

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Tesi di Laurea Magistrale Anno Accademico 2025/2026

ISOLAMENTO ACUSTICO DAI RUMORI DI CALPESTIO

Analisi sperimentale di pavimentazioni flottanti a secco leggere

Relatrici

Prof. Arianna Astolfi

Prof. Louena Shtrepi

Relatore esterno

Prof. David Caballol Bartolomé

Candidato

Giorgio Hollò

Lavoro di ricerca sperimentale svolto in collaborazione con la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid
(ETSEM - UPM)

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi indaga l'efficacia dell'isolamento acustico dai rumori di calpestio in sistemi di pavimentazione flottante "a secco", caratterizzati da una ridotta massa superficiale. La ricerca affronta la sfida acustica dei sistemi a bassa inerzia, analizzando come la combinazione di strati resilienti in lana minerale e rivestimenti leggeri (laminati e parquet), posti in appoggio diretto sullo strato resiliente, risponda alle sollecitazioni dinamiche. L'indagine è stata condotta attraverso una campagna sperimentale presso i laboratori dell'ETSAM di Madrid, integrando un'analisi comparativa dei quadri normativi italiano (D.P.C.M. 05/12/1997) e spagnolo (CTE DB-HR).

I risultati sperimentali hanno rivelato prestazioni acustiche inaspettatamente elevate, con indici di miglioramento (ΔL_w) che superano ampiamente le stime teoriche. Il confronto con il modello previsionale della norma ISO 12354-2 ha evidenziato una sistematica inaffidabilità del calcolo per i sistemi leggeri: lo scarto tra i valori misurati e quelli calcolati si attesta tra i 13 e i 18 dB. Tale discrepanza dimostra che il modello "massa-molla" tradizionale, basato sull'ipotesi di corpo rigido, non è applicabile quando la massa superficiale del rivestimento è esigua, poiché intervengono fenomeni di flessibilità e smorzamento del materiale di finitura che il calcolo semplificato ignora.

In conclusione, lo studio attesta l'elevata efficacia dei sistemi a bassa inerzia, evidenziando contestualmente i limiti di applicabilità dell'attuale normativa tecnica. I riscontri emersi impongono una riconsiderazione critica dei modelli previsionali per questa specifica tipologia costruttiva, in quanto l'approccio semplificato vigente non risulta idoneo a descrivere il comportamento vibro-acustico di elementi a massa ridotta.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	xi
INDICE DELLE TABELLE	xv
1 INTRODUZIONE	1
1.1 Influenza del rumore sulla qualità del sonno e delle attività domestiche	1
1.2 Ansia e autocensura legati al timore di disturbare	2
1.3 Il rumore da calpestio: caratteristiche e criticità nei contesti abitativi	2
2 OBIETTIVI	5
2.1 Obiettivi generali	5
2.2 Obiettivi specifici	5
3 METODOLOGIA	7
3.1 Approccio generale e strategia di ricerca	7
3.2 Campione sperimentale e configurazioni analizzate	7
3.3 Caratterizzazione fisico-meccanica e stima previsionale (Punto 1)	8
3.4 Prove acustiche di laboratorio e trattamento dati (Punto 2)	8
3.5 Confronto tra previsioni teoriche e misure sperimentali (Punto 3)	9
3.6 Analisi comparativa dei quadri normativi e delle procedure di calcolo (Punto 4)	9
4 TRASMISSIONE DEL SUONO NEGLI EDIFICI	11
4.1 Il rumore e la soggettività	11
4.2 La trasmissione del suono	11
4.2.1 Trasmissione del suono per via aerea	11
4.2.2 Trasmissione del suono per via strutturale	12
4.2.3 Interazione tra i fenomeni	13
5 DEFINIZIONE E PARAMETRI DI VALUTAZIONE	15
5.1 Definizione e fenomenologia	15
5.2 Parametri acustici e approcci valutativi	15
5.2.1 Elementi notazionali (L , $'$, n , nT , w)	15
5.2.2 Il parametro di Laboratorio (L_n): La Normalizzazione	16
5.2.3 I parametri in opera L'_n e L'_{nT} : Il dualismo normativo	17
5.2.4 Relazione di conversione e impatto percettivo	18
5.3 Schema di sintesi dei descrittori	18

5.4 Distribuzione geografica degli approcci in Europa	19
6 QUADRO NORMATIVO ITALIANO: ISOLAMENTO ACUSTICO E RUMORE DA CALPESTIO	21
6.1 Introduzione.....	21
6.2 Unificazione della normativa a livello nazionale	22
6.3 Limiti e incongruenze del DPCM	24
6.4 Sviluppi successivi	25
7 QUADRO NORMATIVO SPAGNOLO: ISOLAMENTO ACUSTICO E RUMORE DA CALPESTIO .	27
7.1 Contesto normativo preliminare	27
7.2 Unificazione della normativa a livello nazionale	27
7.3 Logica applicativa e criteri prestazionali del DB HR	29
7.4 Limiti del CTE DB-HR	30
7.4.1 Limiti nei criteri di valutazione e nei requisiti normativi	30
7.4.2 Debolezze tecniche e operative	30
8 CONFRONTO TRA LA NORMATIVA ITALIANA E QUELLA SPAGNOLA	33
8.1 Impostazione generale.....	33
8.2 Trattamento dei rumori da impatto.....	33
9 FONDAMENTI DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI DI CALPESTIO	35
9.1 Principi fondamentali dell'isolamento acustico ai rumori di calpestio	35
9.1.1 Dissipazione delle vibrazioni	35
9.1.2 Disaccoppiamento.....	35
9.2 Modellazione teorica delle strategie di isolamento	35
9.2.1 Il Modello basato sulla dissipazione.....	36
9.2.2 Il Modello basato sul disaccoppiamento: Massa-Molla	36
10 STATO DELL'ARTE	39
10.1 Rivestimenti Resilienti.....	40
10.2 Massetti flottanti	42
10.3 Controsoffitti fonoisolanti	43
10.3.1 Controsoffitti sospesi e in aderenza (supportati dal solaio).....	44
10.3.2 Controsoffitti autoportanti (appoggiati ai muri perimetrali)	44
10.4 Pavimentazioni tecniche sopraelevate	45
10.5 Pavimentazioni flottanti (a secco)	46
10.2.1 Contesto applicativo: Il paradosso geografico e il potenziale tecnologico	48

10.6 Tabella riepilogativa	49
11 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E CONFIGURAZIONI	51
11.1 Lane minerali	51
11.1.1 Arena PF (15 – 25 mm)	52
11.1.2 Panel PST (22 mm).....	53
11.2 Il parametro fondamentale: La Rigidità Dinamica (s')	55
11.2.1 Approcci normativi per la determinazione della rigidità dinamica	56
11.2.2 Determinazione della rigidità dinamica	57
11.2.3 Considerazioni	60
11.3 Rivestimenti di finitura	62
11.4 Configurazioni di prova.....	63
12 MODELLI PREVISIONALI SECONDO LA NORMA ISO 12354-2	65
12.1 Stima del miglioramento per frequenza $\Delta L(f)$ (C.1)	66
12.2 Stima del miglioramento globale ΔL_w (C.2)	68
13 PROVE ACUSTICHE DI LABORATORIO	71
13.1 Laboratorio di prova	71
13.2 Strumentazione utilizzata	71
13.3 Posizionamento della strumentazione.....	72
13.3.1 Posizionamento della macchina per impatti	72
13.3.2 Posizionamento del microfono	73
13.3.3 Combinazione delle posizioni e ciclo di misura	74
13.4 Prove effettuate	75
13.5 Trattamento dei dati e criteri di calcolo	76
13.5.1 Misurazione per bande di frequenza.....	76
13.5.2 Correzione per rumore di fondo	76
13.5.3 Combinazione dei valori e media logaritmica	77
13.5.4 Normalizzazione dei risultati	77
13.5.5 Ottenimento dell'indice globale $L_{n,w}$	78
13.5.6 Calcolo dell'indice di miglioramento ΔL_w	78
13.6 Presentazione dei risultati delle prove	79
13.6.1 Solaio grezzo	80
13.6.2 Solaio con materiale isolante e finitura superficiale	81

14 ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI	91
14.1 Comportamento del solaio grezzo.....	91
14.2 Confronto tra diversi materiali isolanti con rivestimento costante	92
14.2.1 Confronto tra isolanti con pavimentazione laminata da 6 mm.....	93
14.2.2 Confronto tra isolanti con pavimentazione laminata da 12 mm.....	94
14.2.3 Confronto tra isolanti con pavimentazione in parquet di abete da 17 mm	95
14.2.4 Analisi trasversale dell'influenza del materiale isolante nelle configurazioni	96
14.2.5 Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di s').....	97
14.3 Confronto tra diversi rivestimenti con isolante costante	98
14.3.1 Confronto tra rivestimenti con isolante Arena PF 15 mm	99
14.3.2 Confronto tra rivestimenti con isolante Arena PF 25 mm	100
14.3.3 Confronto tra rivestimenti con isolante Panel PST 22 mm	101
14.3.4 Analisi trasversale dell'influenza del rivestimento nelle configurazioni.....	102
14.3.5 Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di m')	103
15 CONFRONTO TRA RISULTATI SPERIMENTALI E MODELLI PREVISIONALI.....	105
15.1 Confronto per bande di frequenza $\Delta L(f)$	105
15.2 Confronto degli indici globali ΔL_w	107
16 SIMULAZIONE DI VERIFICA IN OPERA: CONFRONTO TRA L'APPROCCIO ITALIANO E SPAGNOLO	109
16.1 Premessa metodologica e definizione dello scenario	109
16.2 Valutazione numerica	110
16.2.1 Analisi per frequenza	110
16.2.2 Analisi degli indici globali	111
16.3 Implicazioni normative e progettuali	112
17 DISCUSSIONE DEI RISULTATI	113
17.1 Caratterizzazione fisica e stima prestazionale.....	113
17.2 Risultati globali.....	114
17.2.1 Influenza della rigidità dinamica (s')	116
17.2.2 Influenza della massa superficiale (m')	117
17.2.3 Sintesi dell'interazione tra parametri meccanici e prestazioni di isolamento	118
17.3 Analisi critica delle discrepanze con il modello previsionale normativo	120
17.4 Analisi critica del dualismo normativo: approcci e parametri di verifica	121

17.4.1 Divergenze strutturali: approccio generalista vs funzionale	121
17.4.2 Divergenze metriche: l'influenza della volumetria	122
18 DISCUSSIONE DELLE INCERTEZZE E LIMITAZIONI METODOLOGICHE	125
18.1 Incertezza sui dati (Rigidità Dinamica s')	125
18.2 Incertezze e limitazioni delle misure sperimentali	125
18.3 Limitazioni Intrinseche dei Modelli Previsionali	126
19 CONCLUSIONI	127
19.1 Caratterizzazione fisica e stima teorica	127
19.2 Indagine sperimentale e analisi dell'influenza dei parametri	128
19.3 Analisi critica del modello previsionale e proposta metodologica.....	128
19.4 Divergenze normative e implicazioni sulla tutela dell'utente (Confronto Italia-Spagna)	130
19.5 Considerazioni finali sulla scelta della soluzione ottimale	131
20 BIBLIOGRAFIA	133

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Schema di trasmissione del suono per via aerea. Fonte: relaborazione da https://www.enricomanzi.it/blog/rumori_aerei_e_rumori_strutturali.html [Consultato il 27 marzo 2025].	12
Figura 2 - Schema trasmissione del suono per via strutturale. Fonte: rielaborazione da https://www.enricomanzi.it/blog/rumori_aerei_e_rumori_strutturali.html [Consultato il 27 marzo 2025].	12
Figura 3 - Distribuzione geografica degli indici di valutazione del rumore da calpestio in Europa. Elaborazione propria.	19
Figura 4 - Schema grafico rivestimento resiliente. Produzione propria	40
Figura 5 - Relazione tra riduzione al rumore da impatto e frequenza per distinti materiali. Fonte: [7].	41
Figura 6 - Schema grafico massetto flottante. Elaborazione propria.	42
Figura 7 - Schema grafico controsoffitto isolante. Produzione propria.	43
Figura 8 - Schema grafico pavimentazione tecnica sopraelevata. Produzione propria	45
Figura 9 - Schema grafico pavimentazione flottante. Produzione propria	46
Figura 10 - Logo ufficiale del marchio Isover, appartenente al gruppo Saint-Gobain. Fonte: sito ufficiale Isover, www.isover.it , consultato il 3 maggio 2025.	51
Figura 11 - Materassino acustico Arena PF per pavimenti. Fonte: rielaborazione da [35].	52
Figura 12 - Pannello rigido Panel PST per pavimenti flottanti. Fonte: rielaborazione da [36].	54
Figura 13 - Grafico di correlazione tra densità e resistività al flusso d'aria per diverse lane minerali, fornito da Isover.	58
Figura 14 - Grafico comparativo tra le raccomandazioni del CTE e i materiali analizzati	61
Figura 15 - Da sinistra a destra: laminato vinilico Rovere Chiaro (6 mm), laminato vinilico Rovere Amir (12 mm), parquet in abete massiccio (17 mm). Fonte: Obramat.es	63
Figura 16 - Schema delle combinazioni tra rivestimenti e strati elastici.	63
Figura 17 – Grafico miglioramento acustico $\Delta L(f)$. Produzione propria.	68
Figura 18 - A sinistra: macchina per impatti CESVA MI005. Fonte: adattamento da [54]; a destra: fonometro CESVA SC 420. Fonte: cesva.com .	72
Figura 19 - Disposizione e numerazione delle quattro posizioni della macchina per impatti utilizzate nelle prove. Elaborazione propria.	73
Figura 20 - Disposizione e numerazione delle quattro posizioni del microfono utilizzate nelle prove. Elaborazione propria.	74
Figura 21 – Macchina per impatti sul solaio grezzo	80
Figura 22 - Grafico del livello di pressione. Solaio grezzo	80

Figura 23 - Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm	81
Figura 24 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm ...	81
Figura 25 - Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm	82
Figura 26 - Grafico livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm	82
Figura 27 - Solaio con Arena PF - 15 mm + Parquet di abete massiccio	83
Figura 28 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + parquet di abete massiccio	83
Figura 29 - Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 6 mm	84
Figura 30 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato 6 mm ...	84
Figura 31 - Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 12 mm	85
Figura 32 - Grafico livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 12 mm	85
Figura 33 - Solaio con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio	86
Figura 34 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio	86
Figura 35 - Solaio con Panel PST + laminato vinilico 6 mm	87
Figura 36 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + laminato 6 mm	87
Figura 37 - Solaio con Panel PST + laminato vinilico 12 mm	88
Figura 38 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + laminato 12 mm	88
Figura 39 - Solaio con Panel PST + parquet di abete massiccio	89
Figura 40 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + parquet di abete massiccio	89
Figura 41 - Livello L_n del solaio grezzo in funzione della frequenza. Produzione propria.....	91
Figura 42 - Configurazioni raggruppate per rivestimento costante (analisi influenza s').....	92
Figura 43 - Confronto ΔL_n degli isolanti con Laminato 6 mm ($m' = 5.51 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.....	93
Figura 44- Confronto ΔL_n degli isolanti con Laminato 12 mm ($m' = 10.26 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.....	94
Figura 45- Confronto ΔL_n degli isolanti con Parquet Abete 17 mm ($m' = 7,41 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.....	95
Figura 46 - Bande di prestazione ΔL_n per materiale isolante. Produzione propria.....	96
Figura 47 - Configurazioni raggruppate per isolante costante (Analisi influenza m').....	98
Figura 48 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Arena PF 15 mm ($s' = 10.45 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.....	99
Figura 49 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Arena PF 25 mm ($s' = 6,29 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.....	100

Figura 50 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Panel PST 22 mm ($s' = 6.29 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.....	101
Figura 51 - Bande di prestazione ΔL_n per rivestimento di finitura. Produzione propria.	102
Figura 52 - Confronto $\Delta L(f)$: Valori di Laboratorio – Previsioni ISO 12354-2, con curve raggruppate per materiale di finitura. Produzione propria.	106
Figura 53 - Dettaglio delle due configurazioni che hanno fatto registrare rispettivamente il miglioramento massimo e minimo.....	115
Figura 54 - Confronto spettrale e globale tra la combinazione più efficace e quella meno efficace.	116
Figura 55 - Confronto prestazioni in funzione della rigidità dinamica s' : andamento spettrale (s_x) e valori globali ΔL_w (d_x).	117
Figura 56 - Confronto prestazioni in funzione della massa superficiale m' : andamento spettrale (s_x) e valori globali ΔL_w (d_x).	118
Figura 57 - Mappa di interazione tra rigidità dinamica (s'), massa superficiale (m') e miglioramento acustico (ΔL_w).	119

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Matrice dei descrittori acustici.....	19
Tabella 2 - Tabella A D.PC.M. 5/12/1997: Classificazione degli ambienti abitativi	23
Tabella 3 - Tabella B D.PC.M. 5/12/1997: Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici	24
Tabella 4 - Tabella 2.1.2.3 CTE DB HR: Requisiti di isolamento acustico al rumore da impatto tra recinti. Fonte: [14].	29
Tabella 5 – Riassunto stato dell’arte	49
Tabella 6 - Proprietà tecniche dichiarate del pannello ARENA PF, secondo la documentazione tecnica del produttore Isover – Saint-Gobain. Fonte: [59].....	53
Tabella 7 - Proprietà tecniche dichiarate del pannello PANEL PST, secondo la documentazione tecnica del produttore Isover – Saint-Gobain. Fonte: [61].....	54
Tabella 8 - Le 9 configurazioni sperimentali	64
Tabella 9 – Frequenze di risonanza combinazioni. Produzione propria	66
Tabella 10 – Miglioramenti acustici per frequenza. Produzione propria	67
Tabella 11 - Miglioramenti acustici ponderati. Produzione propria	69
Tabella 12 - Schema delle combinazioni tra le posizioni della macchina per impatti e del microfono utilizzate nelle prove	75
Tabella 13 - Livello di pressione sonora da calpestio normalizzato (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo,	80
Tabella 14 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm	81
Tabella 15 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm	82
Tabella 16 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + parquet di abete massiccio	83
Tabella 17 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + laminato 6 mm	84
Tabella 18 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + laminato 12 mm	85
Tabella 19 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio	86
Tabella 20 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Panel PST + laminato 6 mm.....	87
Tabella 21 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d’ottava. Solaio grezzo con Panel PST + laminato 12 mm	88

Tabella 22 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Panel PST + parquet di abete massiccio	89
Tabella 23 - Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di s'). Produzione propria.	97
Tabella 24 - Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di m'). Produzione propria.....	103
Tabella 25 - Scostamenti tra valori misurati e previsti ($\Delta L_{Iso} - \Delta L_{Lab}$)	105
Tabella 26 - Confronto ΔL_w : Previsioni ISO 12354-2 - Valori di Laboratorio. Produzione propria.	107
Tabella 27 - Valori L'_n e L'_{nT} per banda di frequenza. Confronto tra i livelli normalizzati e standardizzati.	111
Tabella 28 - Valori $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$ globali. Confronto tra i livelli normalizzati e standardizzati .	111
Tabella 29 - Miglioramenti acustici ponderati. Produzione propria	114

1 INTRODUZIONE

La casa rappresenta il luogo in cui trascorriamo gran parte della nostra vita quotidiana e, le sue caratteristiche, influenzano significativamente il nostro benessere psicofisico. La qualità degli ambienti interni non si limita solamente agli aspetti visivi o termici, bensì anche il comfort acustico rappresenta un elemento determinante per la percezione dello spazio abitativo. Un ambiente sonoro equilibrato non solo favorisce il riposo e la concentrazione, ma incide anche sulle interazioni sociali e sulle attività svolte al suo interno. Questo fa del comfort acustico un requisito essenziale per la qualità della vita degli occupanti delle abitazioni.

Il rumore tra appartamenti, così come tra zone comuni ed appartamenti, è un problema che può influenzare negativamente la vita quotidiana degli occupanti. Questo tipo di disturbo non si limita solamente alla percezione di suoni indesiderati, ma può avere ripercussioni significative sul benessere psicologico delle persone. Comprendere come un miglior isolamento acustico possa migliorare la qualità della vita permette di valutare non solo i benefici immediati sul comfort quotidiano, bensì anche i vantaggi a lungo termine in termini di serenità e benessere degli abitanti.

1.1 Influenza del rumore sulla qualità del sonno e delle attività domestiche

Uno degli effetti più immediati e tangibili del rumore generato all'interno degli edifici è la sua influenza negativa sul riposo e sulle attività quotidiane. Il sonno è essenziale per il benessere fisico e mentale, e la sua qualità può essere compromessa da rumori esterni come passi, voci o suoni di elettrodomestici che si propagano attraverso gli elementi che circoscrivono l'abitazione. Rumori provenienti dagli appartamenti vicini, così come dalle zone comuni come corridoi e vani scala, possono non solo ridurre la qualità del sonno, bensì ritardare il suo inizio, riducendo così le ore dedicate al riposo. Una riduzione delle ore di sonno, insieme al peggioramento della sua qualità produce effetti negativi come stanchezza, difficoltà nella concentrazione, irritabilità e aumento dello stress. Nel lungo periodo, i disturbi del sonno ripetuti possono favorire l'insorgenza di problemi di salute più gravi, tra cui ipertensione, depressione e ansia. [1]

Oltre a influenzare il riposo notturno, l'inquinamento acustico compromette anche la qualità delle attività diurne. Un ambiente domestico acusticamente confortevole è ideale per rilassarsi, leggere, studiare o lavorare da casa senza disturbi. L'assenza di rumori consente una maggiore concentrazione, aumenta la produttività e contribuisce a ridurre i livelli di stress. Questo aspetto si fa ancora più rilevante nel contesto attuale, dove il telelavoro e

l'apprendimento a distanza sono sempre più diffusi, trasformando la casa in un luogo multifunzionale, che richiede adeguate condizioni di comfort acustico.

L'adozione di misure di isolamento acustico efficaci può ridurre significativamente queste problematiche, migliorando il riposo notturno e le attività diurne. Un ambiente domestico più isolato dai rumori esterni permette di addormentarsi più rapidamente, dormire meglio e svolgere in modo più efficiente le attività sia dentro che fuori della propria abitazione, contribuendo ad un maggiore benessere psicofisico.

1.2 Ansia e autocensura legati al timore di disturbare

Un isolamento acustico insufficiente non solo influisce sui rumori percepiti, bensì determina l'entità dei rumori percepiti dai vicini e prodotti da noi. Sorge quindi un altro aspetto cruciale per il benessere psicologico degli abitanti: la libertà di vivere la propria casa senza l'ansia di disturbare i vicini. In contesti residenziali con insufficiente isolamento acustico, è comune sviluppare una forma di ansia legata alla costante preoccupazione di generare troppo rumore ed infastidire gli altri. Questa situazione può portare a comportamenti di autocensura, come evitare di invitare amici, parlare a bassa voce durante conversazione serali, evitare di ascoltare musica. Tale ansia limita la libertà personale e trasforma la casa in un luogo di tensione anziché di comfort.

La preoccupazione di disturbare i vicini può avere quindi effetti negativi sulla salute mentale delle persone. Implementare soluzioni di isolamento acustico significa quindi liberare le persone da queste preoccupazioni, permettendo loro di vivere la propria casa in modo più autentico e rilassato, senza il timore di essere ascoltati o infastidire i vicini. Questa libertà non solo migliora la qualità della vita, ma riduce anche lo stress e favorisce un maggior benessere mentale.

1.3 Il rumore da calpestio: caratteristiche e criticità nei contesti abitativi

I rumori da calpestio rappresentano una delle principali fonti di disturbo percepite all'interno degli edifici residenziali, in particolare nei contesti condominiali. A differenza di altre tipologie di rumore, il loro carattere impulsivo e improvviso li rende particolarmente fastidiosi per chi li subisce, anche a livelli non elevati di pressione sonora. Passi, spostamento di sedie, caduta accidentale di oggetti: sono tutte sorgenti comuni che, se non adeguatamente controllate, compromettono la qualità del vivere quotidiano.

Nel caso degli edifici di nuova costruzione, è possibile affrontare il problema del rumore da calpestio già in fase progettuale, prevedendo soluzioni efficaci e integrate che garantiscano buone prestazioni di isolamento e che si armonizzino con le scelte architettoniche e distributive, senza vincoli tecnici significativi.

Diversa è invece la situazione negli edifici esistenti. In questi casi, la possibilità di intervenire con soluzioni realmente efficaci dipende in larga parte dal contesto. Se l'intervento di ristrutturazione interessa l'intero fabbricato, è possibile adottare tecnologie anticalpestio direttamente sui solai, tecnicamente valide e sostenibili anche dal punto di vista economico. Tuttavia, quando l'iniziativa parte dal singolo proprietario di un'unità abitativa, le possibilità di intervento risultano molto più limitate, soprattutto per quanto riguarda le soluzioni strutturali applicabili direttamente sul solaio sovrastante.

Per questo motivo, l'isolamento acustico dai rumori da calpestio negli edifici esistenti continua a rappresentare una sfida tecnica rilevante, la cui risoluzione dipende in gran parte dalla possibilità di intervenire in modo coordinato sull'intero edificio.

2 OBIETTIVI

2.1 Obiettivi generali

L'obiettivo primario della tesi è l'analisi sperimentale del comportamento acustico riguardo i rumori di calpestio di sistemi di pavimentazione flottante a secco, realizzati mediante l'accoppiamento diretto di finiture leggere su strati resilienti in lana minerale.

Lo studio si prefigge di determinare l'efficacia di tali configurazioni, al fine di definire le reali potenzialità di applicazione e i livelli prestazionali raggiungibili da queste tecnologie nel settore delle costruzioni. Contestualmente, il lavoro mira a comprendere l'influenza e l'interazione dei singoli strati (resiliente e di finitura) sul risultato acustico globale e a verificare l'attendibilità dei modelli previsionali standard (ISO 12354-2), confrontando i dati misurati con le stime teoriche per valutare l'accuratezza delle formule normative in relazione a questa specifica tipologia costruttiva.

Inoltre, considerata l'esperienza di ricerca svolta durante un periodo di studio in Spagna, il lavoro include un confronto tra le normative italiana e spagnola in materia di isolamento acustico da rumore da calpestio, con l'obiettivo di contestualizzare il lavoro in un quadro internazionale e valorizzare l'esperienza di ricerca svolta all'estero.

2.2 Obiettivi specifici

Per la definizione degli obiettivi specifici, si è scelto di partire dalla costruzione di un quadro conoscitivo preliminare, illustrando i principi fisici che governano la trasmissione del suono e l'isolamento acustico dai rumori da calpestio. A ciò si affianca la presentazione dei criteri di valutazione e dei limiti normativi vigenti in Italia e Spagna, nonché l'illustrazione delle principali soluzioni tecnologiche attualmente disponibili sul mercato. A partire da questa base conoscitiva, il lavoro di ricerca si è focalizzato sui seguenti obiettivi operativi:

1. Determinare le proprietà fisiche dei materiali costituenti i pavimenti flottanti a secco, individuate dalla teoria come descrittive del loro comportamento, e stimare le prestazioni acustiche dei sistemi applicando i modelli previsionali definiti dalla norma ISO 12354-2 [28].
2. Valutare sperimentalmente l'efficacia delle diverse configurazioni mediante prove di laboratorio conformi con la serie di norme ISO 10140, analizzando l'influenza specifica esercitata dai principali parametri fisici dei componenti sul miglioramento dell'isolamento acustico.

3. Verificare l'affidabilità dei modelli previsionali, confrontando le stime teoriche con i risultati sperimentali al fine di valutare l'accuratezza e l'applicabilità del metodo di calcolo nel caso di pavimenti flottanti a secco.
4. Indagare le divergenze applicative derivanti dai diversi criteri normativi e dalle rispettive modalità di elaborazione dei dati, al fine di valutare le conseguenti implicazioni sulla tutela del comfort acustico abitativo.

3 METODOLOGIA

3.1 Approccio generale e strategia di ricerca

L'impostazione metodologica della tesi muove dalla preliminare definizione del quadro di riferimento, basata sullo studio delle normative nazionali e sull'analisi delle soluzioni tecnologiche esistenti. A partire da questa base conoscitiva, la strategia di ricerca si articola in quattro fasi operative, ciascuna corrispondente a uno specifico obiettivo della tesi:

1. **Caratterizzazione fisica e modellazione teorica:** Questa fase integra l'analisi dei materiali con la previsione delle performance. Si procede dapprima all'acquisizione dei parametri fondamentali, mediante il calcolo della rigidità dinamica s' (MN/m³) dei materiali resilienti (secondo EN 29052-1 [18]) e la determinazione della massa superficiale m' (kg/m²) dei rivestimenti. Successivamente, tali dati vengono utilizzati come input per la stima delle prestazioni acustiche attese (ΔL), applicando i modelli previsionali definiti dalla normativa di riferimento (ISO 12354-2 [28]).
2. **Indagine sperimentale:** Esecuzione di una campagna di prove in laboratorio per misurare le prestazioni reali di isolamento acustico delle diverse configurazioni (secondo ISO 10140). I dati raccolti costituiscono la base per valutare l'efficacia dei sistemi e analizzare l'influenza specifica esercitata dai parametri fisici (s' e m') sul comportamento acustico globale.
3. **Validazione dei modelli di calcolo:** Definizione di una procedura di confronto diretto tra i valori di attenuazione stimati teoricamente (Fase 1) e quelli misurati sperimentalmente (Fase 2). Questa analisi è finalizzata a quantificare lo scostamento tra le due serie di dati, verificando l'accuratezza e i limiti di applicabilità del metodo semplificato per i sistemi a secco.
4. **Analisi delle divergenze normative:** Approfondimento degli schemi legislativi in materia di isolamento acustico nei due Paesi. Sviluppo di uno scenario simulato finalizzato a confrontare e quantificare le differenze numeriche prodotte dai criteri di normalizzazione e standardizzazione, definendone l'impatto concreto sulla tutela del comfort.

3.2 Campione sperimentale e configurazioni analizzate

Il campione oggetto di prova è composto da tre materassini in lana minerale forniti dal produttore Isover (Arena PF 15 mm, Arena PF 25 mm e Panel PST 22 mm), combinati con tre differenti rivestimenti di finitura.

L'abbinamento di ciascun materiale elastico con i vari strati di finitura ha generato nove configurazioni costruttive, selezionate per consentire un confronto omogeneo delle prestazioni acustiche e analizzare l'influenza delle variabili in gioco all'interno del sistema di pavimento flottante.

3.3 Caratterizzazione fisico-meccanica e stima previsionale (Punto 1)

La prima fase metodologica è consistita nell'acquisizione dei parametri fisici fondamentali dei materiali, necessari per la successiva modellazione teorica e per l'analisi delle prestazioni (Fase 2).

- Rigidità Dinamica (s'): Questo parametro, centrale per la modellazione acustica, è stato calcolato per i tre materiali resilienti secondo la norma EN 29052-1 [18], a partire dai valori sperimentali grezzi (frequenze di risonanza) forniti direttamente dal produttore, come dettagliato nel Capitolo 11.2.
- Massa Superficiale (m'): La massa per unità di superficie dei tre diversi rivestimenti di finitura (laminato 6 mm, laminato 12 mm e parquet 17 mm) è stata determinata direttamente in laboratorio ed è riportata nel Capitolo 11.3.

Sulla base di questi parametri, è stato applicato il modello di calcolo dell'Annesso C della norma ISO 12354-2 [28], specifico per i sistemi a secco. Tale procedura ha permesso di determinare sia i valori di riduzione del livello di rumore da calpestio alle singole frequenze (ΔL), sia l'indice di valutazione globale ponderato (ΔL_w), fornendo così il riferimento teorico necessario per le fasi successive.

3.4 Prove acustiche di laboratorio e trattamento dati (Punto 2)

La seconda fase ha riguardato la verifica empirica delle prestazioni reali. Le prove acustiche, eseguite in conformità alla serie di norme ISO 10140, sono state svolte presso il laboratorio specializzato della ETSAM (Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, UPM). La struttura di prova è costituita da due camere sovrapposte separate da un solaio base normalizzato in calcestruzzo armato dello spessore di 15 cm, strutturalmente disaccoppiato mediante appoggi elastici. Tale configurazione rappresenta una condizione ideale per valutare la trasmissione diretta attraverso il solaio, escludendo l'influenza di contributi spuri dovuti alle trasmissioni laterali.

La strumentazione impiegata per le misure comprende:

- Macchina normalizzata per rumore da calpestio con cinque martelli in linea;
- Fonometro di classe 1 (IEC 61672).

Per ciascuna configurazione analizzata sono state eseguite otto misurazioni indipendenti del campo sonoro nella sala ricevente, posizionando la macchina da calpestio e i microfoni secondo quanto prescritto dalla normativa. Come descritto più precisamente nel Capitolo 13, si è proceduto poi al trattamento dei dati grezzi per ottenere i valori normalizzati e globali:

1. Correggere i livelli in funzione del rumore di fondo e del tempo di riverberazione, in conformità alla norma ISO 10140-3 [25];
2. Ottenere il valore globale di riferimento secondo la norma ISO 717-2 [31].

3.5 Confronto tra previsioni teoriche e misure sperimentali (Punto 3)

Per verificare l'affidabilità delle stime, si è proceduto al confronto Teoria-Esperimento mediante la sovrapposizione dei risultati teorici (calcolati nella Fase 1) e dei risultati sperimentali (misurati nella Fase 2). Tale analisi ha permesso di quantificare la discrepanza e verificare l'affidabilità dei modelli previsionali della norma ISO 12354-2 [28], prendendo in esame sia gli andamenti per frequenza che i valori globali.

3.6 Analisi comparativa dei quadri normativi e delle procedure di calcolo (Punto 4)

Questa fase della ricerca prevede un'analisi critica e comparata dei quadri legislativi vigenti nei due contesti di riferimento, Italia e Spagna, al fine di individuare le differenze strategiche nell'imposizione dei limiti di legge per il rumore da calpestio. La metodologia esamina come i due ordinamenti (D.P.C.M. 5/12/1997 per l'Italia e CTE DB-HR per la Spagna) affrontino la tutela dell'utente attraverso approcci normativi distinti, analizzando le diverse logiche con cui vengono definiti i requisiti acustici passivi e i parametri di verifica.

Oltre ad avere un sistema metodologico diverso, i due Stati utilizzano indici differenti per la valutazione della prestazione acustica, rendendo necessario un trattamento specifico dei dati per poterli confrontare.

Per valutare l'impatto concreto che l'adozione di un diverso criterio di elaborazione dei dati esercita sulle verifiche in opera, la metodologia prevede l'applicazione comparata dei due metodi di calcolo (normalizzazione e standardizzazione) ai risultati sperimentali. Tale procedura si fonda sull'assunzione che il caso studio costituisca una situazione reale, in accordo con la normativa vigente che non contempla l'utilizzo della standardizzazione per le prove in laboratorio.

Tuttavia, per rendere gli effetti di tale diverso trattamento evidenti in un contesto realistico e comprensibile, l'analisi si concentra sul caso specifico di una camera da letto di dimensioni contenute. Attraverso questo scenario, si intende comprendere come l'adozione di un differente standard di riferimento possa influire sull'esito della verifica e sulla tutela

dell'occupante, evidenziando le discrepanze che emergono, a parità di limite normativo, nella valutazione finale del comfort.

4 TRASMISSIONE DEL SUONO NEGLI EDIFICI

4.1 Il rumore e la soggettività

In Italia la definizione di inquinamento acustico è fornita dalla Legge Quadro del 26 ottobre 1995, n. 447 [36], che lo descrive come “l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi” [36].

La percezione del suono assume carattere soggettivo, identificando lo stesso come rumore quando è percepito come fonte di disturbo o fastidio. Tuttavia, nel contesto abitativo, qualsiasi suono proveniente dall'esterno può risultare indesiderato, soprattutto nelle ore di sonno o di attività che richiedono concentrazione. Questo rende l'isolamento acustico un aspetto determinante nella percezione del comfort dell'ambiente abitativo, influenzando direttamente la qualità della vita all'interno di un edificio.

4.2 La trasmissione del suono

Negli edifici, il suono si propaga principalmente attraverso due meccanismi: trasmissione per via aerea e trasmissione per via strutturale. Sebbene distinti, questi due fenomeni spesso interagiscono tra loro, influenzando la diffusione del rumore all'interno degli ambienti.

4.2.1 Trasmissione del suono per via aerea

Nella trasmissione per via aerea, il suono si propaga nell'aria tra una sorgente e un ascoltatore. Tuttavia, nel contesto edilizio, si fa riferimento alla trasmissione tra due ambienti separati da elementi costruttivi, come pareti o solai. In questo caso, il meccanismo di trasmissione si sviluppa attraverso le seguenti fasi:

1. Emissione del suono dalla sorgente;
2. Incidenza delle onde sonore sulla partizione e conseguente vibrazione della stessa;
3. Le vibrazioni della struttura generano nuove onde sonore nell'aria;
4. Il suono si propaga per via aerea nell'ambiente ricevente.

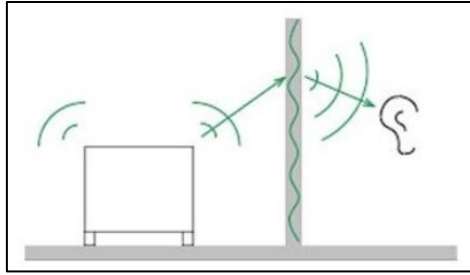


Figura 1 – Schema di trasmissione del suono per via aerea. Fonte: rielaborazione da https://www.enricomanzi.it/blog/rumori_aerei_e_rumori_strutturali.html [Consultato il 27 marzo 2025].

La struttura, quindi, non è il mezzo principale di trasmissione del suono, ma agisce come un filtro, capace di riflettere ed assorbire l'energia sonora, ma anche di trasmetterla all'ambiente adiacente. In questo senso, la propagazione per via aerea ha una componente legata alla trasmissione per via strutturale [3].

4.2.2 Trasmissione del suono per via strutturale

La trasmissione per via strutturale si verifica quando un'azione meccanica induce vibrazioni ad un elemento edilizio, che le propaga attraverso la struttura per via dei collegamenti rigidi tra le sue componenti. Questo fenomeno è tipico del calpestio, degli urti, dello spostamento di mobili o del funzionamento di apparecchiature che generano vibrazioni. Il processo segue queste fasi:

1. Impatto sulla struttura, che genera una vibrazione;
2. Propagazione delle vibrazioni attraverso gli elementi strutturali;
3. Le vibrazioni della struttura generano nuove onde sonore nell'aria;
4. Il suono si propaga per via aerea nell'ambiente ricevente.

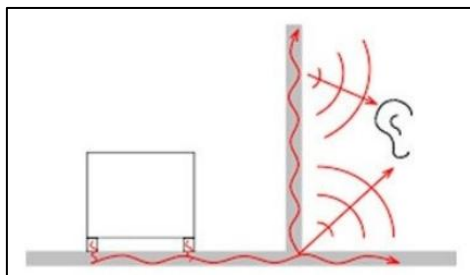


Figura 2 - Schema trasmissione del suono per via strutturale. Fonte: rielaborazione da https://www.enricomanzi.it/blog/rumori_aerei_e_rumori_strutturali.html [Consultato il 27 marzo 2025].

È fondamentale sottolineare il fatto che la vibrazione indotta alla struttura non è direttamente udibile. Il rumore può essere percepito solo quando la struttura, oscillando, genera nuove onde sonore che si diffondono nell'aria. Questo significa che, senza una fase di emissione aerea, il fenomeno resterebbe impercettibile all'udito umano, a meno di un contatto diretto con la superficie vibrante, come appoggiare l'orecchio a un muro [3], [12], [55].

4.2.3 Interazione tra i fenomeni

Dall'analisi dei due meccanismi emerge chiaramente un'interazione tra loro, evidenziata dal fatto che le ultime due fasi del processo sono identiche in entrambi i casi. Questo significa che un suono trasmesso per via aerea può avere una componente strutturale e viceversa.

Un aspetto fondamentale è che nel caso del rumore da impatto, è sufficiente ridurre la trasmissione isolando gli elementi strutturali, impedendo la propagazione delle vibrazioni lungo la struttura. Se la trasmissione delle vibrazioni viene efficacemente interrotta, il rumore non sarà più percepito nell'ambiente ricevente.

Al contrario, nel caso del rumore aereo, oltre a isolare direttamente la trasmissione tra gli ambienti, è necessario considerare anche le altre componenti strutturali coinvolte, poiché il suono può seguire percorsi alternativi (*flanking transmission*) attraverso solai, pareti laterali o altri elementi edilizi connessi rigidamente.

Questa interazione tra le due modalità di trasmissione rende fondamentale un'analisi globale della propagazione del suono negli edifici, per evitare che l'energia sonora trovi percorsi alternativi e comprometta l'efficacia degli interventi di isolamento.

5 DEFINIZIONE E PARAMETRI DI VALUTAZIONE

L'isolamento acustico ai rumori di calpestio nei solai è un aspetto fondamentale nella progettazione edilizia, poiché il comfort acustico dell'edificio è un parametro chiave della qualità dell'ambiente costruito.

5.1 Definizione e fenomenologia

Il fenomeno fisico in esame, definito "rumore da calpestio" dalla normativa italiana e "rumore da impatto" (*ruído de impactos*) da quella spagnola, si genera quando una sorgente meccanica di vibrazione (come passi, caduta di oggetti o trascinamento di arredi) colpisce direttamente la struttura del solaio. Queste vibrazioni, propagandosi attraverso gli elementi costruttivi, vengono irradiate come suono negli ambienti adiacenti, in particolare in quelli sottostanti.

Dal punto di vista fisico, il fenomeno è generato dall'eccitazione diretta di una struttura orizzontale che, vibrando, irradia energia sonora. La distinzione terminologica tra "calpestio" e "impatto" riflette solo una diversa consuetudine linguistica nazionale, ma si riferisce al medesimo meccanismo di trasmissione strutturale.

5.2 Parametri acustici e approcci valutativi

L'isolamento acustico ai rumori di impatto viene quantificato attraverso un sistema di parametri standardizzati che descrivono la prestazione dei solai mediante procedure distinte per l'ambito di laboratorio (caratterizzazione del prodotto) e per quello in opera (verifica della prestazione dell'edificio).

5.2.1 Elementi notazionali (L , ' , n , nT , w)

Per identificare correttamente i descrittori, è utile analizzare gli elementi notazionali delle sigle:

- L (Level – Livello di rumore): misura il livello di rumore da calpestio espresso in decibel (dB), corrispondente al livello di pressione sonora trasmesso e registrato nel locale ricevente in seguito agli impatti esercitati sul solaio;
- ' (Apostrofo): indica che l'indice acustico è stato ottenuto in situ; l'assenza di questo simbolo implica che la misurazione è stata condotta in laboratorio;
- n (Normalized – Normalizzato): Indica la correzione rispetto all'assorbimento acustico (A);

- nT (Standardized – Standardizzato): Indica la correzione rispetto al tempo di riverberazione (T);
- w (Weighted – Ponderato): indica che il valore è stato ottenuto applicando la curva di ponderazione in frequenza definita nella ISO 717-2, Questa operazione di ponderazione viene eseguita come passo finale, dopo aver applicato le necessarie correzioni metodologiche ai livelli misurati in ciascuna banda di frequenza. La ponderazione ' w ' permette così di sintetizzare l'informazione spettrale corretta in un unico indice globale confrontabile.

5.2.2 Il parametro di Laboratorio (L_n): La Normalizzazione

In ambito di laboratorio, la procedura di misura è univoca per tutti i paesi (inclusi Italia e Spagna) ed è stata storicamente definita dalla norma ISO 140-6:1978, oggi sostituita dalla vigente ISO 10140-3. Il parametro di riferimento è il Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato (L_n), definito per bande di frequenza.

Per ottenere questo valore, il livello di pressione sonora misurato in ogni banda viene corretto riferendolo a un'area di assorbimento standard ($A_0 = 10 \text{ m}^2$) rispetto all'area di assorbimento equivalente reale della camera (A):

$$L_n = L_{misurato} + 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Sostituendo il termine A con la formula di Sabine, la relazione esplicita la dipendenza dalle caratteristiche geometriche della stanza:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T} \rightarrow L_n = L_{misurato} + 10 \cdot \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{10 \cdot T} \right)$$

Dove:

- V è il volume del locale ricevente (m^3);
- T è il tempo di riverberazione misurato (s);
- 0,16 è il coefficiente numerico empirico della formula di Sabine (approssimazione di 0,161, dipendente dalle condizioni termo-igrometriche standard).

Il fatto che il Volume (V) compaia al numeratore ha un effetto fisico determinante su ogni frequenza dello spettro: compensa la geometria della stanza.

