

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA*

**TESI DI LAUREA**

in

Acustica applicata ed Illuminotecnica

**IL NUOVO MODELLO DI CALCOLO CEN  
PER LA DETERMINAZIONE  
DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO DEGLI EDIFICI:  
ANALISI CRITICA E APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO**

CANDIDATO:  
Francesca Di Nocco

RELATORE  
Chiar.mo Prof. Massimo Garai

CORRELATORE  
Ing. Luca Barbaresi

Anno Accademico 2015/2016

Sessione I



# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>viii</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>xi</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 La propagazione sonora nel legno</b>	<b>3</b>
1.1 Teoria delle onde . . . . .	3
1.1.1 Propagazione delle onde nell'aria . . . . .	3
1.1.2 Propagazione delle onde nei solidi . . . . .	5
1.1.3 Effetto coincidenza . . . . .	7
1.2 Grandezze acustiche fondamentali . . . . .	9
1.3 Proprietà acustiche del legno . . . . .	10
1.4 Comportamento vibroacustico del CLT . . . . .	12
1.4.1 CLT - Cross Laminated Timber . . . . .	12
1.4.2 Lo stato dell'arte della ricerca sul CLT . . . . .	14
<b>2 Normativa per la progettazione acustica in edilizia: UNI EN 12354</b>	<b>19</b>
2.1 UNI EN 12354-1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti . . . . .	19
2.1.1 Grandezze rilevanti per l'isolamento dal rumore aereo . . . . .	19
2.1.2 Principi generali del modello di calcolo . . . . .	20
2.1.3 Modello dettagliato . . . . .	23
2.1.4 Modello semplificato . . . . .	33
2.1.5 Accuratezza dei modelli . . . . .	34
2.2 UNI EN 12354-2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti . . . . .	35
2.2.1 Grandezze rilevanti per il calpestio . . . . .	35
2.2.2 Principi generali del modello di calcolo . . . . .	36
2.2.3 Modello dettagliato . . . . .	37
2.2.4 Modello semplificato . . . . .	39

---

2.2.5	Accuratezza dei modelli . . . . .	41
2.3	Aggiornamento della UNI EN ISO 12354: 2016 . . . . .	41
2.3.1	Novità introdotte nella parte prima . . . . .	42
2.3.2	Novità introdotte nella parte seconda . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Caso studio di un edificio in legno</b>	<b>49</b>
3.1	Presentazione del caso studio . . . . .	49
3.1.1	Elaborati tecnici . . . . .	51
3.2	Modellazione acustica degli elementi che compongono l'edificio	55
3.2.1	Modellazione delle camere sovrapposte . . . . .	55
3.2.2	Modellazione delle camere adiacenti . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Il nuovo modello di calcolo previsionale</b>	<b>63</b>
4.1	Presentazione del modello nelle sue parti . . . . .	63
4.1.1	Caso A: ambienti sovrapposti . . . . .	64
4.1.2	Caso B: ambienti adiacenti . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Calcolo ed analisi dei risultati</b>	<b>107</b>
5.1	Identificazione delle variabili applicabili al modello di calcolo .	107
5.1.1	Caso A: ambienti sovrapposti . . . . .	107
5.1.2	Caso B: ambienti adiacenti . . . . .	112
5.2	Risultati ottenuti . . . . .	117
5.2.1	Caso A: ambienti sovrapposti . . . . .	117
5.2.2	Caso B: ambienti adiacenti . . . . .	121
5.3	Confronto con i dati misurati in opera . . . . .	128
5.3.1	Caso 1: ambienti sovrapposti . . . . .	129
5.3.2	Caso 2: ambienti adiacenti . . . . .	130
5.4	Incidenza delle variabili sui risultati finali . . . . .	131
5.5	Validazione dei risultati del modello di calcolo . . . . .	132
	<b>Conclusioni</b>	<b>135</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>141</b>



# Elenco delle figure

1.1	Esempio della curva di decadimento misurata con il metodo del rumore interrotto . . . . .	5
1.2	Effetto coincidenza su un pannello infinito . . . . .	8
1.3	Assi principali di una tavola in legno . . . . .	11
1.4	Particolare stratificazione di un pannello in CLT . . . . .	12
1.5	Esempi di costruzioni residenziali e per servizi in CLT . . . . .	13
1.6	Punti di misura e direzioni per la determinazione sperimentale delle velocità di onde longitudinali . . . . .	15
1.7	Esempi di stratigrafie esaminate durante la campagna di misura	16
1.8	Configurazioni e accorgimenti per i test sui giunti verticali ed orizzontali . . . . .	17
2.1	Rappresentazione dei differenti contributi della trasmissione sonora totale . . . . .	21
2.2	Rappresentazione dei differenti percorsi $ij$ tra i due ambienti .	21
2.3	Percorsi di trasmissione sonora tra due ambienti adiacenti . . .	24
2.4	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti rigidi a croce . . . . .	29
2.5	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti di parete con strati intermedi flessibili . . . . .	29
2.6	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti rigidi a T . . . . .	30
2.7	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti di una facciata leggera . . . . .	30
2.8	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti di una parete leggera a doppio strato e di elementi omogenei .	31
2.9	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti di muri leggeri a doppio strato accoppiati . . . . .	31
2.10	Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per giunti ad angolo o con variazioni di spessore . . . . .	32

