	-2	-9
40	cg(x2), str50, v50[gp10, fp3040], str50, cg(x2)	200	53	-3	-9
41	cg(x2), str50, v50[fp2060, gp10, fp2060], str50, cg(x2)	200	60	-4	-11
42	cg(x2), str50, v10, str50[fp2060, gp10, fp2060], cg(x2)	160	59	-3	-10
43	cg(x2), str50[fp2060, gp10, fp2060], v10, str50[fp2060, gp10, fp2060], cg(x2)	160	63	-4	-11
44	cg(x2), str50, v10, str50[gp10, fp3040], cg(x2)	160	57	-4	-10
45	cg(x2), str50[fp3040, gp10], v10, str50[gp10, fp3040], cg(x2)	160	60	-3	-10
46	cg(x2), str50[fp3040, gp10], cg(x2)	100	52	-6	-13
47	cg(x2), str50[fp2060, gp10, fp2060], cg(x2)	100	54	-6	-14
48	cg(x2), str50, v50[gp10, fp3040], str50, cg(x2)	200	57	-3	-10
49	cg(x2), str50, v50[gp10, fp3040], str50, cg(x2), se(x7)	200	55	-3	-9
50	se(x7), cg(x2), str50, v50[gp10, fp3040], str50, cg(x2), se(x7)	200	54	-3	-9
51	cg(x2), str50, v50[fp2060, gp6, fp2060], str50, cg(x2)	200	59	-4	-11
52	cg(x2), str50, v50[fp2060, gp8, fp2060], str50, cg(x2)	200	60	-4	-11
53	cg(x2), str50, v50[fp2060, gp8, fp2060], str50, cg(x2), se(x7)	200	58	-4	-11
54	se(x7), cg(x2), str50, v50[fp2060, gp8, fp2060], str50, cg(x2), se(x7)	200	56	-3	-10
55	cg(x2), str50[fp2060, gp8, fp2060], cg(x2)	100	53	-7	-15
56	cg(x2), str50[fp2060, gp8, fp2060], cg(x2), se(x7)	100	52	-5	-13
57	cg(x2), str50[fp4060], cg(x2)	100	52	-5	-12
58	cg(x2), str50[fp4060], cg(x2), se(x7)	100	51	-4	-12
59	cg(x2), str50[fp4060], cg(x2), se(x7), tr	100	50	-4	-11

Tabella 5.2: pareti misurate e principali risultati; cg = strato di cartongesso, strXX = struttura metallica da cartongesso (XX è la dimensione in mm, [ ] identifica il materiale contenuto nell'intercapedine), gpX = pannello in gomma riciclata pressata (X indica lo spessore in mm), ggX = rotolo di gomma granulata (X indica lo spessore in mm), fpXXYY = pannello di fibra di poliestere (XX identifica lo spessore in mm e YY la densità in kg/m<sup>3</sup>), fmXXYY = pannello in fibra minerale, se = scatole elettriche, fse = fori per scatole elettriche, vXX = spazio vuoto tra le strutture (XX indica lo spessore in mm), tr = tracce per l'alloggiamento della rete impiantistica.

## 5.1.2 Pareti leggere a singola struttura

### Strutture di base

Sono state analizzate alcune strutture di base, composte da struttura singola da 75 mm, dotata di una sola lastra di cartongesso; è stata quindi indagata l'influenza dell'aggiunta di un secondo strato in gesso e la chiusura dell'intercapedine mediante due ulteriori lastre. Dall'analisi è emerso che l'aggiunta dello strato in cartongesso (parete 2) ha contribuito ad aumentare il valore di  $R_w$  di 5 dB, passando da 27 dB a 32 dB. La chiusura della parete mediante due lastre di cartongesso (parete 3) con formazione di un'intercapedine ha consentito di incrementare notevolmente l'indice  $R_w$ , raggiungendo il valore 46 dB. In figura 5.5 si riporta il confronto tra le tre pareti, da cui emerge che l'incremento di potere fonoisolante è distribuito su tutto lo spettro con l'aggiunta degli strati.

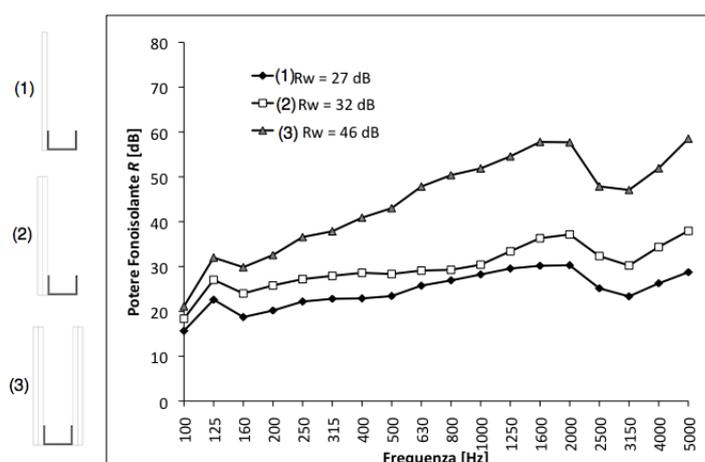


Figura 5.5: analisi delle strutture di base.

### Inserimento di materiali tra le lastre

Sono state sottoposte a prova tre pareti per valutare l'influenza dell'inserimento di diversi materiali tra le due lastre di cartongesso (applicazione su un solo lato della struttura, verso l'ambiente emittente). Le pareti 4 e 5, di spessore totale 13 cm, contengono rispettivamente un materiale in gomma riciclata pressata di spessore 5 mm ed un materiale in gomma riciclata granulare di spessore 5 mm, fissati meccanicamente tramite graffe, mentre la parete 6 (spessore totale 14.5 cm) contiene uno strato di gomma riciclata pressata di spessore 20 mm, fissato meccanicamente con viti. I risultati sono riportati in figura 5.6, in relazione alla struttura chiusa semplice (parete 3). I risultati ottenuti mettono in evidenza una sostanziale uguaglianza del comportamento dei primi due sistemi analizzati (4 e 5) e la parete vuota (3) alle basse frequenze (tra 100 e 630 Hz). Alle alte frequenze è presente invece un significativo miglioramento delle prestazioni della parete, peraltro analogo per entrambi i materiali testati (gomma pressata e granulare). Tale miglioramento porta ad un incremento di 1 dB sull'indice di valutazione del potere fonoisolante ( $R_w = 47$  dB), poiché gli scarti rispetto alla curva di riferimento (UNI EN ISO 717-1) sono sfavorevoli alle basse frequenze. Peraltro il vantaggio sensibile dell'inserimento di

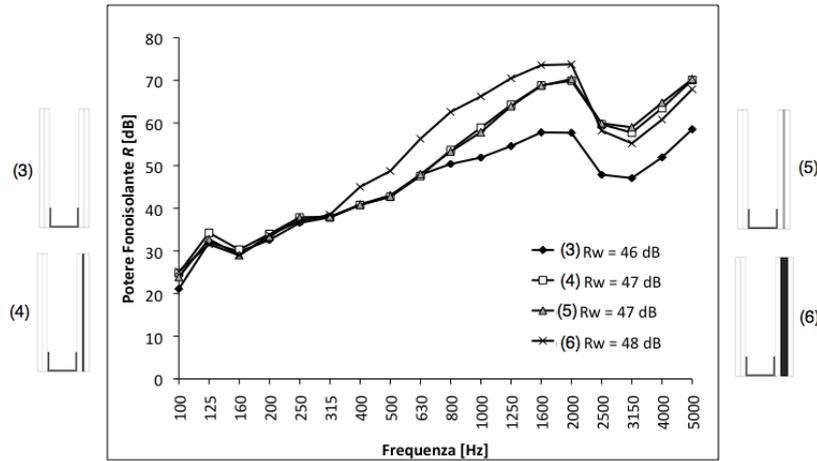


Figura 5.6: applicazione di materiali in gomma tra le lastre.

questi materiali è un innalzamento dell'isolamento in corrispondenza della coincidenza (2500 – 3150 Hz). Il comportamento della parete 6, contenente un pannello di gomma riciclata pressata di spessore 20 mm tra le lastre di cartongesso, è analogo a quello delle pareti 4 e 5, anche se la notevole aggiunta di massa permette di ottenere un incremento netto di  $R$  a partire da 400 Hz, invece che da 800 Hz (pareti 4 e 5). Tuttavia alle basse frequenze (da 100 a 315 Hz) il potere fonoisolante è analogo a quello della struttura vuota di riferimento (3), pertanto rispetto a tale parete l'incremento di  $R_w$  è 2 dB ( $R_w = 48$  dB).

### Inserimento di singoli materiali in intercapedine

Sono state analizzate strutture contenenti un singolo materiale in intercapedine, in relazione alla struttura vuota (3). La parete 7 contiene fibra di poliestere di densità  $40 \text{ kg/m}^3$ , per uno spessore totale di 6 cm. La parete 9 contiene un pannello in fibra minerale ad elevata densità ( $70 \text{ kg/m}^3$ ) di spessore 5 cm. La parete 13 contiene fibra di poliestere di densità  $20 \text{ kg/m}^3$ , in due strati di spessore 3 cm (spessore totale 6 cm). La parete 14 contiene un materiale in gomma riciclata pressata di spessore 3 cm. I risultati sono riportati in figura 5.7. L'inserimento di materiale fibroso all'interno dell'intercapedine permette di aumentare notevolmente le prestazioni sull'intero spettro, in particolare alle basse frequenze. Per le pareti 7, 9 e 13 sono stati infatti misurati indici  $R_w$  rispettivamente di 56, 57 e 55 dB. Differisce molto, invece, il comportamento della parete contenente gomma pressata da 3 cm, che presenta un incremento di  $R$  marcatamente lineare ed accentuato sull'intero spettro, ma un effetto di assorbimento nella cavità minore rispetto all'utilizzo di materiali fibrosi, tale da ottenere un indice  $R_w = 48$  dB. I tre materiali fibrosi utilizzati hanno dato risultati simili, con scostamenti dovuti probabilmente alla diversa densità delle fibre: infatti la fibra minerale utilizzata nella parete 9 è ad alta densità ( $\rho = 70 \text{ kg/m}^3$ ), la fibra di poliestere della parete 7 è di media densità ( $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$ ) e la fibra di poliestere della parete 13 è di bassa densità ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ).

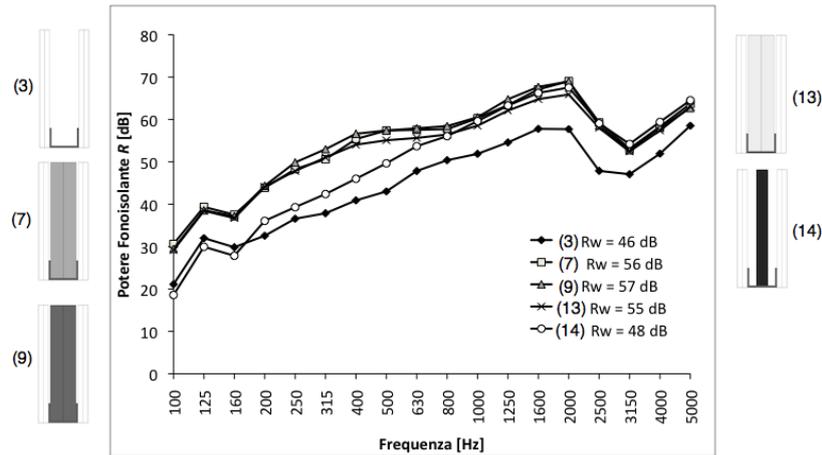


Figura 5.7: materiale singolo in intercapedine.

### Inserimento di materiali accoppiati in intercapedine

Al fine di valutare un eventuale effetto sinergico tra materiali fibrosi e gommosi in intercapedine, sono state misurate alcune pareti contenenti materiali accoppiati composti essenzialmente di fibra di poliestere e gomma.

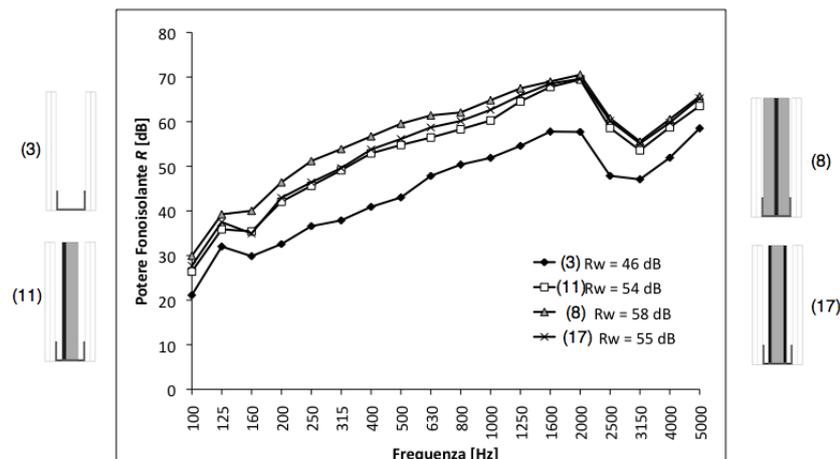


Figura 5.8: materiali accoppiati in intercapedine.

La parete 11 contiene all'interno dell'intercapedine un prodotto composto da un pannello di fibra di poliestere di densità  $40 \text{ kg/m}^3$  accoppiato con un pannello in gomma riciclata pressata di spessore 10 mm; la parete 8 contiene un materiale a tre strati, fibra di poliestere - gomma pressata di spessore 10 mm - fibra di poliestere ( $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$ , spessore 30 mm); la parete 17 contiene un altro materiale a tre strati composto da gomma pressata di spessore 8 mm - fibra di poliestere ( $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$ , spessore 30 mm) - gomma pressata di spessore 8 mm. I risultati ottenuti sono riportati in figura 5.8. I maggiori valori di potere fonoisolante sull'intero spettro sono stati ottenuti per la parete 8, con  $R_w = 58 \text{ dB}$ . Le altre due pareti hanno raggiunto prestazioni minori alle frequenze medie e basse; di conseguenza gli indici di valutazione del potere fonoisolante sono minori di 3 –

4 dB. Per quanto riguarda le pareti 11 e 17, il comportamento è molto simile: il prodotto con due strati di gomma incrementa lievemente il potere fonoisolante alle medie frequenze (500 – 1250 Hz) e riduce di poco l'effetto coincidenza. Sulla parete migliore tra le tre analizzate (parete 8) sono stati condotti due ulteriori test per verificare da un lato l'influenza della densità della fibra di poliestere (parete 12) e dall'altro l'effetto dell'aumento dello spessore di gomma centrale. Nel primo caso è stata sostituita la fibra di densità 40 kg/m<sup>3</sup> con una di densità inferiore (densità 20 kg/m<sup>3</sup>); nel secondo caso il prodotto in gomma pressata è stato sostituito con uno analogo di spessore raddoppiato (20 mm). I risultati sono riportati in figura 5.9.