Fisicamente, infatti, se la camera ricevente è di piccole dimensioni, il livello sonoro misurato ($L_{misurato}$) tende naturalmente ad essere più alto a causa della concentrazione di energia in un volume ridotto con poca superficie assorbente. In questo caso, la formula genera un fattore di correzione negativo abbassando il valore finale di L_n . Viceversa, se la camera è grande, il livello registrato tende naturalmente ad essere più basso poiché l'energia sonora viene dispersa su

una superficie assorbente maggiore; in questo caso la componente di correzione è positiva e incrementa il valore misurato.

Il risultato L_n è quindi un dato spettrale "depurato" dall'influenza delle dimensioni della stanza, rappresenta la capacità di isolamento pura del solaio indipendentemente dalla camera di prova in cui è stato testato.

5.2.3 I parametri in opera L'_n e L'_{nT} : Il dualismo normativo

Per le misurazioni in situ, definite storicamente dalla norma ISO 140-7:1978 (oggi sostituita dalla ISO 16283-2 [30]), esistono due metodi alternativi per correggere i dati spettrali misurati dal fonometro per ogni banda di frequenza. Questa duplicità riflette due diversi approcci alla valutazione della qualità acustica.

5.2.3.1 Approccio Normalizzato (n)

Questo metodo applica a ogni singola frequenza la stessa logica del laboratorio, correggendo rispetto all'assorbimento (A) riferimento $A_0 = 10 \text{ m}^2$:

$$L_n = L_{\text{misurato}} + 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Poiché la formula include il Volume (tramite A), essa cancella l'influenza della dimensione della stanza su ogni banda di frequenza, esattamente come avviene in laboratorio. Obiettivo: Verificare la prestazione tecnica del solaio installato, comprensiva delle trasmissioni laterali, ma depurata dall'effetto del volume della stanza ricevente. È il parametro richiesto dalla normativa italiana per valutare la conformità dell'elemento edilizio.

5.2.3.2 Approccio Standardizzato (nT)

Definito anch'esso nella ISO 16283-2 [30], questo metodo corregge ogni frequenza misurata rispetto al Tempo di Riverberazione (T), con riferimento $T_0 = 0,5 \text{ s}$ (valore tipico di una stanza arredata):

$$L'_n = L_{\text{misurato}} + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

La differenza cruciale è l'assenza del volume V in questa formula. Di conseguenza, le variazioni del livello di pressione sonora dipendenti dalla geometria della stanza non vengono compensate matematicamente, ma rimangono nel risultato finale. Questo parametro ha l'obiettivo di descrivere il livello di rumore realmente percepito dall'utente all'interno di quello specifico ambiente, accettando che la geometria della stanza influenzi il comfort finale. È il parametro richiesto dalla normativa spagnola.

5.2.4 Relazione di conversione e impatto percettivo

La differenza tra i due indici risiede esclusivamente nel fattore geometrico. Esiste una relazione matematica esatta che li lega:

$$L'_{nT}(\text{Spagna}) = L'_n(\text{Italia}) - 10 \cdot \lg \frac{0,16 \cdot V}{A_0 \cdot T_0} = L'_n - 10 \cdot \lg(0,032 \cdot V)$$

Il coefficiente 0,032 deriva dalle costanti della formula di Sabine ($0,16 / T_0$ con $T_0=0,5$ s, diviso per 10). Analizzando la formula, si individua un "volume di equilibrio" quando il termine logaritmico si annulla:

$$0,032 \cdot V = 1 \quad \rightarrow \quad V = \frac{1}{0,032} = 31,25 \text{ m}^3$$

Questo valore di soglia determina il comportamento relativo dei due indici:

- Per $V = 31,25 \text{ m}^3$: In questo specifico caso geometrico, il termine di correzione logaritmica si annulla. I due indici coincidono perfettamente, indicando che la correzione per assorbimento (Italia) e quella per tempo di riverberazione (Spagna) producono il medesimo risultato numerico;
- Per $V < 31,25 \text{ m}^3$ (stanze "piccole"): In ambienti ridotti, la superficie totale interna limitata comporta un minore assorbimento complessivo, causando una concentrazione di energia sonora che rende il Livello misurato (L_{mis}) fisicamente più alto. L'indice Normalizzato (L'_n) applica una correzione negativa che abbassa il valore finale per compensare questo effetto di concentrazione, mentre l'indice Standardizzato (L'_{nT}) non applica questa compensazione e lascia emergere il livello elevato misurato. Di conseguenza, L'_{nT} risulta numericamente superiore a L'_n , evidenziando che in volumi ridotti il comfort acustico è naturalmente peggiore.
- Per $V > 31,25 \text{ m}^3$ (stanze "grandi"): In ambienti ampi, l'energia sonora si disperde su un volume maggiore, riducendo la densità di energia e portando a un Livello misurato (L_{mis}) fisicamente più basso. L'indice Normalizzato (L'_n) rileva il grande volume e applica una correzione positiva che alza il valore finale per annullare il vantaggio acustico offerto dalla grande cubatura e rendere il dato confrontabile con la prestazione intrinseca del solaio; l'indice Standardizzato (L'_{nT}), invece, non compensa questo effetto di diluizione e mantiene il valore basso. Di conseguenza, L'_{nT} risulta numericamente inferiore a L'_n , riflettendo il miglioramento del comfort acustico favorito dalla dispersione dell'energia.

5.3 Schema di sintesi dei descrittori

Per visualizzare in modo immediato le differenze tra gli ambiti di misura e le metodologie di correzione adottate, si propone il seguente schema di sintesi (Tabella 1). La matrice incrocia l'ambito di misura (Laboratorio vs In Sito) con l'approccio matematico di correzione (Normalizzato vs Standardizzato).

Tabella 1 - Matrice dei descrittori acustici

	In laboratorio	In sito
Approccio Normalizzato	L_n	L'_n
Approccio Standardizzato	x	L'_{nT}

Dallo schema emerge chiaramente l'asimmetria del sistema:

- L'approccio Normalizzato garantisce continuità totale: il parametro L_n misurato in laboratorio ha un suo corrispettivo diretto L'_n in cantiere.
- L'approccio Standardizzato, invece, esiste solo come verifica in opera (L'_{nT}), non avendo un corrispettivo nelle prove di laboratorio.

5.4 Distribuzione geografica degli approcci in Europa

L'adozione dell'uno o dell'altro indice per la verifica in opera non è uniforme a livello continentale. Osservando la Figura 3, è possibile distinguere due macroaree di utilizzo [57]:

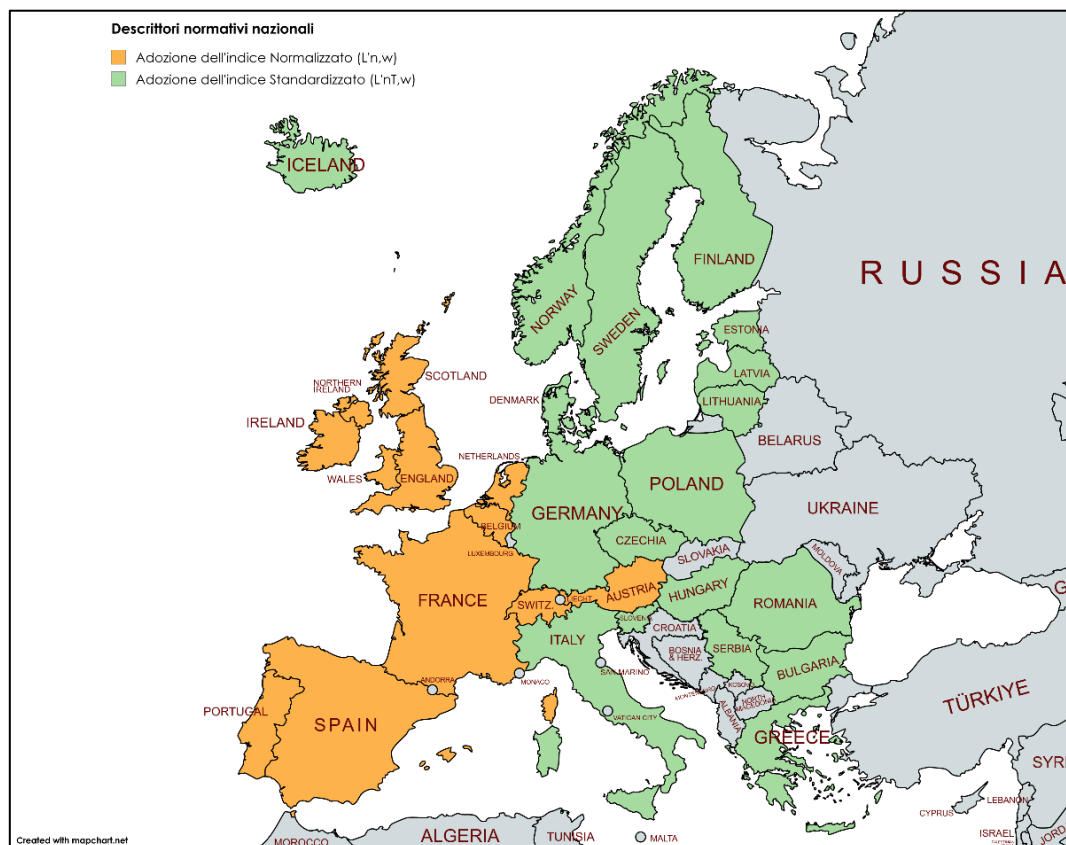


Figura 3 - Distribuzione geografica degli indici di valutazione del rumore da calpestio in Europa. Elaborazione propria.

Dall'analisi della mappa si rilevano i seguenti raggruppamenti:

- Adozione dell'Indice Standardizzato (L'_{nT} - Arancione): Riguarda un gruppo di paesi situato prevalentemente nella parte occidentale del continente (tra cui Spagna, Portogallo, Francia, Regno Unito, Belgio, Paesi Bassi), ma che comprende anche Svizzera e Austria.
- Adozione dell'Indice Normalizzato (L'_n - Verde): È l'approccio più diffuso numericamente e copre un'area vasta ed eterogenea che spazia dai Paesi Scandinavi all'Italia, includendo la Germania, la Grecia e gran parte dell'Europa centro-orientale.

I paesi non evidenziati nella mappa (in grigio) non sono stati inclusi nell'analisi a causa dell'assenza di dati normativi aggiornati nelle fonti di riferimento o dell'utilizzo di descrittori non direttamente comparabili con la dicotomia n/nT .

6 QUADRO NORMATIVO ITALIANO: ISOLAMENTO ACUSTICO E RUMORE DA CALPESTIO

6.1 Introduzione

L'attenzione in Italia verso il tema dell'isolamento acustico negli edifici ha incominciato a svilupparsi nel secondo dopoguerra, quando la crescente urbanizzazione e industrializzazione hanno reso evidente la necessità di regolamentare in tema di comfort abitativo, comprendendo la protezione dal rumore. Le prime disposizioni in materia si trovano nei programmi di edilizia sovvenzionata, avviati per rispondere all'emergenza abitativa e alla necessità di riqualificare il patrimonio edilizio italiano.

Il Piano INA-CASA (1949-1963) fu un programma nazionale destinato alla costruzione di alloggi per i lavoratori, finanziato da contributi statali, datoriali e dei lavoratori stessi. Questo piano introdusse criteri costruttivi che consideravano anche aspetti acustici, ma senza fornire valori numerici obbligatori. Le indicazioni si limitavano a raccomandazioni sull'uso di tramezzi con capacità isolanti adeguate, senza stabilire parametri vincolanti [22], [23].

Il successivo Piano GESCAL (1963-1973), anch'esso rivolto all'edilizia sovvenzionata, segnò un'evoluzione significativa introducendo per la prima volta valori numerici minimi obbligatori per l'isolamento acustico. Questa normativa stabiliva requisiti prestazionali per pareti divisorie interne ed esterne, separazioni tra unità abitative e isolamento rispetto ai vani scala, sebbene con livelli di protezione ancora limitati rispetto agli standard odierni. Per quanto riguarda la protezione dal rumore di calpestio, veniva imposto un limite massimo di 70 dB per il livello sonoro di impatto normalizzato ($L'_{n,w}$), parametro che misura il rumore percepito nel locale sottostante in seguito alla trasmissione delle vibrazioni attraverso i solai. Questa regolamentazione rappresentò il primo passo concreto nella definizione di criteri per il controllo del rumore da impatto negli edifici residenziali sovvenzionati [24].

Un ulteriore sviluppo normativo si ebbe con la Circolare Ministeriale LL.PP. n. 1769 del 1966 - "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici nelle costruzioni edilizie", che forniva indicazioni per il collaudo dell'isolamento acustico negli edifici sovvenzionati. La circolare distingueva tra prove di laboratorio e misurazioni in opera e introduceva due livelli prestazionali: normale, corrispondente ai valori minimi richiesti, e superiore, con parametri consigliati per garantire un comfort acustico maggiore. Tuttavia, le metodologie di misurazione del rumore da calpestio non erano ancora standardizzate a livello internazionale, e le valutazioni si basavano su criteri empirici, rendendo i risultati meno confrontabili e più soggetti a variabilità [25].

Sebbene i piani INA-CASA e GESCAL abbiano rappresentato un primo passo importante verso una regolamentazione dell'isolamento acustico, il loro ambito rimaneva limitato all'edilizia

sovvenzionata, senza estendersi all'intero settore edilizio, lasciando quindi un vuoto normativo per tutte le altre costruzioni [26], [27].

6.2 Unificazione della normativa a livello nazionale

Nonostante le prime normative in materia di isolamento acustico fossero prevalentemente circoscritte all'edilizia sovvenzionata, il concetto di protezione acustica come parte integrante delle condizioni di salubrità degli ambienti abitativi iniziò a prendere piede a partire dal Decreto Ministeriale 5 luglio 1975. In particolare, l'articolo 8 stabiliva che: "I materiali utilizzati per le costruzioni di alloggi e la loro messa in opera debbono garantire un'adeguata protezione acustica agli ambienti...", introducendo per la prima volta il concetto di isolamento acustico come elemento fondamentale per il benessere degli abitanti. Tuttavia, il decreto non definiva parametri numerici specifici, lasciando l'interpretazione del termine "adeguata protezione" piuttosto generica. Questo vuoto normativo avrebbe però trovato risposta con l'introduzione di una legge più strutturata, che segnò un punto di svolta per il settore [58], [40].

Questo cambiamento significativo avvenne con la Legge 26 ottobre 1995, n. 447, nota come Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico. Con questa legge, per la prima volta, venne fornito un quadro normativo completo per il controllo del rumore in Italia, introducendo regolamenti specifici per l'inquinamento acustico sia a livello ambientale che edilizio.

Di particolare importanza, la legge stabiliva:

- L'obbligo di definire requisiti acustici passivi per gli edifici, che però sarebbero stati determinati solo con un successivo decreto nel 1997;
- La suddivisione delle competenze tra Stato, Regioni e Comuni nella gestione dell'inquinamento acustico. L'Art. 3 attribuisce allo Stato la definizione dei criteri generali e dei valori limite, alle Regioni la regolamentazione della classificazione acustica e ai Comuni l'attuazione delle politiche di controllo e risanamento;
- L'introduzione della figura del Tecnico Competente in Acustica (TCA), definita all'Art. 2, comma 6, come il professionista incaricato di effettuare misurazioni e valutazioni acustiche.

Sebbene la Legge 447/1995 non determinasse direttamente i valori minimi per l'isolamento acustico, essa fornì il quadro normativo necessario affinché questi potessero essere stabiliti con regolamenti successivi [36].

A seguito del mandato normativo stabilito dalla Legge Quadro 447/1995, il D.P.C.M. 5 dicembre 1997 rappresenta il provvedimento attuativo che per la prima volta in Italia definisce in modo organico e vincolante i requisiti acustici passivi degli edifici. Il decreto si applica a "edifici nuovi e a quelli esistenti oggetto di interventi che comportano una ristrutturazione integrale

dell'edificio o comunque interessano le strutture edilizie delimitanti le unità immobiliari", estendendo finalmente l'obbligo del rispetto di specifici livelli prestazionali a tutto il settore edilizio, senza più distinzione tra edilizia pubblica e privata [34].

Il D.P.C.M. individua cinque ambiti prestazionali fondamentali, per i quali stabilisce valori limite da rispettare [37]:

- Isolamento ai rumori aerei tra unità immobiliari;
- Isolamento dai rumori esterni;
- Isolamento al rumore da calpestio;
- Isolamento dai rumori di impianti a funzionamento continuo e discontinuo;
- Tempo di riverberazione nei locali scolastici.

Per quanto riguarda la protezione dal rumore di calpestio, il decreto adotta come parametro di riferimento il livello di rumore da impatto normalizzato ($L'_{n,w}$), espresso in decibel (dB). Questo parametro, già definito a livello internazionale dalla norma ISO 717-2 [31], è calcolato, secondo quanto stabilito dal decreto stesso, in conformità alla norma tecnica nazionale UNI 8270:1987, Parte 7.

Oltre a disciplinare le prestazioni acustiche interne degli edifici, il decreto richiama anche l'obbligo di redigere una valutazione previsionale del clima acustico per specifiche tipologie di insediamenti, in conformità all'articolo 8 della Legge 447/1995. Questa relazione ha lo scopo di determinare la rumorosità presente in un'area prima della realizzazione dell'edificio, al fine di verificarne la compatibilità e individuare eventuali interventi di mitigazione [36], [37].

Il D.P.C.M. 5 dicembre 1997 introduce una classificazione funzionale degli edifici che costituisce la base per l'applicazione dei requisiti acustici passivi. Tale classificazione, riportata nella Tabella A del decreto, suddivide gli edifici in sette categorie principali in funzione della loro destinazione d'uso. Ogni categoria corrisponde a un diverso livello di esigenza in termini di isolamento acustico [34].

Tabella 2 - Tabella A D.P.C.M. 5/12/1997: Classificazione degli ambienti abitativi

Categoria A	Edifici adibiti a residenza o assimilabili
Categoria B	Edifici adibiti a uffici e assimilabili
Categoria C	Edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività simili
Categoria D	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili
Categoria E	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
Categoria F	Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili
Categoria G	Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

La tabella B stabilisce i valori limite dei parametri acustici che devono essere rispettati nelle diverse tipologie edilizie, precedentemente classificate nella tabella A.

Tabella 3 - Tabella B D.P.C.M. 5/12/1997: Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici

Categorie di cui alla Tab. A	Parametri				
	$R'_w(^*)$	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

Tra i parametri normati figurano:

- R'_w (dB): Potere fonoisolante apparente delle partizioni tra ambienti di unità immobiliari distinte;
- $D_{2m,nT,w}$ (dB): Isolamento acustico standardizzato di facciata;
- $L'_{n,w}$ (dB): livello di rumore da calpestio normalizzato;
- L_{ASmax} (dBA): livello massimo di pressione sonora (impianti a funzionamento discontinuo);
- L_{Aeq} (dBA): livello equivalente continuo di pressione sonora (impianti a funzionamento continuo).

Il D.P.C.M. 5 dicembre 1997, nel definire i requisiti acustici passivi per gli edifici, introduce due metodi distinti per la misurazione del rumore da calpestio. Per la misurazione in laboratorio, il decreto fa riferimento alla ISO 140-6:1996, che stabilisce la procedura per misurare il rumore da calpestio in un ambiente controllato e standardizzato, calcolando il parametro L'_n . Per la misurazione in opera, ovvero in condizioni reali all'interno di edifici già costruiti, il decreto si rifà alla norma UNI 8270:1987, Parte 7, par. 5.2, in cui il parametro misurato è $L'_{n,w}$, che rappresenta il livello di rumore da calpestio normalizzato [34].

6.3 Limiti e incongruenze del DPCM

Nonostante l'importante passo compiuto dal D.P.C.M. 5 dicembre 1997 nell'introdurre i requisiti acustici passivi per gli edifici, la sua applicazione ha incontrato diverse difficoltà nel

corso degli anni. Una delle principali criticità riguarda la mancanza di sanzioni dirette per il mancato rispetto dei limiti acustici, causando un'applicazione disomogenea sul territorio nazionale. Le sanzioni sono state rese operative solo quando i singoli comuni hanno applicato il decreto all'interno dei loro regolamenti locali, creando quindi differenze sostanziali nell'implementazione della normativa.

Riguardo al rumore da calpestio, la normativa non chiariva inizialmente se le disposizioni fossero applicabili anche nel caso di singole abitazioni su più piani, creando confusione tra i tecnici. Tale ambiguità venne risolta solo nel 2014, quando il Ministero dell'Ambiente chiarì che i limiti acustici sono validi esclusivamente tra distinte unità abitative [58], [30].

A questo si aggiunge un'ulteriore lacuna: il DPCM non prevede alcun requisito minimo di isolamento acustico tra locali appartenenti alla stessa unità immobiliare, né per quanto riguarda il rumore aereo né per quello da impatto. In assenza di limiti prestazionali intra-unità, ambienti sensibili come le camere da letto possono risultare esposti al rumore generato da locali attigui, sia sullo stesso piano che su livelli differenti, senza che ciò costituisca una violazione della norma.

In sintesi, la normativa italiana, pur costituendo un riferimento fondamentale in materia di isolamento acustico in edilizia, presenta rilevanti limitazioni interpretative e applicative, in particolare per quanto riguarda la definizione degli ambiti di applicazione (tra unità immobiliari e all'interno della singola unità) e l'assenza di meccanismi sanzionatori efficaci.

6.4 Sviluppi successivi

Dopo l'introduzione del D.P.C.M. 5 dicembre 1997 [34], la normativa italiana in materia di acustica edilizia ha continuato ad evolversi, con nuovi sviluppi normativi che, purtroppo, non sempre sono stati recepiti in maniera obbligatoria. Tra questi sviluppi vi è l'introduzione della UNI 11367:2010, che stabilisce la classificazione acustica delle unità immobiliari. La norma suddivide gli edifici in quattro classi (da I a IV) in base alla prestazione acustica che l'edificio è in grado di garantire, tenendo conto delle misurazioni fonometriche in opera. Le classi sono differenziate a seconda dei livelli di isolamento acustico, con la Classe I rappresentante il miglior isolamento e la Classe IV il livello inferiore. Sebbene utile per certificare il comfort acustico degli edifici, la UNI 11367 non ha carattere obbligatorio, per cui trova applicazione limitatamente ad alcuni casi di costruzioni pubbliche e casi in cui si cerchi l'ottenimento di specifiche certificazioni in materia di prestazioni acustiche.

Un altro sviluppo normativo è dato dall'introduzione della UNI EN ISO 16283, che riguarda le misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di singoli elementi edilizi. In particolare, la sezione 2 della UNI EN ISO 16283-2:2020 [30] è dedicata al rumore da calpestio ($L'_{n,w}$), che introduce un metodo più preciso e verificabile rispetto alle precedenti misurazioni, garantendo

che i risultati siano confrontabili tra edifici diversi. Tuttavia, così come la UNI 11367:2010, anche questa norma non ha carattere obbligatorio e vede una applicazione limitata.

Nel 2022, con il Decreto CAM, le disposizioni in materia di isolamento acustico per gli edifici pubblici sono state riformate. Il decreto stabilisce i criteri ambientali minimi che devono essere rispettati negli appalti pubblici, sia per la costruzione di nuovi edifici che per la ristrutturazione di edifici esistenti, finanziati con fondi pubblici o europei, inclusi quelli previsti dal PNRR. In questi contesti, il Decreto CAM sostituisce il D.P.C.M. 5 dicembre 1997, stabilendo limiti di isolamento acustico più stringenti, in particolare per quanto riguarda il rumore da calpestio. Il limite massimo di $L'_{n,w}$ per il rumore da calpestio negli edifici pubblici finanziati con fondi pubblici o europei è fissato a 55 dB, un valore più restrittivo rispetto a quello previsto dal D.P.C.M. 5 dicembre 1997, dove la soglia di 55 dB era riservata alle categorie B, F e G (come scuole, ospedali e altre strutture pubbliche con requisiti acustici elevati) [21].

7 QUADRO NORMATIVO SPAGNOLO: ISOLAMENTO ACUSTICO E RUMORE DA CALPESTIO

7.1 Contesto normativo preliminare

Prima dell'introduzione di normative uniformi su scala nazionale relative all'isolamento acustico degli edifici, la Spagna presentava una situazione normativa disomogenea e priva di standard vincolanti diffusi sul territorio. In questo contesto frammentato, l'attenzione ai requisiti acustici passivi degli edifici risultava limitata e variabile, principalmente regolata da riferimenti tecnici volontari e non obbligatori per tutti i settori dell'edilizia.

Il primo significativo tentativo di fornire criteri tecnici minimi a livello nazionale fu rappresentato dalla Norma Básica de la Edificación NBE-CA-82 [15], approvata con il Real Decreto 1909/1981 e successivamente modificata dal Real Decreto 2115/1982. Tale norma stabiliva indicazioni generali circa l'isolamento al rumore aereo (R) e ai livelli di rumore da impatto (L'n), adottando metodi di misurazione basati su standard tecnici riconosciuti (norme UNE). Tuttavia, questa normativa tecnica nazionale aveva un'applicazione limitata principalmente ai progetti pubblici o finanziati dallo Stato, senza obblighi specifici e vincolanti per il settore privato, causando così disparità nella qualità acustica degli edifici sul territorio nazionale.

Parallelamente, è possibile ipotizzare l'esistenza di regolamenti locali in materia di isolamento acustico, come dimostrano alcuni esempi più recenti provenienti da comuni come Valencia, Paterna e Soria. Sebbene questi regolamenti siano stati pubblicati in periodi successivi alla normativa nazionale iniziale, la loro presenza potrebbe indicare un'evoluzione e aggiornamenti di disposizioni locali preesistenti. Tuttavia, dovuto alla limitatezza delle fonti, non è stato possibile reperire documenti specifici relativi a regolamenti locali precedenti al periodo considerato.

Questo contesto di frammentarietà normativa costituisce uno degli aspetti che hanno reso necessario lo sviluppo successivo di normative organiche e uniformi a livello nazionale, con l'obiettivo di garantire un adeguato comfort acustico negli edifici in maniera uniforme e sistematica.

7.2 Unificazione della normativa a livello nazionale

Il processo di unificazione normativa sull'isolamento acustico degli edifici in Spagna ha inizio nel 1999 con l'approvazione della Ley 38/1999, de Ordenación de la Edificación (LOE) [13]. Questa legge stabilisce, per la prima volta su scala nazionale, che la protezione contro il

rumore rappresenta uno dei requisiti fondamentali che ogni edificio deve rispettare. La LOE attribuisce inoltre responsabilità specifiche ai diversi soggetti coinvolti nel processo edilizio, inclusi progettisti, costruttori e direttori dei lavori. Pur non definendo direttamente valori limite o parametri tecnici, la LOE fornisce la base giuridica indispensabile per l'elaborazione di una normativa tecnica vincolante e dettagliata.

Questo sviluppo trova piena attuazione nel Código Técnico de la Edificación (CTE), approvato nel 2006, e in particolare nel suo Documento Básico HR - Protección frente al Ruido [14]. Il DB-HR costituisce il primo strumento normativo pienamente obbligatorio e uniforme sull'intero territorio spagnolo che disciplina l'isolamento acustico degli edifici, introducendo criteri tecnici, metodologie di prova e limiti prestazionali. Il documento si basa su normative UNE-EN ISO e si applica sia alle nuove costruzioni sia agli interventi di ristrutturazione rilevanti.

Una delle principali innovazioni del DB-HR è la classificazione degli ambienti, denominati "recintos", ai quali si applicano requisiti acustici differenziati in base alla loro funzione e sensibilità. Le categorie principali sono [14]:

- Recintos habitables: locali destinati a una permanenza umana significativa, ma non necessariamente soggetti a requisiti di particolare sensibilità. Comprendono, ad esempio, soggiorni, cucine, uffici, aule scolastiche, laboratori e bagni.
- Recintos protegidos: sottoinsieme dei *recintos habitables*, caratterizzati da esigenze più elevate di protezione acustica, in quanto destinati al riposo o alla concentrazione. Ne fanno parte camere da letto, sale di lettura, biblioteche, sale di riunione, stanze d'ospedale.
- Recintos de instalaciones: locali tecnici contenenti apparecchiature impiantistiche potenzialmente rumorose, come centrali termiche, sale macchine, vani ascensore.
- Recintos de actividad: ambienti destinati allo svolgimento di attività economiche, commerciali, professionali o ricreative, che possono generare emissioni acustiche rilevanti.
- Zonas comunes: spazi di uso collettivo all'interno degli edifici, quali ingressi, vani scala, corridoi, androni condominiali.
- Espacios exteriores de uso privativo: aree scoperte ad uso esclusivo di una o più unità immobiliari, come terrazze, balconi e giardini privati.

Il Documento Básico HR costituisce pertanto il riferimento normativo e tecnico centrale per la regolamentazione dell'isolamento acustico degli edifici in Spagna, con requisiti distinti per ciascuna destinazione d'uso. La sua introduzione ha permesso di superare definitivamente il quadro frammentario precedente, imponendo criteri uniformi e vincolanti su scala nazionale.

7.3 Logica applicativa e criteri prestazionali del DB HR

Il Documento Básico HR – Protección frente al Ruido stabilisce una struttura metodologica chiara e coerente, articolata attorno a tre ambiti principali di isolamento: rispetto al rumore aereo esterno e, all'interno dell'edificio, rispetto al rumore aereo e al rumore da calpestio.

Nel caso della protezione dai rumori interni, il processo inizia con la zonizzazione dell'edificio, individuando le diverse unità d'uso e, all'interno di esse, i differenti ambienti definiti in precedenza. I requisiti di isolamento acustico interno (sia per il rumore aereo che per quello da calpestio) sono organizzati in base alla coppia locale emissivo–locale ricevente. I valori più restrittivi si applicano quando il locale ricevente è un ambiente protetto. Per quanto riguarda il rumore da calpestio, i valori di riferimento sono espressi mediante l'indice $L'_{nT,w}$, che rappresenta il livello sonoro da calpestio trasmesso in opera, ponderato e normalizzato [14], [17].

Tabella 4 - Tabella 2.1.2.3 CTE DB HR: Requisiti di isolamento acustico al rumore da impatto tra recinti. Fonte: [14].

RECINTO EMISOR EXTERIOR A LA UNIDAD DE USO	RECINTOS DE UNA UNIDAD DE USO	
	Recinto	
	Protegido Impactos ⁽ⁱ⁾ $L'_{nT,w}$ (dB)	Habitable Impactos ⁽ⁱ⁾ $L'_{nT,w}$ (dB)
Otros recintos del edificio ⁽ⁱⁱ⁾	65	-
⁽ⁱ⁾ Esta exigencia no es de aplicación en el caso de recintos protegidos colindantes con una caja de escaleras. ⁽ⁱⁱ⁾ Siempre que éste recinto no sea de instalaciones, de actividad o no habitable. No hay exigencias de aislamiento acústico a ruido de impactos entre un recinto de una unidad de uso y un recinto no habitable.		
RECINTO EMISOR	RECINTOS RECEPTORES	
	Protegido Impactos ⁽ⁱ⁾ $L'_{nT,w}$ (dB)	Habitable Impactos ⁽ⁱ⁾ $L'_{nT,w}$ (dB)
De instalaciones o de actividad	60	60

Va sottolineato che i requisiti riportati nelle tabelle devono essere sempre intesi come valori minimi da rispettare in opera, attraverso misurazioni acustiche eseguite secondo le norme UNE-EN ISO applicabili. In alternativa, nella fase di progettazione dell'edificio, è possibile ricorrere a un'opzione di calcolo semplificata, che consente di dimostrare il rispetto dei requisiti mediante l'adozione di soluzioni costruttive proposte dal CTE, a condizione che vengano applicate integralmente e in conformità alle specifiche tecniche indicate nelle relative schede [34].

7.4 Limiti del CTE DB-HR

Nonostante il Documento Básico HR rappresenti un importante passo avanti nell'uniformare i criteri di isolamento acustico in Spagna, esso presenta alcune criticità che emergono con particolare evidenza nel trattamento del rumore da impatto.

7.4.1 Limiti nei criteri di valutazione e nei requisiti normativi

Il requisito principale di isolamento contro il rumore da calpestio previsto dal DB HR non è uniforme per l'intero edificio. Il limite di $L'_{nT,w} \leq 60$ dB si applica sia ai locali protetti che a quelli abitabili solo quando il locale emissivo è un locale impianti o un locale destinato ad attività. In tutti gli altri casi, la protezione è imposta esclusivamente ai locali protetti, fissando un limite di $L'_{nT,w} \leq 65$ dB, mentre i locali abitabili non sono soggetti a questo requisito.

Questa situazione assume particolare rilevanza in ambito residenziale, poiché la configurazione tipica di un'abitazione comporta la presenza alternata di locali protetti e locali abitabili. Considerato che questi ambienti si trovano spesso in contatto diretto, sia in verticale che in orizzontale, o condividono un bordo orizzontale comune, nella pratica risulta necessario prevedere una protezione contro il rumore da calpestio anche per i locali abitabili, pur non essendo sempre espressamente richiesta dalla norma.

Pertanto, se negli edifici residenziali è quasi sempre necessario proteggere dal rumore da calpestio sia i locali abitabili che quelli protetti, la norma avrebbe potuto esprimersi con maggiore chiarezza e semplicità, adottando il limite di 65 dB come criterio generale per tutti i locali in ambito residenziale [17].

7.4.2 Debolezze tecniche e operative

Un'altra osservazione riguarda il fatto che i requisiti acustici relativi al rumore da calpestio si applicano esclusivamente tra ambienti adiacenti, ovvero tra spazi sovrapposti, contigui o che condividono un elemento costruttivo. Tuttavia, questo approccio non considera la propagazione del rumore da calpestio attraverso gli elementi strutturali verso ambienti non direttamente adiacenti. Ad esempio, può accadere che un piccolo locale tecnico o un disimpegno separi una zona a elevato passaggio pedonale da un ambiente protetto: in tal caso, la distanza geometrica potrebbe non essere sufficiente a garantire un'attenuazione efficace, mentre la continuità strutturale consentirebbe la trasmissione delle vibrazioni senza costituire una reale barriera acustica. Di conseguenza, il criterio di adiacenza, così come formulato, potrebbe risultare in alcuni casi puntuali insufficiente a garantire una protezione acustica completa.

Infine, pur riconoscendo il valore operativo dell'opzione semplificata, che consente al progettista di dimostrare la conformità ai requisiti normativi senza ricorrere a calcoli complessi o prove in opera, va sottolineato che le soluzioni tecniche previste dal CTE sono numericamente limitate. Questa scarsità di alternative può condizionare in parte la libertà progettuale e la possibilità di adattare la stratigrafia o la tecnologia ai vincoli specifici di cantiere, specialmente nei casi di ristrutturazione o interventi in edifici esistenti.

Questi elementi evidenziano come, nonostante il DB HR costituisca un riferimento avanzato e strutturato, permangano ambiti di miglioramento, in particolare nella protezione dei recinti non classificati come protetti e nella gestione delle trasmissioni acustiche che si propagano oltre i confini fisici immediati dei recinti emettitori.

8 CONFRONTO TRA LA NORMATIVA ITALIANA E QUELLA SPAGNOLA

Nel presente capitolo si propone un confronto tra le due normative nazionali che regolano l'isolamento acustico negli edifici, con particolare riferimento al rumore da impatto. L'analisi si basa sui contenuti esposti nei capitoli precedenti e mira a evidenziare differenze strutturali, approcci applicativi e conseguenze progettuali delle due impostazioni normative.

8.1 Impostazione generale

La normativa italiana, definita dal D.P.C.M. 5 dicembre 1997, si caratterizza per un'impostazione generale e semplificata. Essa considera l'edificio nel suo insieme, imponendo valori limite prestazionali uguali per tutte le partizioni orizzontali e verticali che separano unità immobiliari distinte, senza distinzione tra i vari locali all'interno dell'unità. Questo approccio "monoblocco" non prevede una scomposizione funzionale interna dell'edificio, né distingue tra recinti sensibili e altri ambienti.

Al contrario, la normativa spagnola, attraverso il Documento Básico HR del CTE, adotta un approccio più articolato e organico. L'edificio viene analizzato e scomposto in unità d'uso, recinti e tipologie funzionali, ognuno dei quali soggetto a requisiti specifici. Viene attribuita particolare attenzione ai *recintos protegidos*, come le camere da letto e gli ambienti destinati al riposo, che godono di una protezione acustica superiore.

8.2 Trattamento dei rumori da impatto

Per quanto riguarda il rumore da calpestio, la normativa italiana applica un limite generale ai solai in funzione della destinazione d'uso dell'edificio. Ad esempio, per gli edifici a uso residenziale e alberghiero viene stabilito un valore massimo di $L'_{n,w}$ pari a 63 dB, che si applica a tutte le partizioni orizzontali tra unità immobiliari distinte. La normativa spagnola, invece, prevede una struttura più articolata e differenziata:

- Se il rumore proviene da *recintos de instalaciones o actividades*, il limite di $L'_{nT,w}$ è pari a 60 dB e si applica a tutti i recinti riceventi.
- Se il rumore proviene da altri recinti abitativi, il limite si applica solo ai *recintos protegidos*, e in tal caso è pari a 65 dB.

9 FONDAMENTI DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI DI CALPESTIO

9.1 Principi fondamentali dell'isolamento acustico ai rumori di calpestio

9.1.1 Dissipazione delle vibrazioni

Il primo principio fondamentale da considerare per comprendere la base fisica delle soluzioni di isolamento dai rumori da calpestio è la capacità intrinseca dei materiali di smorzare (dissipare) le vibrazioni. Quando un solido è soggetto a un'eccitazione da impatto, una parte dell'energia si trasmette all'elemento adiacente, mentre un'altra frazione si trasforma in calore all'interno del materiale stesso a causa dell'isteresi meccanica. Maggiore è questa capacità di smorzamento interno (damping ratio), minore sarà l'ampiezza delle vibrazioni che raggiungono gli ambienti adiacenti e più rapido sarà il loro decadimento nel tempo.

9.1.2 Disaccoppiamento

Una strategia fondamentale per limitare la trasmissione delle vibrazioni consiste nel disaccoppiare strutturalmente l'elemento sollecitato dall'impatto da quello che irradia il rumore verso l'ambiente ricevente. Questo si ottiene interponendo uno strato resiliente tra di essi. Dal punto di vista dinamico, questo strato agisce separando fisicamente le componenti rigide del sistema. La presenza di questo elemento intermedio riduce la rigidità del collegamento tra le parti, ostacolando così la trasmissione diretta dell'energia vibratoria e abbassando il livello di rumore percepito negli ambienti adiacenti. L'efficacia di questa separazione dipende dalle proprietà elastiche dello strato interposto.

9.2 Modellazione teorica delle strategie di isolamento

L'applicazione dei principi fondamentali di dissipazione (Sezione 9.2.1) e disaccoppiamento (Sezione 9.2.2) dà origine a due modelli teorici principali per l'isolamento dai rumori da impatto.

Il primo modello, massa-molla, affida l'efficacia dell'isolamento principalmente alla capacità dissipativa di un elemento elastico (la "molla"). In questo schema, l'energia generata dall'impatto viene smorzata "sul nascere" direttamente dalla molla, riducendo così l'energia vibratoria trasmessa alla massa rigida a cui essa è solidale.

Il secondo modello, massa-molla-massa, si basa invece primariamente sul principio del disaccoppiamento. In questa configurazione, la superficie esposta all'impatto (una massa) viene strutturalmente separata da una seconda massa (che irradia verso il locale ricevente) tramite l'interposizione di uno strato elastico (la "molla"). Sebbene il principio cardine sia il disaccoppiamento, l'isolamento acustico è ottenuto grazie alla capacità della "molla" di ammortizzare e dissipare l'energia vibratoria nel trasferimento tra la prima e la seconda massa.

L'efficacia di questa strategia dipende dalle proprietà intrinseche del materiale resiliente. In particolare, sono determinanti la sua capacità di smorzamento interno.

9.2.1 Il Modello basato sulla dissipazione

Il primo modello, assimilabile a un sistema "Massa-Molla", affida l'efficacia dell'isolamento principalmente alla capacità dissipativa di un elemento elastico (la "molla"). In questo schema, la "molla" (l'elemento resiliente) costituisce la superficie stessa esposta all'impatto ed è solidale alla massa rigida ricevente.

L'energia generata dall'impatto viene smorzata "sul nascere" direttamente dalla molla, che attenua l'intensità della forza impulsiva. Questo riduce l'energia vibratoria trasmessa alla massa rigida a cui essa è solidale. L'efficacia del sistema dipende primariamente dalle proprietà di smorzamento interno (damping) del materiale elastico, ovvero dalla sua capacità intrinseca di ridurre l'ampiezza delle vibrazioni indotte dall'impatto e di favorirne un rapido decadimento nel tempo, dissipando così l'energia meccanica trasmessa.

9.2.2 Il Modello basato sul disaccoppiamento: Massa-Molla

Il secondo modello, definito 'Massa-Molla', si basa sul principio fisico fondamentale del disaccoppiamento. Questo principio, descritto in meccanica classica dal sistema massa (m) - molla (k), viene trasposto nel contesto dell'acustica edilizia utilizzando parametri superficiali, più adatti a descrivere elementi costruttivi estesi. In questa configurazione, la superficie esposta all'impatto (la "Massa", descritta dalla sua massa superficiale m') viene strutturalmente separata dall'elemento portante tramite l'interposizione di uno strato elastico (la "Molla" descritta dalla sua rigidità dinamica s').

Sebbene il principio cardine sia il disaccoppiamento, l'isolamento acustico è ottenuto grazie alla capacità della "molla" di ammortizzare e filtrare l'energia vibratoria nel trasferimento tra la prima e la seconda massa.

L'efficacia di questo filtro acustico dipende direttamente dalle proprietà fisiche dei componenti: la rigidità dinamica s' [N/m^3] dello strato resiliente (la "molla") e la massa superficiale m' [kg/m^2] soggetta all'impatto. Questi due parametri, s' e m' , determinano a loro

volta il parametro fondamentale che descrive il comportamento del sistema: la frequenza di risonanza (o frequenza propria), f_0 , definita dalla relazione:

$$f_0 \text{ [Hz]} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}}$$

Questa frequenza f_0 agisce come la soglia critica. L'isolamento acustico (ovvero l'efficacia del filtro) si manifesta infatti significativamente solo per le frequenze superiori a f_0 , al di sopra della quale l'attenuazione aumenta progressivamente con la frequenza.

Sulla base di questi principi fisici, esistono formule predittive che consentono di stimare il miglioramento dell'isolamento acustico ΔL fornito da un sistema massa-molla-massa, come quelle contenute nella norma ISO 12354-2 (Annesso C) [28], che verranno riprese e applicate ai casi specifici nel Capitolo 12 di questa tesi.

È importante notare che esistono anche modelli teorici più sofisticati che descrivono il comportamento del sistema in modo più completo, incorporando anche l'effetto dello smorzamento interno (damping) del materiale resiliente. Questo parametro è cruciale per limitare l'amplificazione delle vibrazioni alla frequenza di risonanza f_0 . Un esempio significativo è il "modello di trasmissibilità" proposto da Schiavi et al., che include esplicitamente η nella stima di ΔL [64], [65], [66], [67]. Tuttavia, poiché il valore di η non è generalmente fornito dai produttori per i materiali isolanti edili e non è stato determinato sperimentalmente per i materiali oggetto di questa tesi, tali modelli avanzati non possono essere applicati quantitativamente nel presente studio.

10 STATO DELL'ARTE

Le principali strategie per migliorare l'isolamento acustico dai rumori da calpestio nei solai si basano su due principi fondamentali: la dissipazione delle vibrazioni, attraverso un elemento elastico posto a diretto contatto con la sorgente d'impatto, e il disaccoppiamento strutturale, ottenuto mediante l'interposizione di uno strato resiliente che separa l'elemento sollecitato dalla struttura portante, riducendo così la rigidità di accoppiamento.

Sebbene l'applicazione di qualsiasi soluzione comporti inevitabilmente un aumento della massa superficiale del solaio, le tecniche attualmente disponibili sul mercato non si basano sulla legge della massa come strategia principale. Infatti, affidarsi esclusivamente all'incremento della massa non rappresenta generalmente una soluzione efficace, né dal punto di vista strutturale, né tanto meno da quello economico, rispetto all'obiettivo da raggiungere.

Per queste ragioni, le soluzioni più efficaci si fondano principalmente sulla scelta e corretta posa di materiali elastici, in grado di interrompere la trasmissione strutturale del rumore, ottenendo risultati apprezzabili senza introdurre carichi eccessivi. Di seguito vengono presentate le principali soluzioni attualmente disponibili.