2.11	Definizione delle diverse vie di trasmissione sonora tra due ambienti sovrapposti . . . . .	36
2.12	Percorsi di trasmissione sonora per due ambienti adiacenti . . .	37
3.1	Vista prospettica del caso studio da Sud . . . . .	49
3.2	Vista prospettica del caso studio da Nord . . . . .	50
3.3	Foto dell'edificio in esame a fine lavori, rispettivamente della facciata Sud e della facciata retrostante . . . . .	50
3.4	Planimetria del piano terra . . . . .	51
3.5	Disegni tecnici: planimetria del primo piano e la sezione longitudinale A-A' . . . . .	52
3.6	Disegni tecnici: planimetria del secondo piano e sezione trasversale B-B' . . . . .	53
3.7	Due dei prospetti dell'edificio-caso studio . . . . .	54
3.8	Riferimenti in pianta per la modellazione delle camere sovrapposte . . . . .	55
3.9	Dettaglio costruttivo del solaio interno con la parete esterna . .	56
3.10	Caratteristiche fisiche del solaio interno finito con controsoffitto	56
3.11	Grafici dell'andamento delle curve di $L_{n0,lab}$ e di $R_{0,lab}$ del solaio grezzo . . . . .	57
3.12	Grafico dell'andamento della curva di $R_{0,lab}$ della parete esterna	58
3.13	Dettaglio tridimensionale della parete interna con il solaio . .	59
3.14	Grafico dell'andamento della curva di $R_{0,lab}$ della parete interna	60
3.15	Riferimenti in pianta per la modellazione delle camere adiacenti	61
3.16	Dettaglio costruttivo della parete divisoria con il solaio . . . .	61
3.17	Caratteristiche fisiche della parete divisoria . . . . .	62
3.18	Grafico dell'andamento della curva di $R_{0,lab}$ per la parete divisoria . . . . .	62
4.1	Esploso assonometrico, in evidenza le aree effettive degli elementi (Caso A) . . . . .	64
4.2	Semplificazione del modello geometrico reale in un modello geometrico ideale (Caso A) . . . . .	65
4.3	Grafici del potere fonoisolante della parete esterna e interna per la frequenza critica . . . . .	66
4.4	Giunti per la trasmissione laterale che prende in considerazione il solaio come elemento $i$ e le pareti come elementi $j$ (Caso A)	70
4.5	Giunti per la trasmissione laterale che considera gli elementi laterali $j$ (Caso A) . . . . .	71
4.6	Schemi di giunzioni di pareti doppie leggere e elementi omogenei [1] . . . . .	73

4.7	Grafici finali dell'andamento di $R'$ e $L'_n$ calcolati del solaio (Caso A) . . . . .	85
4.8	Esploso assonometrico, in evidenza le aree effettive degli elementi (Caso B) . . . . .	86
4.9	Giunzioni con piccoli disallineamenti, appendice J della norma ISO DIS 12354:1 . . . . .	87
4.10	Semplificazione del modello geometrico reale in un modello geometrico ideale (Caso B) . . . . .	88
4.11	Grafico del potere fonoisolante della parete divisoria per la frequenza critica . . . . .	89
4.12	Schematizzazione della parete divisoria per il modello di calcolo	89
4.13	Giunti per la trasmissione laterale che prende in considerazione il solaio come elemento $i$ e le pareti come elementi $j$ (Caso B)	93
4.14	Giunti per la trasmissione laterale che considera gli elementi laterali $j$ (Caso B) . . . . .	94
4.15	Grafico finale dell'andamento di $R'$ calcolato della parete divisoria (Caso B) . . . . .	106
5.1	Grafico degli andamenti dei poteri fonoisolanti $R_{situ}^*$ (dB), dati di ingresso del <i>modello base</i> (Caso A) . . . . .	108
5.2	Grafico dell'andamento del livello di pressione di calpestio $L_{n,0}$ (dB), dati di ingresso del <i>modello base</i> (Caso A) . . . . .	109
5.3	Schemi e formule empiriche per giunti tra elementi costruttivi in CLT . . . . .	110
5.4	Grafico degli andamenti dei poteri fonoisolanti $R_{situ}^*$ (dB) di ingresso del <i>modello base</i> (Caso B) . . . . .	114
5.5	Grafico finale dell'andamento di $L'_n$ calcolato con il <i>modello base</i> (Caso A) . . . . .	120
5.6	Grafico finale dell'andamento di $L'_n$ calcolato con il <i>modello 1</i> (Caso A) . . . . .	120
5.7	Grafico finale dell'andamento di $L'_n$ calcolato con il <i>modello 2</i> (Caso A) . . . . .	121
5.8	Grafico finale dell'andamento di $L'_n$ calcolato con il <i>modello 3</i> (Caso A) . . . . .	121
5.9	Grafico finale dell'andamento di $R'$ calcolato con il <i>modello base</i> (Caso B) . . . . .	127
5.10	Grafico finale dell'andamento di $R'$ calcolato con il <i>modello 1</i> (Caso B) . . . . .	127
5.11	Grafico finale dell'andamento di $R'$ calcolato con il <i>modello 2</i> (Caso B) . . . . .	128

---

5.12	Grafico finale dell'andamento di $R'$ calcolato con il <i>modello 3</i> (Caso B) . . . . .	128
5.13	Grafici di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso A) . . . . .	129
5.14	Grafici di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso B) . . . . .	130
5.15	Grafico di confronto fra il <i>modello di calcolo 3</i> e il <i>modello di calcolo 3b</i> (Caso B) . . . . .	132
5.16	Grafici delle differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati con ciascun modello in frequenza . . . . .	134
5.17	Grafici delle differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati con ciascun modello in frequenza . . . . .	134

# Elenco delle tabelle

2.1	Termine di correzione K per la trasmissione laterale . . . . .	40
2.2	Proprietà meccaniche e fisiche di alcuni materiali da costruzione	44
3.1	Caratteristiche fisiche della parete esterna . . . . .	58
3.2	Caratteristiche fisiche della parete interna . . . . .	59
4.1	Valori delle principali grandezze di input del modello di calcolo (Caso A) . . . . .	66
4.2	Contributi degli strati aggiuntivi (Caso A) . . . . .	67
4.3	Valori di potere fonoisolante $R_{situ}$ (dB) e di livello di pressione di calpestio $L_{n,situ}$ (dB), in bande di un terzo di ottava, per ciascun elemento (Caso A) . . . . .	68
4.4	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti del solaio . . . . .	74
4.5	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti delle pareti laterali	74
4.6	Valori di $\eta_{tot,situ}$ per ciascun elemento (Caso A) . . . . .	77
4.7	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete esterna 1 (Caso A) . . . . .	78
4.8	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete esterna 2 (Caso A) . . . . .	79
4.9	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete interna 3 (Caso A) . . . . .	80
4.10	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete interna 4 (Caso A) . . . . .	81
4.11	Risultati del potere fonoisolante per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso A) . . . . .	83
4.12	Risultati del livello di calpestio per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso A) . . . . .	84
4.13	Valori delle principali grandezze di input del modello di calcolo (Caso B) . . . . .	87
4.14	Contributi degli strati aggiuntivi (Caso B) . . . . .	90