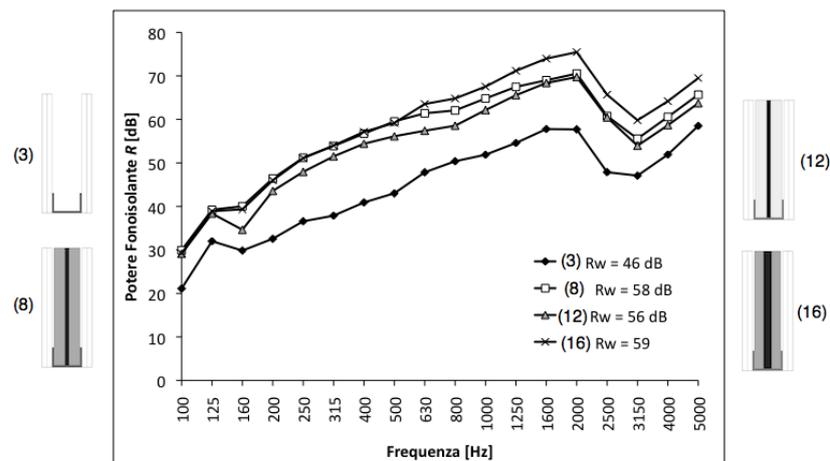


Figura 5.9: influenza della densità del materiale fibroso e dello spessore di gomma pressata per il prodotto composto di due strati laterali in fibre di poliestere e un pannello di gomma pressata centrale.

Il primo test ha messo in evidenza una marcata perdita di isolamento su tutto lo spettro, con una perdita di 2 dB in termini di indice di valutazione ( $R_w = 56$  dB invece che 58 dB). Pertanto è da preferire l'utilizzo della fibra a densità maggiore ( $\rho = 40$  kg/m<sup>3</sup>). Il secondo test ha messo in evidenza un significativo aumento del potere fonoisolante alle medie ed alte frequenze, aumentando di 1 dB l'indice di valutazione ( $R_w = 59$  dB). Stando ai risultati ottenuti, il contributo dell'aggiunta di materiale gommoso alle basse frequenze non risulterebbe significativo nella configurazione testata. Infine, viene riportato in figura 5.10 un confronto diretto tra la parete 8, contenente il prodotto a tre strati (pannello in fibra - pannello in gomma - pannello in fibra) e la parete 7, contenente la stessa quantità di fibra, ma senza lo strato rigido in gomma. Dai risultati ottenuti si evince che l'inserimento dello strato centrale di materiale in gomma pressata da 10 mm permette di ottenere una struttura complessivamente più elaborata, contribuendo positivamente ad un aumento di  $R$  sull'intero spettro.

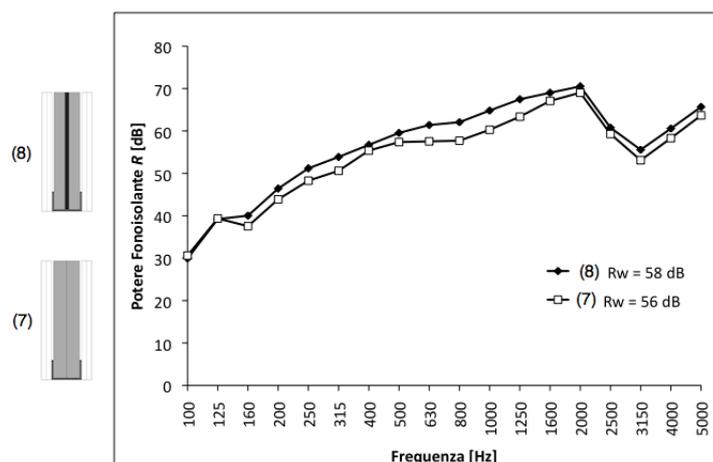


Figura 5.10: influenza dell'inserimento dello strato centrale di gomma nel prodotto a tre strati (fibra-gomma-fibra), in relazione all'utilizzo della sola fibra di poliestere.

### Applicazione simultanea di materiali in intercapedine e tra le lastre di cartongesso

La parete 15 è stata allestita per verificare l'effetto sinergico dell'applicazione di un materiale fibroso in intercapedine e di un materiale in gomma tra le lastre di cartongesso. Sono stati inseriti due pannelli di fibra di poliestere di densità  $40 \text{ kg/m}^3$  e spessore 30 mm (spessore totale 60 mm) all'interno dei montanti ed uno strato di gomma riciclata pressata di spessore 20 mm è stato applicato tra le due lastre di cartongesso esterne (verso l'ambiente emittente del laboratorio). I risultati sono riportati in figura 5.11, a confronto con le pareti 7 e 6, contenenti rispettivamente solo la fibra di poliestere e solo lo strato elastico tra le lastre. Nel complesso lo spettro della parete 15 segue il comportamento della parete contenente la sola fibra nell'intervallo delle basse frequenze e quello della parete con il solo strato in gomma (maggiorato dal contributo del materiale fibroso) alle alte frequenze. In figura 5.12 viene riportato un confronto diretto tra la parete 15 e le pareti contenenti le soluzioni migliori ottenute durante la sperimentazione (parete 8 e 16). Alle medie ed alte frequenze il potere fonoisolante della parete 15 è nettamente superiore rispetto all'utilizzo dei prodotti accoppiati, tuttavia nella parte inferiore dello spettro è carente: tale caratteristica mette in evidenza un comportamento sostanzialmente diverso delle pareti con prodotto accoppiato tipo fibra - gomma - fibra, che dà luogo ad una struttura più elaborata. In termini di indice di valutazione, l'utilizzo di materiale fibroso in intercapedine e gommoso tra le lastre fornisce un  $R_w = 57$  dB, contro valori di  $R_w$  pari a 58 e 59 dB delle altre due soluzioni.

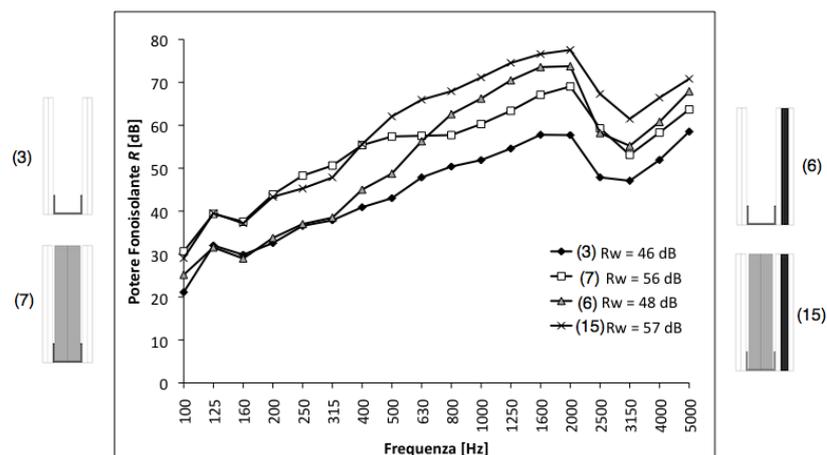


Figura 5.11: effetto sinergico di materiale fibroso in intercapedine e materiale elastico in gomma riciclata tra le lastre di cartongesso.

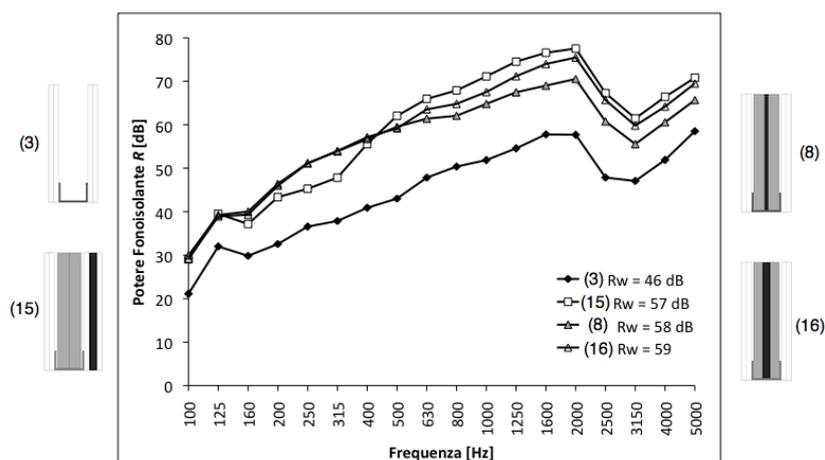


Figura 5.12: parete 15 a confronto con le soluzioni a migliore risultato.

### 5.1.3 Pareti leggere a struttura doppia

#### Strutture di base

In figura 5.13 è riportato il confronto tra le strutture di base, relative alla seconda fase della sperimentazione. Il contributo della chiusura della parete è notevole e comporta un aumento del potere fonoisolante da 30 a 47 dB (la parete 21 è composta da due strutture da 5 cm distanziate di 5 cm, con doppia lastra di cartongesso su ogni lato; spessore totale 20 cm). Rispetto alla struttura a singolo montante da 7,5 cm (spessore totale 12,5 cm) la doppia struttura fornisce un incremento di indice di valutazione  $R_w$  di solo 1 dB, ma in frequenza i miglioramenti sono sensibili, soprattutto alle basse frequenze, dove peraltro sono presenti anche fenomeni di risonanza tipici delle strutture ad ampia intercapedine (160 Hz, 400 Hz).

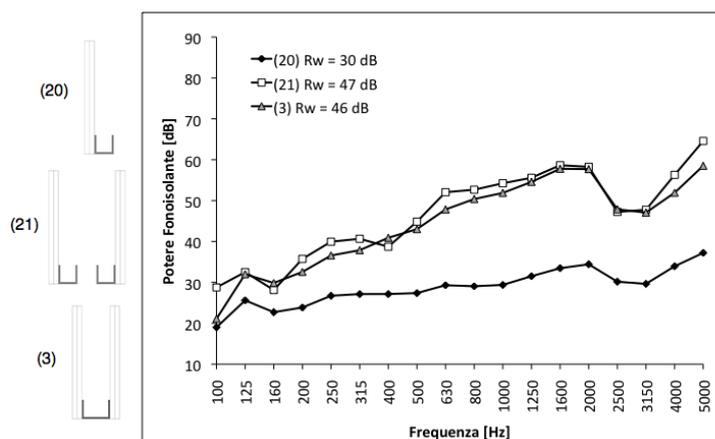


Figura 5.13: strutture di base (l'indicazione in parentesi si riferisce al numero progressivo di parete analizzata).

### Applicazione di materiali preesistenti

La figura 5.14 contiene il confronto tra pareti contenenti alcuni materiali già utilizzati nella prima parte dello studio sulle pareti a singola struttura oppure già presenti sul mercato in modo rilevante (fibre minerali).

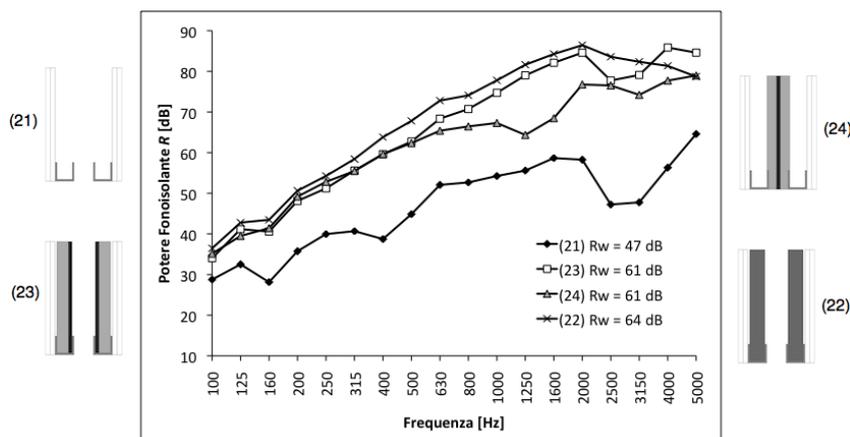


Figura 5.14: applicazione di materiali provenienti dalla precedente fase sperimentale.

L'applicazione dei materiali fonoassorbenti in intercapedine permette di raggiungere valori di potere fonoisolante piuttosto elevati:  $R_w = 61$  dB per le pareti contenenti i prodotti accoppiati di pannelli in gomma pressata ed in fibra di poliestere e 64 dB per la parete contenente lana minerale (le caratteristiche dei materiali utilizzati sono riassunte in tabella 5.2). L'effetto dell'assorbimento è accentuato alle alte frequenze, ma il miglioramento è particolarmente sensibile anche nella parte inferiore dello spettro. La migliore prestazione della lana minerale è da imputare alla maggiore densità e spessore del pannello fibroso applicato in doppio strato all'interno dei montanti. La parete 24, che contiene un materiale in tre strati (fibra di poliestere, gomma pressata, fibra di poliestere) fornisce risultati inferiori alle alte frequenze, rispetto alla parete 23, che contiene due

strati di materiale accoppiato in gomma pressata e fibra di poliestere; tuttavia l'indice di valutazione è analogo, in quanto alle basse frequenze le curve sono pressoché sovrapposte (il calcolo degli scarti sfavorevoli è influenzato dai dati spettrali meno positivi della parete). Si noti che i valori di  $R$  alle alte frequenze sono influenzati dal rumore di fondo. La parete 24 risulta essere particolarmente interessante, per i risultati ottenuti in relazione alla particolare disposizione del materiale impiegato. Infatti la posa in opera consente di applicare gli impianti elettrici senza rimozione di materiale dall'intercapedine, preservandone la durabilità nel tempo.

### Doppia intercapedine (inserimento di uno strato di cartongesso)

In figura 5.15 viene riportato il confronto tra una struttura in cartongesso a doppio telaio da 50 mm chiusa su entrambi i lati da doppia lastra di cartongesso, con la stessa struttura divisa al suo interno da un'ulteriore lastra. Tali pareti sono quindi messe a confronto con la semi-parete ottenuta togliendo il telaio più esterno.

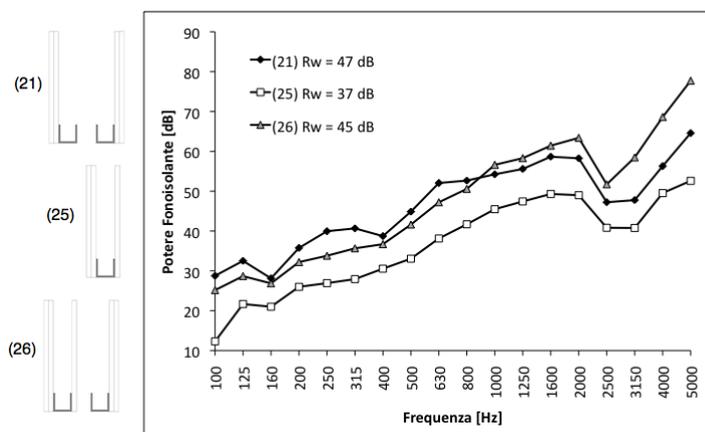


Figura 5.15: influenza dell'introduzione di una lastra di cartongesso (doppia intercapedine).