Prima di illustrare le principali soluzioni costruttive, è utile richiamare i parametri che la letteratura tecnica e la normativa internazionale, in particolare la ISO 12354-2 [28], individuano come determinanti nella capacità di un solaio di isolare dai rumori da calpestio:

- Massa per unità di superficie del solaio (m'): l'aumento della massa incrementa l'inerzia del solaio e tende a ridurre l'ampiezza delle vibrazioni trasmesse. Tuttavia, comporta anche l'abbassamento della frequenza di risonanza del sistema, avvicinandola proprio alla fascia di frequenze in cui il rumore da calpestio risulta più energetico. Per questo motivo, l'incremento della massa non rappresenta di per sé una soluzione efficace per l'isolamento dai rumori da calpestio, e non costituisce la strategia principale nelle tecnologie costruttive attualmente adottate.
- Indice di riduzione vibratoria (K_{ij}): valore espresso in dB che quantifica quanta energia vibratoria viene trasmessa attraverso il giunto tra due elementi strutturali i e j . Un valore K_{ij} elevato indica che il giunto attenua in modo significativo la trasmissione vibratoria, ovvero offre un buon isolamento.
- Rivestimento del pavimento (ΔL_w): riduzione, espressa in dB, del livello di rumore da calpestio ottenuta mediante un sistema di pavimentazione a secco o un rivestimento elastico applicato alla superficie; quanto più elevato è il valore di ΔL_w , tanto migliore sarà l'isolamento.
- Rivestimento sul lato ricevente ($\Delta L_{d,w}$): misura la riduzione aggiuntiva ottenibile mediante l'installazione di un controsoffitto o di un rivestimento inferiore applicato

sotto il solaio. Se il solaio è già dotato di un rivestimento superiore, la norma prevede di considerare solo la metà del valore $\Delta L_{d,w}$ per non sovrastimare l'effetto complessivo.

- Trattamento della trasmissione laterale ($\Delta R_{l,w}$): miglioramento, espresso in dB, dell'isolamento acustico quando si applica un rivestimento alla parete laterale sul lato del locale ricevente (ad esempio una controparete in cartongesso).
- Superficie dell'elemento separatore (S_i): area, espressa in m^2 , del solaio soggetto all'impatto. Nelle equazioni normative compare nel termine logaritmico $10 \log (S_i / S_{i,lab})$: raddoppiando l'area, il livello calcolato aumenta di circa 3 dB; dimezzandola, diminuisce di 3 dB. Un solaio più esteso è in grado di irradiare più energia e offre un maggior numero di punti di accoppiamento con le pareti laterali, influenzando così sia la trasmissione diretta che quella per via laterale.
- Rapporto di forma (S_i / l_{ij}): misura il rapporto tra la superficie del solaio e la lunghezza del giunto con la parete considerata. Questo rapporto, convertito in decibel tramite il termine $10 \log (S_i / l_{ij})$, viene sottratto dal livello di pressione sonora da calpestio trasmessa per via laterale normalizzato e ponderato. Da ciò si deduce che gli impatti si trasmettono più facilmente verso elementi adiacenti lunghi, poiché ogni metro di giunto riceve una quantità maggiore di energia strutturale.

Conviene sottolineare che la ISO 12354-2 [28] non riunisce tutti questi parametri in un'unica equazione: ogni via di trasmissione (diretta o laterale) viene valutata con il sottoinsieme di variabili che le corrisponde e, solo alla fine, i diversi livelli parziali si combinano energeticamente per ottenere il valore globale di rumore da impatto del solaio.

Di seguito si annoverano le principali soluzioni esistenti.

10.1 Rivestimenti Resilienti

Le pavimentazioni resilienti rappresentano una delle soluzioni più semplici ed economiche per ridurre il rumore da calpestio nei solai. Questi materiali, applicati direttamente sulla superficie di calpestio, attenuano la trasmissione delle vibrazioni generate dal passaggio pedonale, limitando così la propagazione del suono attraverso la struttura sottostante.

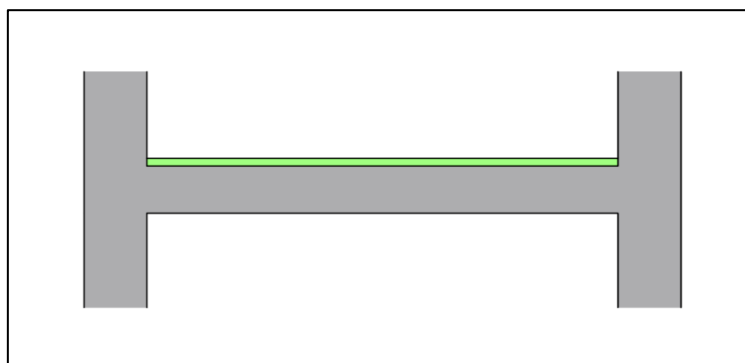


Figura 4 - Schema grafico rivestimento resiliente. Produzione propria

Le pavimentazioni resilienti si classificano in:

- Pavimentazioni in PVC;
- Pavimentazioni in linoleum;
- Pavimentazioni in gomma;
- Moquette.

I principali vantaggi di questa tipologia di finitura sono di natura economica e pratica, in quanto si tratta di materiali a basso costo, di facile installazione e applicabili direttamente sulla pavimentazione esistente, senza la necessità di interventi invasivi [6].

L'efficacia delle pavimentazioni resilienti nell'isolamento dai rumori da calpestio dipende dalle proprietà intrinseche dei materiali che le compongono e, in particolare, dalla combinazione tra rigidità dinamica, capacità di smorzamento interno e spessore effettivo.

Sulla base di prove normalizzate e delle prestazioni dichiarate dai produttori, è possibile distinguere due comportamenti di riferimento: da un lato, le pavimentazioni elastiche compatte (come PVC, linoleum o gomma) raggiungono riduzioni ΔL che, ponderate secondo la UNI EN ISO 717-2 [31], si collocano abitualmente tra 14 e 22 dB; dall'altro, le soluzioni tessili superano frequentemente i 30 dB, in particolare nel caso di moquette di spessore significativo, grazie alla minore rigidità di contatto e alla maggiore capacità di dissipazione meccanica fornita dalla struttura fibrosa [5], [6], [47].

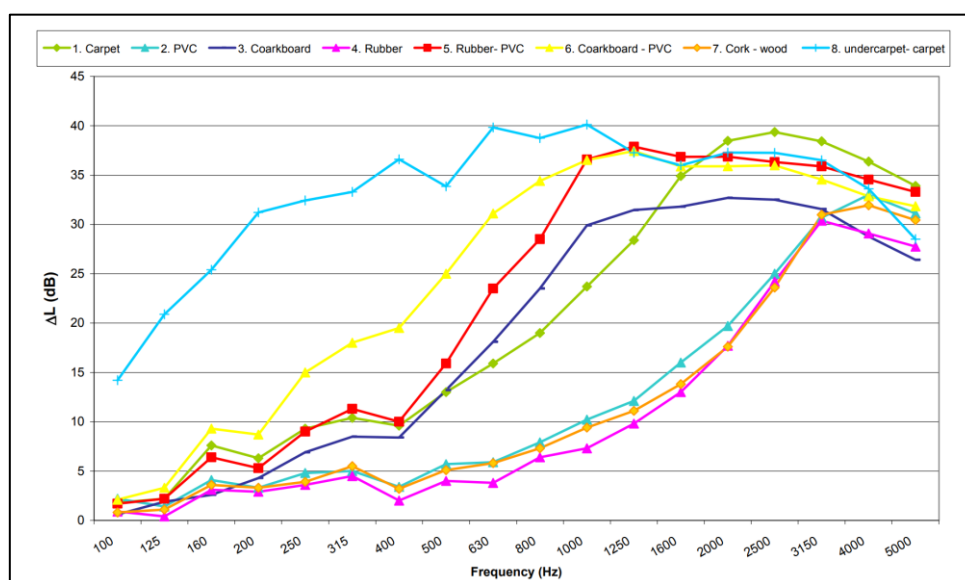


Figura 5 - Relazione tra riduzione al rumore da impatto e frequenza per distinti materiali. Fonte: [7].

È opportuno sottolineare che tali valori sono fortemente influenzati dallo spessore effettivo dello strato resiliente, dalla rigidità dinamica s' e dalla qualità della posa in opera (giunzioni, continuità, presenza di ponti rigidi). Per questo motivo, l'interpretazione degli intervalli indicati deve sempre avvenire alla luce dei dati sperimentali specifici di ciascun prodotto e del sistema costruttivo con cui viene abbinato.

Tuttavia, pur essendo economici, il loro limite è fisico: agiscono solo sulla superficie di contatto. Non disaccoppiano la massa del solaio in modo profondo e spesso non bastano a compensare le carenze strutturali gravi degli edifici esistenti senza un intervento più massiccio.

10.2 Massetti flottanti

Un metodo particolarmente efficace per isolare il solaio dal rumore da calpestio consiste nella desolidarizzazione del massetto, ottenuta attraverso la separazione rispetto all'elemento strutturale mediante uno strato resiliente in grado di ridurre la trasmissione delle vibrazioni. Questo sistema consente non solo di migliorare le prestazioni acustiche del solaio, ma anche di mantenere la libertà di scelta nella finitura del pavimento, che continua ad appoggiarsi sul massetto come in una soluzione tradizionale.

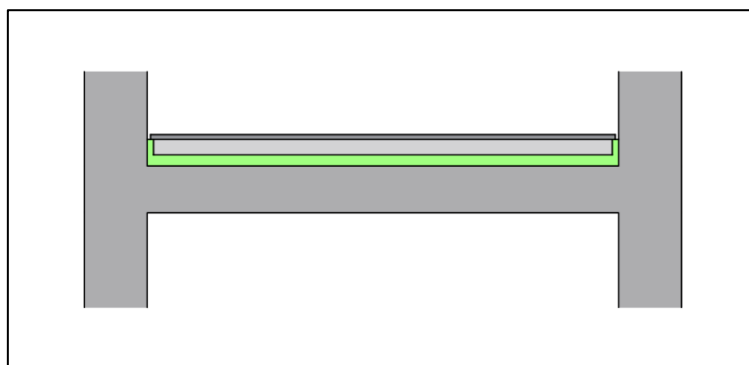


Figura 6 - Schema grafico massetto flottante. Elaborazione propria.

La realizzazione della “vasca” di materiale elastico deve garantire la completa desolidarizzazione del massetto, e quindi del pavimento, dalla struttura inferiore e da quelle adiacenti, evitando ogni collegamento rigido [14], [19]. Per garantire che non vi siano collegamenti rigidi tra il massetto e il solaio sottostante è necessario realizzare la vasca di strato resiliente in modo che sia prima di discontinuità. tale scopo, tutti gli elementi dello strato resiliente devono essere ben giuntati, nastrati e, se necessario, sormontati tra loro per prevenire infiltrazioni di malta. Se il materiale è di tipo fibroso o poroso, come la lana di vetro o di roccia, deve essere adeguatamente protetto con un telo in polietilene per impedirne l'impregnazione. [2], [4], [69].

La scelta del materiale è determinante per garantire l'efficacia dell'isolamento del solaio. Tra le caratteristiche da considerare vi sono le proprietà elastiche, la rigidità dinamica e il comportamento sotto carico nel lungo periodo, poiché il materiale resterà permanentemente compresso sotto il massetto.

Tra i materiali più comuni utilizzati per lo strato resiliente troviamo:

- Polietilene espanso elastificato;
- Gomma riciclata;

- Lana di roccia ad alta densità;
- Lana di vetro.

Tuttavia, l'efficacia di questa tecnologia si scontra oggi con limiti operativi evidenti sia nelle nuove costruzioni che nel recupero. L'uso di leganti umidi impone tempi di asciugatura che bloccano il cantiere per settimane, un costo nascosto spesso incompatibile con le attuali esigenze di rapidità. Inoltre, il peso elevato e gli spessori richiesti (spesso oltre 8-10 cm totali) rappresentano un vincolo rigido: nel nuovo comportano un inutile aggravio strutturale ed economico, mentre nell'esistente rendono spesso la soluzione inapplicabile per limiti di portata dei solai o di quote, favorendo progressivamente il passaggio verso sistemi a secco più leggeri e immediati.

10.3 Controsoffitti fonoisolanti

I controsoffitti rappresentano una soluzione concettualmente distinta dalle opzioni finora analizzate, poiché non agiscono direttamente sulla sorgente del rumore, bensì hanno l'obiettivo di migliorare l'isolamento acustico dell'ambiente ricevente. Questa strategia si configura spesso come una scelta obbligata negli interventi su edifici esistenti dove non è possibile accedere al piano superiore.

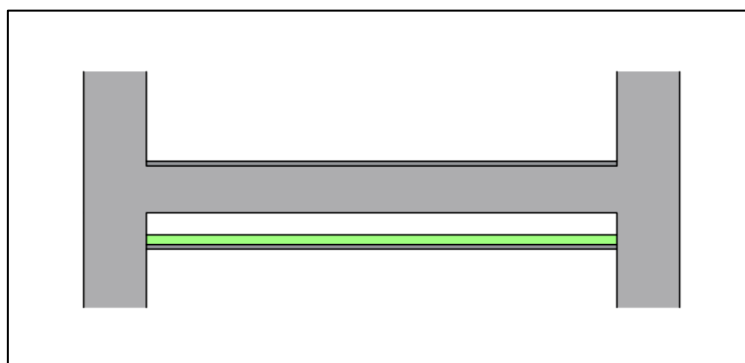


Figura 7 - Schema grafico controsoffitto isolante. Produzione propria

Tuttavia, l'intervento all'intradosso presenta limiti fisici intrinseci rispetto all'azione diretta sulla sorgente. L'efficacia è spesso compromessa dalle trasmissioni laterali: l'energia vibratoria, una volta entrata nella struttura pesante del solaio, si propaga anche lungo le pareti verticali, bypassando parzialmente il controsoffitto (*flanking transmission*) e rendendo vani gli sforzi se non si isolano anche le pareti (creando una costosa "scatola nella scatola"). Inoltre, il sacrificio di volume abitabile rappresenta un vincolo critico: un sistema acustico efficace richiede spessori significativi (spesso > 10-15 cm tra plenum e lastre) che, nel patrimonio edilizio esistente con altezze interpiano standard, risultano spesso incompatibili con i requisiti minimi di abitabilità o con la presenza di infissi, rendendo questa via spesso impraticabile o spazialmente penalizzante [22], [45].

I controsoffitti per l'isolamento acustico possono essere classificati in due principali tipologie, in base al loro sistema di supporto:

10.3.1 Controsoffitti sospesi e in aderenza (supportati dal solaio)

I controsoffitti sospesi e quelli in aderenza sono due tipologie di controsoffitto supportate direttamente dal solaio, ma con modalità di fissaggio differenti. In entrambi i casi, l'isolamento acustico dipende principalmente dalle caratteristiche fonoisolanti dei pannelli utilizzati.

Nei sistemi sospesi, la struttura metallica che sostiene i pannelli del controsoffitto è ancorata al solaio mediante tiranti, creando un'intercapedine tra il controsoffitto e il solaio. Questo spazio può essere sfruttato per inserire materiali fonoassorbenti, migliorando ulteriormente le prestazioni del sistema.

Nei sistemi in aderenza, invece, la struttura metallica è fissata direttamente al solaio, senza la formazione di un'intercapedine: in questo caso, il contributo acustico dipende unicamente dalla pannellatura.

Nei controsoffitti sospesi, l'adozione di un sistema di disaccoppiamento tra il solaio e la struttura metallica consente di ridurre la trasmissione diretta delle vibrazioni, migliorando sensibilmente l'isolamento al rumore da calpestio. Questo effetto si ottiene mediante l'impiego di supporti antivibranti, realizzati in materiali elastomerici come la gomma oppure in molle metalliche con inserti elastici, che interrompono la continuità strutturale e limitano la propagazione del rumore impattivo. L'uso di questi sistemi consente una riduzione del livello di pressione sonora da impatto fino a 15 dB rispetto ai supporti rigidi, con la massima efficacia alle frequenze medio-alte e un miglioramento significativo anche alle basse frequenze [45].

Nei controsoffitti in aderenza, al contrario, l'assenza di elementi disaccoppianti limita fortemente l'efficacia della desolidarizzazione, riducendo il potenziale miglioramento acustico ottenibile.

10.3.2 Controsoffitti autoportanti (appoggiati ai muri perimetrali)

A differenza dei sistemi sospesi, il controsoffitto autoportante non viene appeso al solaio, ma si appoggia esclusivamente sui muri perimetrali. Questa configurazione elimina completamente la trasmissione diretta delle vibrazioni tra il solaio e il locale sottostante, garantendo un isolamento acustico superiore rispetto alle soluzioni che prevedono il fissaggio diretto al solaio. Tuttavia, è importante considerare che una parte delle vibrazioni può comunque trasmettersi alle pareti collegate al solaio. Per questo motivo, anche in questo caso è necessario disaccoppiare il controsoffitto dalla struttura fissata ai muri tramite bande elastiche perimetrali, in modo da evitare la formazione di ponti acustici. Le prestazioni di un

controsoffitto autoportante sono, in generale, superiori rispetto a quelle dei sistemi sospesi, proprio grazie all'assenza di connessioni rigide con il solaio.

10.4 Pavimentazioni tecniche sopraelevate

Le pavimentazioni tecniche sopraelevate, comunemente chiamate pavimentazioni galleggianti, costituiscono un sistema di pavimentazione modulare e poco invasivo, composto da pannelli sollevati rispetto alla pavimentazione originale. Questi pannelli possono essere installati su una struttura metallica sostenuta da supporti regolabili, oppure su una sottostruttura in legno, separata dalla pavimentazione esistente mediante distanziatori elastici.

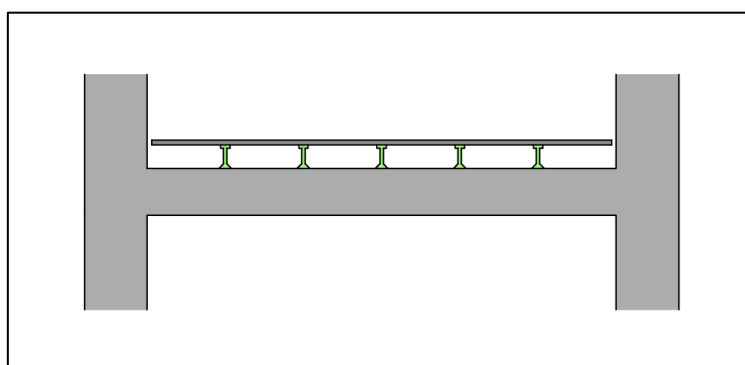


Figura 8 - Schema grafico pavimentazione tecnica sopraelevata. Produzione propria

Il principio di funzionamento di questa soluzione si basa sull'attenuazione delle vibrazioni generate e trasmesse al solaio, consentendo un isolamento acustico efficace contro il rumore da calpestio, in funzione delle caratteristiche degli appoggi. Le prestazioni acustiche dipendono principalmente dalle proprietà elastiche dei supporti utilizzati e dalla configurazione globale del sistema [46]. È fondamentale evitare la formazione di ponti acustici, che possono verificarsi in presenza di collegamenti rigidi tra la nuova pavimentazione e gli elementi esistenti, ovvero il solaio e le strutture circostanti. Per garantire un isolamento acustico efficace, è importante valutare attentamente le proprietà dei materiali di supporto e prevedere l'utilizzo di bande elastiche perimetrali che separino il sistema flottante dalle superfici adiacenti.

Lo spazio creato tra i pannelli modulari e la pavimentazione esistente può essere lasciato vuoto oppure riempito con pannelli fonoisolanti. Nel primo caso, la camera vuota consente il passaggio degli impianti, rendendo questa soluzione particolarmente adatta per uffici e ambienti di lavoro in cui la flessibilità degli impianti rappresenta un requisito fondamentale. Nel secondo caso, il riempimento con materiali fonoisolanti offre vantaggi aggiuntivi in termini di isolamento acustico, in particolare rispetto al rumore aereo.

Tuttavia, l'applicazione di questa tecnologia in ambito residenziale presenta un rapporto costi-benefici spesso sfavorevole. Il sistema richiede spessori elevati (spesso superiori ai 10-15 cm)

che sottraggono prezioso volume abitabile senza una reale necessità impiantistica, a differenza del terziario. Inoltre, la presenza della camera d'aria e la leggerezza dei pannelli modulari tendono a generare una risonanza al passo (effetto "tamburo") che, pur isolando il piano sottostante, restituisce una sensazione di scarsa solidità e un rumore fastidioso all'interno dello stesso ambiente emittente.

Per quanto riguarda le prestazioni di isolamento acustico contro il rumore da calpestio, l'efficacia del sistema dipende dai seguenti fattori:

- Proprietà dei pannelli di pavimentazione;
- Proprietà elastiche dei supporti;
- Altezza della camera d'aria;
- Eventuale utilizzo di materiali fonoisolanti all'interno della camera.

10.5 Pavimentazioni flottanti (a secco)

Le pavimentazioni flottanti a secco rappresentano la soluzione costruttiva al centro della presente indagine sperimentale. Questa categoria rappresenta l'evoluzione tecnologica più coerente con le attuali esigenze di riqualificazione edilizia. Questa tecnologia si basa sull'interposizione di uno strato resiliente tra la struttura esistente e la pavimentazione finale, senza l'impiego di leganti umidi come cementi o malte (a differenza dei massetti flottanti descritti nel paragrafo successivo). Tale caratteristica le rende particolarmente indicate negli interventi di riqualificazione leggera, in quanto comportano carichi ridotti sulla struttura, spessori contenuti e consentono una posa rapida e reversibile. L'assenza di tempi di asciugatura e la compatibilità immediata con solai esistenti risolvono alla radice le criticità logistiche dei sistemi tradizionali.

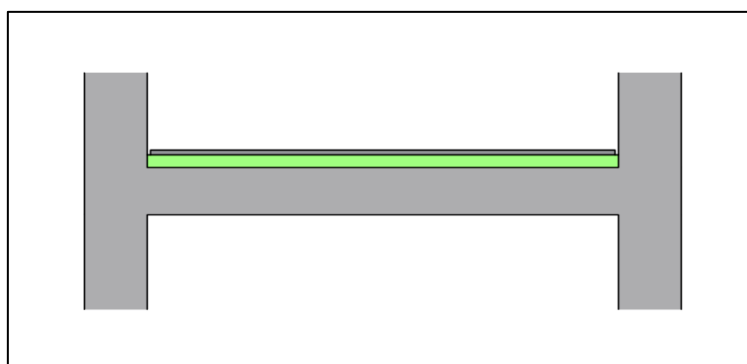


Figura 9 - Schema grafico pavimentazione flottante. Produzione propria

La posa delle pavimentazioni flottanti inizia con la preparazione del supporto esistente, che deve risultare pulito, asciutto e livellato, al fine di evitare problematiche successive. Eventuali irregolarità devono essere corrette, poiché si trasmetterebbero alla pavimentazione superiore.

Lo strato resiliente, fornito in rotoli o pannelli, viene posato direttamente sul supporto, che può essere il solaio, il massetto o la pavimentazione preesistente, e le giunzioni tra i vari elementi devono essere sigillate per garantire la continuità dello strato isolante. In presenza di un sistema di riscaldamento radiante, è fondamentale scegliere un materiale a bassa resistenza termica.

Nel caso in cui la finitura superficiale sia flessibile, come un laminato, un pavimento vinilico o un parquet multistrato prefabbricato, questa può essere installata direttamente sopra lo strato resiliente. Tuttavia, qualora si desideri posare una finitura rigida, come piastrelle ceramiche, gres porcellanato o pietra naturale, è prassi comune interporre un pannello rigido di ripartizione (generalmente pannelli OSB-3, pannelli di particelle agglomerate con cemento, pannelli in fibrogesso o in gesso-cellulosa, oppure pannelli multistrato in legno) tra lo strato resiliente e la pavimentazione. Questo pannello distribuisce uniformemente i carichi sul materiale elastico e consente l'utilizzo sicuro di pavimentazioni rigide, evitando fessurazioni o deformazioni dovute a movimenti o carichi puntuali.

In tutti i casi, è fondamentale lasciare uno spazio perimetrale di circa 1 cm lungo tutto il perimetro delle pareti, al fine di evitare contatti rigidi tra gli elementi. Successivamente può essere installato il battiscopa, mantenendo una distanza di alcuni millimetri rispetto alla pavimentazione, per evitare la formazione di ponti acustici.

Lo strato resiliente è l'elemento che determina il livello di isolamento acustico ottenibile, motivo per cui è importante valutare attentamente sia il materiale sia lo spessore. Tra i principali materiali utilizzati si trovano:

- Gomma riciclata;
- Lana di roccia;
- Lana di vetro;
- Polietilene espanso (PE espanso) elastificato;
- Poliuretano espanso (PU espanso) elastificato;
- Schiuma di melammina;
- Sughero naturale o agglomerato di sughero;
- Polietilene reticolato;
- Materiali innovativi riciclati: includono fibre vegetali o polimeri riciclati.

Le prestazioni acustiche dei diversi materiali dipendono principalmente dal loro spessore e dalla rigidezza dinamica. In linea generale, i materiali più economici e sottili, come il polietilene espanso, offrono riduzioni del rumore da calpestio (ΔL_w) comprese tra 16 e 20 dB, mentre quelli di costo medio, come la gomma riciclata o il sughero, raggiungono normalmente attenuazioni comprese tra 22 e 30 dB, misurate secondo la norma UNI EN ISO 717-2. I materiali più costosi

e specializzati, come il polietilene reticolato o i sistemi multistrato compositi, possono raggiungere livelli di isolamento superiori, superando anche i 30 dB di riduzione del rumore da calpestio [43], [44], [65], [66].

Tuttavia, la rinuncia alla massa inerziale del massetto in calcestruzzo introduce un apparente paradosso fisico. Secondo la legge della massa tradizionale, la drastica riduzione del peso dovrebbe comportare un inevitabile crollo delle prestazioni di isolamento. Eppure, le applicazioni empiriche e i dati di mercato dimostrano che questi sistemi leggeri riescono spesso a garantire livelli di attenuazione competitivi, se non superiori, rispetto alle soluzioni massive tradizionali (massetto galleggiante). Come è possibile ottenere questi risultati "sfidando" la fisica classica? Se la massa non è più la barriera principale, quale meccanismo compensativo interviene? È proprio per rispondere a questo interrogativo che nasce la necessità di questa indagine sperimentale: comprendere come questi sistemi riescano a performare in assenza di massa e definire quali parametri governino realmente la loro efficacia.

10.2.1 Contesto applicativo: Il paradosso geografico e il potenziale tecnologico

Nonostante i vantaggi operativi appena descritti, l'osservazione del mercato internazionale evidenzia una singolare frattura nella diffusione di questi sistemi. Nel Nord Europa (Germania, Scandinavia, Regno Unito), questa tecnologia rappresenta ormai uno standard consolidato, spinta dalla necessità di integrare le diffuse costruzioni leggere (timber frame) con soluzioni a basso carico statico e prive di apporto idrico. Al contrario, nell'Europa meridionale (Italia e Spagna), l'adozione appare ancora frenata da una forte inerzia culturale, legata alla tradizione costruttiva massiva (laterocemento) e al dominio storico delle pavimentazioni ceramiche su massetto.

Tuttavia, i dati tecnici suggeriscono che questa resistenza culturale stia generando una perdita di efficienza per l'intero settore delle costruzioni, pur manifestandosi in modo critico soprattutto nel recupero dell'esistente. Tre fattori rendono questa soluzione un elemento di svolta tecnologica per l'edilizia contemporanea:

1. Abbattimento del carico permanente: Il sistema a secco elimina la necessità dello strato massivo di ripartizione (il massetto cementizio), riducendo drasticamente il peso proprio del pacchetto solaio. In termini strutturali, questo alleggerimento risulta vantaggioso nelle nuove costruzioni per l'ottimizzazione dei dimensionamenti statici, e diviene determinante nel restauro di edifici storici o solai a bassa portanza, rendendo possibili interventi altrimenti insostenibili.
2. Cantiere a secco: L'eliminazione dell'acqua dal processo di posa azzerà il rischio di introdurre umidità nella struttura. Questo aspetto, utile per la logistica del nuovo, diventa cruciale nel restauro di edifici con solai lignei delicati o superfici di pregio (come soffitti affrescati al piano inferiore), dove le infiltrazioni accidentali o l'umidità di risalita di una gettata tradizionale potrebbero causare danni irreversibili.

3. **Bassa inerzia termica:** Un vantaggio impiantistico rilevante riguarda l'eventuale abbinamento con sistemi di riscaldamento radiante. L'assenza della massa di calcestruzzo da riscaldare riduce l'inerzia termica del pacchetto, garantendo una risposta dell'impianto molto più rapida (messa a regime in tempi ridotti). Questa reattività si allinea meglio alle esigenze di comfort contemporanee e alla gestione intermittente del calore, superando la rigidità dei sistemi radianti tradizionali annegati nel massetto.

10.6 Tabella riepilogativa

Per confrontare le diverse soluzioni, si riporta di seguito una tabella riepilogativa che mette a confronto in modo qualitativo i costi e le prestazioni, sulla base dei dati di mercato e della letteratura scientifica analizzata nei paragrafi precedenti. Inoltre, è inclusa una colonna dedicata all'ambito di applicazione più comune e indicato per ciascuna opzione, considerando la fattibilità tecnica e l'efficacia dell'intervento.

Tabella 5 – Riassunto stato dell'arte

Soluzione	Costo	Efficacia	Applicazione
Rivestimenti Resilienti	Medio-basso	Media-bassa	Edifici nuovi ed esistenti
Massetti flottanti	Medio-basso	Alta	Nuove costruzioni
Controsoffitti fonoisolanti	Alto	Media	Edifici esistenti
Pavimentazioni tecniche sopraelevate	Alto	Alta	Tipicamente per uffici
Pavimentazioni flottanti	Medio	Media-alta	Edifici nuovi ed esistenti

11 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E CONFIGURAZIONI

In questo capitolo vengono presentati i materiali utilizzati nella campagna sperimentale e le configurazioni di prova adottate. Dapprima si descrivono le proprietà fisiche e tecniche delle lane minerali impiegate come strato elastico (paragrafo 11.1), approfondendo in particolare il parametro fondamentale della rigidità dinamica (s'), calcolato a partire dai dati sperimentali secondo la normativa vigente (paragrafo 11.2). Successivamente, si illustrano le caratteristiche dei rivestimenti di finitura selezionati (paragrafo 11.3), concentrandosi sulla loro massa superficiale (m'). Infine, viene definita la matrice delle nove configurazioni di prova risultanti dalla combinazione di questi elementi (paragrafo 11.4), che costituirà la base per l'analisi dei risultati nei capitoli successivi.

11.1 Lane minerali

Le lane minerali oggetto dell'analisi sperimentale sono state fornite dal gruppo Saint-Gobain, realtà industriale di rilievo internazionale attiva nel settore dei materiali per l'edilizia sostenibile. In particolare, i prodotti appartengono alla linea Isover, marchio del gruppo specializzato nello sviluppo di soluzioni ad alte prestazioni per l'isolamento termico e acustico, ampiamente utilizzate in ambito residenziale, terziario e industriale.



Figura 10 - Logo ufficiale del marchio Isover, appartenente al gruppo Saint-Gobain. Fonte: sito ufficiale Isover, www.isover.it, consultato il 3 maggio 2025.

I pannelli selezionati (Arena PF e Panel PST) sono materiali specificamente progettati per contribuire all'isolamento dei solai, sia dal punto di vista termico che, in particolare, acustico rispetto al rumore da calpestio. Il loro impiego è finalizzato a limitare la trasmissione delle vibrazioni generate dal passaggio pedonale o da sollecitazioni meccaniche, contribuendo così al comfort acustico interno degli ambienti.

Entrambi i prodotti sono presentati dal produttore come pannelli rigidi ad alta densità e come materiali non idrofili, destinati a garantire stabilità prestazionale e durabilità anche in presenza di condizioni ambientali potenzialmente umide. Inoltre, i materiali condividono alcune

caratteristiche generali rilevanti: inerzia biologica (non favoriscono lo sviluppo di muffe o batteri), stabilità dimensionale nel tempo, compatibilità con sistemi costruttivi esistenti e di nuova realizzazione, e prestazioni dichiarate conformemente a norme tecniche armonizzate, tra cui la EN 29052-1 [18] per la rigidità dinamica e la EN 12667 per la conducibilità termica.

Dal punto di vista ambientale, entrambi i pannelli presentano un contenuto di materia prima riciclata superiore al 50% e sono completamente riciclabili al termine della loro vita utile, contribuendo così agli obiettivi di sostenibilità del settore delle costruzioni.

11.1.1 Arena PF (15 – 25 mm)

Il primo materiale oggetto di analisi sperimentale è ARENA PF, un materassino elastico prodotto da Isover – Saint-Gobain, composto da lana minerale ad alta densità ottenuta tramite fusione e fibratura di materie prime naturali, tra cui basalto, scorie e sabbie silicee, con l’incorporazione di materiali riciclati post-consumo per il 65% in massa, e fornito privo di qualsiasi rivestimento superficiale [59], [60].



Figura 11 - Materassino acustico Arena PF per pavimenti. Fonte: rielaborazione da [35].

Secondo quanto dichiarato nella documentazione tecnica, il pannello presenta prestazioni elevate in termini di isolamento acustico e termico, anche con spessori ridotti, ed è dotato di buona resistenza alla compressione. Il produttore ne sottolinea la stabilità prestazionale nel tempo, con riferimento alla costanza delle performance lungo l’intero ciclo di vita utile dell’edificio. ARENA PF è inoltre descritto come inerte dal punto di vista biologico, non favorevole allo sviluppo di muffe o altri microrganismi, e come non idrofilo, ovvero non soggetto all’assorbimento d’acqua per capillarità, caratteristica che ne favorisce l’impiego in applicazioni a pavimento.

Dal punto di vista ambientale, il pannello è composto per oltre il 50% da materiale riciclato e risulta completamente riciclabile a fine vita. È commercializzato in lastre di dimensioni 1350 ×

600 mm, con spessori di 15 mm e 25 mm [59], [60]. Tra le proprietà tecniche rilevanti, il produttore dichiara [62]:

Tabella 6 - Proprietà tecniche dichiarate del pannello ARENA PF, secondo la documentazione tecnica del produttore Isover – Saint-Gobain. Fonte: [59].

Parametro (con simbolo)	Valore (unità)	Norma di riferimento
Conducibilità termica dichiarata (λ_D)	0,032 W/m·K	EN 12667, EN 12939
Calore specifico approssimato (c_p)	800 J/kg·K	—
Resistenza al flusso d'aria (AF_r)	>5 kPa·s/m ²	EN 29053
Reazione al fuoco	Euroclasse A2-s1, d0	EN 13501-1
Assorbimento d'acqua a breve termine (WS)	<1 kg/m ²	EN 1609
Resistenza alla diffusione del vapore (μ)	1	EN 12086
Rigidità dinamica (s_D)	10 MN/m ³	EN 29052-1
Compressibilità (C_p)	<5 mm	EN 13162, EN 12431
Resistenza a compressione al 10% di deformazione (σ_{10})	5,0 kPa	EN 826
Stabilità dimensionale (DS)	<1 %	EN 1604
Resistenza termica dichiarata (R_D)	0,45 m ² ·K/W (15 mm) – 0,75 m ² ·K/W (25 mm)	EN 12667, EN 12939
Assorbimento acustico ponderato (α_w)	0,30 (sia per 15 mm che per 25 mm)	EN ISO 354

11.1.2 Panel PST (22 mm)

Il secondo materiale analizzato è PANEL PST, anch'esso prodotto da Isover – Saint-Gobain. Si tratta di un pannello rigido costituito da lana di roccia ad alta densità, dotato di un rivestimento in film di polietilene applicato su una delle due superfici. Il prodotto è progettato per l'isolamento acustico da rumore da impatto nei solai, in particolare in sistemi a pavimento flottante.

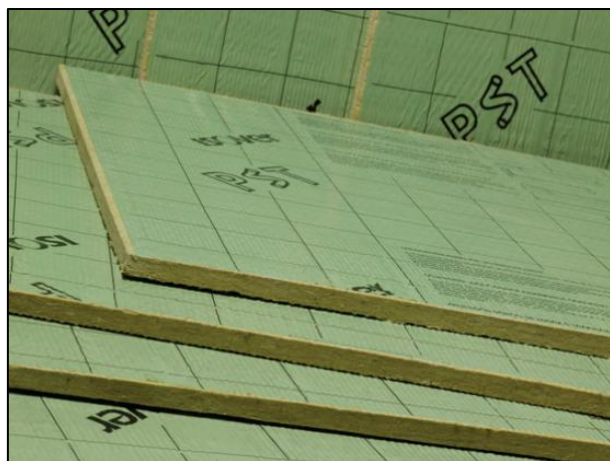


Figura 12 - Pannello rigido Panel PST per pavimenti flottanti. Fonte: rielaborazione da [36].

Secondo quanto riportato nella documentazione tecnica, il pannello presenta buone prestazioni in termini di isolamento acustico e termico, una resistenza meccanica elevata e la capacità di mantenere inalterate le proprie caratteristiche prestazionali nel tempo. PANEL PST è inoltre descritto come inerte dal punto di vista biologico, non favorevole allo sviluppo di muffe o microrganismi, e come non idrofilo, ovvero resistente all'assorbimento d'acqua per capillarità.

Dal punto di vista ambientale, il prodotto è realizzato con una percentuale di materiale riciclato superiore al 50% e risulta completamente riciclabile a fine vita, contribuendo così alla sostenibilità dei sistemi edilizi in cui viene impiegato. PANEL PST è disponibile in pannelli di dimensioni 1200 × 1000 mm, con uno spessore di 22 mm [61]. Tra le proprietà tecniche rilevanti, il produttore dichiara [63]:

Tabella 7 - Proprietà tecniche dichiarate del pannello PANEL PST, secondo la documentazione tecnica del produttore Isover – Saint-Gobain. Fonte: [61]

Parametro (con simbolo)	Valore (unità)	Norma di riferimento
Conducibilità termica dichiarata (λ_D)	0,039 W/m·K	EN 12667, EN 12939
Calore specifico approssimato (c_p)	800 J/kg·K	—
Reazione al fuoco	Euroclasse F	EN 13501-1
Assorbimento d'acqua a breve termine (WS)	<1 kg/m ²	EN 1609
Resistenza alla diffusione del vapore (μ)	1	EN 12086
Rigidità dinamica (s_D)	20 MN/m ³	EN 29052-1
Compressibilità (C_p)	<5 mm	EN 13162, EN 12431

Resistenza a compressione al 10% di deformazione (σ_{10})	65,0 kPa	EN 826
Resistenza termica dichiarata (Rd)	0,55 m ² ·K/W	EN 12667, EN 12939
Assorbimento acustico ponderato (α_w)	—	EN ISO 354

11.2 Il parametro fondamentale: La Rigidità Dinamica (s')

Per valutare l'efficacia dell'isolamento acustico rispetto al rumore da calpestio di una pavimentazione flottante, è necessario considerare il comportamento dinamico dei materiali elastici impiegati nella stratigrafia del pavimento. In particolare, occorre misurare la capacità del materiale di opporsi a una sollecitazione oscillante, analoga a quella generata dal passaggio pedonale o da eventi impulsivi localizzati sulla superficie del pavimento.

In ambito edilizio, tale comportamento viene descritto tramite la rigidità dinamica per unità di superficie, indicata con il simbolo s' ed espressa in MN/m³. Questo parametro quantifica la reattività del materiale a sollecitazioni vibranti perpendicolari alla sua superficie, in regime dinamico, ed è direttamente correlato alla sua efficacia nell'attenuazione del rumore trasmesso per via solida.

La rigidità dinamica può essere concettualmente assimilata alla costante elastica di una molla in un sistema vibratorio. In un modello semplificato, un pacchetto di pavimentazione flottante può essere rappresentato come un sistema massa–molla–massa, in cui il materiale resiliente costituisce l'elemento elastico interposto tra la massa del massetto e quella del solaio. Il valore di s' influisce direttamente sulla frequenza propria di tale sistema e, di conseguenza, sulla sua capacità di attenuare la propagazione del rumore da calpestio [20], [33], [56], [71].

La rigidità dinamica viene determinata sperimentalmente in laboratorio secondo la procedura definita dalla norma EN 29052-1:1992 [18], derivata dalla norma internazionale ISO 9052-1:1989 [32], che stabilisce il metodo di prova per la caratterizzazione dei materiali resilienti impiegati nei pavimenti flottanti. Tale norma è stata recepita a livello nazionale come UNI EN 29052-1:1994 in Italia e UNE-EN 29052-1:1994 in Spagna. Si applica specificamente ai sistemi in cui uno strato elastico è interposto tra il solaio strutturale e il massetto, configurazione che rappresenta lo schema tipico di pavimento flottante secondo la terminologia normativa [32].

Sebbene non sia prevista l'applicazione formale della norma ad altri sistemi, i principi della prova possono essere estesi, in ambito sperimentale, anche alla valutazione di materiali impiegati in configurazioni leggere prive di massetto, come i pavimenti flottanti leggeri. In questi casi, il parametro ottenuto non ha validità normativa, ma conserva comunque un significato tecnico, in quanto misura la risposta dinamica del materiale in condizioni comparabili.

11.2.1 Approcci normativi per la determinazione della rigidità dinamica

La norma EN 29052-1 [18] definisce tre metodi per la determinazione della rigidità dinamica per unità di superficie (s') [N/m^3] dei materiali resilienti, corrispondenti ai paragrafi 3.1, 3.2 e 3.3.

Il primo metodo (paragrafo 3.1) consiste nella definizione diretta della rigidità dinamica come rapporto tra la pressione dinamica applicata e la deformazione verticale dinamica del materiale. Questo approccio, sebbene teoricamente rigoroso, presenta difficoltà pratiche dovute alla necessità di misurare con estrema precisione spostamenti dinamici di piccolissima entità e forze applicate con controllo armonico, richiedendo strumenti dei quali il laboratorio dell'ETSAM non disponeva.

Il secondo metodo (paragrafo 3.2) si basa sul modello fisico massa–molla, in cui il materiale resiliente funge da elemento elastico e la massa superiore rappresenta il carico reale applicato. Le prove hanno lo scopo di determinare la frequenza naturale f_0 [Hz] del sistema costituito dal materiale e dalla massa superiore. A partire da questo valore è possibile ricavare la rigidità dinamica mediante la relazione indicata nella norma. Sebbene utile per prevedere il comportamento dinamico di una data soluzione costruttiva, questo approccio non è pertinente agli obiettivi di questa tesi. Lo scopo qui è infatti caratterizzare la rigidità dinamica standardizzata del materiale isolante stesso, un parametro intrinseco utilizzabile per la previsione in qualsiasi caso applicativo, e non la sua prestazione sotto un carico specifico e predeterminato [18].

Il terzo metodo (paragrafo 3.3) si basa anch'esso sul modello massa–molla, ma impiega una configurazione semplificata e normalizzata che ne facilita l'applicazione in laboratorio, utilizzando una massa di carico standard definita dalla norma. A differenza del Metodo 3.2, questo approccio è concepito specificamente per la caratterizzazione intrinseca e standardizzata del materiale resiliente. Il valore di rigidità dinamica ottenuto tramite questo metodo rappresenta una proprietà generale del materiale, indipendente dalla specifica applicazione finale, rendendolo così un dato confrontabile e utilizzabile in diversi contesti progettuali. Le prove consistono nella determinazione della frequenza di risonanza f_r [Hz] di un sistema costituito da una massa rigida nota appoggiata sul campione e sottoposta a eccitazione verticale. A partire da questo valore si ottiene la rigidità dinamica mediante la relazione:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}}$$

dove:

- s'_t : rigidità dinamica apparente per unità di superficie [N/m^3];
- m'_t : massa per unità di superficie della piastra di carico [kg/m^2].

Questo metodo è stato concepito appositamente per l'impiego sperimentale, garantendo misure affidabili e ripetibili attraverso la chiara identificazione del picco di risonanza nel dominio delle frequenze. Le condizioni di prova, comprese la geometria e le caratteristiche della massa, sono dettagliatamente definite dalla norma stessa [18].

La norma EN 29052-1:1992 [18] prevede che, nel caso di materiali con bassa permeabilità all'aria, sia necessario considerare l'effetto della componente gassosa presente all'interno del materiale stesso. In tali condizioni, la rigidezza dinamica sperimentale s'_t non rappresenta da sola il comportamento complessivo del sistema, in quanto parte dell'energia elastica è assorbita dalla compressione dell'aria intrappolata tra le celle del materiale. Per questo motivo, la norma introduce un fattore correttivo s'_a , definito come la rigidità dinamica per unità di superficie del gas contenuto nel materiale, da sommare alla misura apparente per ottenere la rigidità dinamica corretta:

$$s' = s'_t + s'_a$$

Il valore di s'_a può essere calcolato a partire dalla relazione teorica:

$$s'_a = \frac{p_0}{\varepsilon d}$$

dove:

- p_0 è la pressione atmosferica;
- ε è la porosità de materiale;
- d è lo spessore del provino sotto carica statica, espresso in metri.