4.15	Valori di potere fonoisolante $R_{situ}$ (dB), in bande di un terzo di ottava, per ciascun elemento (Caso B) . . . . .	91
4.16	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti della parete divisoria . . . . .	96
4.17	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti delle pareti laterali	96
4.18	Valori di $\eta_{tot,situ}$ per ciascun elemento (Caso B) . . . . .	99
4.19	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e la parete esterna 1 (Caso B) . . . . .	100
4.20	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e il solaio (Caso B) . .	101
4.21	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete di separazione e la parete interna 3 (Caso B) . . . . .	102
4.22	Valori di $T_{s,i,situ}$ , $T_{s,j,situ}$ e $\overline{D_{v,ij,situ}}$ per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e il solaio (Caso B) . .	103
4.23	Risultati del potere fonoisolante per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso B) . . . . .	105
5.1	Contributi degli strati aggiuntivi del <i>modello di calcolo 1</i> (Caso A) . . . . .	110
5.2	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti del solaio, <i>modello 2</i> (Caso A) . . . . .	111
5.3	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti delle pareti laterali, <i>modello 2</i> (Caso A) . . . . .	112
5.4	Indici di riduzione delle vibrazioni reali per i giunti del solaio, <i>modello 3</i> (Caso A) . . . . .	113
5.5	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti della parete divisoria, <i>modello 1</i> (Caso B) . . . . .	115
5.6	Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti degli elementi laterali, <i>modello 1</i> (Caso B) . . . . .	115
5.7	Contributi degli strati aggiuntivi $\Delta R$ (dB) di ingresso del <i>modello 3</i> (Caso B) . . . . .	116
5.8	Risultati del livello di calpestio calcolati con il <i>modello base</i> (Caso A) . . . . .	118
5.9	Risultati del livello di calpestio calcolati con il <i>modello 1</i> (Caso A) . . . . .	118
5.10	Risultati del livello di calpestio calcolati con il <i>modello 2</i> (Caso A) . . . . .	119
5.11	Risultati del livello di calpestio calcolati con il <i>modello 3</i> (Caso A) . . . . .	119

---

5.12	Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il <i>modello base</i> (Caso B) . . . . .	123
5.13	Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il <i>modello 1</i> (Caso B) . . . . .	124
5.14	Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il <i>modello 2</i> (Caso B) . . . . .	125
5.15	Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il <i>modello 3</i> (Caso B) . . . . .	126
5.16	Valori finali degli indici di valutazione e della deviazione standard	133





# Introduzione

L'obiettivo del presente studio è l'indagine del comportamento acustico di edifici in legno, vista la loro crescente diffusione in Italia. Il lavoro analizza le potenzialità del nuovo metodo trattato nell'aggiornamento della normativa UNI EN 12354 e si propone come caso di sperimentazione del nuovo modello di calcolo per la valutazione prestazionale acustica di un edificio in legno.

Al fine di risalire alla valutazione delle prestazioni acustiche in opera, a partire dal comportamento del singolo elemento costruttivo, è indispensabile tener conto degli aspetti teorici della propagazione delle onde sonore nei solidi ed in particolare nel legno. Parallelamente occorre studiare il quadro normativo attuale e futuro: la normativa UNI EN 12354, emanata nel 2002, è in fase di revisione durante la fase di scrittura del presente lavoro (Luglio 2016). L'aggiornamento di tale norma si prefigge lo scopo di ampliare e migliorare le metodologie e gli strumenti per la progettazione acustica di edifici. Inoltre, la normativa sviluppata dal CEN (European Committee for Standardization) sarà acquisita a livello internazionale dalla ISO (International Organization for Standardization) e quindi dovrà avere la flessibilità necessaria per adeguarsi ad una vasta casistica di problematiche progettuali. Nella versione della normativa in fase di revisione sono introdotti metodi di calcolo peculiari per le strutture in legno. Lo studio teorico della risposta del legno alle sollecitazioni di tipo acustico rappresenta quindi una base necessaria per l'applicazione del modello di calcolo.

A supporto dell'analisi della normativa, viene presentato il caso studio di un edificio residenziale in legno, situato nel comune di Coriano (Rn), che presenta tutti gli elementi oggetto di discussione nello sviluppo normativo. In particolare le chiusure orizzontali sono costituite da lastre in *Cross Laminated Timber* (CLT), che solo di recente è stato oggetto di studi finalizzati alla caratterizzazione del comportamento acustico. Le chiusure verticali sono costituite da pareti multistrato leggere. Per tali elementi gli strumenti per lo studio del comportamento acustico proposti dalla normativa non sono adeguati.

La fase centrale di analisi del modello di calcolo si basa sull'individuazione

delle variabili principali, in grado di determinare l'accuratezza del modello. Per questa ragione sono state sviluppate diverse varianti del modello di calcolo affinché i risultati consentano una discussione critica di quanto proposto dalla normativa.

Nella fase di validazione i risultati calcolati dal modello sono confrontati con dati raccolti in opera da campagne di misura eseguite nel corso dei lavori di costruzione.

# Capitolo 1

## La propagazione sonora nel legno

### 1.1 Teoria delle onde

Si definisce onda sonora in un mezzo la propagazione di un moto oscillatorio che le particelle si comunicano sequenzialmente l'una all'altra, senza che ciascuna si sposti se non localmente intorno alla propria posizione di equilibrio [2].

Perturbando le condizioni locali a riposo delle particelle si genera l'onda sonora. Affinché questa si propaghi, occorre che il mezzo di propagazione abbia le caratteristiche indispensabili di elasticità ed inerzia. Le onde sonore hanno un comportamento diverso a seconda se il mezzo di propagazione è un fluido o un solido: nel primo si possono instaurare solo onde sonore di tipo longitudinale o di compressione, mentre nel secondo si possono instaurare anche onde trasversali o di taglio. Il mezzo fluido più diffuso è l'aria.

#### 1.1.1 Propagazione delle onde nell'aria

Un campo sonoro si definisce libero quando prevale il suono diretto generato da una sorgente sonora che si propaga in un mezzo illimitato privo di ostacoli e quindi in assenza di riflessioni [2].

L'equazione dell'onda che descrive la propagazione della pressione sonora nel tempo e nello spazio è:

$$\nabla^2 p(\bar{r}, t) = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(\bar{r}, t)}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

dove  $p$  (Pa) è la pressione sonora e  $c_0$  (m/s) è la velocità del suono nell'aria, pari a 331,6 (m/s) a temperatura di 0°C e alla pressione atmosferica ( $p_0 = 1$  atm).