Dai dati misurati, risulta che uno strato addizionale di gesso, a formare una doppia intercapedine, non comporta dei sostanziali vantaggi, se inserito in una struttura priva di materiale fonoassorbente, in quanto riduce l'indice di potere fonoisolante di 2 dB, nonostante aumenti l'isolamento alle alte frequenze e riduca l'effetto di coincidenza.

### Struttura a doppia intercapedine con applicazione di materiali specifici in gomme e fibre riciclate

La figura 5.16 mette a confronto diverse possibilità di applicazione di un prodotto a due strati (un pannello in gomma riciclata pressata da 10 mm ed uno di fibra di poliestere di spessore 30 mm e densità  $40 \text{ kg/m}^3$ ), anche in relazione alla presenza o meno della doppia intercapedine. La parete di base (27) ha spessore 8,75 cm ed è composta da doppia lastra di cartongesso, struttura da 50 mm contenente il prodotto accoppiato e lastra di gesso singola in chiusura. Con l'aggiunta di un secondo telaio (parete 29) e due

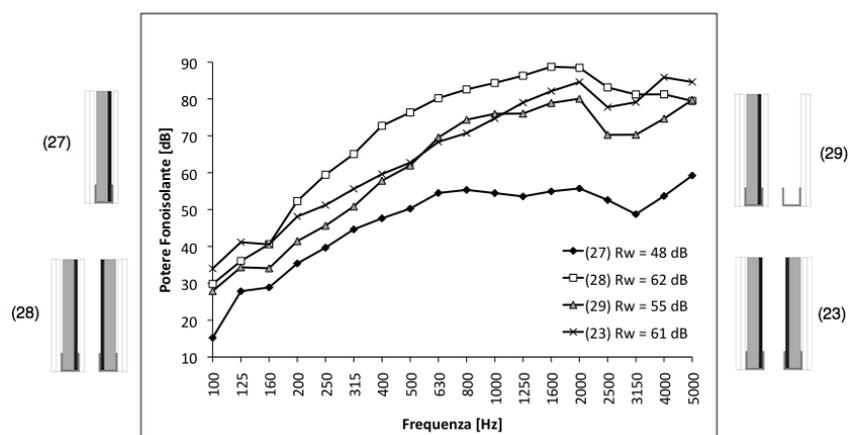


Figura 5.16: struttura a singola e doppia intercapedine, con materiali di riciclo nelle intercapedini.

strati di cartongesso a chiusura, la parete aumenta lo spessore totale a 20 cm e passa da  $R_w = 48$  dB a  $R_w = 55$  dB, con un netto miglioramento sull'intero spettro delle frequenze. L'inserimento dello stesso materiale nell'intercapedine del secondo telaio fornisce un notevole incremento sulle prestazioni globali della struttura, permettendo di raggiungere un  $R_w = 62$  dB. In particolare si noti il vantaggio ottenuto nell'intervallo di frequenze da 200 a 1000 Hz. Rispetto a quest'ultima struttura, la stessa parete senza lastra in cartongesso interna (parete 23), è inferiore di solo 1 dB come indice di potere fonoisolante, in quanto nelle basse frequenze (100 - 125 Hz) le prestazioni sono comparabili.

### Inserimento di strati di gomma pressata a separazione dei montanti

Sono state allestite alcune pareti contenenti esclusivamente prodotti in gomma riciclata pressata, senza l'aggiunta di prodotti fibrosi, per valutare l'effetto di disaccoppiamento delle strutture metalliche mediante elementi elastici piani. Le misure riportate in figura 5.17 mettono a confronto alcuni esempi di queste pareti, in relazione alla struttura chiusa di partenza. Lasciando invariato lo spessore della parete e inserendo uno strato di gomma pressata di spessore 10 mm avvitato internamente ad un telaio (parete 30) si incrementa l'indice di potere fonoisolante di 4 dB, passando da  $R_w = 47$  dB a  $R_w = 51$  dB, con un buon incremento delle prestazioni generali, comunque inferiore all'utilizzo di un prodotto fibroso. Un risultato interessante si è ottenuto restringendo l'intercapedine, fino a portare anche il secondo telaio a contatto con lo strato di gomma (parete 31). Infatti l'indice di potere fonoisolante è calato di 1 dB, a fronte di un guadagno di spessore totale (16 cm invece che 20 cm). Raddoppiando infine lo spessore di gomma (parete 37, spessore 17 cm) si è ottenuto un incremento di  $R_w$  di 1 dB.

### Utilizzo di prodotti fibrosi ad alta densità e pareti ad elevate prestazioni

Al fine di massimizzare le prestazioni, sono state testate alcune pareti contenenti pannelli di fibra di poliestere di maggiore spessore e densità ( $\rho = 60$  kg/m<sup>3</sup>, spessore 4 cm). Un

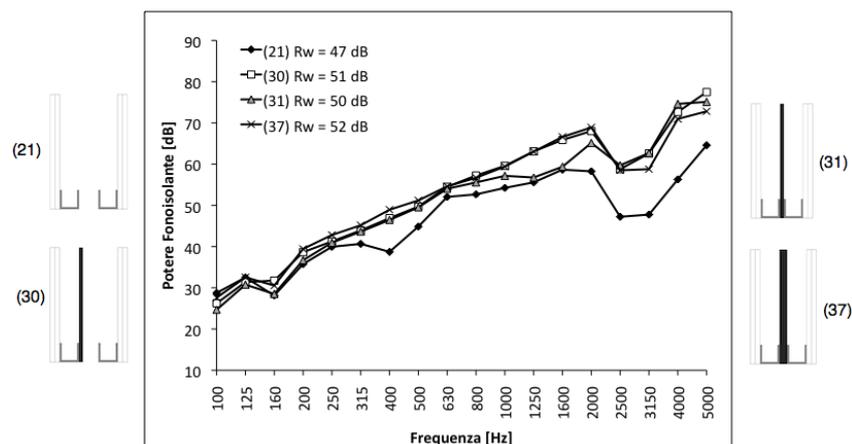


Figura 5.17: inserimento di gomma pressata a separazione dei telai.

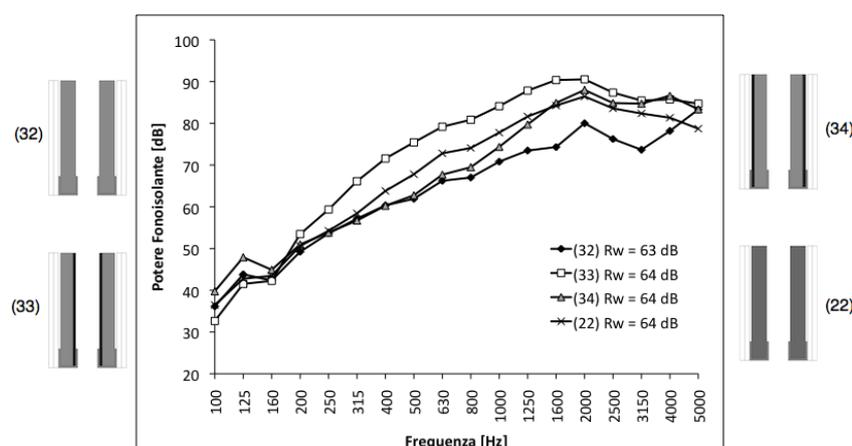


Figura 5.18: utilizzo di fibra di poliestere di elevata densità ( $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$ , spessore 4 cm), anche in abbinamento a materiali in gomma.

primo confronto è riportato in figura 5.18. Pur essendo il comportamento in frequenza delle pareti molto differente, l'indice di valutazione è praticamente analogo. In particolare i pannelli in fibra di poliestere, applicati senza aggiunta di altri materiali, presentano comportamento analogo all'utilizzo di materiali in fibra minerale alle basse frequenze (100 Hz - 315 Hz) ed il maggiore potere fonoisolante alle alte frequenze è dovuto probabilmente a differenze di porosità e densità. Un risultato interessante riguarda le differenti prestazioni ottenute scambiando la mutua posizione degli strati di gomma e di fibra. Infatti, posizionando esternamente la gomma si accentua l'isolamento alle basse frequenze (100 - 125 Hz), a scapito delle medie frequenze, dove il comportamento è più lineare; l'indice di valutazione del potere fonoisolante, invece, non varia.

In figura 5.19 vengono riportati i risultati di due ulteriori pareti contenenti la stessa fibra di poliestere ad elevata densità, combinata con più pannelli di gomma riciclata pressata. Le combinazioni testate permettono di raggiungere elevate prestazioni, con un contenimento dello spessore totale (16 cm). I risultati sono confrontati con quelli della parete contenente fibra minerale in doppio strato (parete 22). La parete 35 (con uno

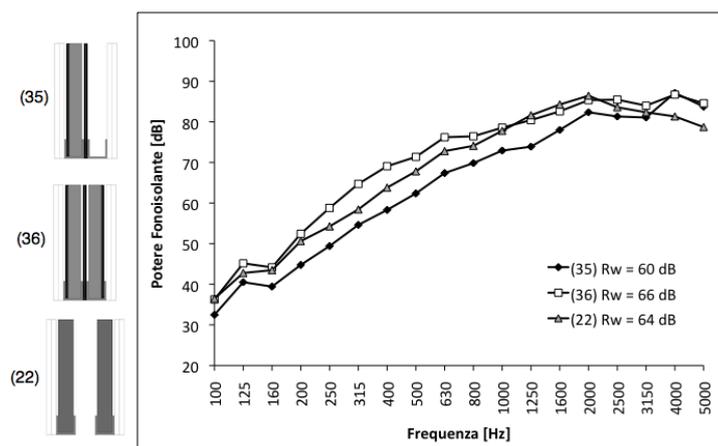


Figura 5.19: strutture ad elevato potere fonoisolante e spessore ridotto (confronto con fibre minerali).

strato di gomma pressata da 10 mm, pannelli di fibra di poliestere di densità  $60 \text{ kg/m}^3$  e spessore 4 cm ed un ulteriore strato di gomma pressata) fornisce un potere fonoisolante  $R_w = 60 \text{ dB}$ , un valore positivo se confrontato con le disposizioni di legge ed i riferimenti della classificazione acustica. Aggiungendo un ulteriore strato di materiale accoppiato si raggiunge un valore di  $R_w$  pari a 66 dB, più elevato rispetto a quello ottenuto con la fibra minerale, in uno spessore ridotto (16 cm invece di 20 cm). In particolare l'isolamento migliora sensibilmente alle basse frequenze.

### Struttura doppia (75 mm - 50 mm)

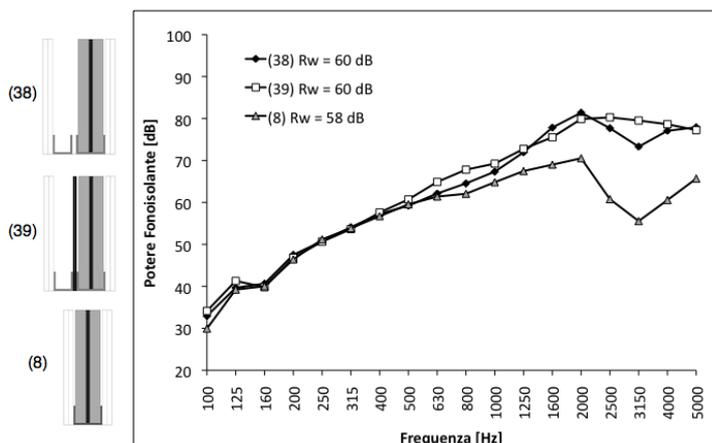


Figura 5.20: potere fonoisolante di pareti a struttura doppia (75 mm + 50 mm).

Un successivo passo dello studio è stata l'analisi di una struttura doppia a telaio misto 75 mm - 50 mm (pareti 38 e 39), contenenti il prodotto a tre strati (due strati di materiale fibroso di densità  $40 \text{ kg/m}^3$  contenenti uno strato di materiale in gomma di spessore 10 mm) all'interno del telaio di larghezza 75 mm (parete 38) con un ulteriore strato di gomma pressata all'esterno del telaio da 75 mm (parete 39); entrambe le pareti

hanno spessore totale 20 cm. I risultati mettono in evidenza un buon risultato globale, con  $R_w = 60$  dB, anche in relazione al risultato ottenuto per la struttura da 12,5 cm contenente lo stesso prodotto accoppiato in parete singola ( $R_w = 58$  dB). In merito all'azione dello strato di gomma aggiuntivo, la sua influenza è scarsa, in quanto modifica in parte il comportamento in frequenza, lasciando però invariato l'indice di valutazione. Il netto vantaggio della doppia struttura rispetto alla singola si nota comunque alle frequenze medie ed alte (630 Hz - 5000 Hz).

### Ottimizzazione di prodotti e strutture

In fase di chiusura dello studio è stato deciso di sviluppare un prodotto in base a specifiche esigenze progettuali; il prodotto scelto è quello che ha fornito durante la sperimentazione i migliori risultati, ovvero il prodotto risultante dall'accoppiamento di due strati di fibra di poliestere con uno di gomma riciclata pressata. Rispetto alla prima formulazione del prodotto, si è scelto di aumentare la densità della parte fibrosa a  $60 \text{ kg/m}^3$ , riducendo lo spessore di ogni strato a 2 cm, in modo da ottimizzare le dimensioni per le intercapedini dei telai da 50 mm. Sono state scelte quattro strutture di base, riportate in figura 5.21, in funzione del possibile utilizzo in opera, in particolare nell'ambito del terziario.

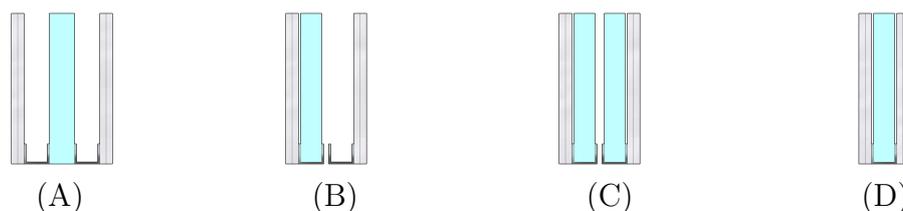


Figura 5.21: stratigrafie indagate in fase di ottimizzazione di prodotto (A) spessore 20 cm, (B) spessore 16 cm, (C) spessore 16 cm, (D) spessore 10 cm.