Per i casi pratici in cui non sia disponibile una misura diretta della porosità, la norma consente di utilizzare una formulazione semplificata, assumendo $\varepsilon = 0,9$ e $p_0 = 0.1$ Mpa (100,000 N/m²), da cui deriva:

$$s'_a = \frac{111}{d}$$

La correzione viene applicata unicamente nei casi in cui la resistività al flusso d'aria del materiale r risulti compresa tra 10 e 100 kPa·s/m². Per materiali con $r > 100$ kPa·s/m² il contributo dell'aria è considerato trascurabile e non si applica nessuna correzione, mentre se è inferiore a 10 kPa·s/m² il metodo non è più valido [18].

11.2.2 Determinazione della rigidità dinamica

I valori di rigidità dinamica presentati in questo paragrafo sono stati calcolati a partire dai dati sperimentali forniti direttamente dal produttore Isover.

Le prove sono state eseguite secondo il metodo previsto al punto 3.3 della norma EN 29052-1 [18], in condizioni ambientali controllate: temperatura pari a 18 °C, umidità relativa del 28 % e pressione atmosferica di 935 mbar.

Per ciascun materiale è stata fornita la frequenza di risonanza media, dalla quale è stato possibile determinare la rigidità dinamica apparente s'_t , applicando la relazione normativa.

In presenza di materiali a celle chiuse o parzialmente chiuse, è stato inoltre considerato il contributo dell'aria intrappolata, calcolando il corrispondente fattore correttivo s'_a , secondo quanto indicato dalla norma.

11.2.2.1 Arena PF – 15 mm

Calcolo della rigidità dinamica apparente:

- Massa superficiale della piastra: $m'_t = 200 \text{ kg/m}^2$ (20 × 20 cm, 8 kg);
- Frequenza di risonanza: $f_r = 20,8 \text{ Hz}$ (valor medio).

$$s'_t = 4\pi^2 \times m'_t \times f_r^2 = 4\pi^2 \times 200 \times (20,8)^2 = 3,42 \text{ MN/m}^3$$

Contributo del gas intrappolato:

Per valutare se includere la componente gassosa nella rigidità dinamica, si parte dal valore della resistenza al flusso d'aria del materiale. Tale valore è stato ricavato utilizzando la tabella fornita dal produttore (figura 7), che mette in relazione la densità e la resistività al flusso d'aria delle lane minerali.

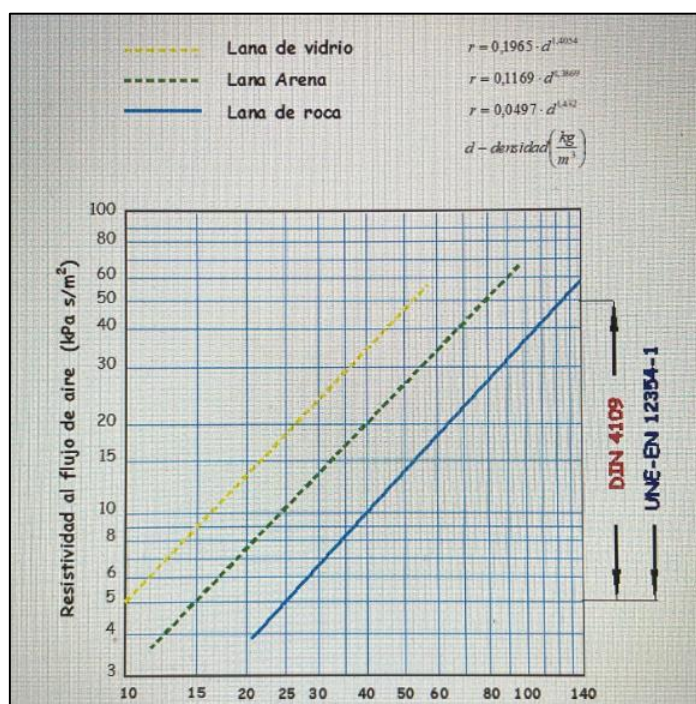


Figura 13 - Grafico di correlazione tra densità e resistività al flusso d'aria per diverse lane minerali, fornito da Isover.

Calcolando la densità di Arena PF 15 mm (1,1 kg/m² e 15 mm di spessore, pari a circa 73 kg/m³) e seguendo la suddetta tabella, si ottiene una resistenza al flusso d'aria di circa 43 kPa·s/m², valore compreso nell'intervallo per cui la norma richiede di considerare il contributo del gas intrappolato nel materiale.

- Pressione atmosferica: $p_0 = 93500$ Pa;
- Porosità del materiale: $\varepsilon = 0,95$
- Spessore sotto carico statico della piastra: $d = 0,014$ m

$$s'_a = \frac{p_0}{\varepsilon d} = \frac{93500}{0,95 \cdot 0,014} = 7,03 \text{ MN/m}^3$$

Valore complessivo della rigidità dinamica:

$$s' = s'_t + s'_a = 3,42 + 7,03 \approx 10,5 \text{ MN/m}^3$$

Isover dichiara un valore arrotondato a 10 MN/m³ nella scheda tecnica.

11.2.2.2 Arena PF – 25 mm

Calcolo della rigidità dinamica apparente:

- Massa superficiale della piastra: $m'_t = 200$ kg/m² (20 × 20 cm, 8 kg);
- Frequenza di risonanza: $f_r = 15,6$ Hz (valore medio).

$$s'_t = 4\pi^2 \times m'_t \times f_r^2 = 4\pi^2 \times 200 \times (15,6)^2 = 1,92 \text{ MN/m}^3$$

Contributo del gas intrappolato:

Per Arena PF 25 mm, la densità calcolata è pari a 56 kg/m³ (1,4 kg/m² e 25 mm di spessore). Utilizzando la tabella riportata in figura 7, si ricava un valore di resistenza al flusso d'aria di circa 30 kPa·s/m², ricadendo anch'esso nell'intervallo che rende necessario considerare il contributo del gas intrappolato.

- Pressione atmosferica: $p_0 = 93500$ Pa;
- Porosità del materiale: $\varepsilon = 0,95$
- Spessore sotto carico statico della piastra: $d = 0,0225$ m

$$s'_a = \frac{p_0}{\varepsilon d} = \frac{93500}{0,95 \cdot 0,0225} = 4,37 \text{ MN/m}^3$$

Valore complessivo della rigidità dinamica:

$$s' = s'_t + s'_a = 1,92 + 4,37 \approx 6,3 \text{ MN/m}^3$$

Isover dichiara un valore di 10 MN/m^3 , arrotondato secondo la prassi industriale di indicare le rigidità in scaglioni standardizzati di 10 MN/m^3 , come confermato direttamente dal produttore.

11.2.2.3 Panel PST

Calcolo della rigidità dinamica apparente:

- Massa superficiale della piastra: $m'_t = 200 \text{ kg/m}^2$ ($20 \times 20 \text{ cm}$, 8 kg);
- Frequenza di risonanza: $f_r = 37,2 \text{ Hz}$ (valore medio).

$$s'_t = 4\pi^2 \times m'_t \times f_r^2 = 4\pi^2 \times 200 \times (37,2)^2 = 10,92 \text{ MN/m}^3$$

Contributo del gas intrappolato:

Per Panel PST è stata seguita la stessa procedura. In questo caso, la densità calcolata (223 kg/m^3 , ottenuta da $4,9 \text{ kg/m}^2$ e 22 mm di spessore) risulta fuori scala rispetto ai limiti previsti dal grafico di figura 7, rendendo incerta la possibilità di stimare se la resistenza al flusso d'aria sia inferiore o superiore al valore soglia di $100 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$. Nonostante ciò, Isover ha ritenuto necessario includere il contributo del gas intrappolato nel calcolo della rigidità dinamica.

- Pressione atmosferica: $p_0 = 93500 \text{ Pa}$;
- Porosità del materiale: $\varepsilon = 0,95$
- Spessore sotto carico statico della piastra: $d = 0,021 \text{ m}$

$$s'_a = \frac{p_0}{\varepsilon d} = \frac{93500}{0,95 \cdot 0,021} = 4,69 \text{ MN/m}^3$$

Valore complessivo della rigidità dinamica:

$$s' = s'_t + s'_a = 10,92 + 4,69 \approx 15,6 \text{ MN/m}^3$$

Isover dichiara un valore di 20 MN/m^3 , arrotondato agli scaglioni standardizzati di 10 MN/m^3 .

11.2.3 Considerazioni

Il Catalogo degli Elementi Costruttivi del CTE [58] raccomanda valori di rigidità dinamica per le lane minerali impiegate nei sistemi di pavimentazione flottante, con l'obiettivo di ottenere soluzioni efficaci di isolamento contro il rumore da calpestio. In particolare, si consiglia che la rigidità dinamica, s' , sia inferiore ai seguenti valori in funzione dello spessore del materiale:

- Spessore 12 mm: $s' < 20 \text{ MN/m}^3$
- Spessore 20 mm: $s' < 13 \text{ MN/m}^3$
- Spessore 30 mm: $s' < 9 \text{ MN/m}^3$

Per facilitare il confronto con i materiali analizzati, i cui spessori differiscono da quelli indicati nel catalogo, tali dati sono stati rappresentati graficamente ed è stata effettuata un'interpolazione tra i valori raccomandati, ottenendo così un valore di riferimento continuo per qualsiasi spessore intermedio.

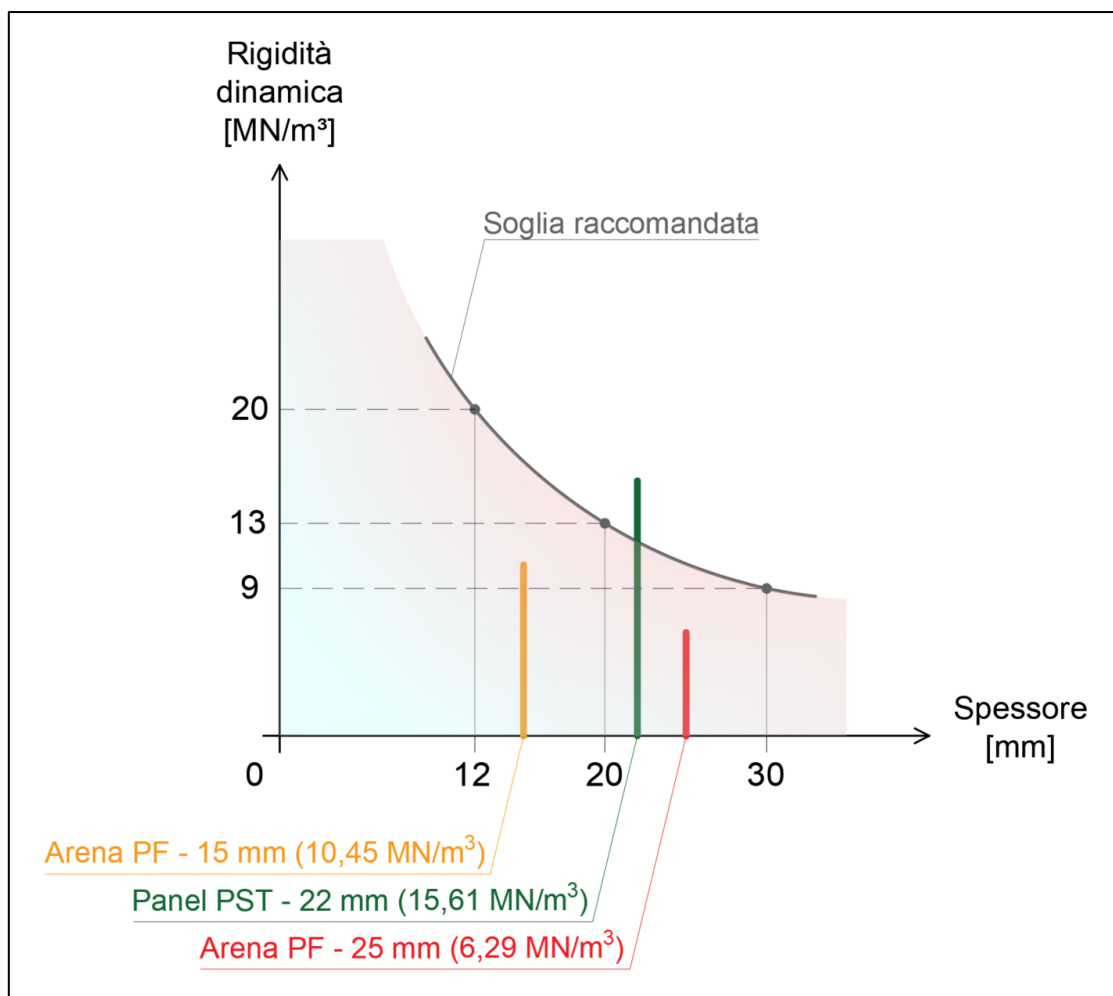


Figura 14 - Grafico comparativo tra le raccomandazioni del CTE e i materiali analizzati

Dal grafico si osserva che i due prodotti Arena PF, sia nello spessore da 15 mm sia in quello da 25 mm, presentano valori di rigidità dinamica nettamente inferiori ai limiti interpolati: l'Arena PF 15 mm si colloca circa 6 MN/m^3 al di sotto della curva di riferimento, mentre l'Arena PF 25 mm risulta di circa 4 MN/m^3 inferiore al valore consigliato per il suo spessore. Pertanto, entrambi i prodotti rispettano le raccomandazioni del CTE. Al contrario, il Panel PST, con una rigidità dinamica di $15,6 \text{ MN/m}^3$, supera di quasi 4 MN/m^3 il valore raccomandato per 22 mm secondo l'interpolazione.

11.3 Rivestimenti di finitura

Nella pratica costruttiva dei pavimenti flottanti, come riportato nello stato dell'arte, il materiale elastico non risulta idoneo a essere utilizzato come superficie di calpestio. Per questo motivo viene posizionato al di sotto dello strato di pavimentazione definitiva, in alcuni casi interponendo inoltre uno strato rigido aggiuntivo destinato a ripartire i carichi e consentire l'impiego di finiture rigide.

Con l'obiettivo di valutare il comportamento delle lane minerali in termini di isolamento dal rumore da calpestio, si è ritenuto imprescindibile analizzare il sistema in condizioni rappresentative dell'uso reale. Per questo motivo, le prove sperimentali sono state eseguite applicando direttamente il rivestimento di finitura sopra il materiale elastico, riproducendo così la configurazione costruttiva più comune nell'edilizia residenziale.

Di seguito, analogamente a quanto fatto per le lane minerali, vengono brevemente presentati i materiali utilizzati come finitura superficiale nelle prove sperimentali: due pavimentazioni viniliche di diverso spessore e un parquet in legno. Questa selezione consente di confrontare il comportamento di sistemi con finiture di diversa natura e analizzare, in particolare, l'effetto dello spessore dello strato di finitura.

Di seguito sono riportati i rivestimenti utilizzati:

- Laminato Rovere Chiaro (6 mm, AC4, classe 32): Pavimentazione composta da doghe in HDF (pannello in fibra ad alta densità) rivestite con una lamina decorativa melaminica pressata a caldo (tipo DPL – Direct Pressure Laminate), destinata a un uso residenziale intensivo. Il nucleo in HDF è costituito da fibre di legno raffinato legate con resine termoindurenti, mentre lo strato decorativo superiore è impregnato di melamina rinforzata con particelle di ossido di alluminio, garantendo un'elevata resistenza all'usura. Il sistema di posa è flottante, con incastro di tipo "clic angolare". Lo spessore totale è di 6 mm e le doghe misurano $128,5 \times 19,2$ cm [48], [51]. La massa superficiale, determinata in laboratorio, è di $5,5 \text{ kg/m}^2$.
- Laminato Rovere Amir (12 mm, AC5, classe 33): Materiale laminato di composizione identica al precedente (nucleo in HDF con rivestimento melaminico tipo DPL), ma con maggiore spessore e resistenza. Presenta la stessa struttura a base di fibre di legno e rivestimento melaminico ad alta durezza. Anche in questo caso, il sistema di posa è flottante, con incastro di tipo "clic verticale". Le doghe misurano $133,1 \times 19,4$ cm [49], [52]. La massa superficiale, determinata in laboratorio, è di $10,3 \text{ kg/m}^2$.
- Parquet in abete massiccio (17 mm): Pavimentazione in legno naturale, fornita in doghe larghe 14 cm, lunghe 2,47 m e con spessore di 1,7 cm, con finitura grezza [50], [53]. Si tratta di un rivestimento rigido, caratterizzato da una massa superficiale di $7,4 \text{ kg/m}^2$, utilizzato come riferimento per valutare il comportamento dei sistemi flottanti con rivestimento in legno massiccio.



Figura 15 - Da sinistra a destra: laminato vinilico Rovere Chiaro (6 mm), laminato vinilico Rovere Amir (12 mm), parquet in abete massiccio (17 mm). Fonte: Obramat.es

11.4 Configurazioni di prova

Combinando i tre materiali isolanti con i tre rivestimenti di finitura descritti nei paragrafi precedenti, sono state definite le 9 configurazioni sperimentali oggetto di studio.

La Figura 16 riassume visivamente la composizione dei pacchetti, indicando per ciascuno i valori di massa superficiale (m') e rigidità dinamica (s').

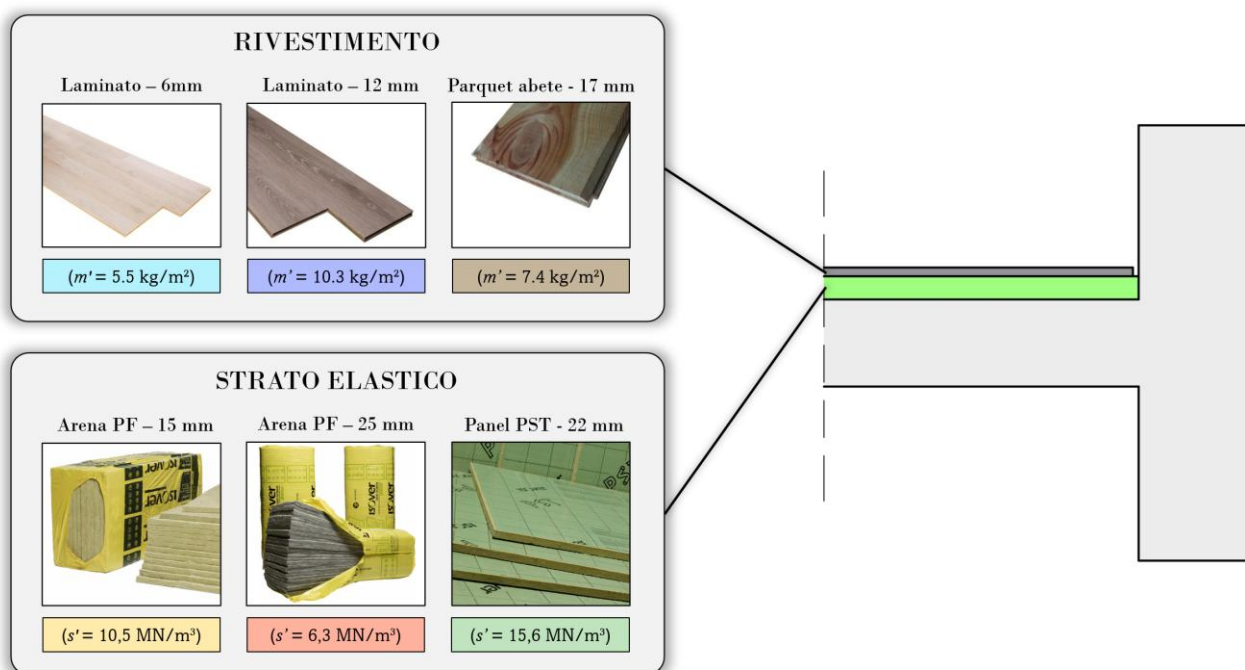


Figura 16 - Schema delle combinazioni tra rivestimenti e strati elastici.

Nella Tabella 11.4 sono elencate le nove stratigrafie che verranno utilizzate nei capitoli successivi per l'esposizione dei risultati.

Tabella 8 - Le 9 configurazioni sperimentali

Configurazione	Strato elastico	s' (MN/m ³)	Rivestimento	m' (kg/m ²)
1	Arena PF 15mm	10.5	Laminato 6mm	5.5
2	Arena PF 15mm	10.5	Laminato 12mm	10.3
3	Arena PF 15mm	10.5	Parquet Abete 17mm	7.4
4	Arena PF 25mm	6.3	Laminato 6mm	5.51
5	Arena PF 25mm	6.3	Laminato 12mm	10.3
6	Arena PF 25mm	6.3	Parquet Abete 17mm	7.4
7	Panel PST 22mm	15.6	Laminato 6mm	5.5
8	Panel PST 22mm	15.6	Laminato 12mm	10.3
9	Panel PST 22mm	15.6	Parquet Abete 17mm	7.4

12 MODELLI PREVISIONALI SECONDO LA NORMA ISO 12354-2

Definite le caratteristiche fisiche dei materiali e le configurazioni di prova nel capitolo precedente, il passo successivo consiste nello stabilire un riferimento teorico con cui confrontare i risultati sperimentali.

Il riferimento fondamentale per questa analisi è la norma internazionale ISO 12354-2:2017 ("Acustica in edilizia - Stima delle prestazioni acustiche degli edifici a partire dalle prestazioni degli elementi - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio") [28]. Questa norma fornisce i modelli di calcolo standardizzati per valutare l'isolamento acustico complessivo tra ambienti, basandosi sull'analisi della trasmissione sonora diretta e laterale indiretta (flanking) e combinando i parametri relativi ai materiali e al loro impiego nella costruzione. Lo scopo principale del corpo normativo è, dunque, predire il livello finale di rumore da calpestio (L_n , o L_{nT}) nell'ambiente ricevente, considerando l'edificio nel suo insieme [28].

Tuttavia, l'obiettivo specifico di questa tesi non è la previsione dell'isolamento acustico finale dell'intero sistema solaio-pareti, ma piuttosto la valutazione dell'efficacia intrinseca delle diverse soluzioni di pavimentazione flottante analizzate sperimentalmente. Si intende, cioè, quantificare il miglioramento ΔL apportato da ciascuna soluzione rispetto al solaio nudo, isolando il contributo del pacchetto "strato resiliente + finitura". Per questo motivo, i modelli di calcolo presentati nel corpo principale della norma ISO 12354-2 [28], non sono direttamente applicabili allo scopo specifico di questo capitolo.

All'interno della stessa norma, però, l'Annesso C (Informativo) fornisce gli strumenti metodologici per la stima della riduzione del livello di pressione sonora da impatto nei pavimenti flottanti a partire dai dati di rigidità dinamica s' dello strato resiliente e dalla massa superficiale m' della pavimentazione sovrapposta.

L'Annesso C propone due approcci distinti per questa stima:

- C.1 Un metodo dettagliato per il calcolo dello spettro $\Delta L(f)$ per bande di frequenza
- C.2 Un metodo semplificato per la stima del valore unico ponderato ΔL_w

Nei paragrafi successivi si procederà all'applicazione di entrambi questi metodi, utilizzando i dati dei materiali caratterizzati nei Capitoli 10.2 e 11.3, al fine di ottenere le previsioni teoriche del miglioramento acustico $\Delta L(f)$ e ΔL_w per le configurazioni oggetto di studio [28].

12.1 Stima del miglioramento per frequenza $\Delta L(f)$ (C.1)

Il primo metodo proposto dall'Annesso C.1 della norma ISO 12354-2 [28] permette di calcolare la riduzione del livello di pressione sonora da impatto ΔL per bande di frequenza. Questo approccio si basa sulla modellazione fisica del sistema pavimento flottante come un sistema massa-molla, la cui efficacia isolante dipende criticamente dalla sua frequenza di risonanza.

La frequenza di risonanza f_0 (in Hz) rappresenta la frequenza propria di oscillazione del sistema e viene calcolata utilizzando la seguente formula [28]:

$$f_0 \text{ [Hz]} = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}}$$

Dove:

- s' è la rigidità dinamica per unità di area dello strato elastico (in MN/m^3)
- m' è la massa per unità di superficie del rivestimento (in kg/m^2)

I parametri di input e i valori di f_0 calcolati per le nove configurazioni analizzate sono riassunti nella seguente tabella:

Tabella 9 – Frequenze di risonanza combinazioni. Produzione propria

Configurazione	Materiale Isolante	Rivestimento	s' (MN/m^3)	m' (kg/m^2)	f_0 Calcolata (Hz)
1	Arena PF 15mm	Laminato 6mm	10.5	5.5	220.3
2	Arena PF 15mm	Laminato 12mm	10.5	10.3	161.5
3	Arena PF 15mm	Parquet Abete 17mm	10.5	7.4	190.0
4	Arena PF 25mm	Laminato 6mm	6.3	5.5	170.9
5	Arena PF 25mm	Laminato 12mm	6.3	10.3	125.3
6	Arena PF 25mm	Parquet Abete 17mm	6.3	7.4	147.4
7	Panel PST 22mm	Laminato 6mm	15.6	5.5	269.3
8	Panel PST 22mm	Laminato 12mm	15.6	10.3	197.3
9	Panel PST 22mm	Parquet Abete 17mm	15.6	7.4	232.2

Una volta nota la frequenza di risonanza f_0 , si può stimare la riduzione ΔL alle diverse frequenze f . Coerentemente con la tipologia costruttiva delle configurazioni sperimentali (posa a secco), si adotta la formula indicata [28]:

$$\Delta L(f) \text{ [dB]} = 40 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right)$$

Questa formula calcola l'andamento del miglioramento ΔL su tutto lo spettro di frequenze considerato. Va tuttavia sottolineato che, mentre l'efficacia isolante descritta dalla formula aumenta per $f > f_0$, nella regione della frequenza di risonanza ($f \approx f_0$) e al di sotto ($f < f_0$), questo modello semplificato è meno rappresentativo del fenomeno fisico reale. In questa zona a basse frequenze, infatti, l'isolamento acustico può risultare inefficace e possono manifestarsi anche fenomeni di amplificazione ($\Delta L < 0$).

Dall'analisi combinata di queste due relazioni emerge la logica fondamentale del sistema massa-molla. La frequenza di risonanza f_0 rappresenta la soglia al di sopra della quale il sistema inizia a isolare efficacemente (ovvero, ΔL diventa positivo). Avere un valore di f_0 il più basso possibile è quindi vantaggioso, poiché implica che l'efficacia isolante del pacchetto comincia a manifestarsi già a frequenze inferiori, ampliando l'intervallo in cui il sistema attenua il rumore.

Di conseguenza, come chiarito dalle formule, per ottimizzare le prestazioni secondo la teoria previsionale della norma, l'isolamento acustico (ΔL) offerto dal pacchetto aumenta con il diminuire della rigidità dinamica (s') dell'isolante e aumenta all'aumentare della massa superficiale (m') del pavimento sovrapposto. Entrambi questi fattori contribuiscono, infatti, ad abbassare la frequenza di risonanza f_0 .

Applicando la relazione, sono stati calcolati gli spettri previsionali del miglioramento acustico ΔL per le nove configurazioni studiate. I risultati numerici sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 10 – Miglioramenti acustici per frequenza. Produzione propria

Frequenza (f) [Hz]	$\Delta L(f)$ ISO 12354-2 (Annesso C.1) [dB]								
	Arena PF 15mm + Lam 6mm (f_0 = 220,3 Hz)	Arena PF 15mm + Lam 12mm (f_0 = 161,5 Hz)	Arena PF 15mm + P. Abete (f_0 = 190 Hz)	Arena PF 25mm + Lam 6mm (f_0 = 170,9 Hz)	Arena PF 25mm + Lam 12mm (f_0 = 125,3 Hz)	Arena PF 25mm + P. Abete (147,4 Hz)	Panel PST 22mm + Lam 6mm (f_0 = 269,3 Hz)	Panel PST 22mm + Lam 12mm (f_0 = 197,3 Hz)	Panel PST 22mm + P. Abete (f_0 = 232,2 Hz)
100,0	-13,7	-8,3	-11,2	-9,3	-3,9	-6,7	-17,2	-11,8	-14,6
125,0	-9,8	-4,5	-7,3	-5,4	0,0	-2,9	-13,3	-7,9	-10,8
160,0	-5,6	-0,2	-3,0	-1,1	4,2	1,4	-9,0	-3,6	-6,5
200,0	-1,7	3,7	0,9	2,7	8,1	5,3	-5,2	0,2	-2,6
250,0	2,2	7,6	4,8	6,6	12,0	9,2	-1,3	4,1	1,3
315,0	6,2	11,6	8,8	10,6	16,0	13,2	2,7	8,1	5,3
400,0	10,4	15,8	12,9	14,8	20,2	17,3	6,9	12,3	9,4
500,0	14,2	19,6	16,8	18,6	24,0	21,2	10,7	16,2	13,3
630,0	18,3	23,6	20,8	22,7	28,1	25,2	14,8	20,2	17,3
800,0	22,4	27,8	25,0	26,8	32,2	29,4	18,9	24,3	21,5
1000,0	26,3	31,7	28,8	30,7	36,1	33,3	22,8	28,2	25,4
1250,0	30,2	35,5	32,7	34,6	40,0	37,1	26,7	32,1	29,2
1600,0	34,4	39,8	37,0	38,9	44,2	41,4	31,0	36,4	33,5
2000,0	38,3	43,7	40,9	42,7	48,1	45,3	34,8	40,2	37,4
2500,0	42,2	47,6	44,8	46,6	52,0	49,2	38,7	44,1	41,3
3150,0	46,2	51,6	48,8	50,6	56,0	53,2	42,7	48,1	45,3
4000,0	50,4	55,8	52,9	54,8	60,2	57,3	46,9	52,3	49,4
5000,0	54,2	59,6	56,8	58,6	64,0	61,2	50,7	56,2	53,3

Per facilitare l'interpretazione dei risultati, nella Figura 16 le curve di miglioramento calcolato ΔL sono state rappresentate utilizzando una scala cromatica legata alla frequenza di risonanza (f_0) di ciascun sistema. Le tonalità verdi identificano le configurazioni con f_0 più bassa (ad es. Arena PF 25mm + Laminato 12mm, con f_0 = 125.3 Hz), mentre le tonalità rosse indicano quelle

con f_0 più alta (ad es. Panel PST + Laminato 6mm, con $f_0 = 269.3$ Hz). L'andamento grafico rende immediata la comprensione del fenomeno fisico:

- Le curve verdi (bassa f_0) iniziano a fornire un isolamento positivo ($\Delta L > 0$) già alle basse frequenze, "attivandosi" prima.
- Le curve rosse (alta f_0) rimangono sotto lo zero più a lungo e iniziano a isolare solo a frequenze più elevate.

Questo conferma visivamente che abbassare la frequenza di risonanza del sistema è fondamentale per estendere l'efficacia dell'isolamento a una porzione più ampia dello spettro sonoro, anticipando l'inizio dell'attenuazione acustica.

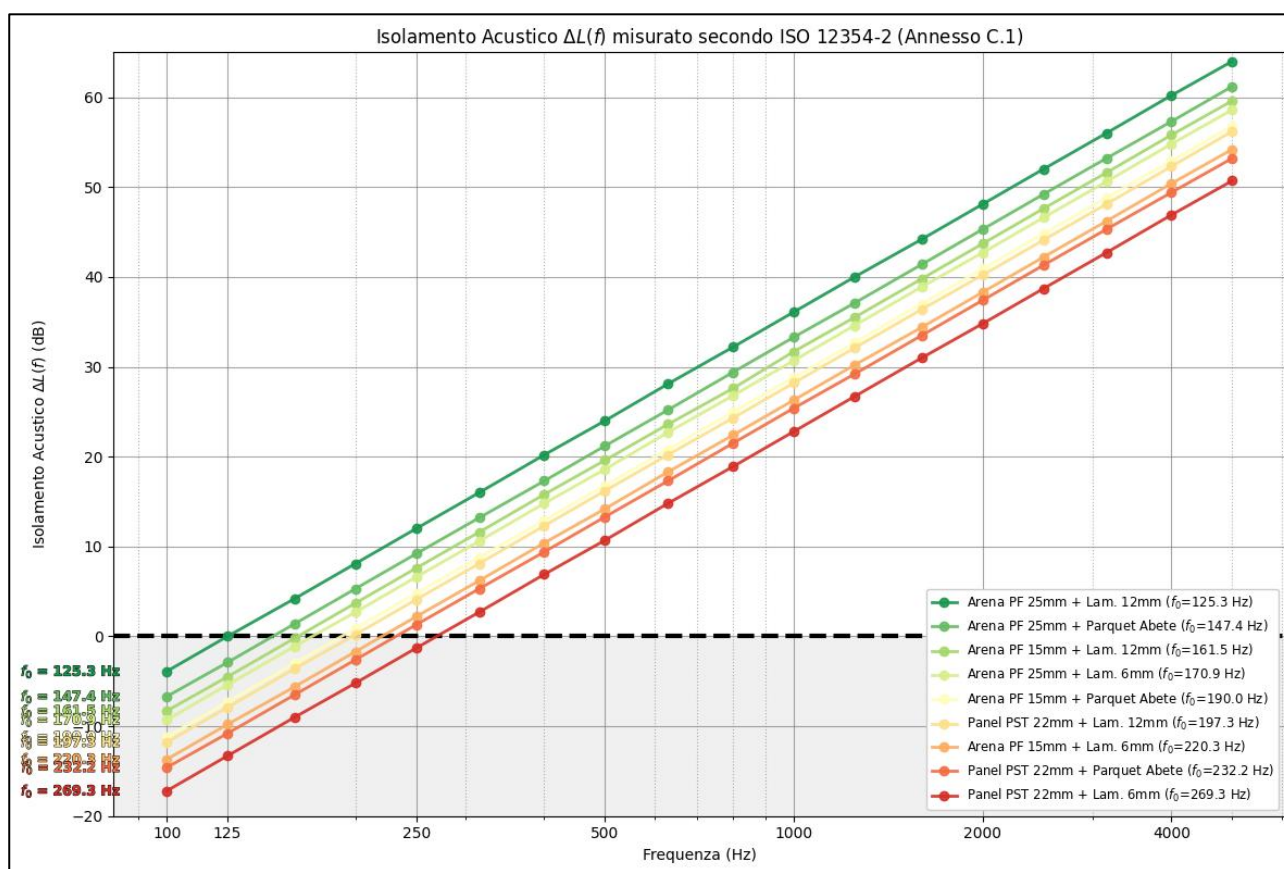


Figura 17 – Grafico miglioramento acustico $\Delta L(f)$. Produzione propria

Gli andamenti mostrano come, secondo il modello dell'Annesso C.1, il miglioramento ΔL aumenta linearmente su scala logaritmica delle frequenze, con pendenze identiche per tutte le configurazioni ma traslate in base alla rispettiva frequenza di risonanza.

12.2 Stima del miglioramento globale ΔL_w (C.2)

Oltre al calcolo spettrale, l'Annesso C.2 della norma ISO 12354-2 [28] fornisce anche un metodo semplificato per stimare direttamente il valore unico ponderato della riduzione ΔL_w . Questo approccio permette una valutazione sintetica rapida delle prestazioni attese.

L'Annesso C.2 mette a disposizione due metodi equivalenti per la stima, ovvero uno schema grafico e una formula, che esprime la stessa relazione in forma analitica.

Considerando i valori specifici e bassi di m' , risulta più rapido e conveniente procedere direttamente con il calcolo tramite la Formula (C.5) [28]:

$$\Delta L_w = ((-0,21m') - 5,45) \lg(s') + (0,46m') + 23,8$$

Applicando la relazione ai parametri fisici delle nove configurazioni (s' e m'), si ottengono gli indici di valutazione previsionali riportati nella Tabella 10:

Tabella 11 - Miglioramenti acustici ponderati. Produzione propria

Configurazione	Materiale Isolante	Rivestimento	s' (MN/m ³)	m' (kg/m ²)	ΔL_w calcolato (dB)
1	Arena PF 15mm	Laminato 6mm	10.5	5.5	19,6
2	Arena PF 15mm	Laminato 12mm	10.5	10.3	20,8
3	Arena PF 15mm	Parquet Abete 17mm	10.5	7.4	20,1
4	Arena PF 25mm	Laminato 6mm	6.3	5.5	21,1
5	Arena PF 25mm	Laminato 12mm	6.3	10.3	22,4
6	Arena PF 25mm	Parquet Abete 17mm	6.3	7.4	21,6
7	Panel PST 22mm	Laminato 6mm	15.6	5.5	18,4
8	Panel PST 22mm	Laminato 12mm	15.6	10.3	19,4
9	Panel PST 22mm	Parquet Abete 17mm	15.6	7.4	18,8

Dall'analisi dei valori ΔL_w previsti in Tabella 10, emerge la coerenza con i principi fisici alla base del modello massa-molla. Si osserva, infatti, una relazione inversa tra la rigidità dinamica s' dello strato resiliente e il miglioramento acustico stimato. Analogamente, si conferma una relazione diretta tra la massa superficiale m' della pavimentazione e il ΔL_w .

13 PROVE ACUSTICHE DI LABORATORIO

Con l'obiettivo di valutare il comportamento acustico rispetto al rumore da calpestio delle diverse soluzioni di pavimentazione flottante, è stata condotta una serie di prove in laboratorio che consentono di confrontare le prestazioni di differenti configurazioni costruttive. La campagna sperimentale include misurazioni sul solaio nudo, utilizzato come riferimento, e sulle diverse combinazioni di materiale isolante e rivestimento di finitura, secondo la metodologia standard per la caratterizzazione dell'isolamento acustico in laboratorio. In tutti i casi sono stati applicati gli stessi protocolli di posizionamento e misurazione, descritti nei paragrafi seguenti, al fine di garantire la confrontabilità dei risultati ottenuti,

13.1 Laboratorio di prova

Le prove acustiche sono state realizzate presso il laboratorio della ETSAM (Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, UPM), costituito da due camere sovrapposte di dimensioni pari a $2,22 \times 3,31$ m ciascuna. L'altezza del locale inferiore è di 1,80 m (volume $13,23 \text{ m}^3$) e quella del locale superiore di 1,75 m (volume $12,86 \text{ m}^3$). I due ambienti sono separati da un solaio in calcestruzzo dello spessore di 15 cm, che funge da lastra di prova per tutte le configurazioni analizzate. Tale solaio è disaccoppiato dal sistema strutturale del laboratorio: poggia su appoggi elastici ed è separato dalle pareti perimetrali mediante un materiale isolante, come richiesto dalla norma ISO 10140-5 [27], al fine di ridurre le trasmissioni laterali per via solida (flanking transmission).

È importante sottolineare che le dimensioni del locale ricevente sono inferiori ai minimi prescritti dalla suddetta norma, il che comporta una possibile limitazione nella rappresentatività dei risultati alle frequenze molto basse, poiché la lunghezza d'onda di tali frequenze è comparabile con le dimensioni del recinto. Per questo motivo, l'analisi si è concentrata sull'intervallo di frequenze compreso tra 100 e 5000 Hz, ambito nel quale le misurazioni non risultano influenzate, rendendo i risultati pienamente rappresentativi.

13.2 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle misurazioni acustiche sono stati impiegati i seguenti strumenti:

- Macchina per impatti CESVA MI005, conforme alle specifiche delle norme ISO 10140, dotata di 5 martelli da 500 g, con un'altezza di caduta libera di 40 mm e un intervallo medio tra gli impatti di 100 ms [9]. La macchina poggia su tre piedini in gomma per

isolarla da vibrazioni parassite e viene utilizzata secondo il protocollo previsto dalla norma.

- Fonometro CESVA SC 420 (classe 1, IEC 61672-1) [10], utilizzato per tutte le misurazioni. La corretta taratura è stata verificata mediante calibratore acustico prima e dopo ciascuna serie di prove.



Figura 18 - A sinistra: macchina per impatti CESVA MI005. Fonte: adattamento da [54]; a destra: fonometro CESVA SC 420. Fonte: cesva.com

Entrambi gli strumenti sono stati utilizzati secondo le raccomandazioni del produttore e in conformità con i requisiti previsti dalla normativa vigente.

13.3 Posizionamento della strumentazione

13.3.1 Posizionamento della macchina per impatti

Il posizionamento della macchina per impatti è stato effettuato in conformità a quanto stabilito dalla norma ISO 10140-3:2021, paragrafo 5.2. Per ciascuna prova, la macchina è stata collocata in quattro posizioni, come previsto dal minimo richiesto dalla norma. La distanza minima tra le diverse posizioni è stata di 0,7 m, e ciascuna posizione è stata mantenuta ad almeno 0,5 m dagli angoli del pavimento, come prescritto dalla normativa [25].

Nel caso di solai omogenei e pesanti, come quello oggetto di questo studio, le posizioni e l'orientamento della macchina per impatti sono stati distribuiti in maniera casuale sull'intera superficie dell'elemento da prova, con l'obiettivo di garantire una rappresentatività spaziale adeguata ed evitare effetti locali [25].

La disposizione adottata è illustrata nella figura 15, dove sono indicate le posizioni selezionate per i test.



Figura 19 - Disposizione e numerazione delle quattro posizioni della macchina per impatti utilizzate nelle prove. Elaborazione propria.

13.3.2 Posizionamento del microfono

Il numero di posizioni del microfono è stato fissato a quattro, corrispondente al numero di posizioni della macchina per impatti, secondo quanto indicato dalla norma ISO 10140-4:2021 [26].

Le posizioni del microfono sono state scelte in modo da rispettare le distanze minime richieste dalla ISO 10140-4:2021 (paragrafo 4.2.2): 0,7 m tra le posizioni fisse del microfono, 0,7 m tra ciascuna posizione e i limiti del locale (sia in senso orizzontale sia verticale), e 1,0 m rispetto al solaio di prova [26].

Il microfono è stato posizionato quindi ad un'altezza compresa tra 0,7 e 0,8 m dal livello del pavimento, in conformità ai requisiti normativi e alle dimensioni del locale ricevente.

La disposizione e numerazione delle posizioni del microfono utilizzate nelle prove è riportata nella figura 16.

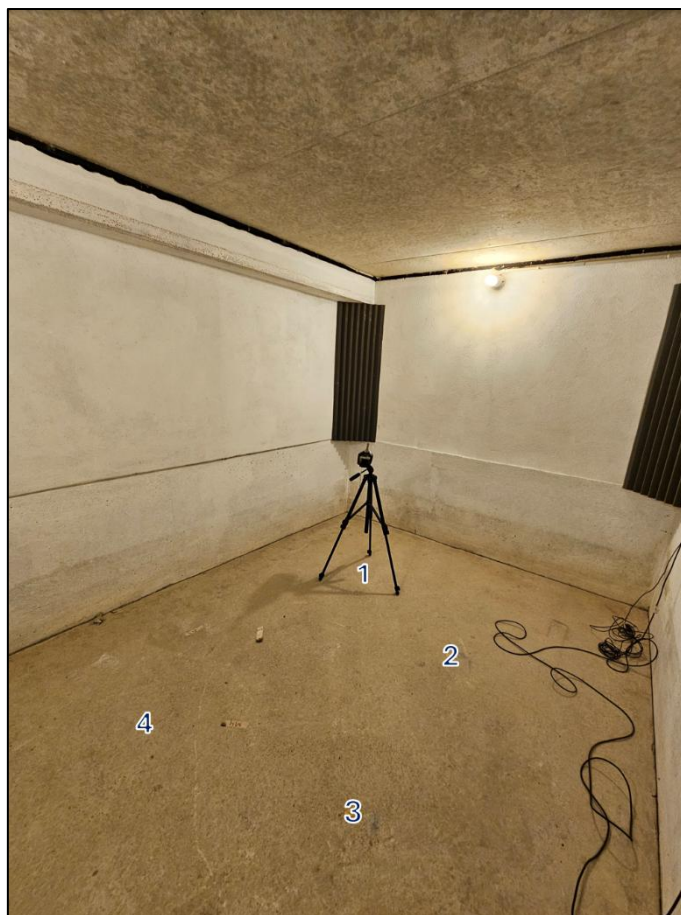


Figura 20 - Disposizione e numerazione delle quattro posizioni del microfono utilizzate nelle prove. Elaborazione propria.

13.3.3 Combinazione delle posizioni e ciclo di misura

Il ciclo completo di misura ha previsto il posizionamento della macchina per impatti in ciascuna delle quattro posizioni predefinite sul solaio e, per ognuna di esse, l'esecuzione di misurazioni in due delle quattro posizioni del microfono. Le posizioni del microfono utilizzate per ciascuna posizione della macchina sono state selezionate casualmente tra quelle disponibili, secondo quanto previsto dalla norma ISO 10140-4:2021 (paragrafo 5.2), che richiede almeno due misurazioni in differenti posizioni del microfono per ogni posizione della macchina [26].