In base alla tipologia di sorgente utilizzata per generare il campo sonoro le onde si distinguono in onde piane, onde cilindriche ed onde sferiche.

In un campo sonoro libero, il suono generato da una sorgente puntiforme si propaga con simmetria radiale e la tipologia di propagazione è sferica, ovvero le grandezze del campo acustico sono in funzione unicamente del tempo  $t$  (s) e della distanza radiale  $r$  (m) dalla sorgente [2]. Di conseguenza, l'equazione 1.1 può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

Un'onda sonora è caratterizzata dal periodo  $T$  (s), ovvero il tempo necessario a compiere un'oscillazione completa, e dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  (m). Le due grandezze fisiche sono legate dalla relazione fondamentale:

$$\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega} = \frac{c}{f} = cT \quad (\text{m}) \quad (1.3)$$

in cui  $\omega$  (m) è la frequenza angolare dell'onda e  $c$  (m/s) è la velocità del suono. Ove l'onda nel propagarsi incontra delle superfici, parte dell'energia viene riflessa e parte trasmessa. L'entità di questi fenomeni dipende dalle caratteristiche della superficie di separazione, dal materiale e dalla geometria. In particolare, all'interno di un ambiente delimitato, il campo sonoro è dato dall'insieme del campo sonoro diretto insieme al campo sonoro riverberante.

La riverberazione del suono dipende dalle dimensioni dello spazio, dalla disposizione dei muri e dalle proprietà di assorbimento delle superfici.

In ambienti chiusi, impiegando rivestimenti superficiali ad altissimo coefficiente di assorbimento, è possibile ricreare le condizioni di campo libero: questi ambienti prendono il nome di camere anecoiche. Nella realtà, solitamente, si tratta di campi sonori semi-riverberanti [2].

Secondo la teoria di Sabine per gli ambienti chiusi il tempo di riverberazione  $T$  (s) è definito come il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora diminuisca di 60 (dB) dopo l'interruzione di una sorgente sonora stazionaria [3]. Inoltre, è possibile calcolarlo con la relazione:

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \quad (\text{s}) \quad (1.4)$$

dove  $V$  (m<sup>3</sup>) è il volume dell'ambiente e  $A = \sum \alpha_{Sab,m} S_i$  (m<sup>2</sup>) è l'area di assorbimento equivalente. Nei casi in cui non è possibile approssimare la curva di decadimento di 60 (dB) ad una linea retta su tutto l'intervallo, allora il tempo di riverberazione può essere valutato su un intervallo più piccolo, ad esempio determinando il  $T_{10}$ , il  $T_{20}$  o il  $T_{30}$ .

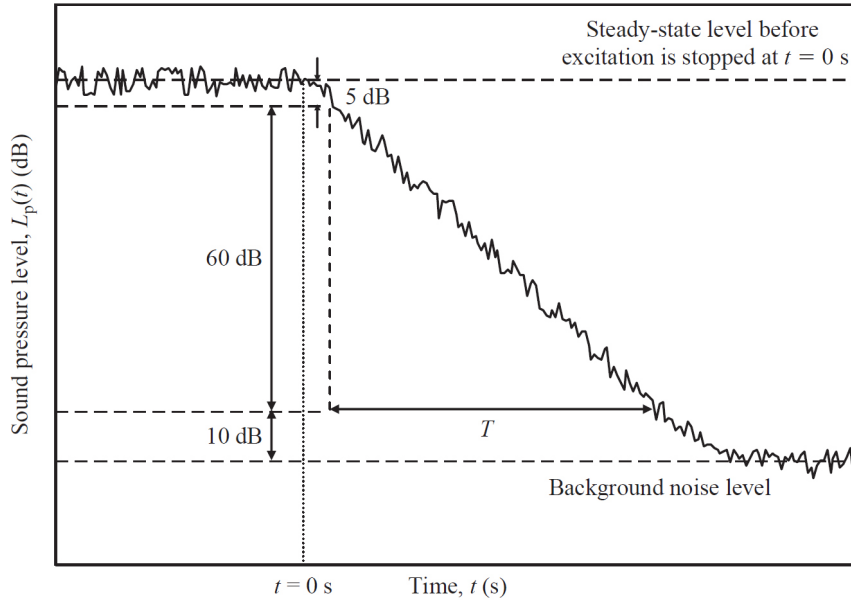


Figura 1.1: Esempio della curva di decadimento misurata con il metodo del rumore interrotto [4]

Il campo sonoro totale è definito mediante la relazione di Hopkins e Stryker [2], che permette di stimare il livello di pressione sonora in un punto di un ambiente, partendo dalle informazioni del livello di pressione sonora della sorgente  $L_w$ , della collocazione mutua sorgente-ricevitore  $r$  e  $Q$  e dalle proprietà fonoassorbenti  $R$ :

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.5)$$

dove  $R(\text{m}^2)$  è detta costante dell'ambiente ed è definita dalla relazione:

$$R = \frac{\bar{\alpha} S}{1 - \bar{\alpha}} \quad (\text{m}^2) \quad (1.6)$$

dove  $\bar{\alpha}$  è il coefficiente di assorbimento medio e  $S(\text{m}^2)$  la superficie totale dell'ambiente.

### 1.1.2 Propagazione delle onde nei solidi

Nelle strutture, affinché si propaghino esclusivamente onde sonore longitudinali pure come nei fluidi, occorre che le dimensioni degli elementi strutturali siano di un ordine di grandezza superiore rispetto alla lunghezza d'onda

longitudinale nell'aria [4]. Poiché nella realtà si utilizzano principalmente travi o lastre, con dimensioni assimilabili alla lunghezza d'onda, l'onda trasmessa è di tipo quasi-longitudinale. Perciò, se si considera  $x$  la direzione di propagazione delle onde, non si verifica un dislocamento delle onde solo lungo questo asse ma anche lungo le direzioni laterali  $y$  e  $z$ . Tuttavia, prevale il dislocamento lungo la direzione  $x$ . Per questa ragione, la radiazione sonora indotta dalle onde quasi-longitudinali è trascurabile rispetto alle onde flessionali nella trasmissione strutturale del rumore aereo.