Ognuna delle quattro pareti è stata allestita utilizzando anche il prodotto composto da uno strato di gomma da 10 mm accoppiato ad un solo strato di fibra di poliestere di spessore 3 cm e densità  $40 \text{ kg/m}^3$ . Ognuna delle strutture analizzate può essere adeguata a differenti ambiti progettuali. Ad esempio, in ambito alberghiero, il montaggio di tipo (A) può essere utilizzato come separazione tra camere da letto adiacenti, in virtù dell'elevato potere fonoisolante e della possibilità di installare gli impianti elettrici senza intaccare il materiale in intercapedine. Il montaggio di tipo (B) potrebbe risultare vantaggioso come separazione tra camera e corridoio, in quanto il materiale presente all'interno di un solo telaio lascia lo spazio impiantistico per gli interni delle camere, con un guadagno di spazio rispetto al montaggio di tipo (A). Il montaggio di tipo (D) potrebbe essere utilizzato come separazione tra camera e relativo bagno, mentre il montaggio di tipo (C) potrebbe essere utilizzato in casi di necessità di elevato potere fonoisolante, con un doppio strato di materiale in intercapedine. In questo caso l'inserimento degli impianti dovrebbe avvenire necessariamente con asportazione di parte della fibra di poliestere.

In figura 5.22 sono riportati i risultati per il prodotto a tre strati, nelle quattro differenti configurazioni. Dai risultati emerge un buon funzionamento in generale del prodotto. In particolare il montaggio di tipo (A), grazie anche ad una maggiore profondità di

parete, permette di guadagnare 1 dB sull'indice di potere fonoisolante, poiché isola molto bene le frequenze medie ed alte. Ovviamente il completo riempimento dell'intercapedine fornisce il risultato migliore, con  $R_w = 63$  dB. Inoltre non è da trascurare il montaggio di tipo (D) che, nonostante non sia consigliabile come separazione tra unità immobiliari (le perdite per trasmissione laterale delle strutture in cartongesso sono notevoli), permette di ottenere  $R_w = 54$  dB con uno spessore di soli 10 cm.

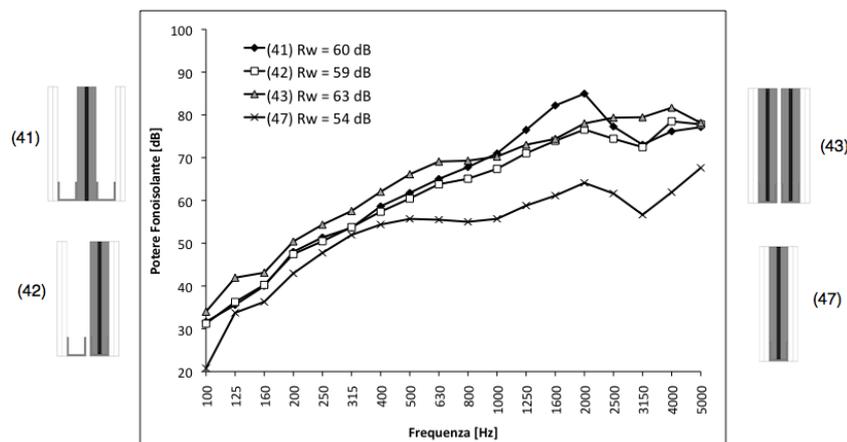


Figura 5.22: applicazione del materiale tri-strato alle strutture di base A, B, C e D.

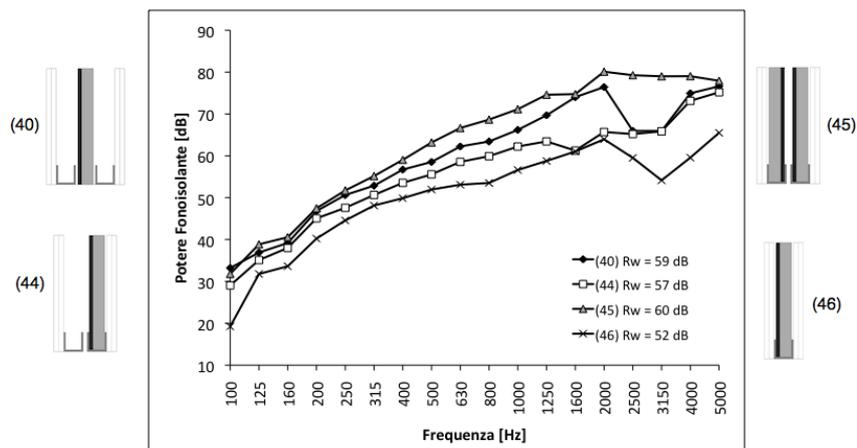


Figura 5.23: applicazione del materiale a due strati alle strutture di base (A) spessore 20 cm, (B) spessore 16 cm, (C) spessore 16 cm, (D) spessore 10 cm.

In figura 5.23 sono riportati i risultati ottenuti per l'altro prodotto (gomma pressata di spessore 10 mm e strato di materiale fibroso di spessore 30 mm), misurato nelle stesse configurazioni del precedente. Rispetto al materiale composto di tre strati, l'accoppiato bistrato ha fornito risultati buoni, ma inferiori per tutte le configurazioni testate, a causa della minor quantità di prodotto fibroso e della minore densità dello stesso. Sono da segnalare alcune peculiarità per quanto riguarda il montaggio dei pannelli: nel montaggio di tipo (A) si è reso necessario avvitare il prodotto al telaio, in quanto il pannello non risulta essere autoportante in un'intercapedine di larghezza 5 cm; nei montaggi di tipo

(B, C, D) l'applicazione del prodotto è invece molto agevole. Per quanto riguarda invece il montaggio del prodotto precedente, esso è risultato molto agevole in configurazione (A), mentre qualche difficoltà si è riscontrata nell'inserimento del pannello dentro l'intelaiatura (montaggi B, C, D), a causa della conformazione del montante a C.

### Influenza degli impianti elettrici (pareti con materiale bistrato)

Il materiale ottenuto tramite l'accoppiaggio di uno strato di fibra di poliestere e di uno strato in gomma pressata è stato inserito in una struttura simile a quella della parete 40, ma con intercapedine di larghezza inferiore, in modo da favorirne l'alloggiamento; la parete 48, così ottenuta, è stata utilizzata per valutare l'influenza degli impianti elettrici sul potere fonoisolante. Sono stati realizzati dei fori, in una disposizione tipica per camere da letto in strutture alberghiere, secondo lo schema di figura 5.24. Inizialmente i fori sono stati praticati sul solo lato della struttura rivolto verso l'ambiente emittente (parete 49); successivamente anche il lato della parete sull'ambiente ricevente è stato forato con la stessa metodologia (parete 50). In particolare la disposizione delle scatole elettriche è speculare, per cui le terne di scatole elettriche sono state disposte combacianti, mentre le scatole di derivazione ad altezza soffitto sono state posizionate in entrambi i casi sul lato sinistro della parete. In figura 5.25 sono riportati i risultati relativi alle pareti 48, 49 e 50.

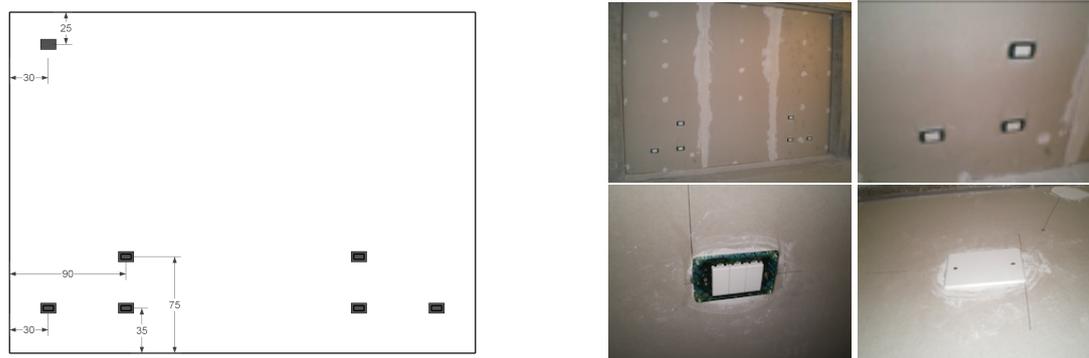


Figura 5.24: schema del posizionamento delle scatole elettriche e alcune immagini della posa.

La progressiva foratura comporta una perdita di isolamento, omogeneamente distribuita sulla porzione di spettro tra 125 Hz e 1250 Hz. Alle alte frequenze l'isolamento sembra non risentire della presenza degli impianti. L'indice di valutazione perde globalmente 3 dB, passando da  $R_w = 57$  dB a  $R_w = 54$  dB.

### Influenza dello spessore dello strato di gomma sull'isolamento del materiale in tre strati (fibra di poliestere, gomma pressata, fibra di poliestere)

Al fine di ridurre i costi di prodotto e migliorare la facilità di posa, si è cercato di ridurre lo spessore di gomma per il prodotto in tre strati, senza però inficiare le prestazioni acustiche e meccaniche. L'allestimento scelto per il test è quello in cui il materiale viene inserito nello spazio compreso tra le due strutture metalliche da cartongesso (montaggio

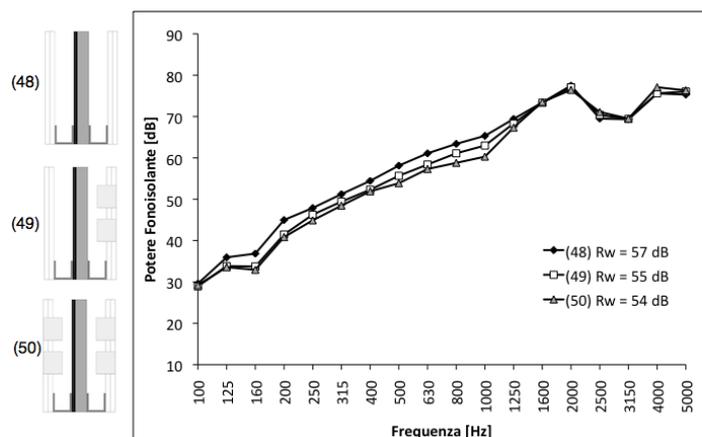


Figura 5.25: influenza del montaggio di scatole elettriche su un solo lato e su due lati (materiale bistrato).

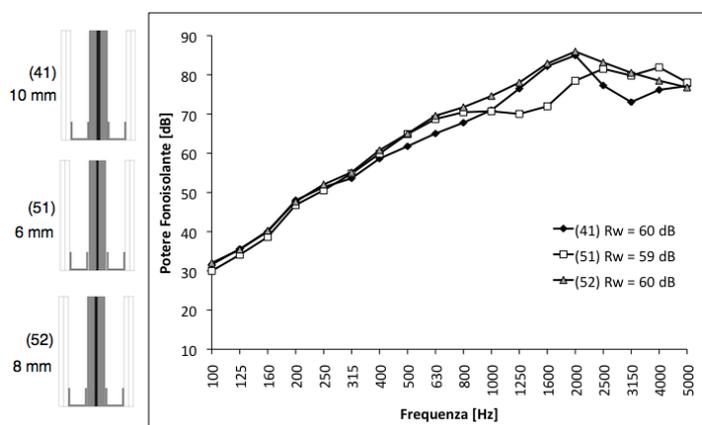


Figura 5.26: differenti spessori di gomma pressata all'interno del prodotto in tre strati (fibra di poliestere, gomma pressata, fibra di poliestere).

di tipo A). In figura 5.26 è riportato il confronto tra le misure ottenute per variazione dello spessore della gomma da 6, 8 e 10 mm.

I risultati mettono in evidenza una differenza di comportamento piuttosto marcata alle frequenze medie ed alte: il prodotto di spessore 6 mm fornisce un maggiore isolamento nella parte centrale dello spettro (400 Hz - 1000 Hz), mentre il prodotto di spessore 10 mm sembrerebbe migliore a frequenze maggiori (1000 Hz - 2000 Hz), il prodotto di spessore 8 mm ha fornito le prestazioni migliori sull'intero spettro. In termini di  $R_w$  i prodotti da 8 mm e 10 mm hanno fornito un risultato di 60 dB, mentre il prodotto da 6 mm 59 dB. Appare molto particolare il profilo spettrale relativo al prodotto accoppiato con lo strato di gomma da 8 mm, che sembra ricalcare fedelmente gli spettri degli altri due prodotti, negli intervalli di frequenze dove essi sono migliori. Sembra quindi che l'ottimizzazione delle prestazioni in relazione al costo si raggiunga con il prodotto contenente gomma pressata di spessore 8 mm. Per approfondire questa tematica sono state eseguite alcune misure di compressione su provini in gomma dei tre spessori, per valutarne le caratteristiche elastiche e poterle correlare alle differenze ottenute nei test

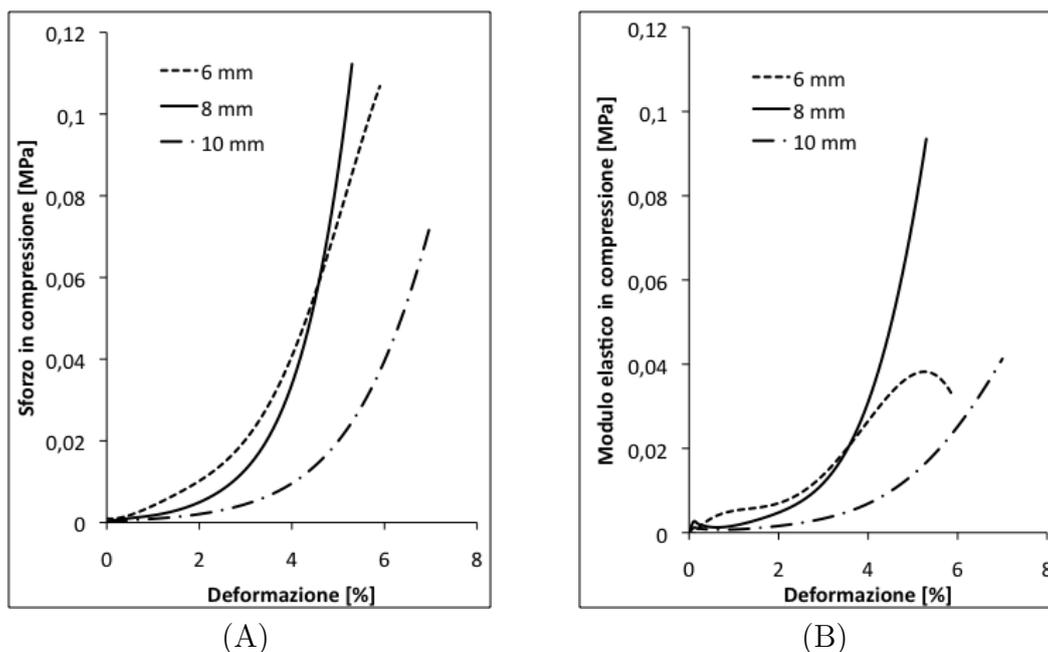


Figura 5.27: caratteristiche elastiche del materiale in gomma pressata: (A) curva carico-deformazione; (B) modulo elastico in compressione in funzione del grado di deformazione del campione.

di isolamento acustico. La figura 5.27 contiene i risultati delle prove di compressione (sforzo-deformazione) e variazione del modulo elastico di compressione in funzione del grado di deformazione. Dai risultati ottenuti sembra che i prodotti in gomma pressata di spessore 8 mm e 10 mm presentino un comportamento simile, con valori differenti a causa dei diversi spessori e, probabilmente, della differenza di densità. Infatti, mentre i campioni in gomma da 8 mm presentano una densità di 780 - 810 kg/m<sup>3</sup>, quelli da 10 mm hanno densità di 660 - 690 kg/m<sup>3</sup>. Il pannello di gomma da 6 mm, che risulta al tatto molto più flessibile rispetto agli altri due, presenta effettivamente un comportamento diverso, sia per quanto riguarda la forma della curva di carico, sia nel modulo elastico, che sembra assestarsi dopo una deformazione di 5%.