La selezione delle combinazioni è stata effettuata cercando di coprire il maggior numero possibile di coppie macchina-microfono e altezze, evitando ripetizioni non necessarie e distribuendo le misurazioni in modo il più omogeneo possibile all'interno del locale, compatibilmente con i vincoli pratici della prova.

Tutte le combinazioni impiegate sono riassunte nella tabella 12, che presenta lo schema delle posizioni utilizzate nell'insieme delle prove effettuate.

Tabella 12 - Schema delle combinazioni tra le posizioni della macchina per impatti e del microfono utilizzate nelle prove

Posizione macchina	Posizione microfono	Altezza microfono (cm)
1	1	70
	2	70
2	2	70
	4	70
3	4	80
	3	80
4	1	80
	3	80

13.4 Prove effettuate

Al fine di valutare il comportamento acustico rispetto al rumore da calpestio delle tre lane minerali prodotte da Isover, impiegate come strato elastico nei sistemi di pavimento flottante, sono state condotte prove di laboratorio che permettono di confrontare le prestazioni di differenti configurazioni.

Le prove includono:

- Solaio grezzo: misurazione di riferimento sul solaio privo di qualsiasi tipo di isolamento o finitura superficiale. Questa prova fornisce il dato di base su cui vengono successivamente valutati gli effetti dei diversi trattamenti.
- Solaio con materiale isolante e finitura superficiale: prove realizzate combinando ciascuna delle tre lane minerali con i tre tipi di pavimentazione flottante studiati, riproducendo così le condizioni reali d'impiego nell'edilizia.

In tutti i casi, durante la posa dei materiali, è stata prestata particolare attenzione affinché gli elementi isolanti e le pavimentazioni non fossero a contatto diretto con le pareti perimetrali del locale, lasciando una distanza minima di 1 cm dai bordi. Questa accortezza è stata adottata per evitare la trasmissione laterale delle vibrazioni e garantire la validità dei risultati [29].

In tutte le configurazioni descritte, le misurazioni sono state effettuate seguendo il protocollo basato su 8 combinazioni tra le posizioni della macchina per impatti e del microfono, come riportato nella tabella 12. Tale procedura garantisce la ripetibilità e la confrontabilità dei risultati ottenuti nelle diverse prove.

Per assicurare la validità dei risultati e analizzare correttamente gli effetti dell'isolamento acustico, sono state eseguite due misurazioni complementari:

- Rumore di fondo: misurazione effettuata in ciascuna prova secondo la norma ISO 10140-4:2021 [26], al fine di valutare il contributo del rumore ambientale e permettere la corretta correzione dei dati.
- Tempo di riverberazione: misurazione del tempo di riverberazione (T60) nel locale ricevente, secondo la norma UNI EN ISO 3382-2, necessaria per la normalizzazione dei risultati e per garantire la comparabilità tra locali e configurazioni differenti.

13.5 Trattamento dei dati e criteri di calcolo

13.5.1 Misurazione per bande di frequenza

Le misurazioni sono state effettuate utilizzando la macchina per impatti normalizzata, con un tempo di mediazione di 6 secondi per posizione, come stabilito al paragrafo 4.2.3.1 della ISO 10140-4:2021 [26].

Per ciascuna configurazione sono stati registrati dati in bande di terzi di ottava comprese tra 100 Hz e 5000 Hz, ottenendo per ciascuna banda un valore specifico del livello di pressione sonora espresso in decibel (dB).

13.5.2 Correzione per rumore di fondo

La correzione per il rumore di fondo è stata applicata per ciascuna banda di frequenza, conformemente a quanto indicato al paragrafo 4.3 della ISO 10140-4:2021 [26]:

- Se la differenza tra il livello del segnale e il livello del rumore di fondo è superiore a 15 dB, non viene applicata alcuna correzione;
- Se la differenza è compresa tra 6 dB e 15 dB, si applica la seguente correzione:

$$L_n = L - 10 \log_{10} \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right)$$

dove L è il livello corretto (dB), L_{sb} è il livello combinato di segnale e rumore di fondo (dB), L_b è il livello di rumore di fondo (dB);

- Se la differenza è pari o inferiore a 6 dB, si applica una correzione standard di 1,3 dB a quel valore e la banda viene considerata limite di misurazione.

Le frequenze per le quali è stata applicata la correzione per il rumore di fondo saranno indicate con un asterisco nelle relative tabelle.

13.5.3 Combinazione dei valori e media logaritmica

Conformemente al paragrafo 4.2.4.1 della ISO 10140-4:2021 [26], per ciascuna banda di frequenza si calcola un valore unico rappresentativo a partire dagli otto valori corretti, corrispondenti a tutte le combinazioni di posizioni della macchina per impatti e del microfono utilizzate nella prova.

Questa riduzione si effettua applicando la media logaritmica definita dalla norma:

$$L = L - 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right)$$

Dove L_j è il livello corretto di pressione sonora ottenuto nella posizione j , e n è il numero totale di misurazioni considerate (in questo caso, otto).

Tale procedura garantisce che, per ogni banda di frequenza, si disponga di un solo valore rappresentativo, adatto al confronto e alla successiva normalizzazione.

13.5.4 Normalizzazione dei risultati

Il livello medio energetico ottenuto per ciascuna banda viene convertito nel livello di pressione sonora da calpestio normalizzato L_n applicando la correzione sviluppata originariamente nella ISO 140-7 e recepita dalla normativa vigente (ISO 10140-3:2021 [25]).

Come anticipato nel capitolo 5, tale normalizzazione aggiunge un termine che compensa simultaneamente le dimensioni e l'assorbimento del locale ricevente, consentendo il confronto dei risultati ottenuti in laboratori differenti.

L'area di assorbimento equivalente A si calcola a partire dal tempo di riverberazione e dal volume del locale, conformemente a quanto previsto dalla ISO 10140-4 [26]:

$$A = 0,16 \frac{V}{T_{60}}$$

Il livello normalizzato si ottiene dunque tramite la relazione:

$$L_n = L + 10 \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Dove:

- L_n è il livello di pressione sonora da calpestio normalizzato (dB)
- L è il livello medio energetico per ciascuna banda (dB)
- A è l'area di assorbimento equivalente (m^2)
- A_0 è l'area di riferimento ($10 m^2$)

Questa correzione è fondamentale per garantire la tracciabilità e la comparabilità internazionale dei risultati di laboratorio, come illustrato nella letteratura normativa e scientifica.

Nel caso in cui si effettuino confronti tra configurazioni, ad esempio nel calcolo del parametro ΔL (sia globale che spettrale), il procedimento consiste nel sottrarre due valori che incorporano la medesima correzione per il tempo di riverberazione. Per questo motivo, tale correzione si annulla nell'operazione e non influisce sulla valutazione del miglioramento acustico fornito da ciascuna soluzione.

La correzione incide quindi sui valori assoluti ottenuti (sia per banda che globali), ma non modifica la differenza tra configurazioni, che rappresenta il dato rilevante per valutare l'efficacia dell'isolamento.

13.5.5 Ottenimento dell'indice globale $L_{n,w}$

La procedura consiste nello spostare la curva di riferimento, definita dalla norma ISO 717-2:2020 [31], con incrementi di 1 dB, fino a quando la somma delle deviazioni sfavorevoli tra lo spettro misurato e la curva, nell'intervallo 100–3150 Hz, non superi i 32 dB.

Una volta posizionata correttamente la curva di riferimento, il valore $L_{n,w}$ si ottiene leggendo il valore della curva a 500 Hz.

Questo valore unico consente di confrontare oggettivamente l'isolamento dai rumori da calpestio dei diversi sistemi testati.

13.5.6 Calcolo dell'indice di miglioramento ΔL_w

Per valutare il miglioramento dell'isolamento acustico rispetto al rumore da calpestio, si confrontano i livelli ottenuti per le diverse configurazioni rispetto alla configurazione di riferimento.

Tale miglioramento può essere valutato in due modi, secondo quanto stabilito dalla norma ISO 717-2:2020 [31]:

- Miglioramento globale (ΔL_w), ottenuto come differenza tra i valori $L_{n,w}$:

$$\Delta L_w = L_{n,w,A} - L_{n,w,B}$$

- Miglioramento per frequenza ($\Delta L(f)$):

$$\Delta L(f) = L_{n_A}(f) - L_{n_B}(f)$$

13.6 Presentazione dei risultati delle prove

Le prove di laboratorio realizzate secondo la metodologia e la strumentazione descritte nei capitoli precedenti hanno permesso di registrare i livelli di pressione sonora generati dal rumore da calpestio nelle diverse configurazioni analizzate.

A partire dai dati grezzi ottenuti in ciascuna prova, e applicando i criteri di elaborazione e normalizzazione illustrati nel paragrafo 12.5, sono stati calcolati, mediante il software Insulation Studio della CESVA, gli spettri del livello di pressione sonora normalizzato (L_n) per ciascuna banda di frequenza, nonché l'indice globale unico ($L_{n,w}$) corrispondente a ogni configurazione.

Di seguito si presentano in modo sistematico i risultati ottenuti per ciascuna configurazione testata, includendo sia i valori spettrali che gli indici globali, che verranno successivamente confrontati e discussi nei capitoli seguenti.

13.6.1 Solaio grezzo



Figura 21 – Macchina per impatti sul solaio grezzo

Tabella 13 - Livello di pressione sonora da calpestio normalizzato (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo,

Frecuencia f Hz	L_n (Tercio de octava) dB
50	--
63	--
80	--
100	69,1
125	68,9
160	69,5
200	68,8
250	71,2
315	78,0
400	76,7
500	78,6
630	78,3
800	79,9
1000	80,5
1250	83,9
1600	83,8
2000	83,8
2500	83,6
3150	84,1
4000	83,4
5000	82,0

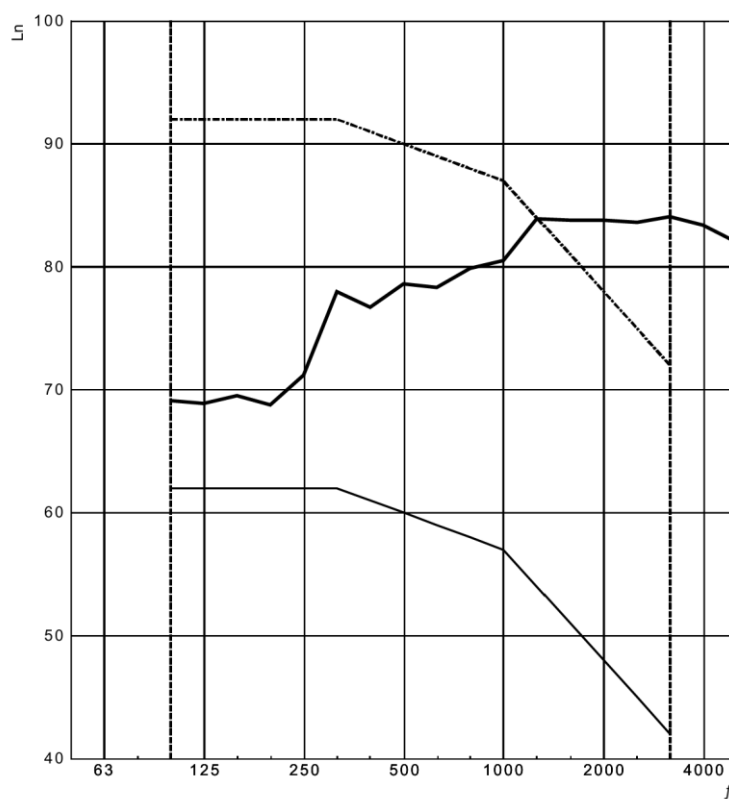


Figura 22 - Grafico del livello di pressione. Solaio grezzo

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 90$ dB

13.6.2 Solaio con materiale isolante e finitura superficiale

13.6.2.1 Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato vinilico 6 mm



Figura 23 - Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm

Tabella 14 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de ottava) dB
50	--
63	--
80	--
100	66,4
125	62,9
160	66,7
200	60,4
250	51,8
315	55,5
400	46,2
500	43,7
630	41,0
800	37,9
1000	32,4
1250	27,7
1600	23,2
2000	$\leq 17,9$ *
2500	$\leq 15,7$ *
3150	$\leq 14,2$ *
4000	$\leq 15,3$ *
5000	$\leq 16,8$ *

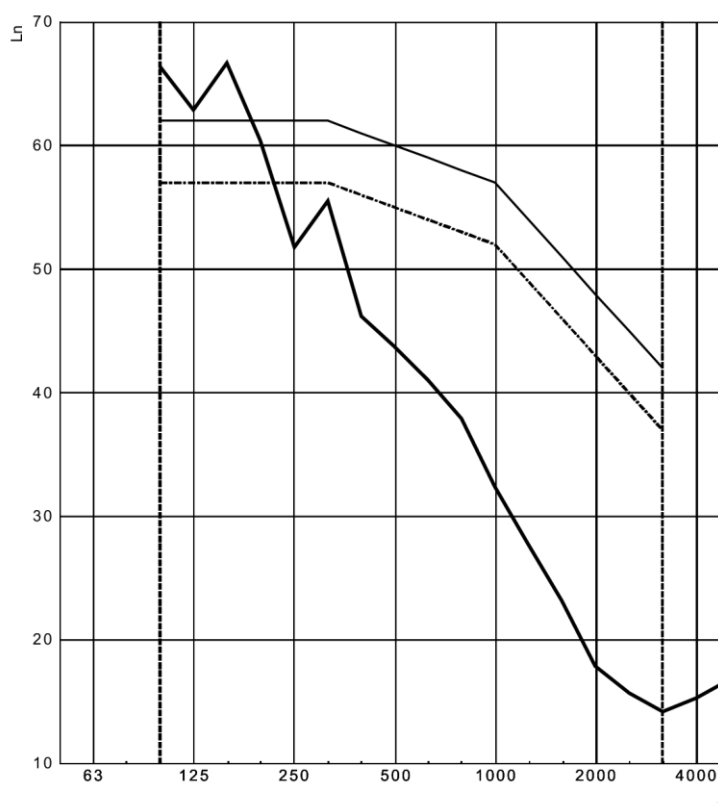


Figura 24 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 6 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 55$ dB

13.6.2.2 Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato vinilico 12 mm



Figura 25 - Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm

Tabella 15 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de ottava) dB
50	--
63	--
80	--
100	70,4
125	68,5
160	62,5
200	59,6
250	56,3
315	59,8
400	52,8
500	48,9
630	46,2
800	42,1
1000	37,4
1250	32,3
1600	29,0
2000	25,4
2500	26,4
3150	23,1
4000	$\leq 17,3$ *
5000	$\leq 13,0$ *

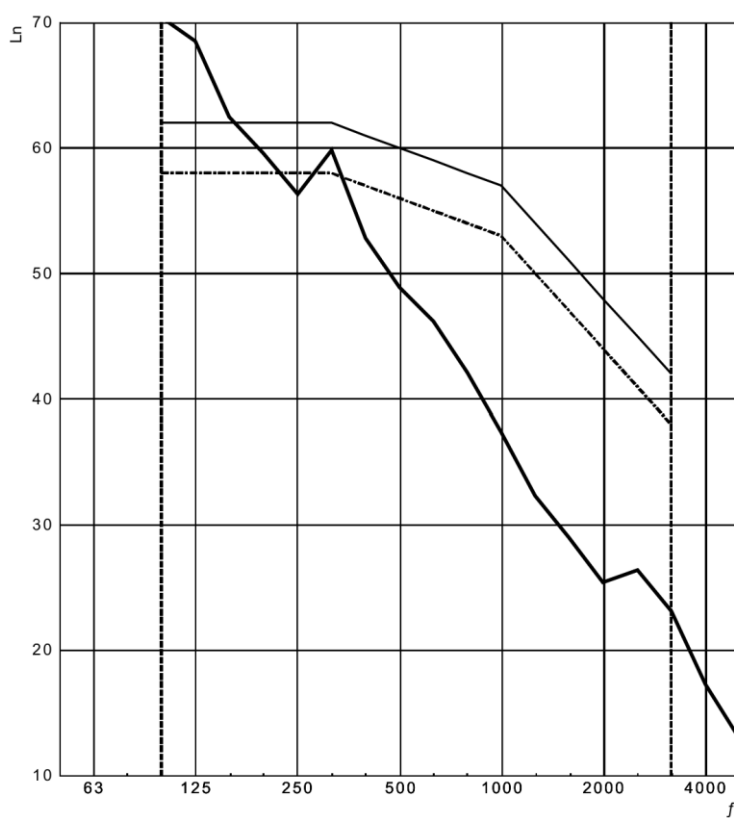


Figura 26 - Grafico livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + laminato 12 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 56$ dB

13.6.2.3 Solaio con Arena PF - 15 mm + parquet di abete massiccio - 17 mm



Figura 27 - Solaio con Arena PF - 15 mm + Parquet di abete massiccio

Tabella 16 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 15 mm + parquet di abete massiccio

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de ottava) dB
50	--
63	--
80	--
100	64,6
125	62,7
160	59,6
200	58,3
250	54,3
315	57,0
400	49,5
500	44,5
630	42,7
800	41,3
1000	39,3
1250	35,6
1600	30,7
2000	25,2
2500	21,9
3150	$\leq 17,6$ *
4000	$\leq 16,2$ *
5000	$\leq 15,2$ *

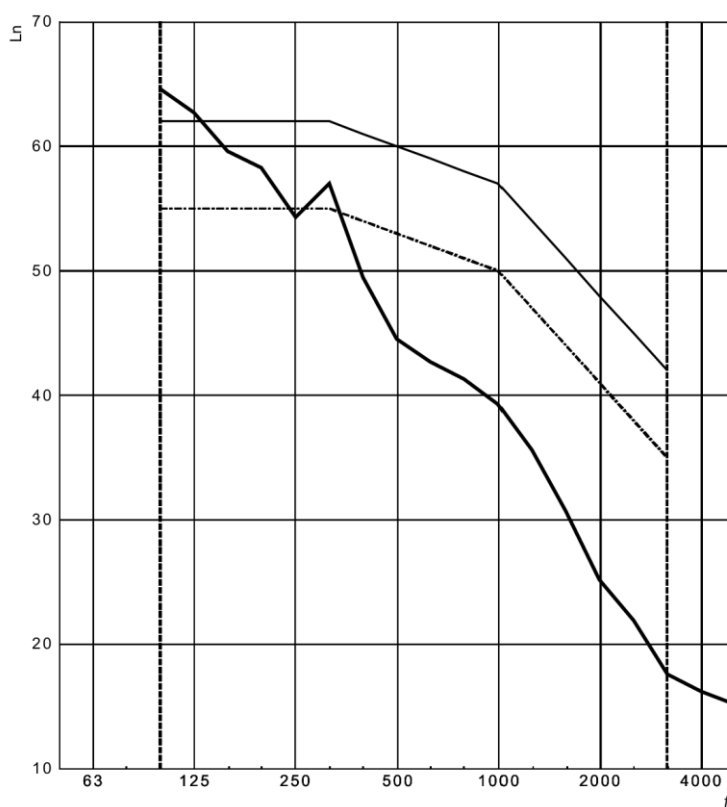


Figura 28 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 15 mm + parquet di abete massiccio

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 53$ dB

13.6.2.4 Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 6 mm



Figura 29 - Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 6 mm

Tabella 17 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + laminato 6 mm

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de octava) dB
50	--
63	--
80	--
100	67,2
125	64,1
160	57,5
200	53,0
250	50,6
315	52,5
400	44,5
500	41,9
630	40,3
800	37,7
1000	32,2
1250	27,0
1600	22,7
2000	$\leq 17,2$ *
2500	$\leq 14,6$ *
3150	$\leq 12,1$ *
4000	$\leq 13,7$ *
5000	$\leq 15,5$ *

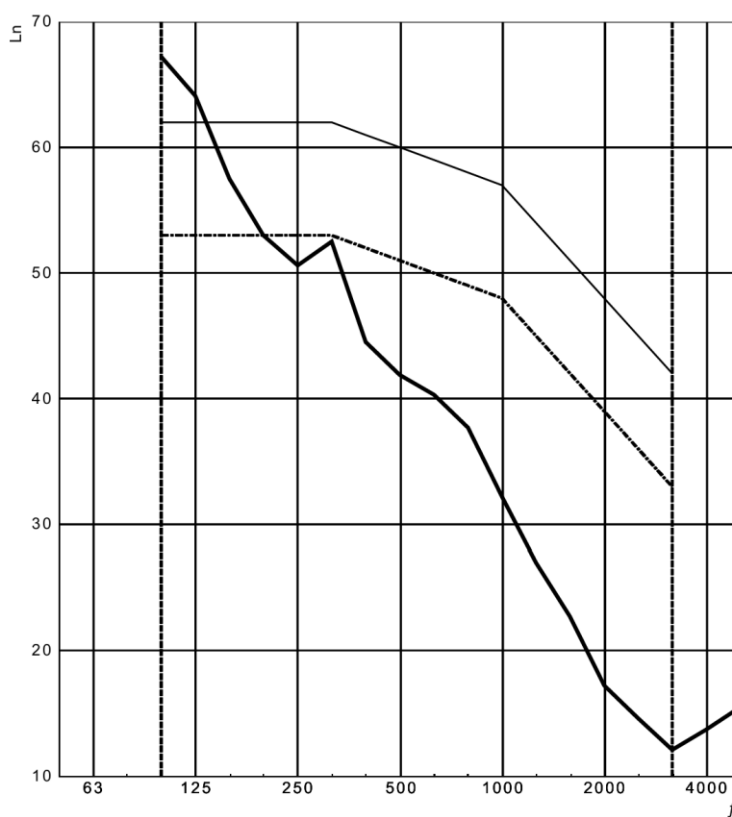


Figura 30 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato 6 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 51$ dB

13.6.2.5 Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 12 mm



Figura 31 - Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 12 mm

Tabella 18 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + laminato 12 mm

Frecuencia f Hz	L_n (Tercio de octava) dB
50	--
63	--
80	--
100	70,6
125	67,5
160	61,1
200	56,5
250	52,1
315	55,9
400	50,1
500	47,8
630	45,4
800	41,7
1000	37,9
1250	32,6
1600	29,0
2000	25,9
2500	27,1
3150	23,8
4000	$\leq 17,2$ *
5000	$\leq 13,0$ *

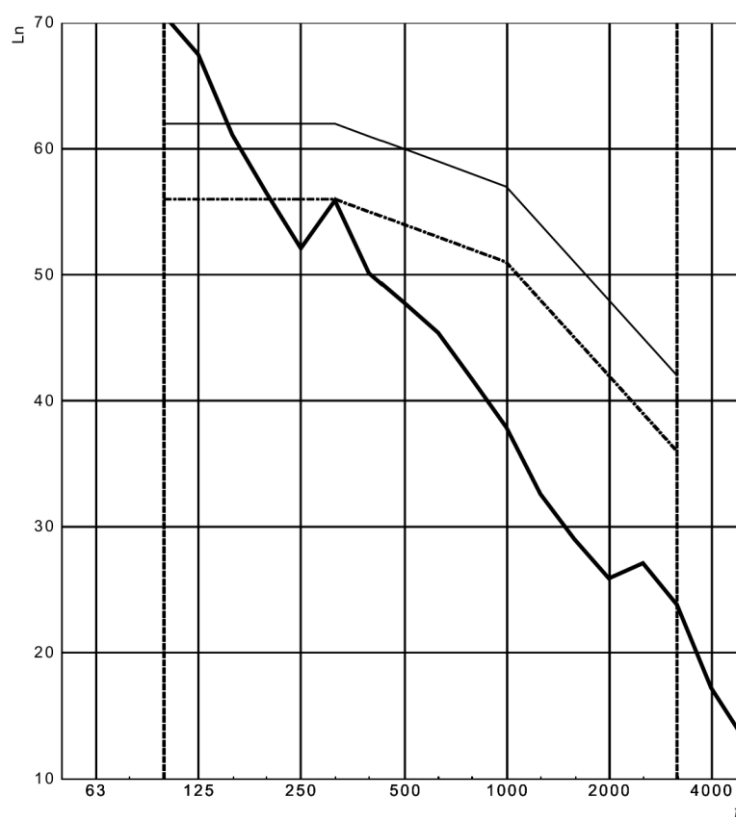


Figura 32 - Grafico livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + laminato vinilico 12 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 54$ dB

13.6.2.6 Solaio con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio - 17 mm



Figura 33 - Solaio con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio

Tabella 19 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de ottava) dB
50	--
63	--
80	--
100	67,0
125	63,7
160	59,9
200	56,9
250	52,1
315	51,2
400	46,9
500	44,3
630	43,1
800	40,3
1000	39,5
1250	35,8
1600	30,5
2000	25,4
2500	20,9
3150	$\leq 16,6$ *
4000	$\leq 14,3$ *
5000	$\leq 12,3$ *

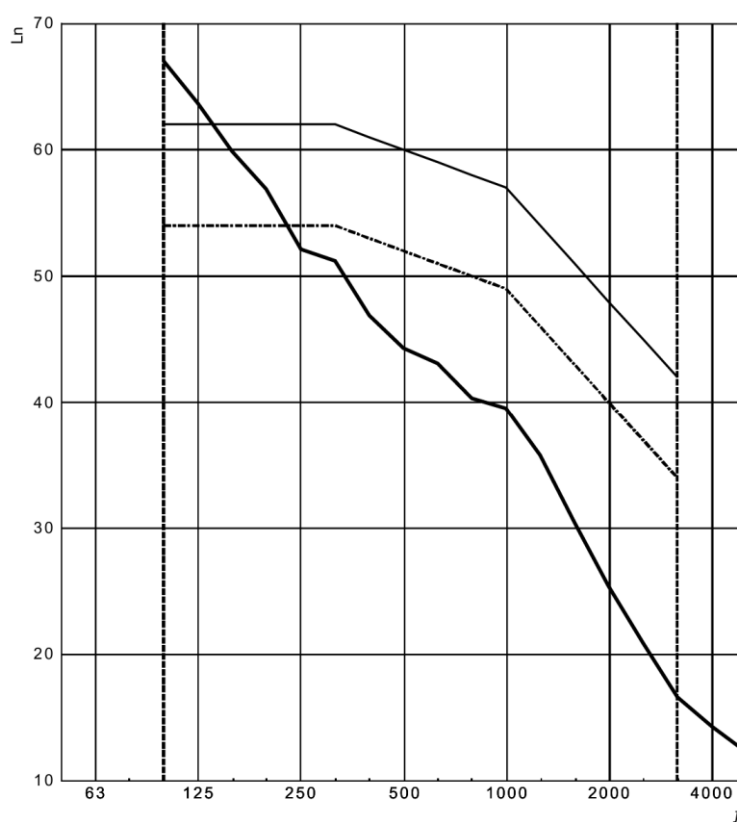


Figura 34 Grafico del livello di pressione. Solaio con Arena PF - 25 mm + parquet di abete massiccio

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 52$ dB

13.6.2.7 Solaio con Panel PST - 22 mm + laminato vinilico 6 mm



Figura 35 – Solaio con Panel PST + laminato vinilico 6 mm

Tabella 20 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Panel PST + laminato 6 mm

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de octava) dB
50	--
63	--
80	--
100	65,8
125	65,9
160	65,0
200	60,3
250	55,1
315	56,9
400	48,3
500	45,2
630	42,7
800	39,2
1000	35,3
1250	29,9
1600	26,2
2000	20,4
2500	$\leq 15,9$ *
3150	$\leq 12,7$ *
4000	$\leq 13,0$ *
5000	$\leq 13,9$ *

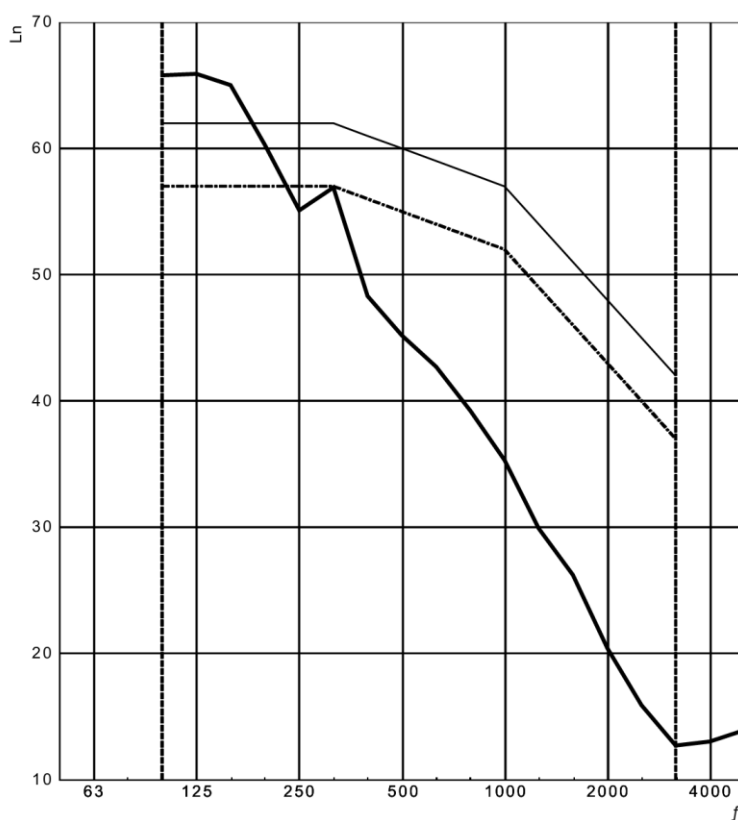


Figura 36 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + laminato 6 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 55$ dB

13.6.2.8 solaio con Panel PST - 22 mm + laminato vinilico 12 mm



Figura 37 – Solaio con Panel PST + laminato vinilico 12 mm

Tabella 21 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Panel PST + laminato 12 mm

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de octava) dB
50	--
63	--
80	--
100	70,7
125	69,3
160	64,8
200	61,0
250	57,9
315	60,6
400	53,6
500	50,8
630	48,7
800	45,4
1000	41,5
1250	38,2
1600	33,9
2000	29,6
2500	28,0
3150	24,1
4000	$\leq 18,0$ *
5000	$\leq 13,9$ *

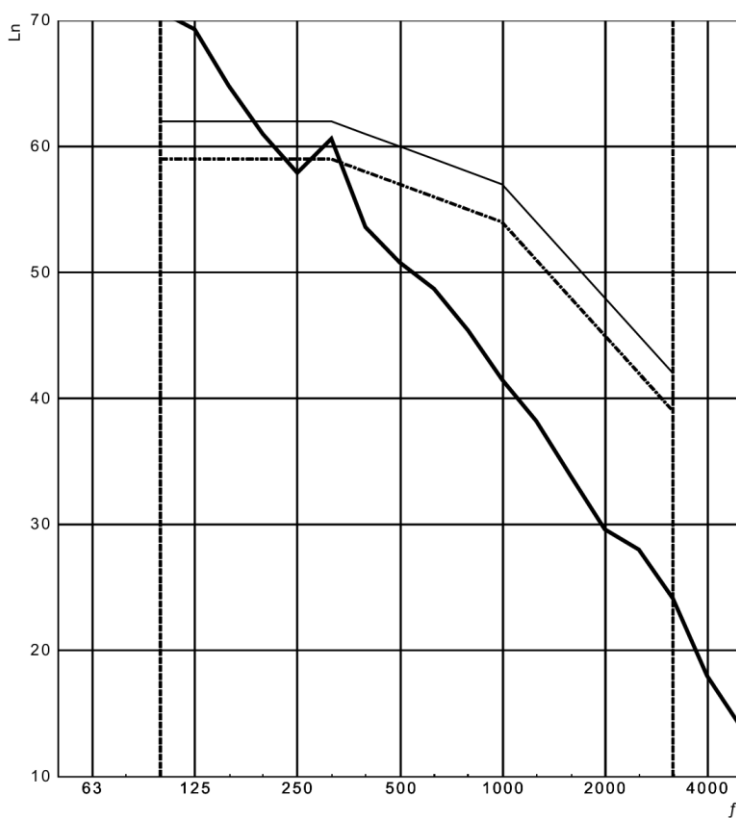


Figura 38 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + laminato 12 mm

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 57$ dB

13.6.2.9 Solaio con Panel PST - 22 mm + parquet di abete massiccio - 17 mm



Figura 39 – Solaio con Panel PST + parquet di abete massiccio

Tabella 22 - Livello di pressione sonora normalizzato da calpestio (L_n) in terzi d'ottava. Solaio grezzo con Panel PST + parquet di abete massiccio

Frequenza f Hz	L_n (Tercio de ottava) dB
50	--
63	--
80	--
100	65,2
125	60,8
160	62,6
200	59,3
250	53,6
315	57,5
400	49,5
500	47,5
630	44,6
800	41,6
1000	38,7
1250	35,7
1600	32,5
2000	26,4
2500	21,2
3150	$\leq 16,6$ *
4000	$\leq 14,2$ *
5000	$\leq 12,5$ *

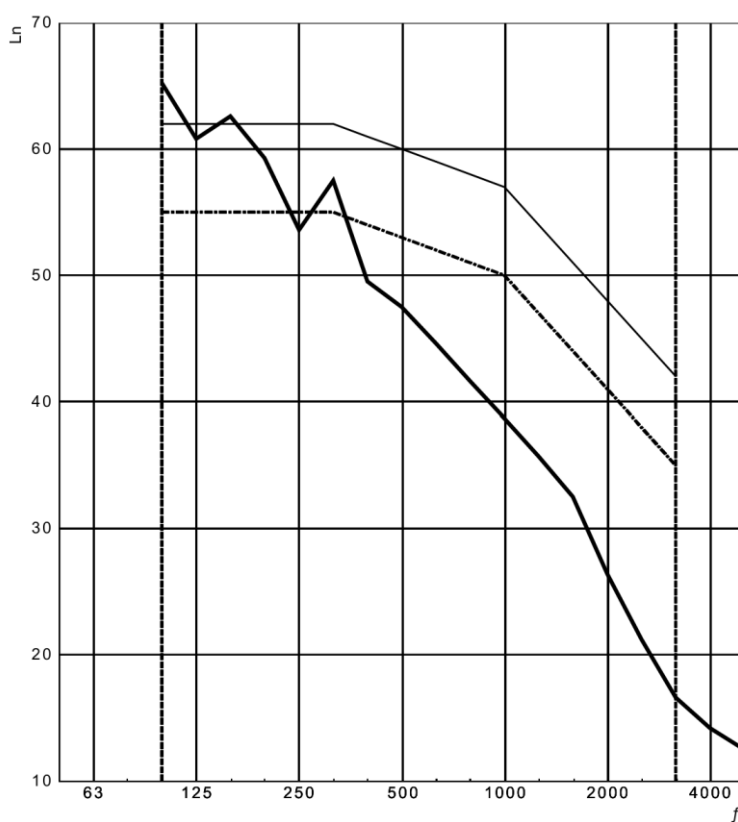


Figura 40 - Grafico del livello di pressione. Solaio con Panel PST + parquet di abete massiccio

Indice globale ottenuto secondo la ISO 717-2:2020 [31]: $L_{n,w} = 53$ dB

14 ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

14.1 Comportamento del solaio grezzo

La prima prova effettuata corrisponde alla misurazione del livello di pressione sonora provocato da impatti normalizzati sul solaio privo di qualsiasi trattamento acustico o rivestimento superficiale. Tale stato viene assunto come configurazione di riferimento, in quanto consente di valutare successivamente l'effetto dei diversi materiali isolanti interposti, sia in termini di miglioramento globale sia di comportamento in funzione della frequenza.

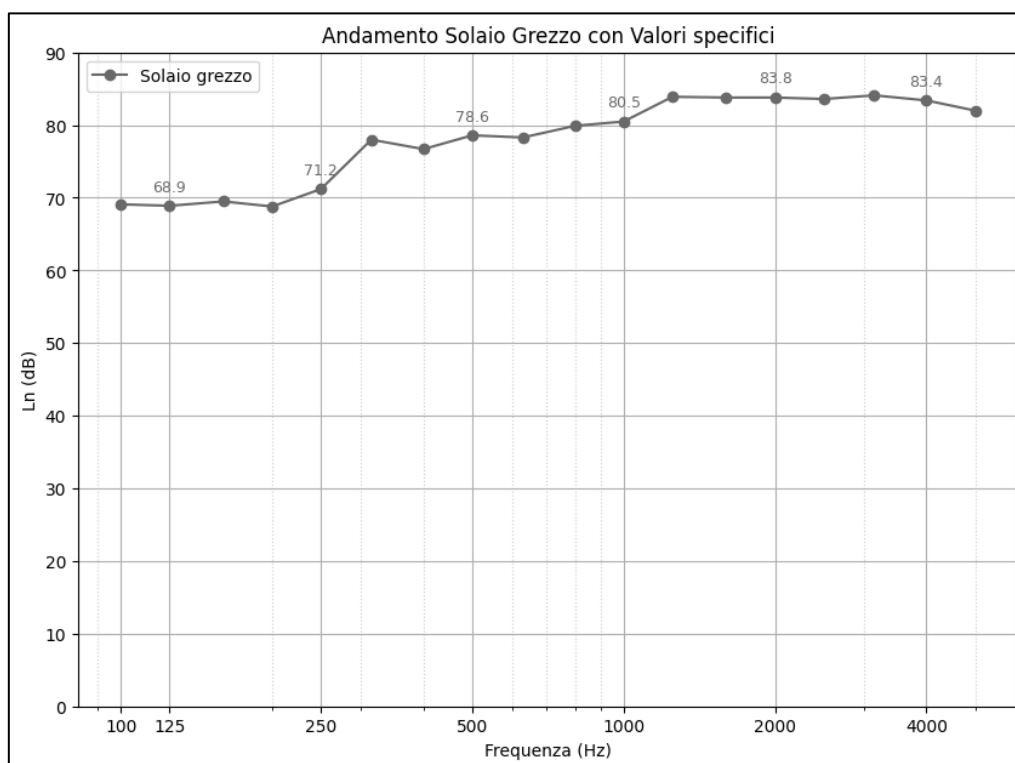


Figura 41 - Livello L_n del solaio grezzo in funzione della frequenza. Produzione propria.

Come si osserva dalla curva riportata nel grafico, a partire da 100 Hz fino a circa 250 Hz il livello di pressione sonora normalizzato si mantiene relativamente costante, con valori prossimi ai 70 dB. Dai 250 Hz in poi inizia un incremento progressivo e irregolare che raggiunge gli 80 dB attorno ai 1000 Hz. Da questo punto, il livello si stabilizza intorno agli 83–84 dB fino ai 5000 Hz. Questo comportamento spettrale evidenzia come tale configurazione di solaio, non includendo strati di disaccoppiamento né materiali dissipativi, consenta una radiazione sonora relativamente regolare lungo lo spettro, con un'efficienza di irraggiamento che tende ad aumentare progressivamente con la frequenza.

Il valore globale di questa configurazione, calcolato secondo la norma UNI EN ISO 717-2 [31], è pari a $L'_{n,w} = 90$ dB, e rappresenta il punto di partenza per il confronto con le soluzioni costruttive analizzate nelle configurazioni successive.

14.2 Confronto tra diversi materiali isolanti con rivestimento costante

Dopo aver definito nel paragrafo 14.1 il comportamento acustico del solaio grezzo, che funge da riferimento per tutte le analisi successive, si procede all'esame dei risultati ottenuti sulle nove diverse configurazioni sperimentali.

Per consentire un confronto sistematico e analizzare l'impatto delle singole componenti, le nove combinazioni (risultanti dall'abbinamento dei 3 isolanti con le 3 finiture) vengono raggruppate e analizzate mantenendo una variabile fissa alla volta. Questa strategia metodologica permette di avere una visualizzazione ordinata e di isolare l'effetto delle altre variabili, consentendo di confrontare in modo chiaro l'influenza che esse hanno sul miglioramento dell'isolamento acustico, ΔL (dB).

n.	Rivestimento	Materiale Isolante	s' (MN/m ³)
1	Laminato 6mm ($m' = 5.5 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5
4		Arena PF 25mm	6.3
7		Panel PST 22mm	15.6
2	Laminato 12mm ($m' = 10.3 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5
5		Arena PF 25mm	6.3
8		Panel PST 22mm	15.6
3	Parquet A. 17mm ($m' = 7.4 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5
6		Arena PF 25mm	6.3
9		Panel PST 22mm	15.6

Figura 42 - Configurazioni raggruppate per rivestimento costante (analisi influenza s')

I grafici che seguono in questo capitolo sono il risultato della differenza, calcolata per ogni banda di frequenza, tra il livello di pressione sonora normalizzato del solaio grezzo (L_n) e i valori (L_n) ottenuti nelle prove dei singoli pacchetti. I valori di ΔL così ottenuti restituiscono, quindi, l'effettivo miglioramento acustico (attenuazione) introdotto da ciascuna soluzione rispetto alla condizione di base. Per facilitare l'analisi, in tali grafici è inoltre segnalata la frequenza di risonanza (f_0) di ciascun sistema (calcolata teoricamente nel Capitolo 12) mediante un quadratino nero posizionato sulla frequenza corrispondente. Ciò permette di correlare visivamente la posizione della f_0 teorica con l'andamento sperimentale dell'isolamento alle diverse frequenze.

Si comincerà, nel paragrafo 14.3, prendendo come costante un rivestimento di finitura alla volta. Verranno quindi graficati e confrontati gli andamenti del miglioramento ΔL che si ottengono al variare del materiale isolante sottostante. L'obiettivo di questa prima analisi è

valutare l'influenza diretta dello strato resiliente e, nello specifico, come le diverse caratteristiche di rigidità dinamica (s') incidano sulla prestazione acustica del sistema.

14.2.1 Confronto tra isolanti con pavimentazione laminata da 6 mm

Il primo grafico analizza le configurazioni che mantengono fissa la finitura superficiale, costituita dal laminato vinilico da 6 mm, la cui massa superficiale m' è pari a $5,5 \text{ kg/m}^2$.

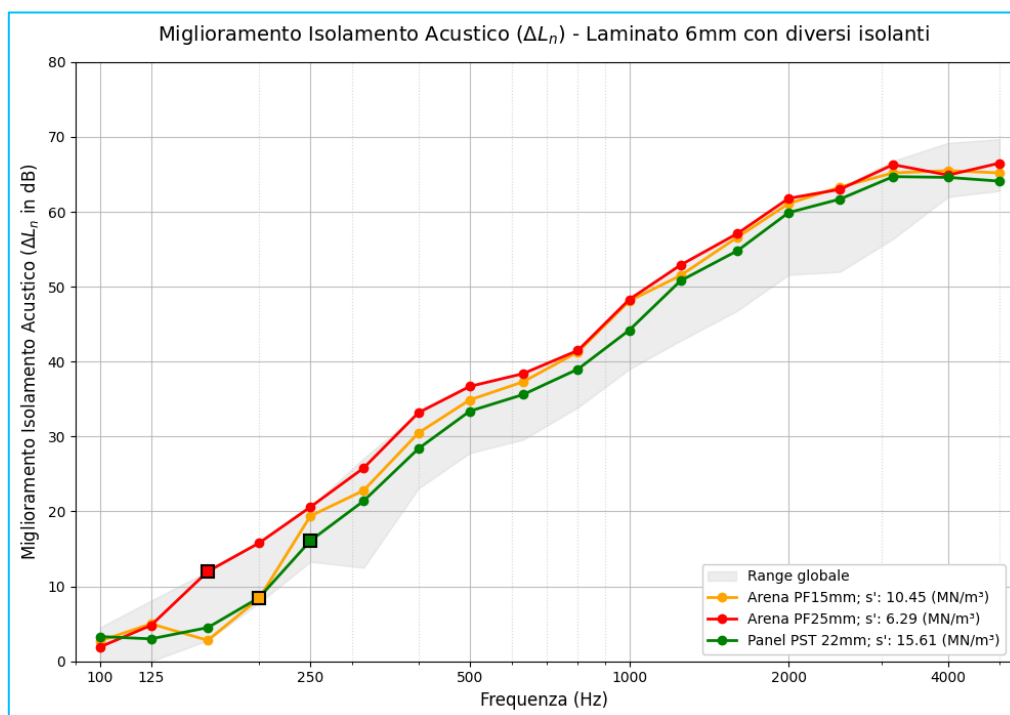


Figura 43 - Confronto ΔL_n degli isolanti con Laminato 6 mm ($m' = 5.51 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.

Alle basse frequenze, fino a 125 Hz, il miglioramento acustico (ΔL) è quasi trascurabile per tutte e tre le configurazioni. È opportuno ricordare che i risultati in questa porzione dello spettro sono potenzialmente influenzati dalle dimensioni del locale di prova, la cui lunghezza d'onda modale è comparabile con quella delle frequenze analizzate, e vanno quindi interpretati con cautela.