Per un'onda quasi-longitudinale che si propaga in direzione  $x$ , le tensioni e le deformazioni lungo le direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$  sono legate dalle seguenti equazioni generali:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= E\varepsilon_x + \nu(\sigma_y + \sigma_z) \\ \sigma_y &= E\varepsilon_y + \nu(\sigma_x + \sigma_z) \\ \sigma_z &= E\varepsilon_z + \nu(\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned}\quad (1.7)$$

dove  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  (Pa) rappresentano gli sforzi di tensione,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$  le deformazioni lungo i tre assi,  $E$  (Pa) è il modulo di Young e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson. Sostituendo  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  nelle equazioni 1.7, si ottiene:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (1.8)$$

e

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \quad (1.9)$$

L'equilibrio di un elemento  $dx$  di una trave è dato dall'equazione:

$$\rho_b S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx = \frac{\partial F}{\partial x} dx \quad (1.10)$$

dove  $\rho_b$  (kg/m<sup>3</sup>) è la densità della trave,  $F$  è la forza agente nella direzione  $x$  in N,  $S$  (m<sup>2</sup>) è la superficie su cui le forze agiscono e  $u$  (m) è lo spostamento nella direzione  $x$ . Dalla teoria di Saint-Venant, considerando l'equazione 1.8, si ottiene:

$$F = ES \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{N}) \quad (1.11)$$

e l'equazione 1.10 diventa:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_b} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.12)$$

Nel caso di lastre  $\varepsilon_y = 0$  e  $\sigma_z = 0$  si ottiene:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \varepsilon_x \quad (1.13)$$

e l'equilibrio di un elemento è espresso dall'equazione che segue:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_p(1 - \nu^2)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.14)$$

In conclusione, la velocità delle onde quasi-longitudinali rispettivamente nei casi di trave e lastra risulta:

$$c_{l,b} = \sqrt{\frac{E}{\rho_p}} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1.15)$$

$$c_{l,p} = \sqrt{\frac{E}{\rho_p(1 - \nu^2)}} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1.16)$$

Analogamente, la velocità di propagazione delle onde flessionali nel caso di travi sottili segue la relazione:

$$c_{b,b} = \sqrt[4]{\omega^2 \frac{EI}{\rho_b S}} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1.17)$$

dove  $\omega$  (rad/s) è la frequenza ed  $I$  (kg/m<sup>2</sup>) è il momento di inerzia della sezione.

### 1.1.3 Effetto coincidenza

Quando una sorgente sonora eccita una struttura, la potenza sonora viene trasmessa al sistema. Di conseguenza si generano diverse tipologie di onde oltre a quelle longitudinali e quando si parla di irradiazione acustica delle strutture occorre soffermarsi sulle onde flessionali (bending waves). Ciò è dovuto al fatto che la deflessione laterale degli elementi laterali sui cui si propagano le onde, rispetto alla lunghezza dell'onda, è rilevante ed è in grado di perturbare il fluido circostante [2].

Si consideri un pannello infinito sul quale vengono generate onde meccaniche flessionali libere. Il pannello irradia nell'aria circostante onde acustiche piane, con un angolo  $\theta$  rispetto alla direzione normale al pannello (Figura 1.2), in modo tale che la lunghezza d'onda delle onde flessionali  $\lambda_b$  risulti uguale alla proiezione sul pannello  $\lambda$  delle onde acustiche nell'aria.

Si definisce effetto coincidenza il fenomeno per cui un'onda sonora acustica piana, incidente sul pannello con un angolo  $\theta$ , abbia la traccia della lunghezza d'onda sul pannello uguale a quella delle onde flessionali  $\lambda_b$ .

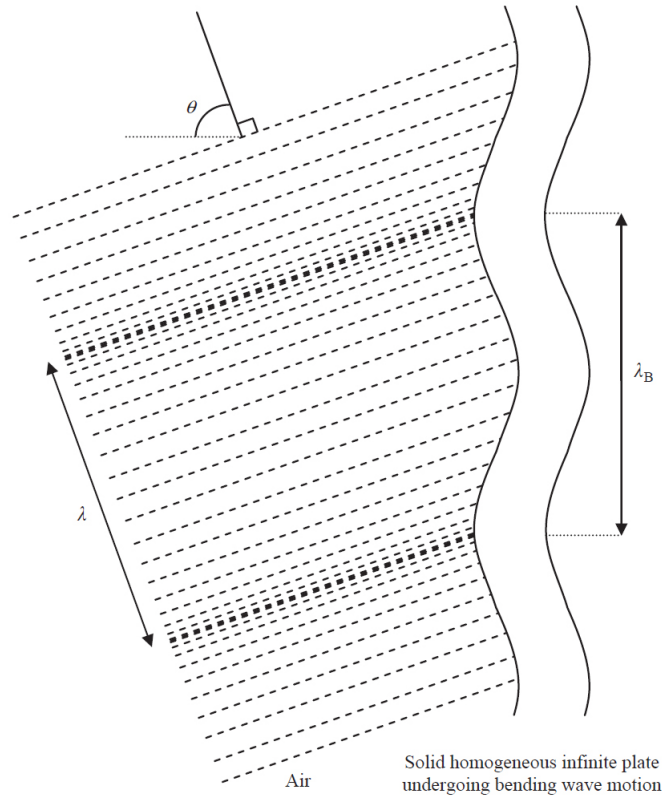


Figura 1.2: Onde piane generate dalla radiazione di un'onda flessionale su un pannello infinito al di sopra della frequenza critica [4]

Sperimentalmente si è visto che per valori di  $f < f_c$  il pannello non irradia alcun suono. Quindi se si verifica la condizione  $f = f_c$ , ovvero che la frequenza dell'onda incidente coincide con la frequenza critica, il pannello irradia e per questo valore la trasmissione del suono è elevata (vedremo più avanti come questo fenomeno comporta una notevole riduzione del potere fonoisolante) [4]. La frequenza di coincidenza o critica è determinata mediante la formula seguente:

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (\text{m}) \quad (1.18)$$

$$f_{coinc} = \frac{c^2}{2\pi \sqrt{\frac{B}{\rho S(1-\nu^2)}} \sin^2 \theta} \quad (\text{Hz}) \quad (1.19)$$

Quindi la frequenza critica può essere considerata come la più bassa frequenza possibile per cui si verifica il fenomeno della coincidenza. Inoltre, è stato dimostrato che per pannelli reali questo fenomeno non dipende dall'angolo



di incidenza  $\theta$  e che l'unica frequenza di coincidenza possibile è la frequenza critica stessa [2].