### Influenza degli impianti elettrici (pareti con materiale in triplo strato)

Il presente paragrafo contiene alcune considerazioni sul possibile vantaggio di un prodotto sandwich contenente uno strato di gomma pressata tra due strati di materiale fibroso in poliestere di riciclo, nell'impiego in opera. In particolare si vuole verificare se lo strato di gomma si comporti da barriera nei confronti del rumore, apportando miglioramenti significativi, rispetto alla presenza del solo materiale fibroso. In figura 5.28 sono riportati i risultati delle misure effettuate sulle pareti 55 - 59, composte di un telaio singolo di larghezza 5 cm, doppia lastra di cartongesso su ambo i lati e intercapedine riempita con il prodotto composto da due strati di fibra di poliestere da 2 cm e densità 60 kg/m<sup>3</sup> contenenti uno strato di gomma pressata da 8 mm (pareti 55 e 56) e sulle pareti contenenti esclusivamente fibra di poliestere di densità 60 kg/m<sup>3</sup> e spessore 4 cm (pareti 57 e 58); gli impianti elettrici sono stati installati solo sul lato della parete rivolto verso l'ambiente

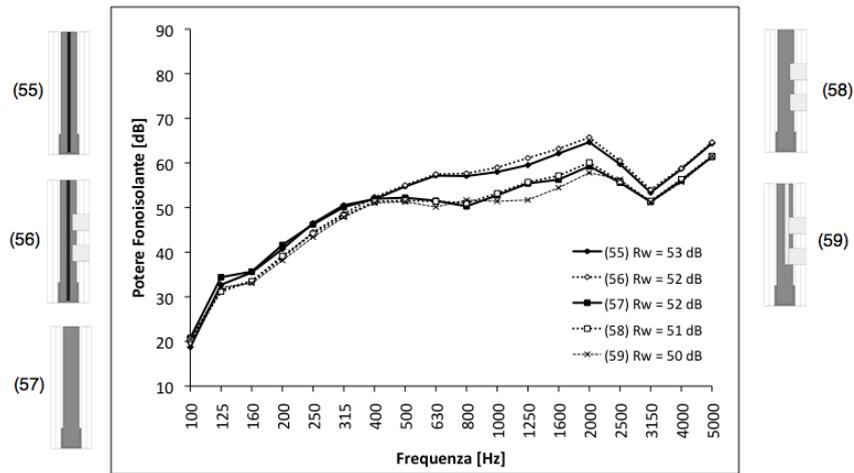


Figura 5.28: potere fonoisolante di pareti in cartongesso contenenti il prodotto in tre strati (poliestere, gomma pressata, poliestere) oppure sola fibra: perdite di isolamento dovute all'installazione degli impianti elettrici.

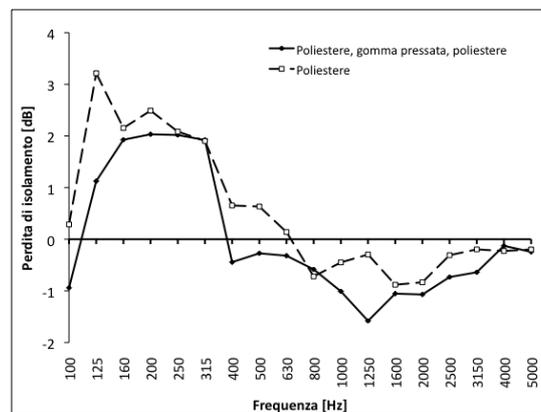


Figura 5.29: perdita di potere fonoisolante in frequenza dovuta all'inserimento degli impianti elettrici in una parete in cartongesso di spessore totale 10 cm contenente il prodotto sperimentale a tre strati (linea continua) e fibra di poliestere di densità  $60 \text{ kg/m}^3$  e spessore 4 cm (linea tratteggiata).

emittente (7 scatole elettriche posizionate come illustrato in figura 5.24, pareti 56 e 58). In entrambe le pareti durante la foratura è stata asportata un'eguale quantità di materiale fibroso all'interno, a simulare una reale installazione. Nella parete 59, rispetto alla 58, sono stati inseriti i condotti in plastica per il passaggio dei cavi elettrici, asportando un volume equivalente di fibra di poliestere. Dai risultati sembra che, nonostante l'indice di potere fonoisolante aumenti di solo 1 dB con l'utilizzo del prodotto in tre strati, il contributo della gomma è significativo a partire da 400 Hz. Le perdite di isolamento dovute all'installazione delle sole scatole elettriche sono localizzate per lo più alle basse frequenze, fino a 400 Hz. Per frequenze superiori a 400 Hz il comportamento della parete resta per lo più invariato. Installando invece anche i tubi in plastica (parete 59) ed asportando quindi anche parte della fibra in poliestere, le perdite di isolamento che ne derivano non sono trascurabili e sono localizzate proprio tra 1000 Hz e 2000 Hz.

In figura 5.29 è riportata la perdita di isolamento in frequenza dovuta all'inserimento delle scatole elettriche per le due soluzioni contenenti il prodotto in poliestere e gomma ed il solo prodotto a base fibra. L'entità della perdita di isolamento sembra in realtà analoga per i due sistemi, anche se le differenze di prestazione potrebbero essere accentuate in opera, dove sono presenti altre perdite dovute a meccanismi di trasmissione laterale. Si riportano quindi in figura 5.30 i risultati delle prove eseguite con l'inserimento degli impianti elettrici sulla parete 52 secondo il consueto schema progettuale.

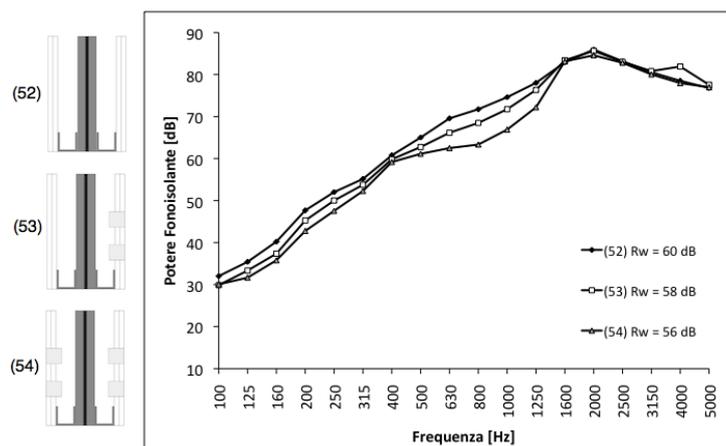


Figura 5.30: perdite di potere fonoisolante di parete in cartongesso contenente il materiale composto di tre strati (poliestere, gomma pressata, poliestere), in seguito all'installazione degli impianti elettrici.

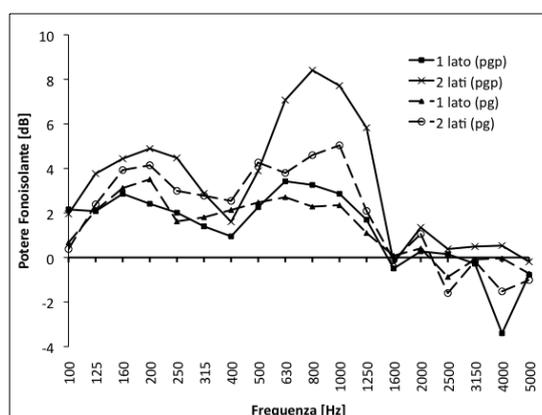


Figura 5.31: perdita di potere fonoisolante in frequenza dovuta all'inserimento degli impianti elettrici in una parete in cartongesso di spessore totale 20 cm contenente il prodotto sperimentale composto di tre strati (linea continua) oppure di due strati (linea tratteggiata), con installazioni su un solo lato della parete o su entrambi i lati.

In figura 5.31 sono riportati invece i valori della perdita di potere fonoisolante in frequenza dei prodotti a tre (linea continua) ed a due (linea tratteggiata) strati, applicando le scatole elettriche prima su di un solo lato della struttura e poi su entrambi i lati. La stratigrafia delle pareti è quella che utilizza il materiale inserito tra le due strutture da

50 mm. Si nota subito che le perdite si collocano principalmente alle frequenze medie, arrivando addirittura a circa 8 dB sulla banda di 800 Hz. Dai grafici si possono trarre alcune considerazioni. Con l'inserimento degli impianti, la parete contenente il prodotto a due strati perde 3 dB, mentre quella con il prodotto a tre strati perde in totale 4 dB sull'indice di potere fonoisolante. A livello di confronto spettrale, dopo la foratura del primo lato, i due prodotti subiscono perdite di eguale entità, mentre dopo la foratura del secondo lato la parete con il prodotto in tre strati subisce perdite leggermente superiori alle basse frequenze e decisamente superiori alle medie frequenze. Nonostante ciò la prestazione globale della parete è superiore, in quanto l'indice di potere fonoisolante è superiore di 2 - 3 dB in tutti i casi.

## 5.2 Applicazione dei materiali riciclati in gomma e fibra di poliestere in rifodera di strutture in muratura

Lo studio dell'isolamento del rumore aereo per pareti in muratura rifoderate è stato affrontato con l'obiettivo di sviluppare un prodotto, composto di materiali provenienti da riciclo, da utilizzarsi principalmente nell'ambito delle ristrutturazioni di edifici esistenti. Per questo è stata installata una parete in mattoni forati da 12 cm e su di essa sono stati applicati alcuni prodotti, per lo più composti di pannelli di gomma pressata e di fibre di poliestere riciclate, anche variando la densità dei componenti. Sono state condotte in totale ventidue prove, indagando anche il comportamento della parete in presenza ed in assenza dell'intonaco. In tabella 5.3 sono riportati in dettaglio tutti gli allestimenti eseguiti ed i principali risultati.

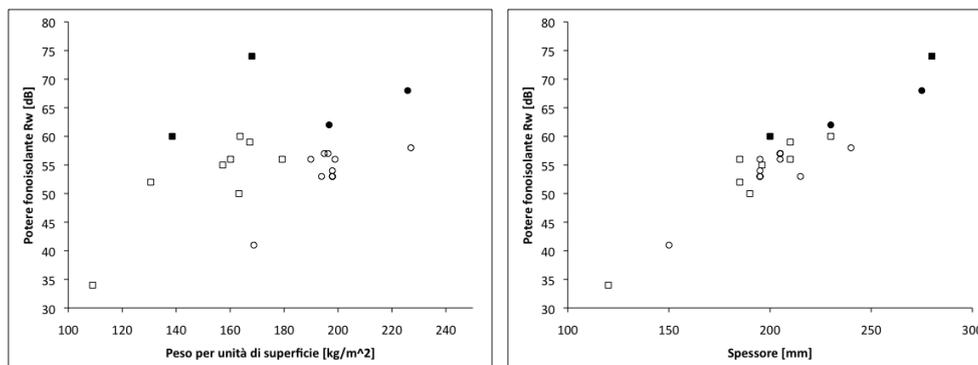


Figura 5.32: indice di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$  in funzione del peso per unità di superficie e dello spessore delle pareti, relativamente ai campioni misurati. (■): parete non intonacata, materiali in rifodera con struttura, (□): parete non intonacata, materiali applicati in rifodera senza struttura, (●): parete intonacata, materiali in rifodera con struttura, (○): parete intonacata, materiali in rifodera senza struttura.

Valutando le prestazioni delle pareti, in termini di  $R_w$ , in funzione del peso per unità di superficie e dello spessore di parete (figura 5.32), sembra che la presenza o l'assenza dell'intonaco non sia un fattore determinante e che l'applicazione di questi materiali consenta

<i>N. parete</i>	<i>Composizione</i>	<i>Spessore [mm]</i>	<i>R<sub>w</sub> [dB]</i>	<i>C [dB]</i>	<i>C<sub>tr</sub> [dB]</i>
1	for12	120	34	-1	-2
2	cg(x2), str50[fp2060, gp8ad, fp2060], for120, str50[fp2060, gp8ad, fp2060],cg(x2)	280	74	-6	-14
3	cg(x2), str50[fp2060, gp8ad, fp2060], for120	200	60	-3	-9
4	cg(x2), gp10ad, for120, gp10ad, cg(x2)	190	50	-2	-6
5	cg(x2), gp20ad, for120, gp20ad, cg(x2)	210	56	-2	-8
6	cg(x1), gp20ad, for120, gp20ad, cg(x1)	185	56	-3	-8
7	cg(x2), gp20bd, for120, gp20bd, cg(x2)	210	59	-3	-8
8	cg(x1), fp2060, for120, fp2060, cg(x1)	185	52	-3	-9
9	cg(x1), gp10ad, cg(x1), fp2060, for120, fp2060, cg(x1), gp10ad, cg(x1)	230	60	-4	-12
10	cg(x2), gg4, pe5, gg4, for120, gg4, pe5, gg4, cg(x2)	196	55	-2	-7
11	int15, for120, int15	150	41	-1	-3
12	cg(x2), str50[fp2060, gp8ad, fp2060], int15, for120, int15	230	62	-4	-12
13	cg(x2), str50[fp2060, gp8ad, fp2060], int15, for120, int15, gp20bd, cg(x2)	275	68	-5	-13
14	int15, for120, int15, gp20bd, cg(x2)	195	54	-2	-7
15	cg(x2), gp20bd, int15, for120, int15, gp20bd, cg(x2)	240	58	-4	-12
16	cg(x2), gp20bd, int15, for120, int15	195	53	-3	-8
17	cg(x2), fp20100, int15, for120, int15	195	56	-3	-9
18	cg(x2), gp20bd, ps2080, int15, for120, int15	215	53	-3	-6
19	cg(x2), gp20bd, fp10100, int15, for120, int15	205	56	-2	-7
20	cg(x2), gp10bd, fp10100, int15, for120, int15	195	53	-2	-6
21	cg(x2), gp10bd, fp20100, int15, for120, int15	205	57	-2	-7
22	cg(x2), gp8bd, fp20100, int15, for120, int15	205	57	-3	-8

Tabella 5.3: pareti misurate e principali risultati; cg = strato di cartongesso, strXX = struttura metallica da cartongesso (XX è la dimensione in mm, [ ] identifica il materiale contenuto nell'intercapedine), gpX = pannello in gomma riciclata pressata (X indica lo spessore in mm, ad indica alta densità, bd indica bassa densità), ggX = rotolo di gomma granulata (X indica lo spessore in mm), fpXXYY = pannello di fibra di poliestere (XX identifica lo spessore in mm e YY la densità in kg/m<sup>3</sup>), peX = strato di polietilene (X identifica lo spessore in mm), psXXYY = pannello di polistirene (XX identifica lo spessore in mm, YY identifica la classe di resistenza a compressione), intX = intonaco (X identifica lo spessore in mm), forX = parete in mattoni forati (X identifica lo spessore in mm).

di raggiungere, con opportune stratigrafie, valori medi di  $R_w$  pari a 55 dB (in laboratorio). Inoltre, a prescindere dalla tecnica di intervento (rifodera con o senza struttura) sembra che l'indice di potere fonoisolante dipenda linearmente in prima approssimazione dallo spessore della parete. Di seguito si propone una semplice analisi delle misure eseguite, raggruppate per tematica di studio.