A partire dai 125 Hz e fino a circa 250 Hz, si osserva un primo scostamento significativo. Il materiale Arena PF 25mm, caratterizzato dal minor valore di rigidità dinamica dei tre ($s' = 6.3 \text{ MN/m}^3$), presenta un miglioramento dell'isolamento nettamente superiore. Ad esempio, alla frequenza di 160 Hz, il ΔL per Arena PF 25mm è di circa 13 dB, con una differenza di circa 10 dB rispetto agli altri due materiali (Arena PF 15mm, $s' = 10.5 \text{ MN/m}^3$, e Panel PST 22mm, $s' = 15.6 \text{ MN/m}^3$).

Proseguendo verso le frequenze più alte, gli andamenti delle tre configurazioni mostrano un incremento del ΔL molto simile tra loro, sebbene non regolare, e le differenze prestazionali si assottigliano. Complessivamente, si può notare una generale migliore prestazione del

materiale con la rigidità dinamica più bassa (Arena PF 25mm), in linea con il modello teorico massa-molla. Tuttavia, questa differenza, più marcata alle medie-basse frequenze, diventa sempre meno evidente al crescere della frequenza, dove le curve tendono a sovrapporsi, attestandosi a circa 65 dB dai 3150 Hz in poi.

14.2.2 Confronto tra isolanti con pavimentazione laminata da 12 mm

Nel secondo scenario, la variabile fissa è il rivestimento in laminato da 12 mm, caratterizzato da una massa superficiale m' di 10.3 kg/m^2 , quasi doppia rispetto al caso precedente.

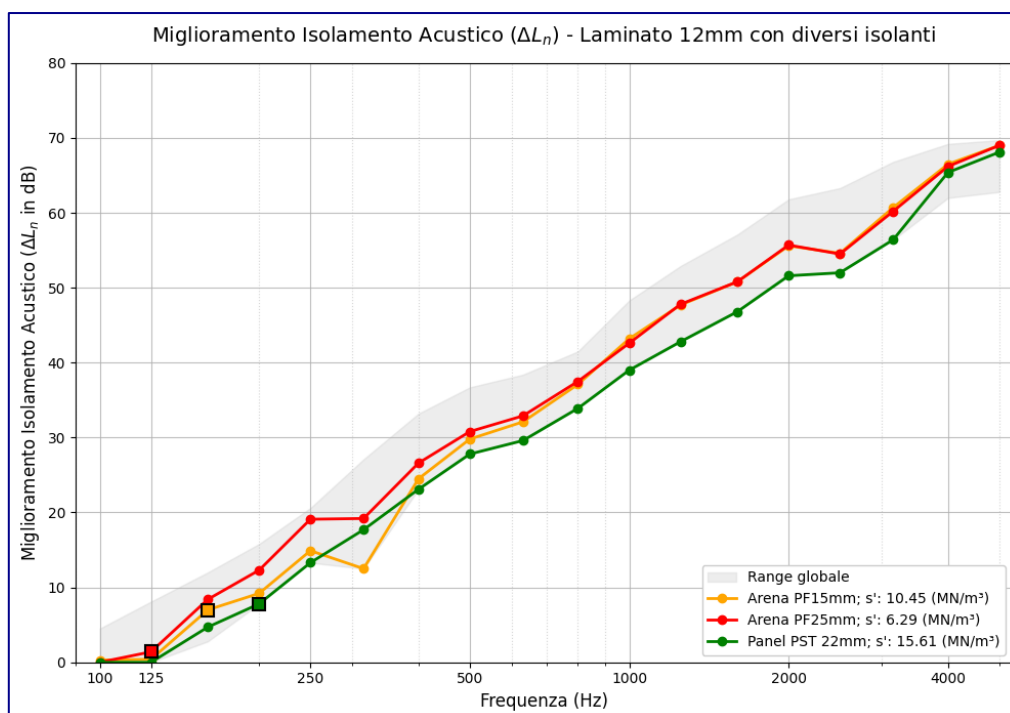


Figura 44- Confronto ΔL_n degli isolanti con Laminato 12 mm ($m' = 10.26 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.

Come nel grafico precedente, a 100 Hz le prestazioni dei tre pacchetti sono identiche e sostanzialmente nulle. Salendo di frequenza, la capacità isolante (ΔL) di tutte le configurazioni aumenta.

Si nota, tuttavia, un'anomalia interessante: i pacchetti con isolante Arena PF (sia 15 mm che 25 mm) mostrano un minimo locale o uno stallo nell'incremento delle prestazioni attorno alla frequenza di 315 Hz, nonostante questa sia distante dalle frequenze di risonanza f_0 calcolate per quei sistemi (rispettivamente 161.5 Hz e 125.3 Hz). Nello specifico, Arena PF 15mm (curva arancione) presenta un netto calo, mentre Arena PF 25mm (curva rossa) ha un plateau. Al contrario, il Panel PST (curva verde) prosegue la sua crescita in modo lineare in quella stessa banda.

Successivamente, gli andamenti riprendono a crescere in modo più o meno regolare. È interessante notare come, con questa finitura più pesante, i due materiali Arena PF (curve rossa

e arancione) si comportino in modo quasi identico: le loro linee praticamente si sovrappongono dai 500 fino ai 5000 Hz. Panel PST, invece, con la sua rigidità dinamica s' più alta ($s' = 15.61 \text{ MN/m}^3$), rimane costantemente al di sotto delle altre due curve, con un rendimento inferiore di circa 5 dB per gran parte dello spettro medio. Questa differenza si attenua solo alle altissime frequenze, dove la curva del Panel PST torna a riavvicinarsi a quelle degli altri due materiali, in particolare attorno ai 4000 Hz.

14.2.3 Confronto tra isolanti con pavimentazione in parquet di abete da 17 mm

In quest'ultimo confronto, la finitura mantenuta costante è il parquet in abete massiccio da 17 mm, con una massa superficiale m' di $7,4 \text{ kg/m}^2$.

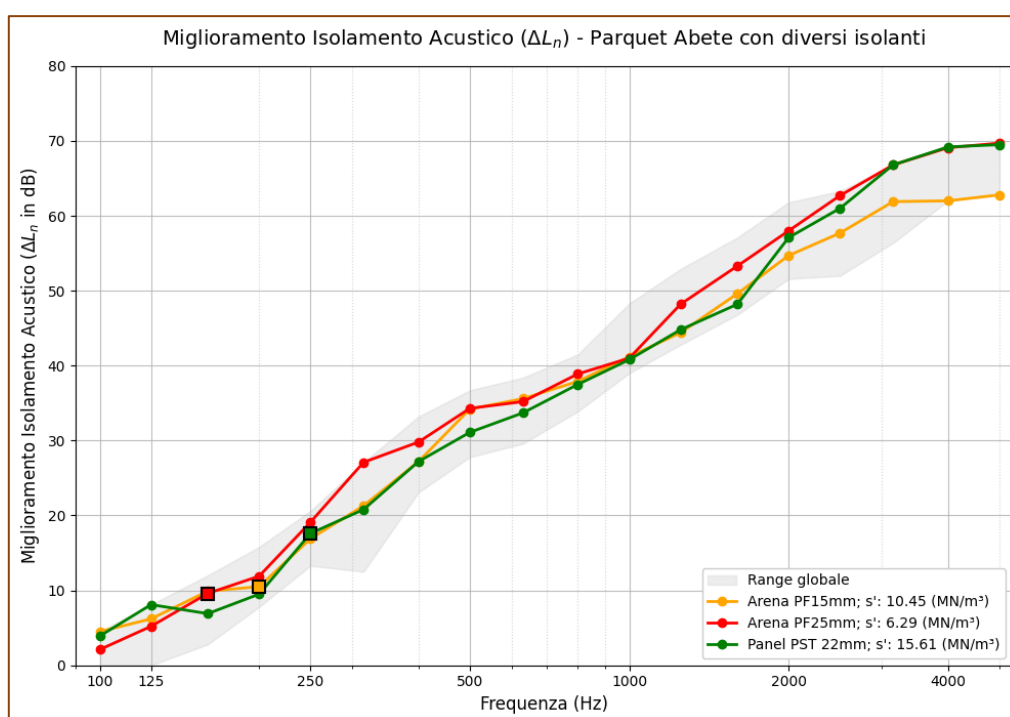


Figura 45- Confronto ΔL_n degli isolanti con Parquet Abete 17 mm ($m' = 7,41 \text{ kg/m}^2$). Produzione propria.

Partendo da valori di isolamento molto bassi per la prima frequenza di 100 Hz, gli andamenti delle tre linee mostrano un crescendo pressoché costante fino al termine della misura.

Analizzando l'andamento complessivo, si può notare un generale e sottile comportamento migliore per Arena PF 25mm (curva rossa, $s' = 6.3 \text{ MN/m}^3$) in quasi tutto lo spettro medio. Nello stesso intervallo, Arena PF 15mm (curva arancione, $s' = 10.5 \text{ MN/m}^3$) e Panel PST (curva verde, $s' = 15.6 \text{ MN/m}^3$) assumono un comportamento simile tra loro, risultando leggermente meno efficienti rispetto al materiale con s' inferiore.

La situazione si scosta da questa tendenza a partire dai 2000 Hz: il Panel PST (verde) migliora le sue prestazioni fino ad eguagliare quelle di Arena PF 25mm (rosso) e raggiungendo circa 70 dB alle frequenze di 4000 e 5000 Hz. Al contrario, Arena PF 15mm (arancione), nonostante abbia un valore di rigidità dinamica intermedio, frena la sua salita e si posiziona nettamente al

di sotto delle altre due curve alle frequenze più alte, raggiungendo un massimo di circa 63 dB di attenuazione.

14.2.4 Analisi trasversale dell'influenza del materiale isolante nelle configurazioni

Il grafico 14.3.4 sintetizza i risultati dei tre confronti precedenti, raggruppando gli andamenti in "bande di prestazione". Ciascuna banda (colorata) rappresenta l'intervallo di miglioramento acustico (dal minimo al massimo) ottenuto da un singolo materiale isolante al variare dei tre diversi rivestimenti di finitura.

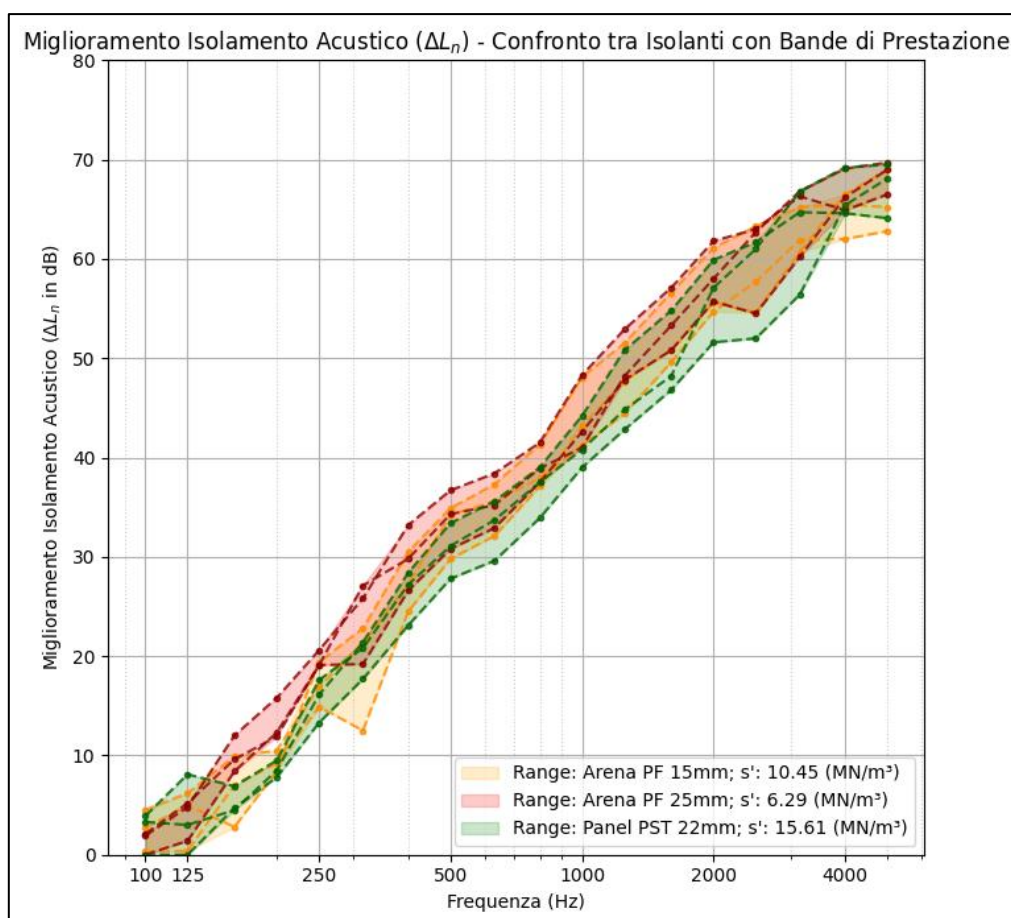


Figura 46 - Bande di prestazione ΔL_n per materiale isolante. Produzione propria.

Questa visualizzazione aggregata permette di trarre conclusioni più generali sull'efficacia dei materiali:

Alle bassissime frequenze (fino a 125 Hz), gli andamenti delle tre bande sono molto vicini ed equiparabili. Come già specificato, i valori in questo intervallo rimangono comunque poco affidabili a causa delle dimensioni ridotte del laboratorio.

Nello spettro delle basse e medie frequenze, approssimativamente da 160 Hz fino a 2500 Hz, le prestazioni seguono fedelmente quanto previsto dalla teoria del sistema massa-molla. Si

osserva una chiara gerarchia in cui le prestazioni sono inversamente proporzionali al valore di rigidità dinamica s' :

- La banda rossa (Arena PF 25mm, $s' = 6.3 \text{ MN/m}^3$) è quella che garantisce il miglioramento ΔL mediamente più elevato.
- Segue la banda arancione (Arena PF 15mm, $s' = 10.5 \text{ MN/m}^3$).
- Infine, la banda verde (Panel PST 22mm, $s' = 15.6 \text{ MN/m}^3$), relativa al materiale più rigido, si posiziona costantemente al di sotto delle altre due.

Alle alte frequenze (oltre i 2500 Hz), si verifica un'inversione di tendenza contraria a quanto prevede il modello teorico semplificato. Il materiale con la rigidità dinamica più alta, il Panel PST (banda verde), migliora nettamente le sue prestazioni, raggiungendo e persino superando l'efficacia dei due materiali Arena PF. Questo fenomeno suggerisce che, in questo intervallo di frequenza, la sola rigidità dinamica s' non è più il parametro dominante e che altre caratteristiche del materiale (come lo smorzamento interno o la struttura stessa del pannello) diventano preponderanti nel determinare l'isolamento acustico.

14.2.5 Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di s')

A conclusione dell'analisi sull'influenza degli strati resilienti, si riportano nella Tabella 23 i valori dell'indice globale ΔL_w . Come indicato nel paragrafo 13.5.6, questo valore si ottiene calcolando la differenza tra l'indice globale del solaio grezzo ($L_{n,w} = 90 \text{ dB}$) e l'indice globale $L_{n,w}$ misurato per il pacchetto specifico 3. Un ΔL_w più alto indica quindi un miglioramento acustico maggiore.

Nella Tabella 21, i valori ΔL_w così calcolati sono raggruppati per rivestimento di finitura, al fine di isolare gli effetti della rigidità dinamica s' degli isolanti.

Tabella 23 - Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di s'). Produzione propria.

n.	Rivestimento	Materiale Isolante	s' (MN/m ³)	$L_{n,w}$ (dB)	ΔL_w (dB)	
1	Laminato 6mm ($m' = 5.5 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5	55	35	
4		Arena PF 25mm	6.3	51	39	
7		Panel PST 22mm	15.6	55	35	
2	Laminato 12mm ($m' = 10.3 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5	56	34	
5		Arena PF 25mm	6.3	54	36	
8		Panel PST 22mm	15.6	57	33	
3	Parquet A. 17mm ($m' = 7.4 \text{ kg/m}^2$)	Arena PF 15mm	10.5	53	37	
6		Arena PF 25mm	6.3	52	38	
9		Panel PST 22mm	15.6	53	37	

I risultati globali sono perfettamente coerenti con la teoria e con quanto osservato nell'analisi spettrale fatta precedentemente. Analizzando le tre coppie di combinazioni a rivestimento fisso, si nota una chiara gerarchia prestazionale:

- Il valore ΔL_w migliore si ottiene sistematicamente con Arena PF 25mm, caratterizzato dal valore di s' più basso (6.3 MN/m^3).
- Gli altri due materiali (Arena PF 15mm e Panel PST) mostrano una resa inferiore ma molto simile tra loro. Nello specifico, nel caso delle finiture in Laminato 6mm e in Parquet Abete, i loro valori di ΔL_w sono identici (rispettivamente 35 dB e 37 dB). Solo nel caso con la finitura in Laminato 12mm, il Panel PST (33 dB) presenta un valore marginalmente più basso (peggiore) rispetto ad Arena PF 15mm (34 dB).

L'analisi degli indici globali conferma quindi che la rigidità dinamica s' è un parametro determinante e affidabile per prevedere l'efficacia di un isolante in un sistema flottante: a una s' inferiore corrisponde un miglioramento acustico ΔL_w superiore.

14.3 Confronto tra diversi rivestimenti con isolante costante

Proseguendo nell'analisi comparativa dei risultati sperimentali, questa sezione inverte l'approccio metodologico adottato nel paragrafo 14.3.

n.	Materiale Isolante	Rivestimento	$m' \text{ (kg/m}^2\text{)}$
1	Arena PF 15mm ($s' = 10.5 \text{ MN/m}^3$)	Laminato 6mm	5.5
2		Laminato 12mm	10.3
3		Parquet Abete 17mm	7.4
4	Arena PF 25mm ($s' = 6.3 \text{ MN/m}^3$)	Laminato 6mm	5.5
5		Laminato 12mm	10.3
6		Parquet Abete 17mm	7.4
7	Panel PST 22mm ($s' = 15.6 \text{ MN/m}^3$)	Laminato 6mm	5.5
8		Laminato 12mm	10.3
9		Parquet Abete 17mm	7.4

Figura 47 - Configurazioni raggruppate per isolante costante (Analisi influenza m')

In questo caso, la variabile che viene mantenuta costante è il materiale isolante (e, di conseguenza, la sua specifica rigidità dinamica s'). Verranno quindi presentati tre grafici distinti, uno per ciascun isolante testato: Arena PF 15 mm, Arena PF 25 mm e Panel PST 22 mm. Su ciascun grafico saranno sovrapposti e confrontati gli andamenti del miglioramento acustico

ΔL ottenuti al variare del rivestimento di finitura (Laminato 6 mm, Laminato 12 mm e Parquet Abete 17 mm).

L'obiettivo di questa analisi è isolare e valutare l'influenza dello strato di finitura sul comportamento del sistema. Nello specifico, si intende osservare come le diverse caratteristiche dei rivestimenti, in particolare la loro massa superficiale m' , impattino sulla prestazione acustica complessiva del pavimento flottante.

14.3.1 Confronto tra rivestimenti con isolante Arena PF 15 mm

Il primo grafico di questa serie fissa come materiale isolante l'Arena PF 15 mm (con $s' = 10.5 \text{ MN/m}^3$) e analizza le capacità di isolamento ΔL al variare dei tre rivestimenti di finitura, caratterizzati da diverse masse superficiali m' .

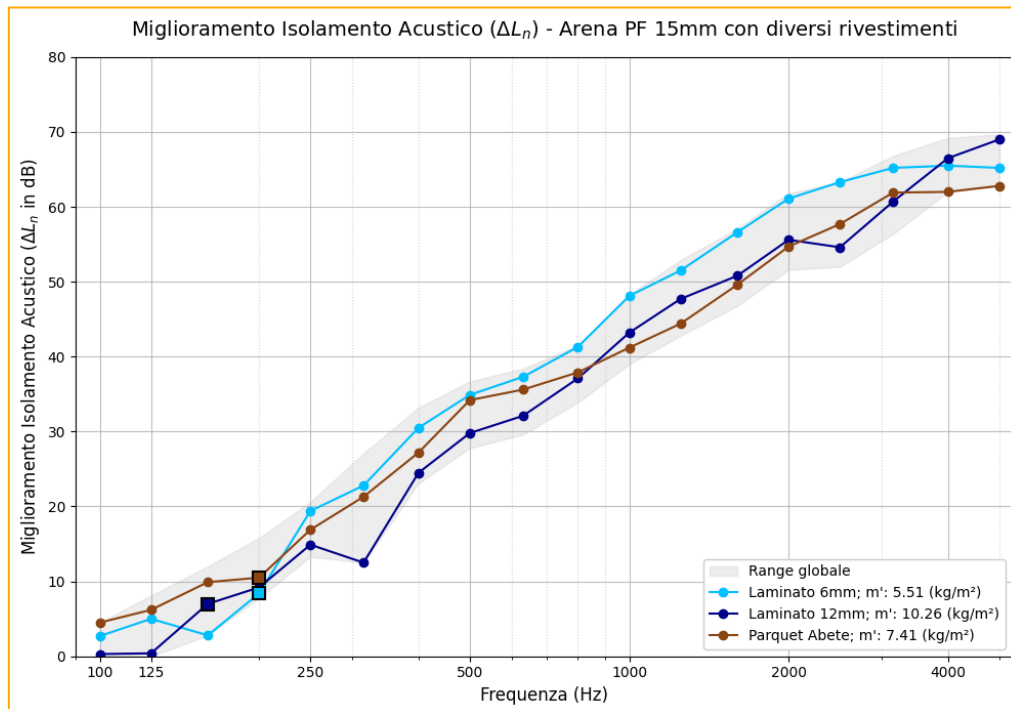


Figura 48 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Arena PF 15 mm ($s' = 10.45 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.

Si osserva che alle frequenze più basse, tra 100 e 125 Hz, il Laminato 12 mm (curva blu scuro, $m' = 10.3 \text{ kg/m}^2$) non offre alcun isolamento, mentre gli altri due rivestimenti, il Laminato 6 mm (azzurro) e il Parquet (marrone), si attestano già su valori vicini ai 5 dB di attenuazione.

Proseguendo nello spettro, i tre andamenti mostrano una progressione crescente, seppur non del tutto costante. Si notano, in particolare, due minimi locali che si verificano per il Laminato 6 mm a 160 Hz e per il Laminato 12 mm a 315 Hz, entrambi comunque distanti dalle rispettive frequenze di risonanza f_0 calcolate.

A parte queste fluttuazioni, l'aspetto più rilevante si osserva a partire dai 250 Hz fino quasi ai 4000 Hz: il Laminato 6 mm, pur essendo caratterizzato dalla massa superficiale minore ($m' =$

5.5 kg/m²), presenta prestazioni nettamente migliori rispetto agli altri due materiali più pesanti. Questi ultimi (Parquet e Laminato 12 mm) mostrano un comportamento simile tra loro, con una prestazione mediamente inferiore di circa 5 dB rispetto alla finitura più leggera.

Andando verso il fondo del grafico, la situazione si inverte. Le curve dei due materiali più leggeri (Laminato 6 mm e Parquet Abete) tendono ad appiattirsi a partire dai 3000 Hz. Al contrario, il materiale più pesante, il Laminato 12 mm, mostra una rapida crescita nelle prestazioni, superando le altre due configurazioni e posizionandosi in cima nell'intervallo tra 4000 e 5000 Hz raggiungendo i 69 dB.

14.3.2 Confronto tra rivestimenti con isolante Arena PF 25 mm

In questo grafico fissiamo come materiale isolante l'Arena PF 25 mm ($s' = 6.3 \text{ MN/m}^3$).

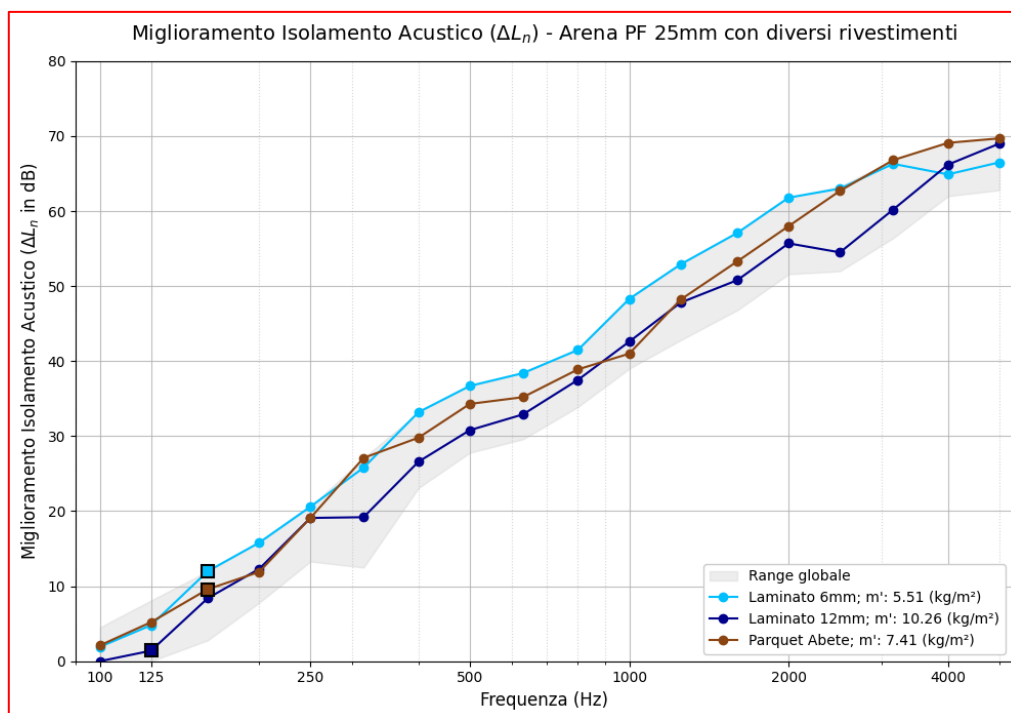


Figura 49 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Arena PF 25 mm ($s' = 6,29 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.

Questo caso presenta un andamento generale molto simile a quello analizzato nel paragrafo precedente (14.3.1), con la curva del Laminato 6 mm (azzurro) che domina le medie frequenze.

L'unica differenza sostanziale emerge nell'andamento alle ultime frequenze. A differenza del caso precedente (con Arena PF 15mm), dove dopo la frequenza di 3150 Hz il pacchetto comprendente il parquet di abete ($m' = 7.4 \text{ kg/m}^2$) aveva il rendimento più scarso dei tre, questa volta rende meglio. Come visibile dalla curva marrone, il parquet supera i due laminati a partire da circa 3150 Hz e tocca il valore di 69,7 dB (a 4000 Hz), che risulta il valore di miglioramento ΔL più alto registrato tra tutte le tre prove svolte.

14.3.3 Confronto tra rivestimenti con isolante Panel PST 22 mm

In quest'ultimo grafico, il materiale isolante fisso è il Panel PST 22 mm ($s' = 15.6 \text{ MN/m}^3$).

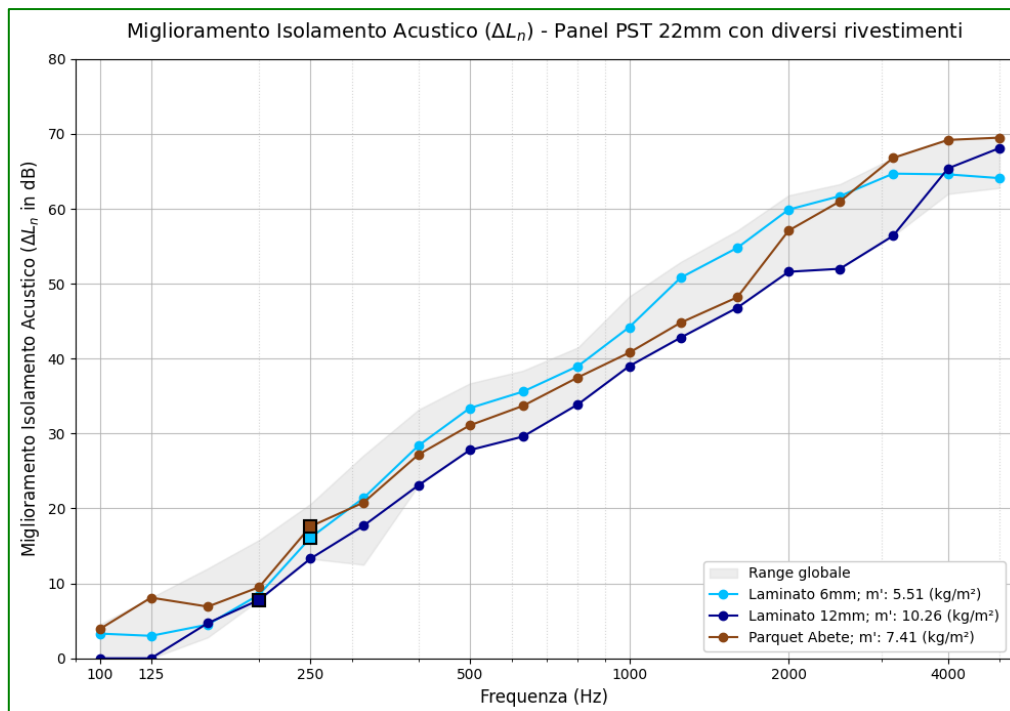


Figura 50 - Confronto ΔL_n dei rivestimenti con Panel PST 22 mm ($s' = 6.29 \text{ MN/m}^3$). Produzione propria.

Analizzando le curve, si osserva un comportamento relativo dei tre rivestimenti praticamente identico a quello riscontrato nel caso precedente (paragrafo 14.3.2). Nello spettro medio delle frequenze (da 250 Hz a 2500 Hz circa), il Laminato 6 mm (curva azzurra), ovvero il materiale più leggero ($m' = 5.5 \text{ kg/m}^2$), conferma di avere la miglior prestazione. Nello stesso intervallo, il Laminato 12 mm (curva blu scuro), il materiale più pesante ($m' = 10.3 \text{ kg/m}^2$), mostra prestazioni generalmente inferiori agli altri due.

Alle ultime frequenze, come nel caso precedente, il Laminato 12 mm presenta una netta salita e raggiunge quasi le prestazioni del Parquet di Abete. Quest'ultimo (curva marrone), a sua volta, a partire dai 3150 Hz si distacca dall'andamento intermedio precedente e presenta il comportamento migliore tra le tre finiture.

14.3.4 Analisi trasversale dell'influenza del rivestimento nelle configurazioni

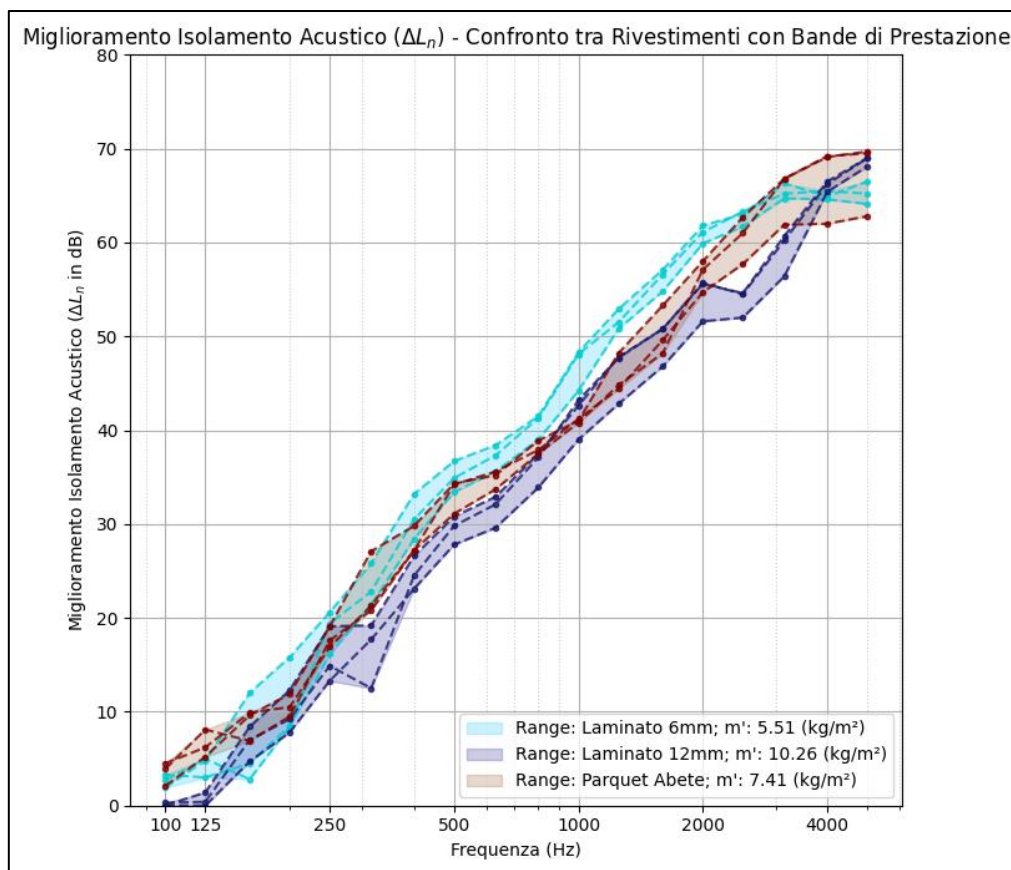


Figura 51 - Bande di prestazione ΔL_n per rivestimento di finitura. Produzione propria.

Il grafico 14.4.4 sintetizza i tre confronti precedenti, raggruppando gli andamenti in "bande di prestazione" in base al rivestimento di finitura utilizzato. Ogni banda colorata rappresenta l'intervallo di miglioramento ΔL (dal minimo al massimo) ottenuto da uno specifico rivestimento al variare dei tre diversi isolanti sottostanti.

Questa visualizzazione aggregata permette di analizzare l'influenza generale della massa superficiale m' del rivestimento:

- Alle prime frequenze (100-125 Hz), la banda del materiale più pesante, il Laminato 12 mm (blu scuro, $m' = 10.3 \text{ kg/m}^2$), evidenzia prestazioni quasi nulle. Nello stesso intervallo, le bande degli altri due materiali (Laminato 6 mm e Parquet Abete) si attestano già su valori di attenuazione superiori, attorno ai 4-7 dB.
- A partire dai 160 Hz e fino ai 3150 Hz, emerge una tendenza chiara: il range del Laminato 6 mm (banda azzurra), ovvero il materiale più leggero ($m' = 5.5 \text{ kg/m}^2$), comincia a presentare un andamento crescente e con valori generalmente superiori rispetto ai due materiali più pesanti, mantenendo la prima posizione in questo ampio spettro.
- Nel frattempo, gli altri due materiali (Parquet e Laminato 12 mm) presentano un andamento simile, ma con un leggero vantaggio generale per il Parquet di Abete (banda marrone), materiale dalla massa superficiale media ($m' = 7.4 \text{ kg/m}^2$). Il materiale più

pesante (Laminato 12 mm) ha quindi un comportamento peggiore per quasi tutto lo spettro, in apparente contraddizione con il modello teorico massa-molla.

- Verso le alte frequenze (oltre i 3150 Hz), la situazione si modifica. Si vede un miglioramento delle prestazioni del Laminato 12 mm, il materiale che fino ad adesso aveva avuto le prestazioni peggiori, portando la sua banda al di sopra di quella del Laminato 6 mm. Contemporaneamente, la banda del Parquet di Abete subisce una notevole espansione e ingloba le prestazioni degli altri due materiali.

14.3.5 Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di m')

In modo analogo, si conclude l'analisi sull'influenza dei rivestimenti analizzando l'indice globale ΔL_w , calcolato come differenza tra il $L_{n,w}$ del solaio grezzo (90 dB) e quello delle singole configurazioni.

La Tabella 22 evidenzia come varia il ΔL_w al variare della massa superficiale m' del rivestimento, mantenendo costante l'isolante.

Tabella 24 - Analisi sintetica del ΔL_w (Influenza di m'). Produzione propria.

n.	Materiale Isolante	Rivestimento	m' (kg/m ²)	$L_{n,w}$ (dB)	ΔL_w (dB)	
1	Arena PF 15mm ($s' = 10.5$ MN/m ³)	Laminato 6mm	5.5	55	35	
2		Laminato 12mm	10.3	56	34	
3		Parquet Abete 17mm	7.4	53	37	
4	Arena PF 25mm ($s' = 6.3$ MN/m ³)	Laminato 6mm	5.5	51	39	
5		Laminato 12mm	10.3	54	36	
6		Parquet Abete 17mm	7.4	52	38	
7	Panel PST 22mm ($s' = 15.6$ MN/m ³)	Laminato 6mm	5.5	55	35	
8		Laminato 12mm	10.3	57	33	
9		Parquet Abete 17mm	7.4	53	37	

Come ci si aspettava dall'analisi delle bande di prestazione, e come viene ora confermato da questi valori globali, si giunge a una conclusione in netta contraddizione con il modello previsionale della norma ISO 12354-2 (Annesso C.2) [28]. La teoria, infatti, prevede che l'isolamento ΔL_w aumenti all'aumentare della massa m' del rivestimento.

I dati sperimentali mostrano invece una tendenza ben diversa. Analizzando i risultati all'interno di ciascun blocco di isolante costante, si osserva che:

- Il rivestimento più pesante, il Laminato 12mm ($m' = 10.3$ kg/m²), fornisce sistematicamente il risultato ΔL_w peggiore (rispettivamente 34 dB, 36 dB e 33 dB).

- Le prestazioni mediamente migliori si ottengono invece con il Parquet Abete (massa media, $m' = 7.4 \text{ kg/m}^2$) o con il Laminato 6mm (massa leggera, $m' = 5.5 \text{ kg/m}^2$).

15 CONFRONTO TRA RISULTATI SPERIMENTALI E MODELLI PREVISIONALI

Nei capitoli precedenti sono stati presentati separatamente i due termini del confronto: da un lato le stime teoriche del miglioramento acustico (ΔL), calcolate nel Capitolo 12 secondo i modelli dell'Annesso C della norma ISO 12354-2 [28]; dall'altro i risultati reali ottenuti dalle prove sperimentali di laboratorio, analizzati nel Capitolo 14.

Questo capitolo ha l'obiettivo di porre i due dataset in un confronto diretto per quantificare sistematicamente la discrepanza (o "errore di previsione") tra il modello di calcolo normativo e il comportamento reale dei sistemi a secco analizzati. L'analisi viene condotta sia per bande di frequenza che attraverso gli indici globali ponderati.

15.1 Confronto per bande di frequenza $\Delta L(f)$

Per verificare l'attendibilità del modello previsionale spettrale (ISO 12354-2, Annesso C.1 [28]), è stata calcolata la differenza puntuale, per ogni banda di frequenza, tra il valore di isolamento stimato teoricamente (ΔL_{Iso}) e quello misurato in laboratorio (ΔL_{Lab}).

$$\Delta L(f) = \Delta L_{Iso} - \Delta L_{Lab}$$

I risultati numerici di tale confronto sono riportati nella Tabella 25, che elenca gli scostamenti in dB per ciascuna delle nove configurazioni.

Tabella 25 - Scostamenti tra valori misurati e previsti ($\Delta L_{Iso} - \Delta L_{Lab}$)

Diff. Tra valore da laboratorio e previsione con ISO 12354-2									
Frequenza (f) [Hz]	Arena PF 15mm + Lam 6mm (f0 = 220,3 Hz)	Arena PF 15mm + Lam 12mm (f0 = 161,5 Hz)	Arena PF 15mm + P, Abete (f0 = 190 Hz)	Arena PF 25mm + Lam 6mm (f0 = 170,9 Hz)	Arena PF 25mm + Lam 12mm (f0 = 125,3 Hz)	Arena PF 25mm + P, Abete (147,4 Hz)	Panel PST 22mm + Lam 6mm (f0 = 269,3 Hz)	Panel PST 22mm + Lam 12mm (f0 = 197,3 Hz)	Panel PST 22mm + P, Abete (f0 = 232,2 Hz)
100,0	16,4	7,0	15,7	11,2	2,4	8,8	20,5	10,2	18,5
125,0	15,8	4,9	13,5	10,2	1,4	8,1	16,3	7,5	18,9
160,0	8,4	7,2	12,9	13,1	4,2	8,2	13,5	8,3	13,4
200,0	10,1	5,5	9,6	13,1	4,2	6,6	13,7	7,6	12,1
250,0	17,2	7,3	12,1	14,0	7,1	9,9	17,4	9,2	16,3
315,0	16,3	6,6	12,2	14,9	6,1	13,6	18,4	9,3	15,2
400,0	20,1	8,1	14,3	17,4	6,4	12,5	21,5	10,8	17,8
500,0	20,7	10,1	17,3	18,1	6,8	13,1	22,7	11,6	17,8
630,0	19,0	8,5	14,8	15,3	4,8	10,0	20,8	9,4	16,4
800,0	19,6	10,0	13,6	15,4	6,0	10,2	21,8	10,2	16,8
1000,0	21,8	11,4	12,4	17,6	6,5	7,7	22,4	10,8	16,4
1250,0	26,0	16,1	15,6	22,3	11,3	11,0	27,3	13,6	19,0
1600,0	26,2	15,0	16,1	22,2	10,6	11,9	26,6	13,5	17,8
2000,0	27,6	14,7	17,7	23,9	9,8	13,1	28,6	14,0	20,0
2500,0	25,7	9,6	16,9	22,4	4,5	13,5	29,0	11,5	21,1
3150,0	23,7	9,4	17,7	21,4	4,3	14,3	28,7	11,9	22,2
4000,0	17,7	10,3	14,3	14,9	6,0	11,8	23,5	13,1	19,8
5000,0	11,0	9,4	10,0	7,9	5,0	8,5	17,4	11,9	16,2

A fronte di questi dati, si è cercato di individuare una logica che mettesse in relazione la precisione delle previsioni con le caratteristiche delle diverse configurazioni testate. L'analisi

ha evidenziato con chiarezza che la variabilità dell'errore segue un legame diretto con la tipologia del materiale di rivestimento utilizzato.

Per visualizzare questa dipendenza, nel grafico di Figura le curve di scostamento sono state raggruppate e colorate in base alla finitura:

- Le tonalità blu identificano le configurazioni con il rivestimento più pesante (Laminato 12 mm);
- Le tonalità marroni identificano il rivestimento di massa media (Parquet 17 mm);
- Le tonalità azzurre identificano il rivestimento più leggero (Laminato 6 mm).

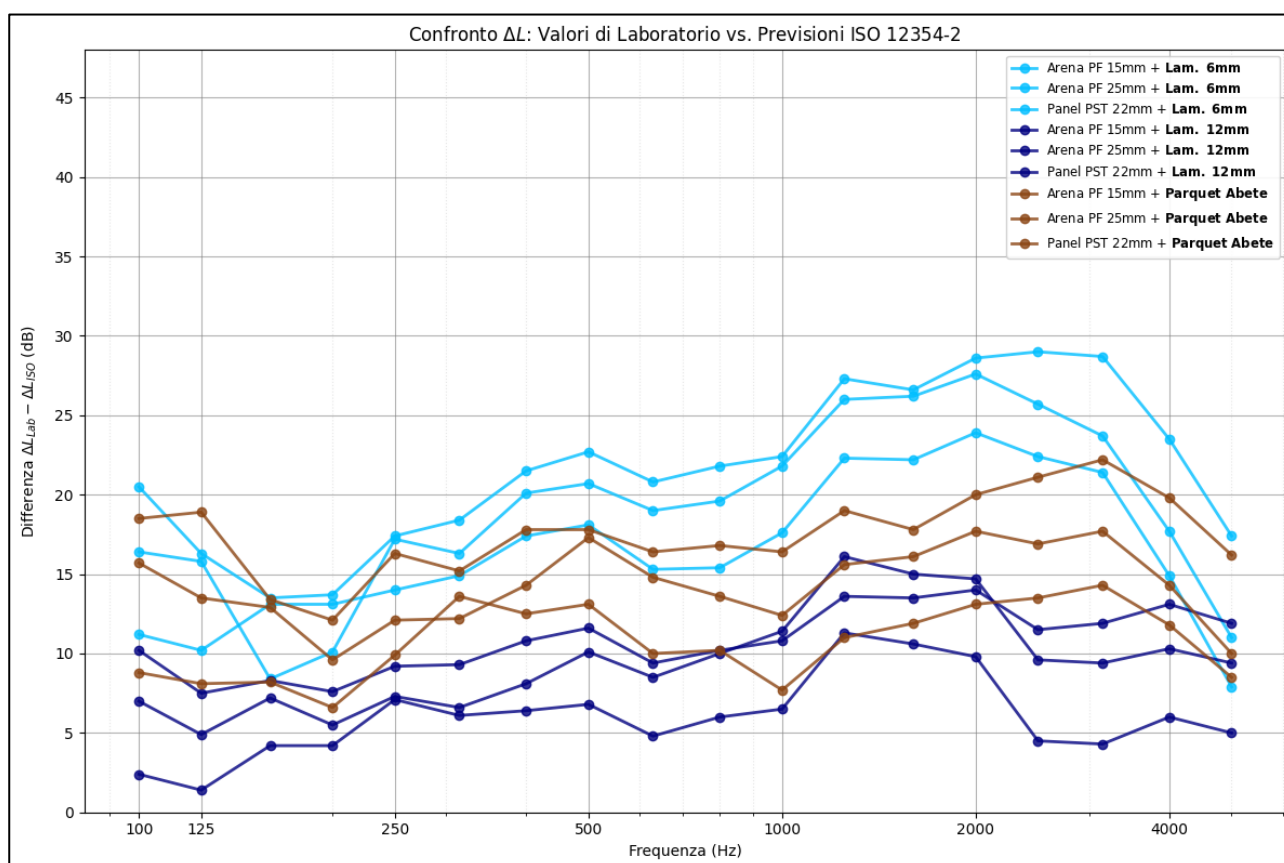


Figura 52 - Confronto $\Delta L(f)$: Valori di Laboratorio – Previsioni ISO 12354-2, con curve raggruppate per materiale di finitura. Produzione propria.