Per strutture come pannelli omogenei ed isotropi, la frequenza critica è espressa in funzione della velocità delle onde quasi-longitudinali  $c_L$  dalla relazione:

$$f_c = \frac{c_0^2}{1,8c_L h} \quad (\text{Hz}) \quad (1.20)$$

dove  $c_L$  (m/s) è la velocità del suono nell'aria ed  $h$  (m) lo spessore dell'elemento.

## 1.2 Grandezze acustiche fondamentali

Si definisce intensità di un'onda sonora la quantità di energia che fluisce, nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda [2]. La relazione che descrive questa grandezza è:

$$\langle I \rangle = \frac{\hat{p}^2}{\rho_0 c} \quad \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (1.21)$$

e stabilisce che l'intensità sonora media  $\langle I \rangle$  è uguale al quadrato della pressione sonora efficace  $\hat{p}^2$  diviso per l'impedenza acustica caratteristica [2].

La densità di energia sonora rappresenta l'energia contenuta in una unità di volume del mezzo ed è descritta dalla relazione che segue [2]:

$$D = \frac{\langle I \rangle}{c} = \frac{\hat{p}^2}{\rho_0 c^2} \quad \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right) \quad (1.22)$$

L'energia sonora irradiata da una sola sorgente nell'unità di tempo rappresenta la potenza acustica  $W$  della sorgente e l'unità di misura è il watt. Ipotizzando che la sorgente irradia la stessa energia uniformemente in tutte le direzioni, la potenza sonora è descritta dalla relazione [2]:

$$W = \int_S I_S dS = 4\pi r^2 I_S = 4\pi r^2 \frac{\hat{p}^2}{\rho_0 c} \quad (W) \quad (1.23)$$

Il livello di pressione sonora può essere espresso in relazione alla pressione sonora:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.24)$$

dove  $p_0$  è convenzionalmente assunto pari a  $20 \times 10^{-6}$  Pa, che corrisponde alla soglia uditiva umana media alla frequenza di 1 kHz [2].

Analogamente si può definire il livello di potenza sonora di una sorgente come:

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.25)$$

dove la potenza sonora di riferimento  $W_0$  è assunta convenzionalmente pari a  $10^{-12}$  W [2].

### 1.3 Proprietà acustiche del legno

Dal punto di vista acustico, le principali proprietà considerate per la comparazione delle diverse tipologie di legno sono la densità, il modulo di Young e il fattore di perdita. Queste caratteristiche definiscono le proprietà acustiche dei diversi elementi e da questi valori è possibile determinare i seguenti parametri [4, 5]:

- velocità delle onde quasi-longitudinali di una trave  $c_{l,b}$  definita come la radice del rapporto tra il modulo di Young del materiale  $E$  e la densità del materiale  $\rho_b$ :

$$c_{l,b} = \sqrt{\frac{E}{\rho_b}} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1.26)$$

- impedenza del materiale  $z$  definita come il prodotto fra la velocità del suono nel materiale  $c_{l,b}$  e la densità del materiale  $\rho_b$ :

$$z = \rho_b c_{l,b} = \sqrt{E \rho_b} \quad (\text{Rayl}) \quad (1.27)$$

- coefficiente di radiazione sonora  $R_{rad}$  definito come il rapporto fra la velocità del suono nel materiale  $c_{l,b}$  e la densità del materiale  $\rho_b$ :

$$R_{rad} = \frac{c_{l,b}}{\rho_b} = \sqrt{\frac{E}{\rho_b^3}} \quad \left( \frac{\text{m}^4}{\text{kg s}} \right) \quad (1.28)$$

- fattore di perdita  $\eta$  che rappresenta la capacità di dissipare parte dell'energia da cui la struttura è eccitata:

$$\eta = \frac{1}{Q_b} = 2\zeta \quad \left( \frac{\text{m}^4}{\text{kg s}} \right) \quad (1.29)$$

In generale, il fattore di perdita o smorzamento totale si compone di due contributi: il fattore di perdita interno  $\eta$  e il fattore di perdita da accoppiamento  $\eta_{i,j}$ .

Il legno, diversamente da altri materiali da costruzione, è un materiale naturale e le proprietà che lo riguardano possono variare considerevolmente da campione a campione. Si tratta di un materiale anisotropo, quindi le proprietà meccaniche sono uniche e indipendenti sulle tre direzioni mutualmente ortogonali: l'asse longitudinale  $L$  parallelo alla direzione delle fibre, l'asse radiale  $R$  ortogonale agli anelli e l'asse tangenziale  $T$  perpendicolare alle fibre ma tangente agli anelli (Figura 1.3).

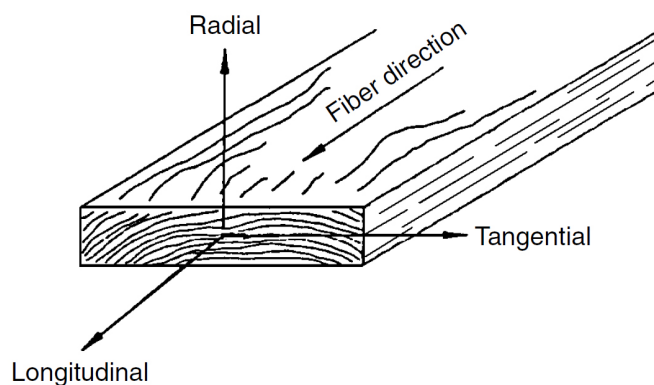


Figura 1.3: Assi principali di una tavola in legno [6]

La velocità del suono del materiale, influenzata dalla variabilità del modulo di elasticità e della densità, varia in base alla direzione delle fibre e decresce al crescere della temperatura e dell'umidità [6]. La variabilità del valore della velocità del suono nel legno dipende da queste proprietà ed assume due differenti valori in direzione longitudinale e tangenziale.