### Analisi delle strutture di base rivestite con struttura metallica

La parete di base è stata allestita senza gli strati di intonaco e con la malta applicata tra i giunti orizzontali e verticali dei mattoni (parete 1). Successivamente sono stati applicati due rivestimenti (uno su ogni lato) con struttura metallica da cartongesso contenenti il prodotto accoppiato in tre strati già misurato all'interno di pareti leggere<sup>1</sup> (parete 2); infine è stata rimossa una delle due rifodere (parete 3). In figura 5.33 queste pareti sono state messe a confronto con la parete di base intonacata allestita successivamente (parete 11), con la parete intonacata dotata di una rifodera su di un lato analoga alle precedenti (parete 12) e con la parete intonacata dotata di una rifodera con struttura su di un lato e sull'altro una rifodera senza struttura, effettuata applicando uno strato di gomma pressata a bassa densità (circa 500 kg/m<sup>3</sup>) e rivestendo con un doppio strato di cartongesso (parete 13).

<sup>1</sup>fibra di poliestere di spessore 20 mm densità 60 kg/m<sup>3</sup>, gomma pressata di spessore 8 mm e fibra di poliestere di spessore 20 mm densità 60 kg/m<sup>3</sup>.

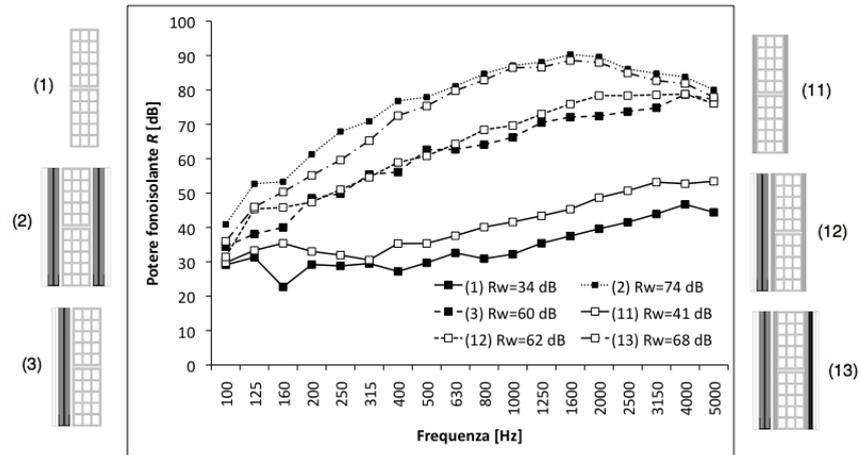


Figura 5.33: rifodera con struttura da cartongesso su parete in mattoni forati da 12 cm: confronto con le strutture di base.

Per la parete di base si è ottenuto un  $R_w$  pari a 34 dB e l'aggiunta dell'intonaco ha permesso di aumentare di 7 dB il risultato sull'indice di valutazione, ottenendo  $R_w = 41$  dB per la parete 2. Sullo spettro l'aggiunta dell'intonaco su ambo i lati della parete ha l'effetto di traslare la curva del potere fonoisolante in frequenza verso valori maggiori, mantenendo costante la pendenza del tratto rettilineo in cui vale la legge di massa. L'aggiunta di una sola rifodera alla parete ha consentito di ottenere valori elevati di  $R_w$ , raggiungendo 60-62 dB, per gli allestimenti in assenza e presenza di intonaco; il miglioramento dovuto all'introduzione dell'intonaco tende a ridursi su pareti dotate di elevato potere fonoisolante e, in questo particolare esempio, l'elevata prestazione acustica della parete è da attribuirsi principalmente alla presenza della rifodera con struttura. Aggiungendo una ulteriore rifodera con struttura e materiale accoppiato in intercapedine il potere fonoisolante raggiunge valori molto alti su tutto lo spettro e  $R_w = 74$  dB (parete 3); anche aggiungendo una rifodera applicata senza struttura contenente un materiale in gomma pressata a bassa densità di spessore 20 mm (parete 13) si ottiene un buon isolamento ( $R_w = 68$  dB). Tra i due allestimenti, la parete 3 garantisce maggiore isolamento alle basse frequenze, grazie alla presenza di più materiale fonoassorbente in intercapedine, mentre alle alte frequenze il comportamento è analogo a quello della parete 13.

### Rivestimenti senza struttura su due lati

In figura 5.34 sono riportati i risultati ottenuti su alcuni allestimenti in cui alla parete di base non intonacata sono stati applicati rivestimenti in cartongesso (doppia lastra sui due lati) accoppiati a materiali in gomma pressata di diversa densità. In particolare nella parete 4 sono stati aggiunti due rivestimenti con gomma pressata ad alta densità (circa  $800 \text{ kg/m}^3$ ) di spessore 10 mm e due strati di cartongesso di spessore 12,5 mm ciascuno. La parete 5 è analoga alla precedente, ma con strato di gomma di spessore 20 mm. Si nota come l'applicazione di questi materiali aumenti linearmente il potere fonoisolante della parete alle frequenze medie ed alte e, all'aumentare dello spessore del materiale, la curva trasli verso valori più positivi. Rispetto alla parete di base, il valore di  $R_w$  è cresciuto da 34

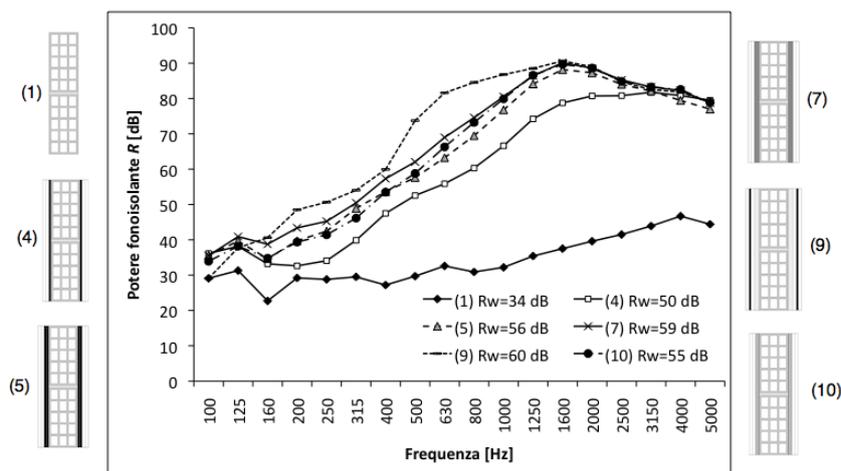


Figura 5.34: rivestimento della parete di base non intonacata su due lati mediante materiali in gomma.

dB a 50 dB (parete 4) e 56 dB (parete 5); il comportamento alle basse frequenze condiziona fortemente le prestazioni globali per questo tipo di applicazioni. La parete 7 è analoga alla 5, ma lo strato in gomma è di minore densità (circa  $500 \text{ kg/m}^3$ ) e le prestazioni crescono notevolmente; in particolare alla basse frequenze il miglioramento è sensibile e contribuisce ad innalzare il valore di  $R_w$  di 3 dB raggiungendo 59 dB. Sembra quindi che la densità del materiale accoppiato sia un fattore determinante in questo tipo di applicazioni ed il comportamento elastico dello strato disaccoppiante influisca notevolmente sul risultato della rifodera. La parete 9 è dotata di una stratigrafia più complessa, in quanto su ogni lato sono stati realizzati due rivestimenti composti da uno strato di materiale fibroso in poliestere riciclato ad alta densità ( $\rho = 100 \text{ kg/m}^2$ ) e di spessore 20 mm, uno strato di cartongesso, uno strato di gomma pressata ad alta densità da 10 mm ed un ulteriore strato di cartongesso. Per questa parete si nota che l'effetto combinato dell'assorbimento del materiale fibroso e dell'apporto di massa dello strato in gomma produce un ottimo risultato sia in frequenza, sia in termini di indice di valutazione  $R_w$ , che raggiunge 60 dB. La parete 10 contiene invece un materiale accoppiato sperimentale formato da due strati di gomma granulare da 4 mm con interposto uno strato di polietilene da 5 mm: per tale parete i risultati sono molto simili alla 5, senza un grosso contributo dei diversi strati.

### Rivestimenti senza struttura su un solo lato

L'ultima parte della sperimentazione è stata condotta applicando i materiali in rifodera su un solo lato della parete, per ottimizzare la scelta del prodotto migliore limitando i costi di applicazione (in termini di quantitativo utilizzato). Sono stati misurati quindi sistemi semplici composti da un singolo materiale o al più da due materiali accoppiati, tenendo in considerazione anche le necessità di isolamento termico della struttura nel complesso. La chiusura del rivestimento è stata effettuata mediante cartongesso in doppio strato, per limitare i problemi di fessurazione delle lastre esterne.

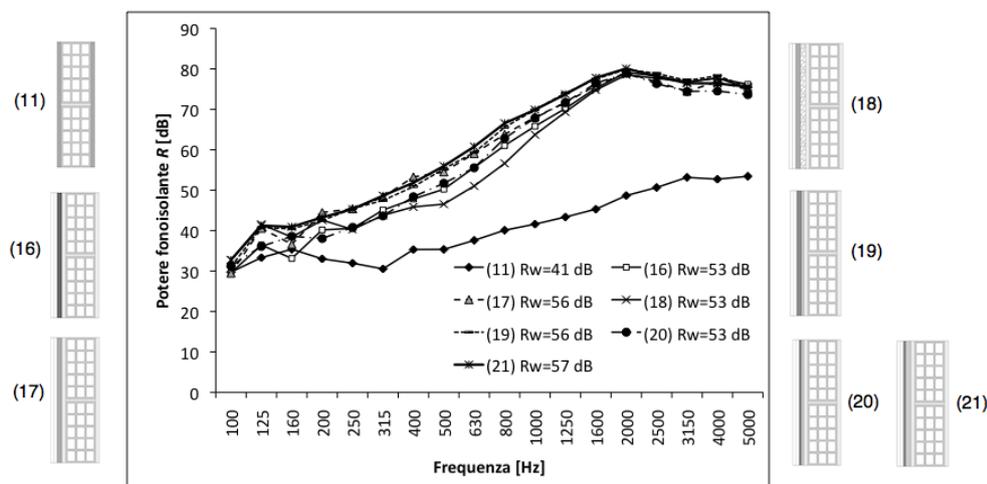


Figura 5.35: rivestimento della parete di base intonacata su un solo lato mediante materiali accoppiati.

I valori di isolamento ottenuti variando i materiali di rivestimento sono molto simili e l'indice di valutazione varia tra 53 e 57 dB per tutte le configurazioni. Le prime due pareti contengono un strato di spessore 20 mm rispettivamente di gomma riciclata pressata di densità circa  $500 \text{ kg/m}^3$  (parete 16) e di fibra di poliestere di densità  $100 \text{ kg/m}^3$  (parete 17). Ancora una volta il prodotto fibroso sembra funzionare meglio alle frequenze basse, per cui la prestazione globale ne beneficia. Nella parete 18 è stato utilizzato come materiale di rivestimento tra il cartongesso e la muratura uno strato di polistirene espanso da 20 mm abbinato ad uno strato in gomma di spessore 20 mm e densità  $500 \text{ kg/m}^3$ : dai risultati sembra che la presenza dello strato di polistirene sia ininfluente ai fini acustici, potrebbe invece dare un contributo all'isolamento termico della partizione. Una riprova dell'importanza dell'inserimento di un materiale fibroso all'interno delle intercapedini nelle partizioni verticali si può avere dal confronto tra le misure sulle pareti 20 e 21, in cui sono stati utilizzati i seguenti materiali resilienti tra il cartongesso e la muratura: uno strato di gomma pressata di densità circa  $500 \text{ kg/m}^3$  e uno di fibra di poliestere di spessore 10 mm e densità  $100 \text{ kg/m}^3$  per la parete 20, lo stesso spessore di gomma ed uno spessore doppio di materiale fibroso per la parete 21. Raddoppiando lo strato di materiale fibroso l'indice di valutazione è aumentato da 53 a 57 dB, grazie al maggiore contributo alle medie e basse frequenze. Nella progettazione di nuovi materiali per applicazioni di rifoderia di pareti in muratura, quindi, è importante prevedere l'utilizzo di almeno una parte di materiale fibroso assorbente nel sistema; d'altronde uno strato in gomma, più rigido e pesante, può dare dei vantaggi in termini di stabilità della superficie esposta del cartongesso, poiché funge da supporto, ed inoltre aumenta la massa del sistema.

# Capitolo 6

## Conclusioni

Nell'ambito del lavoro di dottorato è stato affrontato lo studio dell'isolamento acustico degli elementi edilizi, approfondendo in particolare le tematiche legate alle prestazioni acustiche di solai in laboratorio, anche mediante l'applicazione di opportuni materiali isolanti, principalmente in gomma granulata e fibre polimeriche provenienti da riciclo. Lo studio è stato possibile grazie alla disponibilità di un laboratorio conforme alle direttive delle norme UNI EN ISO 140, dotato anche di dispositivi per la misura delle caratteristiche meccaniche su piccoli campioni.