Da una prima analisi sommaria, si è cercato di trovare una correlazione tra la precisione della previsione e le caratteristiche della combinazione, che si è presto rivelata essere relativa alla frequenza di risonanza (f_0).

Per dimostrare visivamente tale legame, nel grafico è stato assegnato un colore a ciascuna curva secondo una scala cromatica: dal blu, per la combinazione con la f_0 più bassa (Arena PF 25mm + Lam. 12mm, $f_0 = 125.3$ Hz), fino al rosso per la combinazione con la f_0 più alta (Panel PST + Lam. 6mm, $f_0 = 269.3$ Hz), assegnando i colori intermedi alle altre configurazioni in ordine crescente di f_0 .

L'osservazione del grafico conferma visivamente la correlazione inversa tra la massa superficiale e l'errore di previsione, evidenziando una precisa stratificazione delle curve:

- Le configurazioni con il rivestimento più pesante (Laminato 12 mm, curve blu) si posizionano sistematicamente nella parte inferiore del grafico, mostrando l'errore di sottostima minore.
- In una fascia intermedia si collocano le curve relative al rivestimento di massa media (Parquet 17 mm, curve marroni), che presentano scostamenti superiori rispetto al laminato pesante.
- Infine, nella parte più alta del grafico si trovano le curve del materiale più leggero (Laminato 6 mm, curve azzurre), che evidenziano la discrepanza più marcata tra il modello teorico e la misura reale.

Questa disposizione ordinata dimostra che l'affidabilità del modello ISO decresce progressivamente al diminuire della massa superficiale del rivestimento di finitura.

15.2 Confronto degli indici globali ΔL_w

Per ottenere una sintesi quantitativa immediata, il confronto è stato esteso agli indici di valutazione unici ponderati (ΔL_w). La Tabella 26 mette a confronto, per ciascuna delle nove configurazioni, il valore di miglioramento misurato in laboratorio ($\Delta L_{w,Lab}$) con quello previsto dal modello normativo semplificato ($\Delta L_{w,ISO}$). L'ultima colonna evidenzia l'entità della discrepanza (errore di stima).

Tabella 26 - Confronto ΔL_w : Previsioni ISO 12354-2 - Valori di Laboratorio. Produzione propria.

Configurazione	Materiale Isolante	Rivestimento	f0 Calcolata (Hz)	ΔL_w , Lab (dB)	ΔL_w , ISO (dB)	ΔL_w Lab - ISO (dB)	
1	Arena PF 15mm	Laminato 6mm	220.3	35	19,6	15,4	
2	Arena PF 15mm	Laminato 12mm	161.5	34	20,8	13,2	
3	Arena PF 15mm	Parquet Abete 17mm	190.0	37	20,1	16,9	
4	Arena PF 25mm	Laminato 6mm	170.9	39	21,1	17,9	
5	Arena PF 25mm	Laminato 12mm	125.3	36	22,4	13,6	
6	Arena PF 25mm	Parquet Abete 17mm	147.4	38	21,6	16,4	
7	Panel PST 22mm	Laminato 6mm	269.3	35	18,4	16,6	
8	Panel PST 22mm	Laminato 12mm	197.3	33	19,4	13,6	
9	Panel PST 22mm	Parquet Abete 17mm	232.2	37	18,8	18,2	

Osservando i valori di differenza riportati nell'ultima colonna, si nota una netta distinzione tra i gruppi di configurazioni in base al materiale di finitura utilizzato:

- Le tre configurazioni con Laminato 12 mm (configurazioni 2, 5, 8) presentano i valori di scostamento più bassi in assoluto, compresi in un intervallo molto ristretto tra 13,2 dB e 13,6 dB.
- Le configurazioni che utilizzano i rivestimenti più leggeri, ovvero Laminato 6 mm e Parquet 17 mm, mostrano invece differenze sensibilmente maggiori, che variano da un minimo di 15,4 dB fino a un massimo di 18,2 dB.

A differenza di quanto riscontrato per il laminato pesante, tra questi due materiali più leggeri non emerge una gerarchia costante: i valori di scostamento si alternano, con il Parquet che presenta differenze superiori in alcuni casi e il Laminato 6 mm in altri, attestandosi comunque entrambi su livelli di discrepanza mediamente superiori rispetto al rivestimento da 12 mm.

16 SIMULAZIONE DI VERIFICA IN OPERA: CONFRONTO TRA L'APPROCCIO ITALIANO E SPAGNOLO

16.1 Premessa metodologica e definizione dello scenario

Per comprendere appieno le implicazioni pratiche dei risultati ottenuti, è necessario analizzare come i dati misurati verrebbero interpretati e classificati nei due diversi contesti normativi nazionali. Come discusso nel Capitolo 5, esiste una differenza sostanziale tra la fase di caratterizzazione del prodotto (laboratorio) e quella di verifica dell'edificio (in opera), fase quest'ultima che definisce anche i parametri di riferimento per il rispetto dei limiti di legge:

- In laboratorio, sia l'Italia che la Spagna adottano l'unico standard internazionale disponibile (ISO 10140), che definisce il Livello Normalizzato (L_n). Non esiste, a livello normativo, un parametro "standardizzato" (L_{nt}) per le misure in laboratorio.
- Nelle verifiche in opera, le strade divergono non solo nella formula di calcolo, ma nella filosofia di valutazione. L'approccio italiano (D.P.C.M. 5/12/1997 [34]) mantiene una continuità metodologica adottando il Livello Normalizzato (L'_n), al fine di facilitare il confronto diretto tra le prestazioni degli orizzontamenti depurando il dato dall'influenza del locale ricevente. L'approccio spagnolo (CTE DB-HR [14]) prescrive invece il Livello Standardizzato (L'_{nt}), introducendo un cambio di parametro correttivo (dall' area equivalente al tempo di Riverberazione) con l'obiettivo di avvicinarsi alla percezione reale dell'utente, legando la prestazione al comfort effettivo nell'ambiente arredato.

Poiché il parametro standardizzato (L'_{nt}) non è misurabile direttamente in laboratorio, per confrontare l'efficacia dei materiali secondo l'ottica spagnola è necessario ricorrere a una simulazione di scenario. Si ipotizza, pertanto, che la camera ricevente del laboratorio (di volume $V = 13,23 \text{ m}^3$) corrisponda a un ambiente reale (es. una piccola camera da letto) situato in un edificio residenziale soggetto a collaudo.

L'obiettivo della simulazione è confrontare i due esiti normativi a parità di condizioni fisiche:

1. Scenario Italia: applicazione della formula del Livello Normalizzato (L'_n). Poiché tale metodo utilizza la medesima procedura di calcolo impiegata per la certificazione in laboratorio (correzione su $A_0 = 10 \text{ m}^2$), non vi è alcun cambio di parametro. Di conseguenza, il valore numerico ottenuto in questo scenario rimane identico al dato di laboratorio misurato (L_n).
2. Scenario Spagna: L'applicazione del Livello Standardizzato (L'_{nt}). In questo scenario non si applica più la correzione per l'area di assorbimento equivalente (A), ma

esclusivamente quella riferita al tempo di riverberazione (T). Per ottenere questi valori direttamente dai dati L_n/L'_n disponibili, si applica la formula di conversione matematica descritta nel Capitolo 5.

È doveroso precisare che questa simulazione opera una forzatura metodologica necessaria ai fini comparativi. In un reale scenario in opera, il livello di pressione sonora misurato (L') risulterebbe fisicamente più alto rispetto a quello di laboratorio a causa del contributo delle trasmissioni laterali (*flanking transmission*), qui trascurabili grazie alla desolidarizzazione del solaio. Di conseguenza, la prestazione di isolamento reale dell'edificio sarebbe inferiore a quella del solo elemento testato. Tuttavia, lo scopo di questa analisi non è predire il valore assoluto in opera, bensì isolare ed evidenziare esclusivamente la differenza numerica generata dall'applicazione dei due diversi metodi di calcolo (n vs nT) a parità di dato fisico di input.

16.2 Valutazione numerica

L'applicazione della normativa spagnola allo scenario specifico analizzato comporta una variazione sistematica dei valori numerici rispetto a quelli ottenuti con l'approccio italiano. Di seguito si analizza l'entità di questa variazione distinguendo tra l'andamento spettrale e l'indice di valutazione unico.

16.2.1 Analisi per frequenza

Per ottenere i valori spettrali conformi alla normativa spagnola, si applica ai livelli normalizzati ($L'_n = L_n$) la formula di conversione analizzata nel Paragrafo 5.2.4:

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \cdot \lg(0,032 \cdot V)$$

Sostituendo il termine V con il volume specifico del locale ricevente del laboratorio ($13,23 \text{ m}^3$), si ottiene il termine correttivo per il caso in esame:

$$C = -10 \cdot \lg(0,032 \cdot 13,23) \approx +3,7 \text{ dB}$$

Applicando questo fattore alla formula precedente, si determina la relazione numerica:

$$L'_{nT} \approx L'_n + 3,7 \text{ dB}$$

Questo fattore di conversione agisce come una costante additiva su ogni singola banda di frequenza. Nel caso specifico di questa campagna sperimentale, per tutte le bande misurate nell'intervallo 100 Hz – 5000 Hz, il livello standardizzato (L'_{nT}) risulta amplificato in modo uniforme rispetto al corrispondente caso di correzione con il metodo normalizzato (L'_n).

Di seguito si riportano i dati spettrali completi ricalcolati per tutte le configurazioni:

Tabella 27 - Valori L'_n e L'_{nT} per banda di frequenza. Confronto tra i livelli normalizzati e standardizzati.

Frequenza (f) [Hz]	Valori L'_n e L'_{nT} per banda di frequenza (dB)																	
	Arena PF 15mm + Lam 6mm		Arena PF 15mm + Lam 12mm		Arena PF 15mm + P, Abet		Arena PF 25mm + Lam 6mm		Arena PF 25mm + Lam 12mm		Arena PF 25mm + P, Abete		Panel PST 22mm + Lam 6mm		Panel PST 22mm + Lam 12mm		Panel PST 22mm + P, Abete	
	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)	L'_n (f)	L'_{nT} (f)
100,0	66,4	70,1	70,4	74,1	64,6	68,3	67,2	70,9	70,6	74,3	67	70,7	65,8	69,5	70,7	74,4	65,2	68,9
125,0	62,9	66,6	68,5	72,2	62,7	66,4	64,1	67,8	67,5	71,2	63,7	67,4	65,9	69,6	69,3	73,0	60,8	64,5
160,0	66,7	70,4	62,5	66,2	59,6	63,3	57,5	61,2	61,1	64,8	59,9	63,6	65	68,7	64,8	68,5	62,6	66,3
200,0	60,4	64,1	59,6	63,3	58,3	62,0	53	56,7	56,5	60,2	56,9	60,6	60,3	64,0	61	64,7	59,3	63,0
250,0	51,8	55,5	56,3	60,0	54,3	58,0	50,6	54,3	52,1	55,8	52,1	55,8	55,1	58,8	57,9	61,6	53,6	57,3
315,0	55,5	59,2	59,8	63,5	57	60,7	52,5	56,2	55,9	59,6	51,2	54,9	56,9	60,6	60,6	64,3	57,5	61,2
400,0	46,2	49,9	52,8	56,5	49,5	53,2	44,5	48,2	50,1	53,8	46,9	50,6	48,3	52,0	53,6	57,3	49,5	53,2
500,0	43,7	47,4	48,9	52,6	44,5	48,2	41,9	45,6	47,8	51,5	44,3	48,0	45,2	48,9	50,8	54,5	47,5	51,2
630,0	41	44,7	46,2	49,9	42,7	46,4	40,3	44,0	45,4	49,1	43,1	46,8	42,7	46,4	48,7	52,4	44,6	48,3
800,0	37,9	41,6	42,1	45,8	41,3	45,0	37,7	41,4	41,7	45,4	40,3	44,0	39,2	42,9	45,4	49,1	41,6	45,3
1000,0	32,4	36,1	37,4	41,1	39,3	43,0	32,2	35,9	37,9	41,6	39,5	43,2	35,3	39,0	41,5	45,2	38,7	42,4
1250,0	27,7	31,4	32,3	36,0	35,6	39,3	27	30,7	32,6	36,3	35,8	39,5	29,9	33,6	38,2	41,9	35,7	39,4
1600,0	23,2	26,9	29	32,7	30,7	34,4	22,7	26,4	29	32,7	30,5	34,2	26,2	29,9	33,9	37,6	32,5	36,2
2000,0	17,9	21,6	25,4	29,1	25,2	28,9	17,2	20,9	25,9	29,6	25,4	29,1	20,4	24,1	29,6	33,3	26,4	30,1
2500,0	15,7	19,4	26,4	30,1	21,9	25,6	14,6	18,3	27,1	30,8	20,9	24,6	15,9	19,6	28	31,7	21,2	24,9
3150,0	14,2	17,9	23,1	26,8	17,6	21,3	12,1	15,8	23,8	27,5	16,6	20,3	12,7	16,4	24,1	27,8	16,6	20,3
4000,0	15,3	19,0	17,3	21,0	16,2	19,9	13,7	17,4	17,2	20,9	14,3	18,0	13	16,7	18	21,7	14,2	17,9
5000,0	16,8	20,5	13	16,7	15,2	18,9	15,5	19,2	13	16,7	12,3	16,0	13,9	17,6	13,9	17,6	12,5	16,2

16.2.2 Analisi degli indici globali

L'incremento dei livelli di pressione sonora su tutto lo spettro delle frequenze si ripercuote direttamente sul calcolo dell'indice unico ponderato (w), parametro di riferimento per le verifiche di legge.

Applicando la procedura di calcolo della norma ISO 717-2 [31] alle nuove curve spettrali traslate, si sono determinati i valori globali $L'_{nT,w}$ per tutte le configurazioni.

Osservando i risultati, si nota che la differenza tra l'indice italiano normalizzato e quello spagnolo simulato ($L'_{nT,w}$) non è costante, ma oscilla tra +3 dB e +4 dB. Questa variazione è dovuta alla natura discreta (numeri interi) degli indici di valutazione acustica:

- Il fattore di conversione fisico calcolato è un numero decimale (+3,73 dB).
- La norma ISO 717-2 impone che l'indice finale sia espresso come numero intero.
- Di conseguenza, a seconda di come la curva di riferimento si adatta allo spettro specifico e delle regole di arrotondamento, l'incremento matematico di 3,73 dB si traduce nell'indice finale a volte come 3 dB e più frequentemente come 4 dB.

Di seguito si riporta il quadro completo degli indici globali ricalcolati per tutte le nove configurazioni:

Tabella 28 - Valori $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$ globali. Confronto tra i livelli normalizzati e standardizzati

Globale	Valori globali L'_n e L'_{nT}																	
	Arena PF 15mm + Lam 6mm		Arena PF 15mm + Lam 12mm		Arena PF 15mm + P, Abet		Arena PF 25mm + Lam 6mm		Arena PF 25mm + Lam 12mm		Arena PF 25mm + P, Abete		Panel PST 22mm + Lam 6mm		Panel PST 22mm + Lam 12mm		Panel PST 22mm + P, Abete	
	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{nT,w}$
	55	58	56	60	53	56	51	55	54	58	52	56	55	59	57	61	53	57

16.3 Implicazioni normative e progettuali

L'analisi condotta evidenzia che il divario di circa 4 dB riscontrato non è un semplice scarto numerico, ma il risultato di una diversa impostazione filosofica che ha conseguenze dirette sulla verifica di legge.

La differenza fondamentale risiede nel fatto che l'indice standardizzato (L'_{nT}), adottato dalla Spagna, registra fedelmente la realtà fisica della pressione sonora nell'ambiente, mantenendo la dipendenza naturale tra la geometria della stanza e il rumore percepito. Al contrario, l'indice normalizzato (L'_n), usato in Italia, interviene matematicamente per disaccoppiare il risultato dal volume, modificando i valori per valutare l'elemento edilizio in astratto. Questa distinzione comporta una diversa distribuzione della "severità" normativa in funzione dello spazio.

Nel caso di ambienti "piccoli" ($V < 31,25 \text{ m}^3$): La fisica impone che il livello sonoro aumenti a causa della concentrazione di energia:

- L'approccio spagnolo (L'_{nT}) accetta questo dato di fatto: registrando valori più alti (nel nostro caso +4 dB), costringe il progettista a utilizzare solai più performanti per garantire il comfort reale.
- L'approccio italiano (L'_n), invece, risulta meno severo: applica una correzione che riduce il valore numerico, "perdonando" l'effetto geometrico sfavorevole per non penalizzare la certificazione del solaio.

Nel caso di ambienti grandi ($V > 31,25 \text{ m}^3$): La fisica fa sì che il livello sonoro diminuisca grazie alla dispersione dell'energia:

- L'approccio spagnolo (L'_{nT}) registra questo vantaggio naturale, restituendo valori più bassi e facilitando la verifica.
- L'approccio italiano (L'_n) risulta più severo: applica una correzione che alza il valore numerico, annullando il vantaggio offerto dal volume per richiedere al solaio la medesima prestazione intrinseca.

In conclusione, mentre il metodo italiano mira a garantire la qualità costante del prodotto edilizio (indipendentemente da dove viene installato), il metodo spagnolo punta a garantire la qualità costante del comfort acustico, adattando implicitamente la richiesta prestazionale alle condizioni critiche o favorevoli dell'ambiente ricevente.

17 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

17.1 Caratterizzazione fisica e stima prestazionale

La prima fase dell'analisi dei risultati riguarda la definizione del comportamento teorico del sistema. Prima di procedere con le misurazioni acustiche, è stato necessario esaminare il modello fisico che governa l'isolamento dai rumori di calpestio nei pavimenti galleggianti: il sistema "massa-molla".

L'analisi della teoria ha permesso di individuare i due parametri fisici fondamentali che, secondo la teoria, descrivono questo sistema:

1. Rigidità dinamica (s'): relativa allo strato isolante (la molla).
2. Massa superficiale (m'): relativa allo strato di finitura (la massa).

Una volta determinati questi valori per i materiali in esame (come dettagliato nel Capitolo 11), è stato possibile applicare i modelli previsionali definiti dalla norma UNI EN ISO 12354-2 [28]. Questa norma utilizza proprio i parametri m' e s' per stimare la riduzione del livello di pressione sonora di calpestio.

Sono stati quindi eseguiti i calcoli previsionali per tutte le nove combinazioni, sia in termini di andamento in frequenza (spettrale), sia come indici di valutazione globali (ΔL_w). Dall'analisi di queste stime teoriche, si evince che:

- Esiste una correlazione inversa tra la rigidità dell'isolante e l'isolamento: al diminuire della rigidità (s'), e quindi utilizzando materiali più elastici, le prestazioni migliorano.
- Esiste una correlazione diretta tra la massa del rivestimento e l'isolamento: all'aumentare della massa (m'), le prestazioni migliorano.
- Questi due fattori influenzano direttamente la frequenza di risonanza del sistema: più questa è bassa (ottenuta con massa alta e rigidità bassa), maggiore sarà l'isolamento acustico utile.

I risultati di questa stima, espressi attraverso l'indice globale di riduzione del rumore di calpestio ponderato, sono riassunti nella seguente tabella:

Tabella 29 - Miglioramenti acustici ponderati. Produzione propria

Configurazione	Materiale Isolante	Rivestimento	s' (MN/m³)	m' (kg/m²)	ΔL_w calcolato (dB)
1	Arena PF 15mm	Laminato 6mm	10.45	5.51	19,6
2	Arena PF 15mm	Laminato 12mm	10.45	10.26	20,8
3	Arena PF 15mm	Parquet Abete 17mm	10.45	7.41	20,1
4	Arena PF 25mm	Laminato 6mm	6.29	5.51	21,1
5	Arena PF 25mm	Laminato 12mm	6.29	10.26	22,4
6	Arena PF 25mm	Parquet Abete 17mm	6.29	7.41	21,6
7	Panel PST 22mm	Laminato 6mm	15.61	5.51	18,4
8	Panel PST 22mm	Laminato 12mm	15.61	10.26	19,4
9	Panel PST 22mm	Parquet Abete 17mm	15.61	7.41	18,8

Osservando i valori previsti, è possibile identificare gli estremi prestazionali teorici:

- Miglior caso previsto: La combinazione Arena PF 25 mm con Laminato 12 mm ($\Delta L_w = 22,4$ dB). Questo risultato, coerente con la teoria, unisce l'isolante con minore rigidità alla finitura più pesante.
- Peggior caso previsto: La combinazione Panel PST 22 mm con Laminato 6 mm ($\Delta L_w = 18,4$ dB), dove la maggiore rigidità dell'isolante e la massa ridotta della finitura limitano la prestazione teorica.

17.2 Risultati globali

Dall'analisi complessiva degli spettri di miglioramento dell'isolamento acustico (ΔL_n) misurati per le nove configurazioni, emerge un comportamento generale omogeneo.

Come evidenziato nel grafico riassuntivo (Figura 53), tutte le curve presentano un andamento simile:

- Alle basse frequenze (100 Hz), la capacità fonoisolante è pressoché nulla o molto ridotta, con valori di attenuazione compresi tra 0 e 5 dB.
- A partire da questo punto, l'efficacia isolante cresce costantemente con l'aumentare della frequenza, seguendo un andamento quasi lineare su scala logaritmica, senza presentare irregolarità o deviazioni significative.
- Alle alte frequenze (5000 Hz), i sistemi raggiungono i massimi livelli prestazionali, attestandosi in un intervallo compreso tra 63 e 70 dB.

Nonostante le differenze costruttive, le prestazioni dei vari pacchetti si collocano all'interno di una fascia ristretta: l'analisi visiva delle curve mostra che il divario tra la configurazione migliore e quella peggiore supera raramente i 10 dB nelle singole bande di frequenza. Questa osservazione è confermata dall'analisi degli indici di valutazione globali (ΔL_w), che evidenziano un intervallo prestazionale totale di soli 6 dB.

Analizzando nel dettaglio le curve, è possibile individuare le due combinazioni che, per la gran parte dello spettro di frequenza, delimitano superiormente e inferiormente questo intervallo di variabilità:

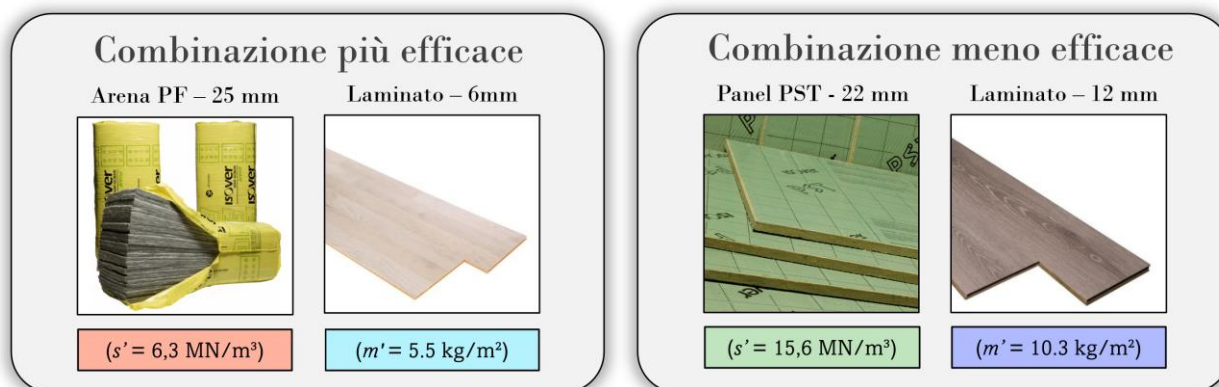


Figura 53 - Dettaglio delle due configurazioni che hanno fatto registrare rispettivamente il miglioramento massimo e minimo.

- **Combinazione più efficace:** È costituita dall'isolante Arena PF 25 mm ($s' = 6,3 \text{ MN/m}^3$) abbinato al rivestimento in Laminato 6 mm ($m' = 5,5 \text{ kg/m}^2$). Questa configurazione mostra il comportamento migliore nella maggioranza dello spettro, raggiungendo un indice globale di $\Delta L_w = 39 \text{ dB}$.
- **Combinazione meno efficace:** È composta dall'isolante Panel PST 22 mm ($s' = 15,6 \text{ MN/m}^3$) con finitura in Laminato 12 mm ($m' = 10,3 \text{ kg/m}^2$). Questa soluzione presenta le prestazioni inferiori, con un indice globale di $\Delta L_w = 33 \text{ dB}$.

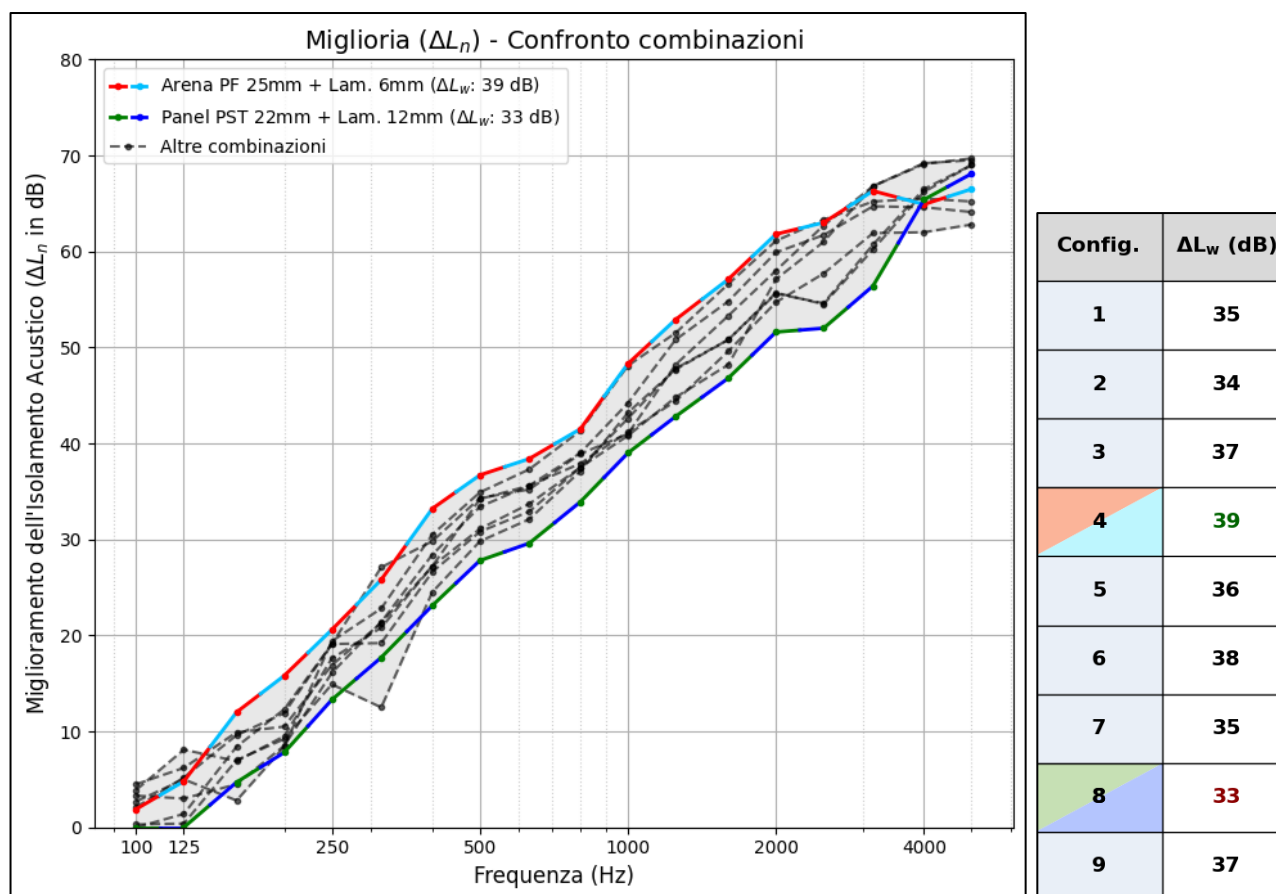


Figura 54 - Confronto spettrale e globale tra la combinazione più efficace e quella meno efficace.

Il grafico a sinistra evidenzia come la combinazione più efficace (linea colorata rosso-azzurra) delimiti prevalentemente l'estremo superiore del fascio di curve, mentre quella meno efficace (linea verde-blu) ne segni prevalentemente l'estremo inferiore. Tale andamento trova piena conferma nell'analisi dei valori globali riportati in tabella: la totalità degli indici ΔL_w misurati per le nove configurazioni risulta infatti compresa esattamente tra i 39 dB della configurazione migliore e i 33 dB di quella peggiore.

17.2.1 Influenza della rigidità dinamica (s')

Isolando il comportamento dello strato elastico (ovvero confrontando i risultati a parità di rivestimento), i dati sperimentali offrono un riscontro diretto alla teoria del sistema massa-molla, pur evidenziando alcune peculiarità non lineari.

In linea generale, si osserva la correlazione inversa tra la rigidità dinamica e l'isolamento acustico: al diminuire del valore di s' , le prestazioni migliorano. Questa tendenza è confermata visivamente dal grafico di confronto per frequenza e dalla tabella dei valori globali riportati in Figura 55. Si vede infatti come l'Arena PF 25 mm, forte della sua rigidità dinamica di $s' = 6,29$ MN/m³ (la minore tra i tre materiali testati), garantisca sistematicamente la prestazione migliore in tutte le configurazioni, indipendentemente dal rivestimento applicato.

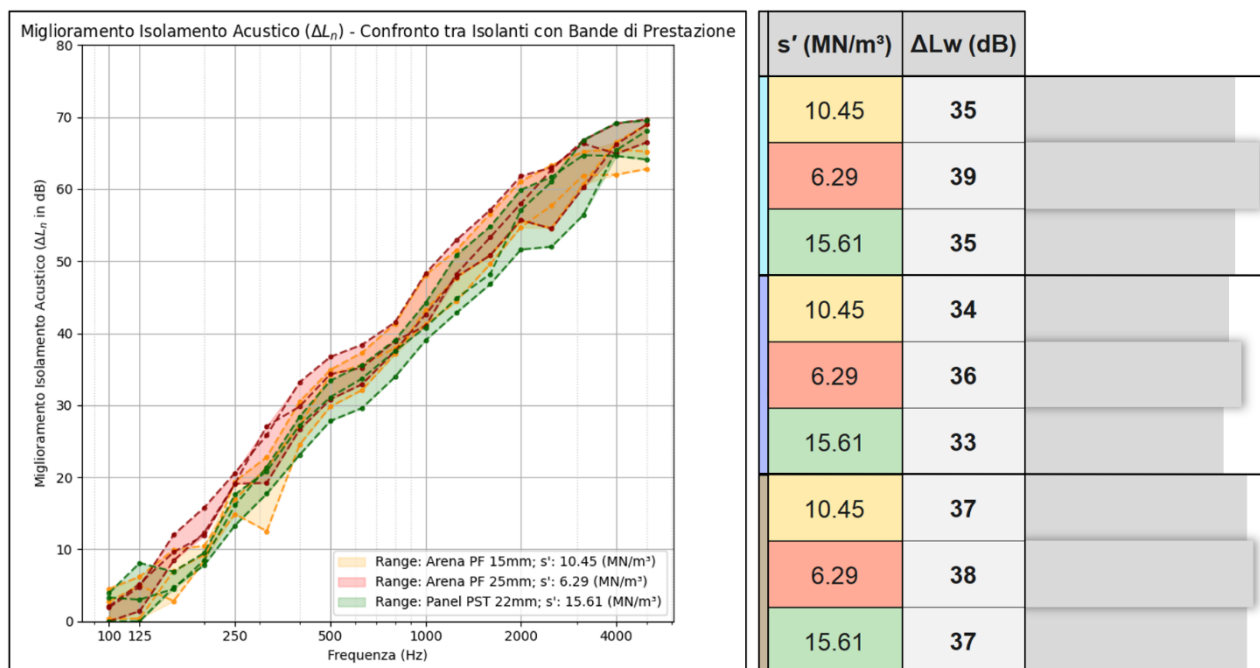


Figura 55 - Confronto prestazioni in funzione della rigidità dinamica s' : andamento spettrale (sx) e valori globali ΔL_w (dx).

Tuttavia, analizzando il comportamento degli altri due isolanti, emerge un quadro meno intuitivo. Confrontando l'Arena PF 15 mm ($s' = 10,45$ MN/m³) con il Panel PST 22 mm ($s' = 15,61$ MN/m³), si nota che il divario teorico di rigidità (5 MN/m³) non si traduce in una differenza proporzionale in termini di isolamento globale ΔL_w , che risulta invece pressoché equivalente. Questa ridotta differenza prestazionale suggerisce che, nel confronto tra materiali di natura diversa (lana minerale composita vs lana di roccia), il Panel PST riesca a compensare la sua rigidità dinamica sfavorevole grazie al maggiore spessore (22 mm contro 15 mm), che introduce verosimilmente meccanismi di smorzamento aggiuntivi non descritti dal solo parametro s' .

Nel caso specifico, è evidente come il Panel PST riesca a compensare la sua maggiore rigidità dinamica (sfavorevole) grazie al maggiore spessore (22 mm contro 15 mm), che introduce verosimilmente meccanismi di smorzamento aggiuntivi. Ne consegue che la previsione basata esclusivamente sul confronto della rigidità dinamica s' può risultare imprecisa se non si considerano, contestualmente, anche la composizione materica e lo spessore dello strato resiliente.

17.2.2 Influenza della massa superficiale (m')

Spostando l'analisi sul rivestimento di finitura, i risultati sperimentali offrono uno scenario che contraddice le previsioni teoriche classiche. Se in teoria un aumento della massa superficiale (m') dello strato superiore dovrebbe incrementare l'isolamento acustico, i dati raccolti mostrano una tendenza opposta.

Come si evince chiaramente dal grafico a sinistra in Figura 56, il materiale con la massa superficiale maggiore (Laminato 12 mm) è quello che fornisce sistematicamente l'isolamento

acustico peggiore, collocandosi stabilmente nella fascia bassa del diagramma. Risalendo lungo il grafico, si incontra il materiale di peso intermedio (Parquet), mentre il rivestimento con il peso inferiore (Laminato 6 mm), che teoricamente avrebbe dovuto occupare l'ultima posizione, si colloca invece in cima al fascio di curve, a dimostrazione delle migliori proprietà isolanti offerte in termini spettrali.

Spostando l'attenzione sulla tabella a destra, si ritrova conferma del fatto che il Laminato 12 mm offre le prestazioni peggiori anche in termini di indice unico. Tuttavia, la gerarchia netta osservata nell'andamento per frequenza non si ripete con la stessa precisione per i valori globali ΔL_w : tra i due materiali di massa minore (Laminato 6 mm e Parquet), i risultati appaiono infatti più altalenanti, senza un predominio univoco dell'uno sull'altro.

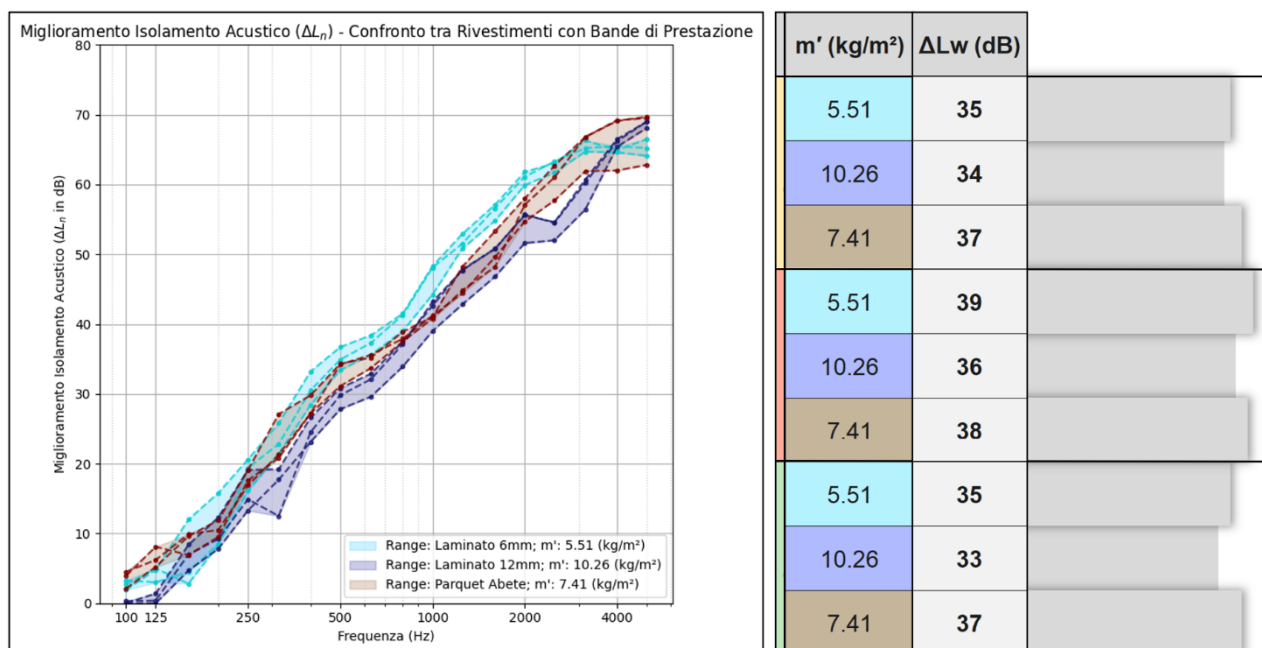


Figura 56 - Confronto prestazioni in funzione della massa superficiale m' : andamento spettrale (sx) e valori globali ΔL_w (dx).

Le correlazioni standard, basate sull'assunto che un aumento di massa sia sempre vantaggioso, non trovano riscontro nei dati sperimentali, i quali delineano un quadro prestazionale che diverge in modo sostanziale dalle aspettative teoriche per questa tipologia di solai.

17.2.3 Sintesi dell'interazione tra parametri meccanici e prestazioni di isolamento

Al fine di rendere evidente la complessa interazione dei due parametri fondamentali che governano le prestazioni delle stratigrafie nei solai (la rigidità dinamica (s') e la massa superficiale (m')), è stata elaborata una mappa di sintesi grafica (Figura 57). Tale rappresentazione unisce in un unico diagramma le entità delle proprietà fisiche dei materiali e l'entità del potere fonoisolante ai rumori di calpestio ottenuto sperimentalmente.

La lettura del grafico si articola secondo le seguenti coordinate: l'asse delle ascisse (asse X) riporta i valori di rigidità dinamica (s'), mentre l'asse delle ordinate (asse Y) indica la massa superficiale (m'). All'interno del piano cartesiano sono collocate le nove combinazioni oggetto delle prove sperimentali, ciascuna univocamente definita dai propri parametri fisici.

Per quantificare visivamente l'entità dell'efficacia isolante, i punti del grafico sono caratterizzati da due aspetti grafici che ne descrivono il miglioramento in decibel:

- La dimensione dell'indicatore: un diametro maggiore corrisponde a un isolamento superiore.
- La scala cromatica: i colori variano dal viola (prestazioni inferiori) al giallo (prestazioni ottimali).

A ulteriore precisione, su ciascun indicatore è riportato il valore numerico puntuale del miglioramento dell'indice di valutazione (ΔL_w) espresso in dB.

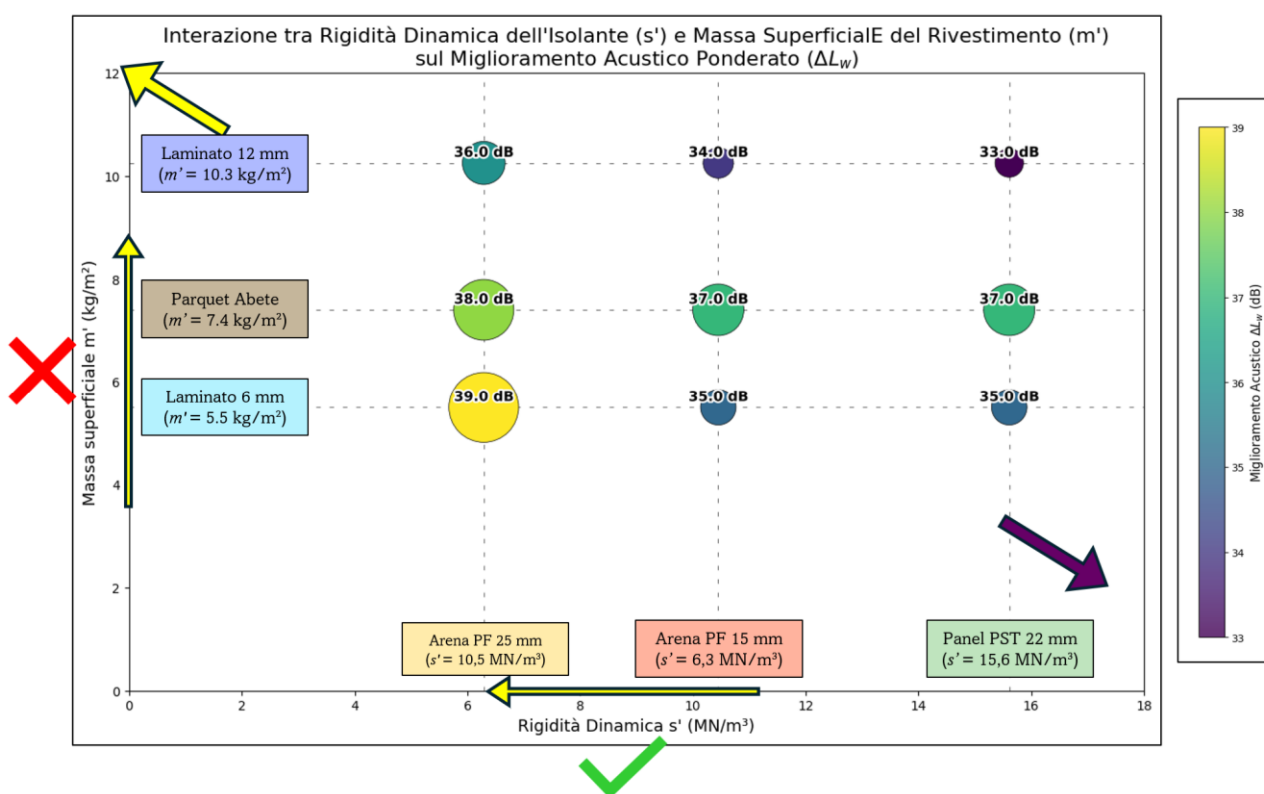


Figura 57 - Mappa di interazione tra rigidità dinamica (s'), massa superficiale (m') e miglioramento acustico (ΔL_w).

Dall'analisi della distribuzione dei risultati emergono considerazioni significative sul comportamento del sistema.

Osservando l'andamento lungo la rigidità dinamica (asse X), si nota che procedendo verso sinistra (ovvero al diminuire del valore di s') i punti del grafico mostrano un netto miglioramento delle prestazioni acustiche. Questo comportamento appare pienamente coerente con la teoria del sistema massa-molla, dove una minor rigidità dello strato resiliente favorisce il disaccoppiamento e la riduzione della trasmissione delle vibrazioni.