Molto importante è la caratteristica di impedenza che influenza la quantità di energia trasmessa tra il legno e l'aria circostante. Infatti, il rapporto tra l'intensità sonora riflessa  $I_r$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e quella incidente  $I_0$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) è descritta dalla relazione:

$$\tau_r = \frac{I_r}{I_0} = \left( \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2 \quad (1.30)$$

dove  $z_1$  e  $z_2$  sono le medie delle due impedenze. Analogamente, il rapporto tra l'intensità sonora  $I_t$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e quella incidente  $I_0$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) è:

$$\tau_t = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4z_2z_1}{(z_2 + z_1)^2} \quad (1.31)$$

Dalle relazioni appena viste, si può dedurre che la frazione di intensità trasmessa o riflessa assume valori maggiori per elevate differenze tra le due caratteristiche di impedenza  $z_1$  e  $z_2$ .

Il tempo di riverberazione strutturale  $T_s$  (s), estrapolato dalle misure descritte dalla UNI EN ISO 3382:2 [7], viene utilizzato per il calcolo del fattore di smorzamento mediante la relazione:

$$\eta = \frac{2,2}{fT_s} \quad (1.32)$$

dove  $f$  (Hz) è la frequenza. I valori del coefficiente di smorzamento per il legno possono essere vari: da 0,1 per superfici in legno umide a 0,002 per superfici in legno secche.

In conclusione, per la determinazione dello smorzamento si riportano le relazioni che rappresentano le diverse tipologie di calcolo dello stesso:

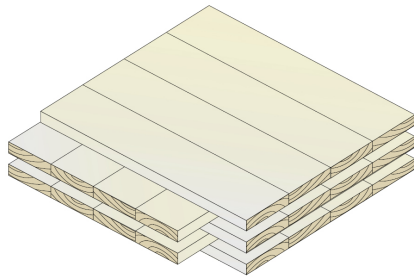
$$\eta(\omega_0) = 2\zeta = \frac{1}{Q} = \frac{l_{dec}}{\pi} = \frac{2,2}{f_0T} \quad (1.33)$$

dove  $\zeta$  è il rapporto di smorzamento (adimensionale),  $Q$  è il fattore di qualità,  $l_{dec}$  è il decremento logaritmo (adimensionale) e  $T$  (s) il tempo di riverberazione [2].

## 1.4 Comportamento vibroacustico del CLT

### 1.4.1 CLT - Cross Laminated Timber

Attualmente è sempre più viva l'esigenza di sostenibilità energetica ed ambientale. Negli ultimi anni si è innescato un processo di rinnovamento nell'ambito della costruzione edilizia. In questo nuovo scenario è proprio il legno a porsi come un materiale innovativo e in grado di rispondere alle richieste di comfort, durabilità, risparmio energetico e di sostenibilità.



(a) Schema dell'orditura incrociata



(b) Dettaglio di un pannello

Figura 1.4: Particolare stratificazione di un pannello in CLT [8]

Il legno risponde molto bene anche ai requisiti legislativi richiesti per le nuove abitazioni in termini di isolamento acustico e termico. Essendo un materiale naturale mantiene le condizioni di salubrità dell'ambiente ed, inoltre, è un materiale più leggero, adattabile e lavorabile rispetto ad altri materiali da costruzione: aspetti che contribuiscono ad una rapida realizzazione delle costruzioni in legno. Ci sono anche degli svantaggi da tenere in considerazione: è un materiale anisotropo, organico e quindi deperibile e da mantenere periodicamente.

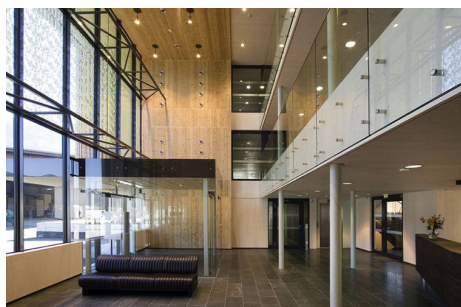
Le tipologie costruttive in legno principalmente usate sono: strutture in legno a telaio leggero di tipo *Platform Frame*, strutture ad ossatura portante in legno di tipo *Post e Beam* e strutture in legno massiccio. Una costruzione in *cross laminated timber*, sistema costruttivo molto diffuso nel Nord America e sempre di più in Europa, si basa su elementi strutturali come pareti e solai realizzati dalla sovrapposizione di un numero dispari di strati di legno lamellare e incollati insieme alternando l'orientamento delle fibre, come in figura 1.4. La disposizione incrociata degli strati conferisce all'elemento una certa isotropia macroscopica, migliorandone le caratteristiche meccaniche.



(a) Abitazione familiare a Klagenfurt, Austria



(b) Costruzione residenziale a Judenburg, Austria



(c) Binderholz Headquarter, Fügen, Austria



(d) UBC's Earth Sciences Building, Vancouver

Figura 1.5: Esempi di costruzioni residenziali e per servizi in cui è stato adottato il sistema costruttivo in CLT oppure soluzioni ibride [8, 9]

### 1.4.2 Lo stato dell'arte della ricerca sul CLT

Il CLT è un sistema costruttivo diffuso in Europa che sta prendendo piede anche in Italia. Per questa ragione è nata l'esigenza di avviare un lavoro di ricerca sul comportamento acustico di queste strutture, volgendo una particolare attenzione alle giunzioni dei diversi elementi e alla trasmissione laterale delle vibrazioni nel sistema.

Tipicamente i pannelli hanno tre o più strati e in totale raggiungono spessori tra i 75 mm e i 250 mm.

Quando si esamina la trasmissione del rumore nelle strutture, bisogna porre l'attenzione su cinque aspetti che derivano proprio dalle proprietà del CLT [10]:

- il fattore di smorzamento interno dei pannelli in CLT assume valori molto più alti rispetto agli elementi in cemento o muratura: misure sperimentali hanno determinato valori da 0,06 in su, a dispetto di un range tra lo 0,006 e lo 0,015;
- la frequenza di coincidenza dei pannelli in CLT è molto più alta rispetto ai sistemi tradizionali: ad esempio per un pannello con 3 strati la frequenza di coincidenza è sugli 800 Hz contro frequenze critiche al di sotto dei 250 Hz. Per questo motivo è raccomandata l'applicazione di una correzione ai valori di potere fonoisolante di laboratorio per le frequenze al di sotto della frequenza critica;
- gli effetti di strati aggiuntivi all'elemento grezzo in CLT, che completano pareti o solai, possono essere trattati come correzioni additive  $\Delta$ , così come accade per i sistemi in cemento o muratura. Essendo costituito da materiale più leggero subisce effetti di diversa entità;
- i sistemi di giunzione dei pannelli sono composti da piatti metallici o viti e non si ottengono mai delle giunzioni rigide: l'indice di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  per i giunti deve essere misurato secondo la ISO 10848;
- a causa di elevate perdite interne ai pannelli in CLT, la lunghezza di assorbimento equivalente è impostata numericamente uguale all'area del CLT assemblato.