Il lavoro di qualificazione degli ambienti di misura, che si è protratto nell'arco del triennio, ha permesso di studiare a fondo la distribuzione dei campi sonori generati nell'ambito delle prove di isolamento degli elementi edilizi ed ha avuto esito positivo. Le camere accoppiate per la misura del potere fonoisolante di elementi verticali sono state qualificate in accordo alle indicazioni delle norme di riferimento, per quanto riguarda l'identificazione dei punti di sorgente sonora; per la scelta delle posizioni di microfono fisse, le metodologie della norma sono state integrate con criteri di posizionamento originali, in quanto le normative stesse non specificano univocamente tutti i criteri di scelta, ma forniscono delle linee guida, come ad esempio la distribuzione spaziale omogenea, la non simmetria e le mutue distanze tra posizioni attigue. L'identificazione stessa del reticolo di punti distribuiti negli spazi disponibili ha richiesto studi preliminari, per massimizzare le posizioni ed i rilievi della pressione sonora. Al termine dello studio sono stati identificati due punti di sorgente sonora in ambiente emittente, sei posizioni di microfono in ambiente emittente e ricevente; si è scelto di eccedere il numero minimo richiesto dalla norma, al fine di campionare la pressione sonora in una porzione maggiore di spazio. I punti selezionati sono ben distribuiti in entrambi gli ambienti e soddisfano i criteri imposti. La verifica del massimo isolamento misurabile è stata condotta su pareti leggere e pesanti; sono stati misurati valori di  $R'_{max}$  molto elevati: 80 dB per le pareti in cartongesso e 82 dB per le pareti pesanti. Inoltre, il tempo di riverberazione degli ambienti è risultato idoneo alle misurazioni, sia in fase di messa a punto del laboratorio che durante l'attività ordinaria. La qualificazione per le prove di isolamento del rumore aereo sui solai è stata più difficoltosa, poiché le due strutture di base sono dotate di caratteristiche di isolamento troppo elevate rispetto ai requisiti suggeriti per il provino. Pertanto la qualificazione non ha dato risultati ottimali, infatti il numero di posizioni di sorgente sonora supera il minimo indicato dalla norma (tre posizioni invece che due) sul solaio in laterocemento,

mentre sul solaio in calcestruzzo i punti selezionati non hanno soddisfatto tutti i criteri imposti, come ad esempio l'omogeneità della distribuzione spaziale in ambiente emittente. Per quanto riguarda il massimo potere fonoisolante dei solai, la procedura adottata per la valutazione, che consiste nel rifoderare il solaio con strati di materiali assorbenti e isolanti, non ha dato i risultati sperati, pertanto sarà necessario applicare metodi differenti. Per quanto riguarda le misure di livello di rumore di calpestio normalizzato, le carenze normative sono state affrontate mediante un'analisi degli scarti dei livelli di rumore rispetto alla media calcolata su molte misurazioni. Nel complesso il metodo ha permesso di ricavare sei posizioni ottimali di generatore di rumore di calpestio e sei di microfono fisso su entrambi i solai. Sono state selezionate posizioni in eccesso rispetto alle indicazioni minime delle norme, per avere un campionamento più rappresentativo dell'intero volume all'interno delle camere.

I due solai nudi del laboratorio sono stati misurati ed analizzati mediante gli strumenti messi a disposizione dalle norme previsionali UNI EN 12354, per verificare la rispondenza ai modelli teorici. Per il solaio in calcestruzzo i livelli di rumore di calpestio normalizzato sono risultati sufficientemente in linea con i livelli di riferimento indicati nella norma UNI EN ISO 717-2, anche se la pendenza della curva è maggiore per il solaio reale, per cui i livelli sono leggermente inferiori alle basse frequenze e superiori alle alte. Tramite il calcolo del fattore di radiazione ed il tempo di riverberazione strutturale si riesce a descrivere in maniera piuttosto precisa il comportamento del solaio in calcestruzzo, poiché tale tipologia strutturale soddisfa sufficientemente le ipotesi alla base delle relazioni contenute nelle norme. Tra le diverse formulazioni del fattore di radiazione sembra che  $\sigma_3$  (per onde libere) e  $\sigma_F$  (per onde forzate) siano quelli che rappresentino più fedelmente l'andamento del livello di rumore normalizzato rilevato. Per quanto riguarda il solaio in laterocemento, le misure hanno messo in luce una significativa differenza di emissione sonora sotto l'azione del generatore di rumore di calpestio. Infatti tale solaio, strutturalmente molto differente dalla piastra armata, produce livelli di rumore molto più elevati, soprattutto tra 800 e 5000 Hz, probabilmente a causa della struttura seriale e della presenza delle pignatte, elementi di alleggerimento strutturale dotate di minore impedenza meccanica. Queste caratteristiche rendono più difficile l'applicazione dei metodi previsionali indicati nelle norme UNI EN 12354. Ad esempio, confrontando il tempo di riverberazione strutturale misurato e calcolato, le discrepanze rilevate sono state notevoli, soprattutto alle frequenze medio basse. Inoltre risulta difficoltosa l'identificazione di un valore plausibile per la massa del solaio, in quanto non è ancora chiaro se possa essere più significativo il dato relativo a porzioni locali di elemento, piuttosto che quello valutato sull'intera superficie (localmente il valore della massa per unità di superficie varia a seconda che ci sia una trave o una pignatta). Per sopperire a queste difficoltà sono state prese in considerazione alcune formule previsionali sviluppate negli anni da diversi enti italiani, derivanti da misure di solai in opera. Delle tre formule analizzate, una in particolare descrive approssimativamente il comportamento del solaio di laboratorio, mentre le altre due descrivono bene il comportamento dei solai in opera. In particolare sembra che, in assenza di trasmissione laterale, il solaio in laterocemento sia libero di vibrare e produca livelli di rumore di calpestio molto elevati: le curve ricavate dalle misure in opera hanno mediamente livelli inferiori, indice che la radiazione effettiva della piastra probabilmente è più bassa con vincoli strutturali diversi dall'appoggio, nonostante le trasmissioni laterali.

L'esperienza maturata nell'ambito di questa indagine sarà messa a frutto per valutare in maniera più approfondita la correlazione tra le misure di laboratorio ed i rilievi in opera, mediante misure ripetute su più solai nudi ed isolati (con gli stessi materiali analizzati in laboratorio). Si cercherà di studiare il comportamento acustico e meccanico del solaio in laterocemento mediante misure sistematiche di accelerazione in corrispondenza delle pignatte e dei travetti, sotto l'azione del generatore di rumore di calpestio e campionando i tempi di riverberazione strutturale, per valutare una possibile correlazione con i metodi di previsione normati.

Lo studio sulla correlazione tra rigidità dinamica e riduzione di rumore di calpestio normalizzato ha messo in luce la necessità di valutare in maniera molto precisa sia i parametri acustici che i parametri statici e dinamici dei materiali isolanti usati come sottofondo per pavimenti galleggianti. In particolare le metodologie di preparazione del campione nelle prove di rigidità dinamica devono essere seguite molto scrupolosamente, perché approssimazioni poco corrette possono generare deviazioni di risultato molto elevate ed in genere sovrastimano le prestazioni dei materiali. La presenza dello strato di gesso tra il campione e la piastra di carico determina uno spostamento della frequenza di risonanza verso valori superiori ed anche la presenza della sigillatura con *petroleum jelly* ai bordi inferiori del campione incrementa la frequenza di risonanza per tutti i materiali testati e non solo quelli porosi a celle chiuse. La variazione media di rigidità dinamica dovuta all'insieme dei due fattori (lo strato in gesso ed il *petroleum jelly*) è stata valutata attorno ai 10-20 MN/m<sup>3</sup>, con forti differenze in base alla natura dei materiali. In valori percentuali, l'ordine di grandezza è del 50%. Anche la comprimibilità ed il cedimento sotto carico hanno un effetto non trascurabile: sul calcolo di  $s'_{max}$  l'influenza media è stata di 2,6±1,8 MN/m<sup>3</sup>. Per i materiali granulari la presenza dello strato in gesso è di notevolissima importanza; infatti nell'applicazione in opera del materiale, le condizioni di carico sotto massetto (gettato in opera) sono analoghe a quelle del campione sottoposto a prova; tuttavia, se tali materiali fossero utilizzati in opera con massetti prefabbricati posati a secco, il valore di rigidità dinamica più corretto dovrebbe essere quello misurato senza lo strato di gesso. In base a queste supposizioni, in futuro verrà intrapresa una campagna di misure volta a verificare se materiali granulari possano risentire delle due differenti condizioni di posa.

Sono state analizzate le formule previsionali disponibili in letteratura per correlare i dati di rigidità dinamica ai valori della riduzione di rumore di calpestio normalizzato su solaio in calcestruzzo armato, confrontando sedici materiali di cui gran parte provenienti da riciclo di gomme granulari ed altri materiali disponibili in commercio. È stata ricavata la frequenza di risonanza del solaio (completo del rivestimento isolante), mediante le formule indicate nelle norme UNI EN 12354-2 e UNI EN 12354-1. La prima fornisce un metodo di calcolo basato sul presupposto che la rigidità del solaio di base non influenzi il comportamento risonante del sistema a pavimento galleggiante, per cui la frequenza di risonanza dell'intero pacchetto dipende solamente dal peso del massetto e dalla rigidità dinamica dello strato resiliente. La seconda, che riguarda l'isolamento del rumore aereo tra gli ambienti, calcola la risonanza del solaio considerando anche la massa del solaio di base, che sta in rapporto di circa 3:1 rispetto a quella del massetto: in queste condizioni l'influenza del solaio di base potrebbe non essere trascurabile ed il sistema potrebbe essere descritto in maniera più precisa con un modello dinamico a più gradi di libertà. Le stime

delle due formule previsionali della frequenza di risonanza  $f_0$  divergono soprattutto per materiali di elevata rigidità dinamica e, viste le difficoltà di misurazione e la possibilità non remota di sopravvalutare i materiali mediante tecniche di misura poco precise, anche la scelta della formula previsionale può essere una fonte significativa di errore.

Una volta calcolati i valori di  $f_0$ , sono state applicate tre formule previsionali per calcolare la riduzione di livello di rumore di calpestio in frequenza  $\Delta L$ : due formule sono indicate dalla norma UNI EN 12354-2 e stimano la riduzione del livello di rumore a partire da  $f_0$ , con un incremento lineare di pendenza 30 e 40 dB/decade. La terza formula si basa sul calcolo della trasmissibilità di un sistema massa-molla ad un grado di libertà e prevede la conoscenza del valore di smorzamento del materiale resiliente; ai fini del calcolo si è cercato di ricavare lo smorzamento a partire dalle misure di rigidità dinamica, tramite il fattore di qualità. Tale metodo di calcolo si è rivelato in parte approssimativo, per cui in futuro sarà necessario stimare  $\zeta$  con tecniche differenti, ad esempio a partire dai tempi di riverberazione strutturale; di conseguenza si potrà rieffettuare l'analisi basata sulla trasmissibilità e comparare nuovamente i risultati. Dallo studio è emerso che per gran parte dei materiali le tre formule interpolano abbastanza bene i dati sperimentali, solo se i valori della rigidità dinamica sono stati misurati correttamente. In particolare sembra che le formule  $30 \log(f/f_0)$  e  $-20 \log(T)$  forniscano una stima abbastanza affidabile dell'indice di valutazione per circa il 50 % dei campioni esaminati. Ai fini della stima dell'indice di valutazione  $\Delta L_w$ , è molto importante che la previsione sia abbastanza attendibile alle basse frequenze. Per i materiali granulari in gomma, ad esempio, nonostante una scarsa approssimazione alle alte frequenze, a causa di una valutazione troppo approssimativa del fattore di smorzamento  $\zeta$ , nella parte inferiore dello spettro la curva teorica basata sulla trasmissibilità risulta molto vicina a quella sperimentale ed il calcolo dell'indice risulta vicino al valore misurato. Tuttavia, la riduzione sembra avere un andamento in frequenza rettilineo con pendenza compresa tra 30 e 40 dB, per cui le altre due formule sembrano fornire valori più attendibili, se valutato l'intero spettro di frequenze. Per i campioni composti almeno in parte da materiale fibroso, la stima delle prestazioni acustiche è risultata verosimile solo valutando il contributo della rigidità dinamica dell'aria contenuta nella porosità aperta: tale contributo è stato calcolato in base allo spessore del materiale, in mancanza di adeguati strumenti di misura. Per il proseguimento di questi studi sarà di fondamentale importanza l'allestimento di un sistema di misura affidabile della resistenza al flusso d'aria dei materiali, da utilizzare per tutti i campioni, sia quelli per cui è stata stimata attraverso calcoli approssimativi, sia quelli per i quali è stata ritenuta trascurabile.

L'analisi dell'isolamento acustico dei sistemi integrati di riduzione di rumore di calpestio e riscaldamento a pavimento ha permesso di studiare stratigrafie complesse applicate al solaio in laterocemento, in condizioni analoghe a quelle effettivamente riscontrate in opera. I prodotti misurati, abbinati a specifici materiali resilienti, hanno consentito di ottenere ottimi valori di riduzione del rumore ed in particolare valori di livello di rumore di calpestio normalizzato  $L_n$  in frequenza relativi ad una specifica stratigrafia, comprendente anche lo strato di alleggerimento, le tubazioni in pressione e le finiture superficiali. Per quanto riguarda le finiture i risultati sono stati molto interessanti, in quanto è emerso che la ceramica influenza poco il meccanismo di trasmissione delle forze dal generatore di rumore al solaio, mentre una finitura flottante lignea, se posata su strato disaccoppiante,

consente di ridurre fortemente il rumore emesso dal solaio nell'ambiente ricevente. Parte delle misure effettuate in questo lavoro sono state utilizzate per confrontare le prestazioni isolanti dei materiali applicati ai due diversi solai. A causa dei differenti valori di livello di rumore di calpestio dei solai nudi in calcestruzzo armato e laterocemento, la valutazione dei materiali applicati alle due strutture può fornire valori globali di riduzione molto differenti. Quindi sembra che, mentre il  $\Delta L$  in frequenza misurato sulla piastra armata di riferimento sia una proprietà attribuibile esclusivamente al materiale, il  $\Delta L_w$  sia un descrittore in parte influenzato dalla struttura alla quale il materiale è applicato. Pertanto ai fini della progettazione acustica è di fondamentale importanza conoscere le grandezze in frequenza, piuttosto che l'indice di valutazione.

È stato studiato l'effetto della maturazione del massetto sulle misure di rumore di calpestio in laboratorio e sono state verificate le indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 140-8. Sembra infatti che i risultati delle misure possano subire variazioni sensibili fino a circa diciotto - ventuno giorni dalla posa, mentre un'attesa superiore sia per lo più superflua. In particolare se l'asciugatura avviene in condizioni climatiche critiche, ad esempio a temperature molto basse, l'influenza dello stadio di maturazione è superiore. Per questo motivo nei mesi invernali (dicembre e gennaio) l'allestimento dei campioni in laboratorio deve essere seguito con molta attenzione e cautela.

È stata affrontata l'analisi del potere fonoisolante in laboratorio di pareti contenenti materiali provenienti da riciclo di gomme granulari e fibre di poliestere. Sono state allestite pareti interamente in cartongesso a struttura singola e doppia; i materiali sono stati poi applicati anche in rifodera di pareti in muratura. Il percorso della sperimentazione ha consentito di scegliere le combinazioni ottimali dei materiali a disposizione, con il fine di sviluppare prodotti con specifici vantaggi commerciali.