Spostando l'analisi sulla massa superficiale (asse Y), si evidenzia invece un fenomeno inatteso. Secondo la teoria classica (Legge di Massa), il miglioramento dell'isolamento dovrebbe corrispondere a uno spostamento verso l'alto all'interno del grafico (aumento di m'). Tuttavia, i dati sperimentali mostrano chiaramente che tale previsione non si verifica; al contrario, in diverse configurazioni l'aumento della massa del rivestimento non produce i benefici attesi.

Ricapitolando l'interazione attraverso le direttrici diagonali, la teoria suggerirebbe un incremento prestazionale seguendo il vettore orientato verso l'alto a sinistra (indicato dalla freccia diagonale gialla), configurazione che unirebbe la minima rigidità alla massima massa. L'osservazione dei dati smentisce però tale previsione: le massime prestazioni assolute si concentrano invece nella zona a bassa rigidità e bassa massa (angolo in basso a sinistra), guidate principalmente dall'isolante Arena PF 25 mm.

In questo contesto, è rilevante notare quanto emerge analizzando la fascia centrale del grafico, corrispondente alle configurazioni con parquet di abete. In questi casi si riscontra un eccellente rendimento generale e, soprattutto, una notevole stabilità prestazionale: nonostante la rigidità dinamica dell'isolante sottostante vari drasticamente da 6,29 a 15,61 MN/m³, i valori di ΔL_w rimangono pressoché costanti, oscillando esclusivamente tra i 37 e i 38 dB. Questa variazione minima (1 dB) a fronte di grandi differenze nel sottofondo evidenzia come questa specifica tipologia di rivestimento riesca a ottimizzare il sistema, rendendo meno critica la dipendenza dalla rigidità dello strato resiliente.

17.3 Analisi critica delle discrepanze con il modello previsionale normativo

L'analisi comparativa tra i risultati sperimentali ottenuti in laboratorio e le stime calcolate secondo il modello semplificato della norma ISO 12354-2 (Annesso C) ha evidenziato una discrepanza sistematica che richiede una specifica interpretazione fisica e metodologica.

Dall'osservazione dei dati, emerge in prima istanza che il modello teorico opera una sottostima costante delle prestazioni. In tutte le nove configurazioni analizzate, i valori di isolamento misurati in laboratorio risultano nettamente superiori a quelli previsti dal calcolo teorico. Nello specifico, lo scarto medio riscontrato sull'indice di valutazione del miglioramento dell'isolamento acustico ponderato (ΔL_w) varia tra i 13 dB e i 18 dB a favore della prestazione reale. Sebbene dal punto di vista della sicurezza progettuale questo rappresenti un margine cautelativo, un errore di tale entità indica che la formula normativa tende a essere eccessivamente conservativa quando applicata a questa specifica tipologia di sistemi a secco.

Oltre all'errore quantitativo, è fondamentale analizzare la correlazione tra l'accuratezza della previsione e la massa superficiale (m'). Come evidenziato nel Capitolo 15, l'errore del modello non è casuale ma cresce al diminuire della massa del rivestimento. Questa evidenza suggerisce che l'applicazione delle formule previsionali alle configurazioni studiate (in

particolare quelle con laminati da 6 mm e 12 mm) rappresenti una forzatura rispetto al campo di validità implicito del modello stesso.

Alla luce di queste evidenze, appare chiaro come il modello massa-molla semplice risulti essere insufficiente per descrivere con accuratezza il comportamento di questi sistemi flottanti a secco.

La causa fisica di tale inaffidabilità risiede nella natura del modello teorico "massa-molla" adottato dalla norma. Tale modello assume implicitamente che il massetto galleggiante si comporti come un corpo rigido (piastra indeformabile) che oscilla su una molla. Tuttavia, i rivestimenti leggeri analizzati (laminati e parquet flottanti) non possiedono la rigidità flessionale sufficiente per comportarsi come una massa concentrata rigida; essi tendono a deformarsi localmente sotto il punto di impatto e a dissipare energia attraverso meccanismi di smorzamento interno e attrito tra le doghe. Questi fenomeni fisici complessi, che il modello semplificato ignora, contribuiscono significativamente all'isolamento reale, portando alla sistematica sottostima osservata nelle previsioni teoriche. Tale fenomeno risulta particolarmente determinante nel caso del laminato vinilico da 6 mm: la sua ridotta inerzia e il basso spessore ne accentuano la deformabilità sotto il punto di impatto, attivando una significativa dissipazione di energia per smorzamento interno (*damping*) e attrito tra le doghe. Questi meccanismi dinamici, innescati proprio dalla flessibilità del materiale sotto gli urti, compensano ampiamente la ridotta massa superficiale, generando una prestazione reale che il modello statico della norma non è in grado di quantificare.

17.4 Analisi critica del dualismo normativo: approcci e parametri di verifica

17.4.1 Divergenze strutturali: approccio generalista vs funzionale

Dal confronto delle impostazioni normative emerge una sostanziale differenza nella concezione della protezione acustica. Il modello italiano fonda la sua tutela sul concetto di "ambiente abitativo". La norma considera l'entità funzionale nel suo complesso (che può essere l'intero appartamento nel caso residenziale, o la singola camera di degenza in un ospedale) e impone un limite ai rumori, siano essi aerei o da calpestio, che vi entrano dall'esterno. L'approccio è generalista: si garantisce che il livello di rumore immesso nell'ambiente abitativo resti sotto la soglia, senza considerare una eventuale suddivisione interna degli spazi.

Al contrario, il modello spagnolo ragiona per "recintos" (stanze). La norma classifica ogni vano in quattro categorie e la protezione si attiva in funzione della specifica relazione tra ambiente emittente e ambiente ricevente. Non basta sapere che funzione svolge il locale disturbato, è determinante sapere anche da dove proviene.

Questa differenza metodologica ha conseguenze dirette sull'estensione della tutela, come emerge, per esempio, analizzando il rumore da calpestio in ambito residenziale. La normativa italiana impone un limite massimo ($L'_{n,w} \leq 63$ dB) che protegge l'ambiente abitativo dai rumori provenienti da unità confinanti. Questo limite garantisce l'isolamento "in ingresso", ma non regola la trasmissione sonora tra locali appartenenti alla medesima unità immobiliare (ad esempio tra stanza e stanza dello stesso appartamento), ignorando di fatto il comfort acustico tra ambienti interni alla stessa proprietà.

In Spagna, invece, la verifica è puntuale e modulata sulla coppia emittente-ricevente:

- Si applica un limite più severo ($L'_{nT,w} \leq 60$ dB) quando il recinto abitabile o protetto confina con locali impianti o attività;
- Si applica il limite standard ($L'_{nT,w} \leq 65$ dB) quando il recinto protetto confina con altri recinti abitativi o zone comuni.

Ne consegue che il sistema italiano protegge il "contenitore" (l'unità abitativa) in modo uniforme dalle adiacenze, ma lascia scoperta la protezione interna. Il sistema spagnolo protegge il "contenuto" (la stanza) discriminando in base alla sua sensibilità, e alla nocività di chi disturba.

17.4.2 Divergenze metriche: l'influenza della volumetria

L'indagine svolta impone una riflessione critica sulle modalità di verifica previste dai diversi quadri normativi nazionali. La diversa interpretazione dei dati di laboratorio (L_n) nei parametri di verifica in opera richiesti in Italia (L'_n) e in Spagna (L'_n) genera risultati numerici differenti a partire dalla medesima prestazione fisica del solaio.

Per comprendere l'impatto concreto di questa divergenza metodologica nella pratica progettuale, è utile analizzare uno scenario applicativo realistico. Si consideri un ambiente ricevente di dimensioni contenute, con un volume di $15,7 \text{ m}^3$. Tale volumetria corrisponde, ad esempio, a una camera da letto singola con un'altezza di $2,50 \text{ m}$ (altezza minima standard in molti regolamenti edilizi spagnoli) e una superficie di $6,28 \text{ m}^2$ (dimensione che, seppur ridotta, risulta compatibile con le norme di abitabilità vigenti in contesti densamente urbanizzati come la Comunità di Madrid). Applicando la formula di conversione tra i due indici ($L'_n - 10 \cdot \lg(0,032 \cdot V)$), tale specifica volumetria rappresenta la soglia critica in cui la differenza tra il valore standardizzato spagnolo e quello normalizzato italiano ammonta esattamente a 3 dB:

$$L'_{nT} = L'_n + 3\text{dB}$$

Sebbene una variazione di pochi decibel possa apparire contenuta, le sue implicazioni sono rilevanti sia sul piano fisico che su quello della percezione umana. In acustica fisica, un incremento di 3 dB del livello di pressione sonora corrisponde a un raddoppio dell'energia sonora immessa nell'ambiente. Tuttavia, la risposta dell'udito umano non è lineare rispetto all'energia, ma segue una scala logaritmica di sensazione definita dalla psicoacustica.

Sebbene una variazione di pochi decibel possa apparire contenuta, le sue implicazioni sono rilevanti sul piano della percezione umana. Secondo la legge di potenza di Stevens, che regola la percezione dell'intensità sonora (Loudness), si assume convenzionalmente che la sensazione di volume raddoppi ogni 10 dB ($2^{(\Delta L / 10)}$). Per un incremento di 3 dB, la relazione diventa:

$$R = 2^{\frac{3}{10}} = 1,23$$

Il risultato indica che la sensazione sonora percepita è pari a 1,23 volte quella originale (un aumento del 23%). Questa differenza di approccio assume una rilevanza statistica fondamentale nell'edilizia residenziale, dato che il punto di equilibrio tra i due metodi ($L'_n = L'_{nT}$) si verifica solo in ambienti con volume di circa 31,25 m³. Poiché la maggior parte delle camere da letto presenta volumetrie inferiori a questa soglia, i due metodi di calcolo restituiscono sistematicamente valori divergenti proprio negli ambienti destinati al riposo.

Tuttavia, fermarsi al confronto teorico a parità di volume sarebbe riduttivo. È necessario considerare che le normative costruttive nazionali, fanno sì che in media le volumetrie delle camere da letto nei due paesi siano differenti, giustificando di fatto la scelta dell'indice. In Spagna, dove le normative consentono frequentemente volumetrie inferiori a 31,25 m³, l'utilizzo del parametro legato alla percezione (L'_{nT}) garantisce una maggiore tutela proprio per questi ambienti di dimensioni contenute, che costituiscono tipicamente gli spazi destinati al riposo. In Italia, al contrario, le normative impongono volumetrie minime che portano le stanze ad essere solitamente superiori a tale soglia. In questo contesto, l'uso del parametro normalizzato (L'_n) comporta la registrazione di valori numerici più alti, poiché si rinuncia alla componente che evidenzia la maggior dispersione delle onde sonore nei grandi volumi; un valore calcolato più alto, a fronte di un limite di legge fisso, impone di fatto prestazioni isolanti migliori, finendo nella maggior parte dei casi per tutelare maggiormente l'occupante. Pertanto, in entrambi i casi, partendo da differenze legate all'ampiezza degli spazi costruttivi, l'indice scelto finisce per convergere verso l'obiettivo di tutelare il sonno e il comfort abitativo.

18 DISCUSSIONE DELLE INCERTEZZE E LIMITAZIONI METODOLOGICHE

Al fine di concludere l'analisi e contestualizzare correttamente i risultati ottenuti, è fondamentale svolgere una valutazione critica delle incertezze e delle limitazioni metodologiche proprie di questo studio. Il confronto condotto nel Capitolo 15 ha quantificato una notevole discrepanza tra le prestazioni misurate in laboratorio (Capitolo 14) e quelle stimate dai modelli teorici (Capitolo 12). Il presente capitolo procederà, dunque, a esaminare in modo sistematico le principali fonti di variabilità che concorrono a spiegare tali scostamenti, analizzando le incertezze insite nelle procedure di calcolo e di misura adottate.

18.1 Incertezza sui dati (Rigidità Dinamica s')

La prima fonte di incertezza da analizzare risiede nel parametro fondamentale utilizzato per tutti i calcoli previsionali: la rigidità dinamica s' .

Come esplicitato nel Capitolo 11, i valori di s' per i tre materiali isolanti non sono stati misurati in modo indipendente nel corso di questa ricerca, ma sono stati calcolati sulla base dei dati sperimentali forniti direttamente dall'azienda produttrice. Sebbene la metodologia di calcolo sia stata descritta in dettaglio, si è dovuto assumere come veritieri i dati di misura di base forniti.

Questo parametro è di cruciale importanza, poiché, insieme alla massa superficiale m' , costituisce l'input fondamentale per entrambi i modelli previsionali dell'Annesso C della norma ISO 12354-2 utilizzati in questa tesi. Esso influenza infatti direttamente sia il calcolo del miglioramento per frequenza $\Delta L(f)$ (attraverso la stima della f_0), sia il calcolo del miglioramento globale ΔL_w . Non essendoci stato modo di condurre verifiche sperimentali indipendenti su tali dati, qualsiasi incertezza iniziale sul valore di s' si propaga inevitabilmente a tutti i risultati dei modelli previsionali, influenzando direttamente il confronto presentato nel Capitolo 15.

18.2 Incertezze e limitazioni delle misure sperimentali

La seconda fonte di incertezza da analizzare riguarda la procedura sperimentale stessa. La principale limitazione delle prove condotte risiede nelle dimensioni del laboratorio della ETSAM. Come specificato nel paragrafo 13.1, i locali di prova (con un volume di circa 13 m³) sono inferiori ai minimi prescritti dalla norma ISO 10140-5 [27].

Questa condizione ha una conseguenza diretta sull'affidabilità dei risultati alle frequenze molto basse, poiché la lunghezza d'onda modale del locale è comparabile con quella delle frequenze analizzate. Per limitare al massimo la distorsione dei valori campionati, si sono quindi considerati i dati a partire dai 100 Hz, frequenza oltre la quale l'influenza delle dimensioni della camera sulle prime frequenze è molto bassa, e considerabile nulla sulle successive frequenze più alte.

Alle incertezze legate alla geometria dei locali si aggiungono quelle, seppur controllate, relative alla strumentazione (microfono e macchina per impatti normalizzata) e alla procedura di campionamento spaziale (basata su 4 posizioni della macchina e 8 combinazioni totali).

Tuttavia, sebbene le condizioni discusse introducano un margine di incertezza sui valori assoluti dei livelli misurati, esse non inficiano la validità complessiva dello studio. Il punto di forza della ricerca risiede nella sua validità comparativa: poiché tutte le nove configurazioni sperimentali sono state testate nelle medesime condizioni al contorno (stesso laboratorio, stessa strumentazione e identico protocollo di misura), le incertezze sistematiche si elidono nel confronto reciproco tra le diverse soluzioni.

18.3 Limitazioni Intrinseche dei Modelli Previsionali

L'ultima e forse più significativa fonte di discrepanza risiede nei limiti intrinseci dei modelli teorici proposti dalla norma ISO 12354-2 [28].

Come specificato nel Capitolo 12, l'Annesso C della norma fornisce i modelli di calcolo previsionali specifici per il caso della posa a secco del pavimento flottante. Tuttavia, i risultati del confronto (Capitolo 15) dimostrano in modo inequivocabile che i modelli previsionali della norma, sebbene formalmente applicabili, sono quantitativamente inaffidabili per descrivere i sistemi flottanti leggeri e a secco. La sottostima sistematica di oltre 13 dB evidenzia una profonda lacuna nel modello.

Nello specifico, il modello mostra criticità non solo nel calcolo dei valori assoluti, ma anche nella previsione delle tendenze fisiche, come dimostrato dall'inversione dell'effetto della massa superficiale m' discussa nel paragrafo 14.5. Tale scostamento suggerisce che il modello fisico semplificato "massa-molla", su cui si basano le formule della norma, risulti un'approssimazione eccessiva per l'applicazione su sistemi a massa ridotta.

Evidentemente, il modello ignora altri parametri fisici che si rivelano determinanti nel comportamento reale dei sistemi a secco. Sebbene non sia possibile identificarli con certezza senza ulteriori indagini specifiche, è plausibile supporre che proprietà come lo smorzamento interno (η) o la rigidità flessionale del rivestimento di finitura possano giocare un ruolo non trascurabile, che il modello attuale non considera.

19 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di ricerca ha esaminato il comportamento acustico delle pavimentazioni flottanti a secco. Tali configurazioni si pongono come diretta alternativa tecnologica ai tradizionali massetti galleggianti: pur condividendo il principio del disaccoppiamento elastico, se ne distaccano eliminando lo strato di ripartizione cementizio e rinunciando, di fatto, alla componente massiva preponderante del sistema.

Nello specifico, la ricerca ha perseguito quattro obiettivi principali:

1. La caratterizzazione fisica dei materiali e la stima prestazionale teorica;
2. La misurazione delle prestazioni reali e l'analisi dell'influenza dei principali parametri fisici;
3. La verifica dell'attendibilità dei modelli previsionali rispetto ai dati sperimentali;
4. La valutazione critica delle divergenze normative e dei rispettivi indici descrittivi.

19.1 Caratterizzazione fisica e stima teorica

In risposta al primo obiettivo, la ricerca ha preso avvio dall'analisi del modello teorico "massa-molla", individuando nella rigidità dinamica del materiale resiliente (s') e nella massa superficiale del rivestimento (m') le variabili fisiche necessarie per la descrizione del sistema e per la previsione acustica. Una volta determinati sperimentalmente i valori di tali parametri per i materiali in esame, si è proceduto alla stima delle prestazioni applicando il modello di calcolo definito dalla norma ISO 12354-2.

L'analisi teorica ha evidenziato come, secondo il modello normativo, l'isolamento acustico dipenda strettamente dal bilanciamento tra i due input: le stime prevedono un miglioramento delle prestazioni all'aumentare della massa superficiale e al diminuire della rigidità dinamica. Traducendo tali relazioni in valori numerici, e facendo riferimento per sintesi ai soli indici globali ponderati, il calcolo previsionale ha restituito un range prestazionale (ΔL_w) decisamente contenuto:

- Minimo teorico: 18,4 dB (configurazione a maggiore rigidità e minore massa).
- Massimo teorico: 22,4 dB (configurazione a minore rigidità e maggiore massa).

Questi valori definiscono il benchmark teorico del sistema, che costituisce il riferimento basilare per il successivo confronto con i dati sperimentali.

19.2 Indagine sperimentale e analisi dell'influenza dei parametri

In risposta al secondo obiettivo, la campagna di misurazione in laboratorio ha permesso di definire le prestazioni reali delle diverse configurazioni e di isolare l'incidenza delle singole variabili fisiche. I risultati sperimentali restituiscono un quadro prestazionale assoluto di rilievo, con valori di miglioramento dell'isolamento acustico (ΔL_w) compresi tra un minimo di 33 dB e un massimo di 39 dB.

Tuttavia, l'analisi dell'influenza dei parametri ha fatto emergere un comportamento inatteso rispetto alle attese teoriche:

- Influenza della rigidità dinamica (s'): Si conferma la validità della correlazione inversa generale, per cui al diminuire della rigidità dinamica corrisponde un incremento dell'isolamento acustico. Tuttavia, tale parametro non risulta essere l'unico descrittore affidabile: il confronto tra isolanti di diversa natura ha evidenziato come un maggiore spessore possa compensare una rigidità dinamica sfavorevole, introducendo meccanismi di smorzamento aggiuntivi non descritti dal solo valore di s' .
- Influenza della massa superficiale (m'): Si osserva una chiara inversione di tendenza rispetto a quanto affermato dalla teoria. Nello specifico intervallo di pesi indagato (con valori massimi prossimi ai 10 kg/m²), la gerarchia prestazionale risulta opposta alle aspettative: la riduzione della massa superficiale si traduce in un aumento delle prestazioni acustiche, rendendo le configurazioni più leggere preferibili rispetto a quelle a maggiore inerzia.

19.3 Analisi critica del modello previsionale e proposta metodologica

In riferimento al terzo obiettivo della ricerca, l'analisi comparativa tra i risultati sperimentali ottenuti in laboratorio e le stime calcolate secondo il modello definito dalla norma ISO 12354-2 ha evidenziato una discrepanza sistematica che richiede una specifica interpretazione fisica e metodologica.

Dall'osservazione dei dati emerge, in prima istanza, che il modello teorico opera una sottostima costante delle prestazioni. In tutte le configurazioni analizzate, i valori di isolamento misurati in laboratorio risultano nettamente superiori a quelli previsti dal calcolo teorico. Nello specifico, lo scarto riscontrato sull'indice di valutazione del miglioramento dell'isolamento acustico ponderato (ΔL_w) varia tra i 13,2 dB e i 18,2 dB a favore della prestazione reale.

Un errore di tale entità non può essere interpretato come un semplice margine di sicurezza cautelativo, ma denota un problema strutturale nell'algoritmo di calcolo: la formula normativa risulta inadeguata a descrivere la risposta acustica di questi sistemi a secco molto leggeri, portando a stime inattendibili.

Approfondendo l'analisi, è emerso un fattore determinante: la correlazione tra l'accuratezza della previsione e la massa superficiale (m'). I dati raccolti dimostrano che l'errore del modello non è casuale, ma cresce proporzionalmente al diminuire della massa del rivestimento. Questa evidenza sperimentale costituisce il nucleo del problema: l'applicazione delle formule standard, rappresenta una forzatura quando estesa alle configurazioni ultra-leggere qui indagate.

La causa fisica di tale inaffidabilità risiede nella natura del sistema "massa-molla" adottato dalla norma, che assume implicitamente che il pavimento galleggiante svolga il ruolo di una massa concentrata indeformabile (corpo rigido). Tuttavia, i rivestimenti leggeri analizzati non possiedono la rigidezza flessionale sufficiente per essere assimilati a corpi rigidi. Essi tendono invece a comportarsi come membrane elastiche, deformandosi localmente sotto il punto di impatto. Proprio questa deformabilità attiva significativi meccanismi di dissipazione energetica per smorzamento (damping) e attrito tra gli elementi che il modello statico ignora, generando prestazioni reali nettamente superiori alle attese.

La letteratura scientifica ha già affrontato la limitatezza dei modelli classici per sistemi complessi. Autori come Schiavi et al. hanno proposto modelli analitici costitutivi più sofisticati che integrano parametri aggiuntivi, come il fattore di perdita (η), per descrivere matematicamente la trasmissibilità del sistema includendo gli effetti dello smorzamento [59], [60], [61], [62]. Tuttavia, sebbene tali modelli descrivano meglio la fisica del fenomeno, la loro applicazione pratica per la previsione in opera ("in situ") risulta complessa, data la mancanza del fattore di perdita dei materiali nelle schede tecniche dei fabbricanti. Inoltre, i risultati qui presentati evidenziano sperimentalmente una tendenza specifica non descritta dai modelli generali: nei sistemi a secco leggeri indagati, la riduzione della massa agisce paradossalmente come fattore migliorativo, in netta controtendenza rispetto alla legge di massa classica.

Di conseguenza, la presente tesi propone un approccio metodologico pragmatico, orientato a perfezionare l'utilizzo dell'Annesso C della norma ISO 12354-2, dedicato ai modelli di calcolo. I risultati suggeriscono che l'attuale formulazione unica per i massetti a secco debba essere superata, introducendo una distinzione operativa basata su una soglia critica di massa superficiale, collocabile attorno ai 15 kg/m^2 :

- Per sistemi con $m' > 15 \text{ kg/m}^2$: l'attuale formula previsionale contenuta nell'Annesso C mantiene la sua validità operativa, fornendo stime coerenti con il comportamento fisico atteso.
- Per sistemi con $m' < 15 \text{ kg/m}^2$: si evidenzia la necessità di implementare una formulazione correttiva specifica. Per questo sottogruppo di pavimentazioni ultra-leggere, il modello deve essere ricalibrato per interpretare correttamente il ruolo della massa, valorizzando il comportamento elastico e i fenomeni di smorzamento che, come dimostrato in questa sede, governano la risposta acustica in modo predominante rispetto alla pura inerzia di massa.

19.4 Divergenze normative e implicazioni sulla tutela dell'utente (Confronto Italia-Spagna)

In risposta al quarto obiettivo di ricerca, il confronto tra i due quadri legislativi ha evidenziato profonde differenze sia nella filosofia di protezione che nelle metriche di verifica adottate.

Per quanto riguarda l'approccio strutturale, l'analisi conferma due strategie opposte basate sulla diversa concezione di unità da proteggere.

Per quanto riguarda l'approccio strutturale, l'analisi conferma due strategie opposte basate su diverse unità di definizione.

La normativa italiana persegue la tutela dell'intero "ambiente abitativo", imponendo un limite unico ai rumori in ingresso ($L'_{n,w} \leq 63$ dB per il residenziale). Questo approccio applica una protezione uniforme che difende l'ambiente abitativo nella sua interezza dai rumori esterni, senza però entrare nel merito della suddivisione interna degli spazi.

Al contrario, la normativa spagnola basa la suddivisione degli spazi in *recintos*, corrispondenti alle stanze, applicando i criteri di verifica agli ambienti abitabili e protetti. In Spagna, la verifica è puntuale e modulata sulla coppia emittente-ricevente: si applica un limite più severo ($L'_{nT,w} \leq 60$ dB) quando il recinto abitabile o protetto confina con locali impianti o attività, mentre si applica il limite standard ($L'_{nT,w} \leq 65$ dB) quando il recinto protetto confina con altri recinti abitativi o zone comuni.

Tale approccio trova piena coerenza nella scelta anche del parametro di verifica. L'adozione in Spagna dell'indice standardizzato rispetto al tempo di riverbero ($L'_{nT,w}$) riflette la volontà di legare il risultato alla reale percezione umana dell'evento sonoro nell'ambiente arredato. Viceversa, la scelta italiana di normalizzare rispetto all'assorbimento acustico ($L'_{n,w}$) privilegia la confrontabilità tecnica dei pacchetti costruttivi.

Proprio questa differenza di approccio assume una rilevanza statistica fondamentale nell'edilizia residenziale, dato che il punto di equilibrio tra i due metodi ($L'_{n,w} = L'_{nT,w}$) si verifica solo in ambienti con volume di circa 31,25 m³.

Questa soglia diventa cruciale alla luce delle specificità costruttive nazionali. In Spagna, dove le normative consentono frequentemente volumetrie inferiori a 31,25 m³, l'utilizzo di un parametro legato alla percezione ($L'_{nT,w}$) garantisce una maggiore tutela proprio per questi ambienti di dimensioni contenute, che costituiscono tipicamente gli spazi destinati al riposo. In Italia, al contrario, le normative impongono volumetrie minime che portano le stanze ad essere solitamente superiori a tale soglia. In questo contesto, l'uso del parametro normalizzato ($L'_{n,w}$) comporta la registrazione di valori numerici più alti, poiché si rinuncia alla componente che evidenzia la maggior dispersione delle onde sonore nei grandi volumi; un valore calcolato più alto, a fronte di un limite di legge fisso, impone di fatto prestazioni isolanti migliori, finendo

nella maggior parte dei casi per tutelare maggiormente l'occupante. Pertanto, in entrambi i casi, partendo da differenze legate all'ampiezza degli spazi costruttivi, l'indice scelto finisce per convergere verso l'obiettivo di tutelare il sonno e il comfort abitativo nella maggior parte dei casi.

19.5 Considerazioni finali sulla scelta della soluzione ottimale

In conclusione, è fondamentale evidenziare come la strategia di isolamento acustico ai rumori da calpestio non possa limitarsi alla sola massimizzazione delle prestazioni fonoisolanti (ΔL_w). La scelta della soluzione ottimale richiede un approccio olistico che integri le performance acustiche con le caratteristiche fisiche e meccaniche del sistema.

Nello specifico delle soluzioni flottanti a secco, ciò impone un criterio di scelta che bilanci l'efficacia acustica con parametri critici quali la compressibilità, la stabilità meccanica, la durabilità chimico-fisica e il comportamento termico. L'obiettivo deve essere privilegiare la soluzione che meglio risponde alle specifiche condizioni al contorno e ai requisiti operativi reali, superando la logica del mero valore numerico di laboratorio.

20 BIBLIOGRAFIA

1. ALVARO, Pasquale K., ROBERTS, Rachel M. e HARRIS, Jodie K. A systematic review assessing bidirectionality between sleep disturbances, anxiety, and depression. In: Sleep [online]. Luglio 2013, 36(7), 1059-1068. ISSN 0161-8105. DOI: 10.5665/sleep.2810. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/243970419> [Consultato il 21 marzo 2025].
2. ANIT (Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e Acustico). Corretta posa in opera dei massetti galleggianti [online]. Disponibile su: <https://www.anit.it> [Consultato il 19 marzo 2025].
3. BERANEK, Leo L. e VÉR, István L. (Editors). Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications. 2a ed. Hoboken: Wiley, 2019.
4. BERGOMI, A. Ristrutturazioni acustiche: soluzioni tecnologiche ed analisi di un caso studio. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura. Milano: Politecnico di Milano, 2014. Relatore: Paolo Oliaro. Disponibile su: https://www.politesi.polimi.it/retrieve/a81cb05a-f44a-616b-e053-1605fe0a889a/2014_07_Bergomi.pdf [Consultato il 19 marzo 2025].
5. BRICOFLOR ITALIA. Moquette e acustica: pavimenti perfetti per uffici e hotel [online]. 28 settembre 2018. Disponibile su: <https://www.bricoflor.it/blog/2018/09/28/moquette-e-acustica-pavimenti-perfetti-per-uffici-e-hotel> [Consultato il 12 marzo 2025].
6. BURATTI, Cinzia e MORETTI, Elisa. Impact noise reduction: laboratory and field measurements of different materials performances. In: Euronoise 2006 [online]. Tampere (Finland), Gennaio 2006. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/242159690> [Consultato il 19 marzo 2025].
7. CARRASCOSA MARTÍN, A. e CARRETERO MOYA, A. Aislamiento acústico. In: Curso de especialización en instalaciones de edificación. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
8. CASTRONOVO, Valerio. Il piano INA-Casa (1949-1963). In: Il contributo italiano alla storia del pensiero – Tecnica. Roma: Istituto della Enciclopedia Italiana, 2013. Disponibile su: https://www.treccani.it/enciclopedia/il-piano-ina-casa-1949-1963_%28Il-Contributo-italiano-alla-storia-del-Pensiero%3A-Tecnica%29 [Consultato il 23 marzo 2025].
9. CESVA. MI005: Máquina de impactos [Scheda tecnica]. Disponibile su: https://www.sonoflexchile.com/oldsite/fichas/impacto_mi005.pdf [Consultato il 18 luglio 2025].

10. CESVA. Sonómetro SC420 [Scheda tecnica]. Disponibile su: <https://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc420/> [Consultato il 18 luglio 2025].
11. COLLEGIO DEI PERITI INDUSTRIALI DELLA PROVINCIA DI BARI. Isolamento acustico [online]. 2014. Disponibile su: <https://www.periti-industriali.bari.it/wp/wp-content/uploads/2014/02/8-ISOLAMENTO-ACUSTICO.pdf> [Consultato il 23 marzo 2025].
12. CREMER, Lothar, HECKL, Manfred e UNGAR, Eric E. Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. 3a ed. Berlin: Springer, 2005.
13. ESPAÑA. JEFATURA DEL ESTADO. Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. In: Boletín Oficial del Estado, n. 266, 6 novembre 1999. Disponibile su: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1999-21567> [Consultato il 24 marzo 2025].
14. ESPAÑA. MINISTERIO DE FOMENTO. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HR: Protección frente al ruido. Madrid: Ministerio de Fomento, 2009. Disponibile su: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/DBHR.pdf> [Consultato il 24 marzo 2025].
15. ESPAÑA. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO. Orden de 29 de septiembre de 1988 por la que se aclaran y corrigen diversos aspectos de los anexos a la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-82 sobre condiciones acústicas en los edificios. In: Boletín Oficial del Estado, n. 242, 8 ottobre 1988, pp. 29222–29223.
16. ESPAÑA. MINISTERIO DE VIVIENDA. Catálogo de elementos constructivos del CTE. Madrid: Ministerio de Vivienda, 2010. Disponibile su: <https://www.codigotecnico.org> [Consultato il 20 luglio 2025].
17. ESPAÑA. MINISTERIO DE VIVIENDA. Guía de aplicación del DB HR: protección frente al ruido. Anejo 2: ejemplos de aplicación. Madrid: Ministerio de Vivienda, 2009.
18. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 29052-1:1992: Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. Brussels: CEN, 1992.
19. FASOLD, W. e VERES, E. *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*. 3. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2016. ISBN 978-3-410-24305-2.
20. FAUSTI, P., BARON, N. e BONFIGLIO, P. La rigidità dinamica dei materiali usati per l'isolamento del rumore da calpestio: confronto tra differenti metodi di misura. 2005. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/256132684> [Consultato il 3 maggio 2025].
21. GRANZOTTO, N. e BARI, L. L'evoluzione e l'applicazione del D.P.C.M. 5 dicembre 1997: parametri, limiti e chiarimenti. In: Newsletter tecnica POROTON® Italia [online]. n. 153, 23 ottobre 2023. Disponibile su: <https://www.poroton.it> [Consultato il 27 marzo 2025].

22. GRUPPO MADE. Insonorizzare il soffitto: ecco come eliminare i rumori di calpestio [online]. Disponibile su: <https://www.gruppomade.com/insonorizzare-soffitto-eliminare-rumori-calpestio/> [Consultato il 21 marzo 2025].
23. INGENIO. Massetti desolidarizzati e massetti galleggianti: cosa sono e come si realizzano in base alle norme vigenti [online]. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/articoli/massetti-desolidarizzati-e-massetti-galleggianti-cosa-sono-e-come-si-realizzano-in-base-alle-norme-vigenti/> [Consultato il 21 marzo 2025].
24. INGENIO. Pavimentazioni resilienti: cosa sono e perché sceglierle [online]. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/articoli/pavimentazioni-resilienti-cosa-sono-e-perche-sceglierle/> [Consultato il 10 marzo 2025].
25. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-3:2021: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Measurement of impact sound insulation. Geneva: ISO, 2021.
26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-4:2021: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements. Geneva: ISO, 2021.
27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-5:2021: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Geneva: ISO, 2021.
28. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12354-2:2017: Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms. Geneva: ISO, 2017.
29. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16251-1:2014: Acoustics – Laboratory measurement of impact sound insulation improvement by floor coverings on lightweight and heavyweight floors – Part 1: Heavyweight floors. Geneva: ISO, 2014.
30. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16283-2:2020: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings – Part 2: Impact sound insulation. Geneva: ISO, 2020.
31. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 717-2:2020: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Geneva: ISO, 2020.
32. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9052-1:1989: Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. Geneva: ISO, 1989.
33. ISOLMANT. La rigidità dinamica. Quaderno tecnico – Scheda 8 [online]. Tecnasfalti Isolmant, 2014. Disponibile su: <https://www.isolmant.com/filer/canonica/1606724963/1/> [Consultato il 3 maggio 2025].

34. ITALIA. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 5 dicembre 1997. Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 297 del 22 dicembre 1997. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1997/12/22/97A10190/sg> [Consultato il 24 marzo 2025].
35. ITALIA. Legge 14 febbraio 1963, n. 60. Provvedimenti per l'incremento delle costruzioni di alloggi per lavoratori. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 62 del 7 marzo 1963.
36. ITALIA. Legge 26 ottobre 1995, n. 447. Legge quadro sull'inquinamento acustico. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 254 del 30 ottobre 1995. Disponibile su: https://www.comune.venezia.it/sites/comune.venezia.it/files/immagini/Ambiente/LEGGE_447_1995.pdf [Consultato il 24 marzo 2025].
37. ITALIA. Legge 26 ottobre 1995, n. 447. Legge quadro sull'inquinamento acustico. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 254 del 30 ottobre 1995. Disponibile su: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/normativa/legge_26_10_95_447.pdf [Consultato il 21 marzo 2025].
38. ITALIA. Legge 28 febbraio 1949, n. 43. Provvedimenti per incrementare l'occupazione operaia, agevolando la costruzione di case per lavoratori. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 54 del 7 marzo 1949.
39. ITALIA. MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI. Circolare 30 aprile 1966, n. 1769: Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici nelle costruzioni edilizie. Roma: Ministero dei Lavori Pubblici, 1966.
40. ITALIA. MINISTERO DELLA SANITÀ. Decreto Ministeriale 5 luglio 1975. Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali d'abitazione. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 190 del 18 luglio 1975.
41. JABŁOŃSKI, Marek, BEDNARSKA, Dalia, GRYMIN, Witold, SCHIAVI, Alessandro e KONIORCZYK, Marcin. Prediction for the acoustic performance of a floating floor: novel probabilistic approach considering materials Gaussian uncertainties. In: Applied Acoustics [online]. 2021, 182, art. 108252. ISSN 0003-682X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108252. Disponibile su: https://iris.inrim.it/bitstream/11696/71012/6/Manuscript_22.05_AS.pdf [Consultato il 27 ottobre 2025].
42. L'ANTIRUMORE. Isolamento acustico: il controsoffitto [online]. Disponibile su: <https://www.lantirumore.it/blog-insonorizzazione/parliamo-di/isolamento-acustico-il-controsoffitto> [Consultato il 21 marzo 2025].
43. LECA. Sottofondi a secco [online]. Disponibile su: <https://www.leca.it/applicazioni/massetti-sottofondi-e-riempimenti/sottofondi-a-secco/> [Consultato il 21 marzo 2025].

44. LEROY MERLIN. Sottopavimento isolante verde polietilene espanso sottofondo laminato 1x50 m [online]. Disponibile su:
<https://www.leroymerlin.it/prodotti/sottopavimento-isolante-verde-polietilene-espanso-sottofondo-laminato-1x50-m-92665369.html> [Consultato il 14 marzo 2025].
45. LIETZÉN, J. et al. Sound insulation of suspended ceilings: a FEM-based comparison of suspension systems. In: Forum Acusticum 2023 (10th Convention of the European Acoustics Association). Torino, 11-15 settembre 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.1014. Disponibile su: <https://doi.org/10.61782/fa.2023.1014> [Consultato il 21 marzo 2025].
46. MASACOUSTICS. Come realizzare un pavimento flottante con U-boats [online]. Disponibile su: <https://www.masacoustics.it/come-realizzare-un-pavimento-flottante-con-u-boats/> [Consultato il 21 marzo 2025].
47. NANNI GIANCARLO & C. Pavimenti isolanti acustici: stop ai rumori [online]. Disponibile su: <https://www.nannigiancarlo.it/blog-e-informazioni-rivestimento-pavimenti-pareti/51-blog-pavimenti/419-pavimento-acustico-2> [Consultato il 12 marzo 2025].
48. OBRAMAT. Ficha técnica: Suelo laminado AC4 6 mm modelo Roble Claro [online]. Disponibile su: <https://media.adeo.com/media/4547827/media.pdf> [Consultato il 18 luglio 2025].
49. OBRAMAT. Ficha técnica: Suelo laminado AC5 12 mm modelo Roble Amir [online]. Disponibile su: <https://media.adeo.com/media/4547827/media.pdf> [Consultato il 18 luglio 2025].
50. OBRAMAT. Ficha técnica: Tarima abeto con nudo macizo ancho 14 cm grosor 1,7 cm [online]. Disponibile su: <https://media.adeo.com/media/4548799/media.pdf> [Consultato il 18 luglio 2025].
51. OBRAMAT. Suelo laminado AC4 6 mm modelo Roble Claro [online]. Disponibile su: <https://www.obramat.es/productos/suelo-laminado-ac4-6mm-modelo-roble-claro-25055730.html> [Consultato il 18 luglio 2025].
52. OBRAMAT. Suelo laminado AC5 12 mm modelo Roble Amir [online]. Disponibile su: <https://www.obramat.es/productos/suelo-laminado-ac5-12mm-modelo-roble-amir-10936590.html> [Consultato il 19 luglio 2025].
53. OBRAMAT. Tarima abeto con nudo macizo ancho 14 cm grosor 1,7 cm [online]. Disponibile su: <https://www.obramat.es/productos/tarima-abeto-con-nudo-macizo-ancho-14cm-grosor-1-7cm-10961643.html> [Consultato il 18 luglio 2025].
54. PAVONI BELLI, Andrea, RUSSO, Francesco e SCHIAVI, Alessandro. Measurement of dynamic stiffness to estimate the reduction in impact sound pressure level. In: Euronoise 2003 [online]. Napoli, 19-21 maggio 2003. Paper ID 278-IP. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/259921665> [Consultato il 21 marzo 2025].
55. PISANI, R., DEVECCHI, C. e ONALI, P. La trasmissione del rumore per via strutturale all'interno delle abitazioni. In: Atti del 41° Convegno Nazionale AIA. Pisa, 17-19 giugno 2014. Disponibile su:

- <http://www.studioacusticapisani.it/edilizia/Trasmissionestrutturaleabitazioni.pdf>
[Consultato il 21 marzo 2025].
56. POULOS, P., SMITH, J. e WANG, Y. Dynamic stiffness measurement: an empirical model to predict s' of resilient materials. 2017. Disponibile su:
<https://www.researchgate.net> [Consultato il 3 maggio 2025].
57. RASMUSSEN, Birgit e MACHIMBARRENA, María. Existing Sound Insulation Performance Requirements and Classification Schemes For Housing Across Europe. In: COST Action TU0901 - Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe [online]. Aalborg: Aalborg University, 2014, pp. 31-54. Disponibile su: <http://www.costtu0901.eu/> [Consultato il 5 dicembre 2025].
58. ROCCO, L. et al. L'evoluzione della protezione acustica degli edifici in Italia: norme, metodi e soluzioni. In: Atti del 43° Convegno Nazionale AIA. Alghero, 25–27 maggio 2016. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/303923189>
[Consultato il 21 marzo 2025].
59. SAINT-GOBAIN ISOVER IBÉRICA S.L. Declaración ambiental de producto – Arena PF [online]. 2024. Disponibile su: <https://www.isover.es> [Consultato il 3 maggio 2025].
60. SAINT-GOBAIN ISOVER IBÉRICA S.L. FT arena PF: Suelos flotantes [Scheda tecnica]. 2024. Disponibile su: <https://www.isover.es> [Consultato il 3 maggio 2025].
61. SAINT-GOBAIN ISOVER IBÉRICA S.L. FT Panel PST: Suelos flotantes [Scheda tecnica]. 2024. Disponibile su: <https://www.isover.es> [Consultato il 3 maggio 2025].
62. SAINT-GOBAIN ISOVER. FT Arena PF. Panel rígido de lana mineral arena [Scheda tecnica]. Disponibile su: <https://dam.pim-cps.saint-gobain.com> [Consultato il 20 giugno 2025].
63. SAINT-GOBAIN ISOVER. FT Panel PST. Panel rígido de lana de roca [Scheda tecnica]. Disponibile su: <https://www.isover.es/download-documents/ficha-tecnica/ft-panel-pst-.pdf> [Consultato il 20 giugno 2025].
64. SCHIAVI, Alessandro. Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors. In: Applied Acoustics [online]. 2018, 129, 64-71. ISSN 0003-682X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.07.013. Disponibile su:
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.013> [Consultato il 21 marzo 2025].
65. SCHIAVI, Alessandro, PAVONI BELL, A. e RUSSO, F. Dynamic Stiffness Measurement: an Empirical Model to Estimate the Reduction in Impact Sound Pressure Level and its Relative Improvement Curve. Torino: Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, 2004. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/259921758>
[Consultato il 14 marzo 2025].
66. SCHIAVI, Alessandro, PAVONI BELL, A. e RUSSO, F. Estimation of Acoustical Performance of Floating Floors from Dynamic Stiffness of Resilient Layers. Torino: Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, 2005. Disponibile su:
<https://www.researchgate.net/publication/232279094> [Consultato il 19 marzo 2025].

67. SCHIAVI, Alessandro, PAVONI BELLI, Andrea e RUSSO, Francesco. Un modello empirico per la previsione del comportamento acustico di pavimenti galleggianti dalla misura della rigidità dinamica dei materiali elastici utilizzati come sottofondi. In: Rivista Italiana di Acustica [online]. 2005, 29(1-2), 9-22. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/259922048> [Consultato il 21 marzo 2025].
68. SIRAGUSA, Roberto. Il rumore aereo e strutturale nei sistemi edilizi. In: Ingenio [online]. 19 febbraio 2024. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/articoli/il-rumore-aereo-e-strutturale-nei-sistemi-edilizi/> [Consultato il 21 marzo 2025].
69. THE SPRUCE. Floating Flooring Review: Pros and Cons [online]. Disponibile su: <https://www.thespruce.com/what-is-a-floating-floor-1821740> [Consultato il 21 marzo 2025].
70. WIKIPEDIA. Isolamento acustico [online]. Disponibile su: https://it.wikipedia.org/wiki/Isolamento_acustico [Consultato il 9 marzo 2025].
71. ZANUTTO, T. Rigidità dinamica. Proxital S.p.A., 2008. Disponibile su: https://www.inquinamentoacustico.it/_download/rigidita%20dinamica%20-%20zanutto.pdf [Consultato il 3 maggio 2025].