I risultati di questo lavoro potranno essere ampliati mediante futuri approfondimenti. In particolare, lo studio della correlazione tra rigidità dinamica e riduzione del rumore di calpestio potrà essere approfondito mediante misure accelerometriche condotte su solai nudi e isolati, per verificare le effettive frequenze di risonanza delle strutture edilizie e tarare la scelta delle formule previsionali; allo stesso scopo, le misure di rigidità dinamica potrebbero essere condotte su grandi campioni allestiti sui solai reali di laboratorio. Inoltre, poiché materiali diversi hanno fornito funzioni di risposta in frequenza molto diverse, si potrà studiare in modo più approfondito la correlazione tra la curva risultante dalle prove di rigidità dinamica e le caratteristiche meccaniche e dinamiche dei materiali. Infine si potrà provare a descrivere il comportamento del solaio isolato con modelli più complessi rispetto al semplice sistema massa-molla-smorzatore (ad esempio considerando più gradi di libertà), poiché in certe condizioni di vincolo il solaio di base potrebbe risultare influente sul modo di vibrare del massetto galleggiante.



# Bibliografia

- [1] Astolfi A., Schiavi A., Geroso S., Corallo M., “L’influenza della trasmissione laterale (indiretta) nella determinazione del livello di rumore di calpestio”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [2] Basso R., *Elementi di meccanica delle vibrazioni*, Librerie Progetto, 2005.
- [3] Beranek L.L., Vér I.L., *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley and Sons, 1997.
- [4] Bettarello F., Fausti P., “Risultati dell’indagine sulle procedure di misura previste dalla norma UNI EN 29052-1 per la determinazione della rigidità dinamica dei materiali resilienti”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [5] Bettarello F., Fausti P., Schiavi A., “On the dynamic stiffness of materials used under floating floors: analysis of the resonant frequency dependence by excitation force amplitude using different measurement techniques”, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, 2-7 September 2007, Madrid, Spain.
- [6] Brosio E., Schiavi A., Geroso S., “Comportamento acustico di solai in laterocemento: considerazioni preliminari su alcuni dati sperimentali”, *Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, marzo 2007.
- [7] Bütikofer R., “New Acoustic Test Procedure for Hard Floor Covering Systems with Soft Underlay”, *Acta Acustica united with Acustica* 96, 2010, 494-504.
- [8] Chung H., “Fourier Series Solutions to the Vibration of Rectangular Lightweight Floor/Ceiling Structures”, *Acta Acustica united with Acustica* 94, 2008, 401-409.
- [9] Cremer L., Heckl M., Petersson B.A.T., *Structure-borne sound*, Springer, 2007.
- [10] Di Bella A., Granzotto N., “Analisi comparativa delle tecniche di miglioramento del potere fonoisolante di partizioni verticali”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [11] Di Bella A., Luison L., Loriggiola F., “Ottimizzazione delle metodologie di qualificazione di camere riverberanti per la valutazione dell’isolamento acustico di elementi edilizi”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.

- [12] Dikavicius V., Miskinis K., “Change of Dynamic Stiffness of Open and Closed Cell Resilient Materials after Compressibility Test”, *Materials Science* 15 (4), 2009, 368-371.
- [13] Fausti P., Bettarello F., “Inter-Comparison of laboratory measurement of dynamic stiffness”, *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, 2-7 September 2007, Madrid, Spain.
- [14] Fausti P., Bettarello F., Cremonini R., “Influenza dello spettro sonoro sulla determinazione dell’indice di valutazione del livello di rumore di calpestio di solai”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [15] Granzotto N., Di Bella A., Rinaldi C., “Considerazioni sul livello di pressione sonora di calpestio”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [16] Guigou-Carter C., Villot M., Kouyoumji J.L., “Analytical and Experimental Study of Wood Floorings”, *Proceedings of Forum Acusticum*, 2005, Budapest, Hungary.
- [17] Hiramitsu A., “Effect of change in impact force on heavy-weight impact sound and impact characteristic of heavy/soft impact sources”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.
- [18] Hopkins C., *Sound Insulation*, Elsevier, 2007.
- [19] Hopkins C., Wilson R., Craik R.J.M., “Dynamic stiffness as an acoustic specification parameter for wall ties used in masonry cavity walls”, *Applied Acoustics* 58, 1999, 51-68.
- [20] Huang S.P., Chen K.T., Lai R.P., “Development of standardized impact sources for laboratory measurement of sound transmission through lightweight walls”, *Applied Acoustics* 58, 1999, 333-349.
- [21] Jeong J.H., Ha Y. H., “Heavy-weight Impact Sound Isolation Performance in In-situ Condition”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.
- [22] Kyoung-Woo K., Gab-Cheol J., Kwan-Seop Y., Jang-yeul S., “Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level”, *Building and Environment* 44, 2009, 1589-1600.
- [23] Lang J., “A round robin on sound insulation in buildings”, *Applied Acoustics* 52 (314), 1997, 225-238.
- [24] Lin T.R., Farag N.H., Pan J., “Evaluation of frequency dependent rubber mount stiffness and damping by impact test”, *Applied Acoustics* 66, 2005, 829-844.
- [25] Luison L., Di Bella A., Loriggiola F., “Analisi comparativa delle prestazioni acustiche di pareti leggere”, *Atti del XXXVII Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 26-28 maggio 2010, Siracusa, Italia.

- [26] Luison L., Di Bella A., Loriggiola F., “Experimental Analysis of the Different Behavior of Materials for Impact Sound Insulation in Buildings in Relation to the Kind of Base Floor: a Comparison Among Laboratory Measurements on a Concrete Slab and on a Hollow Brick and Concrete Bare Floor”, *Proceedings of EAA EuroRegio 2010 1<sup>st</sup> Congress on Sound and Vibration*, 15-18 September 2010, Ljubljana, Slovenia.
- [27] Luison L., Di Bella A., Loriggiola F., “Influence of the Sample Preparation for Dynamic Stiffness tests on the Calculation of Impact Noise Level Attenuation”, *Proceedings of EAA EuroRegio 2010 1<sup>st</sup> Congress on Sound and Vibration*, 15-18 September 2010, Ljubljana, Slovenia.
- [28] Luison L., Di Bella A., Loriggiola F., “Valutazione del tempo di maturazione dei massetti nella determinazione in laboratorio delle prestazioni acustiche di solai”, *Atti del XXXVII Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 26-28 maggio 2010, Siracusa, Italia.
- [29] Maidanik G., “Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Field”, *Journal of Acoustical Society of America* 34 (6), June 1962, 809-826.
- [30] Mak C.M., Jianxin S., “A study on the effect of floor mobility on structure-borne sound power transmission”, *Building and Environment* 38, 2003, 443-455.
- [31] Matsumoto T., Uchida M., Sugaya H., Tachibana H., “Development of multiple drywall with high sound insulation performance”, *Applied Acoustics* 67, 2006, 595-608.
- [32] Morra M., Schiavi A., Tarizzo P., Astolfi A., Bronuzzi F., “Il comportamento acustico e meccanico dei solai in latero-cemento”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [33] Novak R.A., “Radiation from Partially Excited Plates”, *Acta Acustica* 3, 1995, 561-567.
- [34] Panuszka J.R., “The Influence of Stiffness and Boundary Conditions of Thin Rectangular Plates on Radiated Acoustic Power”, *Applied Acoustics*, 46, 1995, 345-362.
- [35] Park B., Park J., Jeon J.Y., “Analysis of Vibration and Impact-Force Characteristics for the Standard Heavy-Weight Impact Source”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.
- [36] Park H., Kim Y., Song G.G., Kim S.W., “Verification of Standard Floor Impact Source by Comparing with Living Impact Source”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.
- [37] Robinson M.P., Clegg J., “Improved Determination of Q-Factor and Resonant Frequency by a Quadratic Curve-Fitting Method”, *IEEE transactions on electromagnetic compatibility* 47 (2), May 2005.

- [38] Rushforth I.M., Horoshenkov K.V., Mirafteb M., Swift M.J., “Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste”, *Applied Acoustics* 66, 2005, 731-749.
- [39] Schiavi A., “Metodo per la stima del livello di rumore di calpestio in opera in presenza di solai interpiano in latero-cemento”, *Convention Nazionale del GAE - L’acustica edilizia in Italia: esperienze e prospettive*, 11-12 marzo 2009, Ferrara, Italia.
- [40] Schiavi A., Alasia F., Pavoni Belli A., Corallo M., Russo F., “Determinazione della rigidità dinamica a lungo periodo”, *neo-EUBIOS* 17, anno VIII, settembre 2006.
- [41] Schiavi A., Di Bella A., Semprini G., Astolfi A., Tarizzo P., Luison L., Barbaresi L., Pontarollo C.M., “Proposal for a reference floor for hollow brick and concrete slabs based on Italian experiences”, *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.
- [42] Schiavi A., Pavoni Belli A., Russo F., Corallo M., “Acoustical and mechanical characterization of an innovative expanded sintered elasticized polystyrene (EPS-E) used as underlayer in floating floors”, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, 2-7 September 2007, Madrid, Spain.
- [43] Schiavi A., Pavoni Belli A., Russo F., Corallo M., “Misura della rigidità dinamica di materiali multistrato e possibilità di previsione dell’isolamento al rumore di calpestio”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [44] Schiavi A., Pavoni Belli A., Russo F., Corallo M., “Rigidità dinamica: alcune riflessioni per la revisione della norma UNI EN ISO 29052-1”, *Atti del XXXVII Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 26-28 maggio 2010, Siracusa, Italia.
- [45] Schiavi A., Russo F., Pavoni Belli A., Corallo M., “La misura in laboratorio della riduzione di rumore di calpestio e cenni sulle metodologie di misura delle proprietà meccaniche dei materiali resilienti”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [46] Secchi S., Cellai G., “La determinazione del livello di rumore da calpestio basata sui livelli di velocità di vibrazione dei solai”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [47] Secchi S., Cellai G., “Influenza delle condizioni di posa in opera sulle prestazioni di pareti in lastre di gesso rivestito”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.

- [48] Semprini G., Barbaresi L., Manzi E., “Analisi dei modelli di calcolo semplificati per la determinazione del livello di rumore di calpestio in opera”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [49] Semprini G., Barbaresi L., “Procedure e indagini sperimentali nella misura del rumore da calpestio in opera”, *Seminario AIA-GAE - Il controllo del rumore di calpestio: progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M. 5-12-97*, Torino, 27 marzo 2007.
- [50] Semprini G., Di Bella A., Schiavi A., Astolfi A., Barbaresi L., Luison L., Tarizzo P., Pontarollo C.M., “Acoustical Behaviour of Bare Floor in Hollow Brick and Concrete (Italian Building Technology)”, *Proceedings of Internoise*, 23-27 August 2010, Lisbon, Portugal.
- [51] Sewell E.C., “Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle”, *Journal of Sound and Vibration* 12 (1), 1970, 21-32.
- [52] Spagnolo R., “Manuale di acustica applicata”, UTET Libreria, 2001.
- [53] Stewart M.A., Craik R.J.M., “Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab”, *Applied Acoustics* 59, 2000, 353-372.
- [54] Sun H.L., Chen H.B., Zhang K., Zhang P.Q., “Research on performance indices of vibration isolation system”, *Applied Acoustics* 69, 789-795.
- [55] Tadeu A., Antonio J., Mateus D., “Sound insulation provided by single and double panel walls - a comparison of analytical solutions versus experimental results”, *Applied Acoustics* 65, 2004, 15-29.
- [56] Tadeu A., Pereira A., Godinho L, Antonio J., “Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions”, *Applied Acoustics* 68, 2007, 17-42.
- [57] Tarizzo P., Schiavi A., Pavoni Belli A., Corallo M., Russo F., “Determinazione dell’isolamento limite della camera di prova del potere fonoisolante dell’I.N.R.I.M. Misure e considerazioni”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [58] Tarizzo P., Schiavi A., “Trasmissioni strutturali del rumore all’interno degli edifici: introduzione alla mobilità”, *Atti del XXXVI Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 10-12 giugno 2009, Torino, Italia.
- [59] UNI EN ISO 140-1:2006 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale”.
- [60] UNI EN ISO 140-3:2006 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Misurazione in laboratorio dell’isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio”.

- [61] UNI EN ISO 140-6:2000 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 6: Misurazione in laboratorio dell’isolamento dal rumore di calpestio di solai”.
- [62] UNI EN ISO 140-7:2000 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 7: Misurazione in opera dell’isolamento dal rumore di calpestio di solai”.
- [63] UNI EN ISO 140-8:1999 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 8: Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato”.
- [64] UNI EN ISO 140-11:2005 “Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 11: Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio leggero normalizzato”.
- [65] UNI EN ISO 354:2003 “Acustica - Misura dell’assorbimento acustico in camera riverberante”.
- [66] UNI EN ISO 717-1:1999 “Acustica - Valutazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea”.
- [67] UNI EN ISO 717-2:1999 “Acustica - Valutazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento del rumore di calpestio”.
- [68] UNI EN 826:1998 “Isolanti termici per edilizia - Determinazione del comportamento a compressione”.
- [69] UNI EN 1606:1999 “Isolanti termici - Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione”.
- [70] UNI EN 12354-1:2002 “Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti”.
- [71] UNI EN 12354-2:2002 “Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento acustico al calpestio tra ambienti”.
- [72] UNI EN 12431:2000 “Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore degli isolanti per pavimenti galleggianti”.
- [73] UNI EN 29052-1:1993 “Acustica - Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali”.
- [74] UNI EN 29053:1993 “Acustica. Materiali per applicazioni acustiche. Determinazione della resistenza al flusso d’aria”.

- [75] Uris A., Bravo J.M., Estéles H., “Experimental Sound Insulation Performance of Single Frame Partitions with the Addition of a Sound-Absorptive Perforated Board”, *Acta Acustica united with Acustica* 94, 2008, 321-325.
- [76] Utley W.A., Mulholland K.A., “The Transmission Loss of Double and Triple Walls”, *Applied Acoustics* 1, 1968, 15-20.
- [77] Vér I.L., “Impact noise isolation of composite floors”, *Journal of Acoustical Society of America* 50 (4), 1970, 1043-1050.
- [78] Yang K.S., Kim K.W., Choi H.J., “Current state of approval floor structure and impact sound insulation performance in laboratory”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.
- [79] Yun Y., Mak C.M., Tang S.K., “A study of the effect of inertia blocks on the stability of the vibratory system and the performance of vibration isolation”, *Applied Acoustics* 68, 2007, 1511-1524.
- [80] Zeitler B, Schoenwald S., Nightingale T., “Parametric study of sound transmission through lightweight floors”, *Proceedings of Internoise 2010*, 13-16 June 2010, Lisbon, Portugal.



*Grazie a tutto lo staff della ditta Isolgomma,  
in particolare Fabio ed Adriano.*

*Grazie al Gruppo di Acustica del Dipartimento di Fisica Tecnica:  
Martina, Nicola, Francesca e Paolo.*

*Grazie a Fiorella, Diego, Cecilia, Tommaso,  
Maria Vittoria, Francesca, Makiko, Marco, Carlo, Antonio  
ed Elena.*