L'articolo *Airborne sound transmission of cross laminated timber plate with orthotropic stiffness* di C. Hopkins [11] ha esaminato l'anisotropia dei pannelli in CLT, per capire se è una proprietà da dovergli attribuire e se è possibile utilizzare la teoria delle lastre finite o infinite per la previsione di  $R$ . Per i test è stata utilizzata una lastra in CLT composta da tre strati da 35 mm e di densità 438 kg/m<sup>3</sup>.

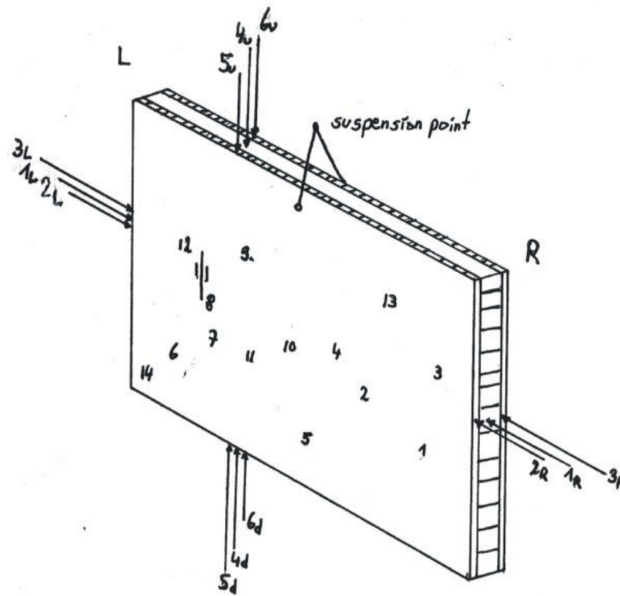


Figura 1.6: Punti di misura e direzioni per la determinazione sperimentale delle velocità di onde longitudinali di un pannello intero, *Airborne sound transmission of cross laminated timber plate with orthotropic stiffness* di C. Hopkins [11]

Assumendo l'ipotesi di anisotropia del pannello, esistono due valori diversi di frequenza critica,  $f_{cx}$  in direzione dell'asse  $x$  e  $f_{cy}$  in direzione dell'asse  $y$ . Le frequenze critiche  $i$ -esime sono calcolate con la relazione 1.20 e la frequenza critica effettiva  $f_{c,eff}$ , corrispondente ad un modello equivalente di una lastra isotropa, può essere determinata nel seguente modo:

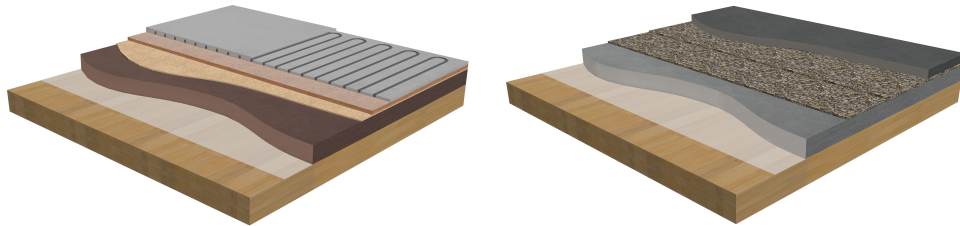
$$f_{c,eff} = \sqrt{f_{cx}f_{cy}} \quad (1.34)$$

Le velocità delle onde nelle due direzioni  $c_{Li}$  sono state determinate con dei test di laboratorio, ottenendo valori diversi in base all'asse della lastra considerato. Questo risultato conferma che le lastre in CLT sono anisotrope [11]. Sono state effettuate le misurazioni dell'efficienza di radiazione attraverso eccitazione sonora e meccanica mostrando una ragionevole coerenza con la teoria, per frequenze al di sotto della frequenza critica. Invece, le misure del potere fonoisolante hanno mostrato che al di sotto della più bassa delle frequenze critiche i risultati sono in accordo con il modello della lastra finita isotropa (usando una rigidità flessionale equivalente), mentre al di sopra della più alta delle frequenze critiche è stato possibile vedere che i modelli di lastra isotropa e anisotropa sono simili, ma nessuno dei due si avvicina all'andamento dei valori delle misurazioni eseguite [11].

### Lavoro di ricerca dell'Università di Bologna

Il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna ha da poco portato a termine una campagna di misurazioni sperimentali per la caratterizzazione acustica di massetti galleggianti su solaio in CLT [12]. Parallelamente sta conducendo un lavoro di ricerca sulla trasmissione laterale di differenti sistemi di connessione per pannelli in CLT [13].

Indagando 18 stratigrafie differenti, posate su una solaio grezzo in CLT di 140 mm, si è potuto prender conoscenza di come si comportano diversi tipi di materiali resilienti, di massetti a secco o in sabbia e cemento, di sottofondi alleggeriti e di diverse tipologie di controsoffitto. Questo lavoro ha l'obiettivo di voler contribuire ad un miglioramento delle formule previsionali da utilizzare nella progettazione di strutture leggere, come il CLT, scostandosi dalle strutture edilizie tradizionali.



(a) Stratigrafia 12 dove è stato testato il massetto con sistema radiante, simulando le condizioni reali

(b) Stratigrafia 14 in cui si è testato uno strato resiliente a base poliuretanica a cellule aperte

Figura 1.7: Esempi di stratigrafie esaminate durante la campagna di misura

Queste misure hanno permesso di collezionare, all'interno di un database, i valori di attenuazione al livello di calpestio  $\Delta L$  e di attenuazione al rumore aereo  $\Delta R$  dei diversi campioni, valori riutilizzabili nel calcolo previsionale del livello normalizzato di calpestio  $L'_n$  e del potere fonoisolante  $R'$ .

Infine, l'articolo [12] propone una prima ipotesi di estensione della validità della relazione di Heckl:

$$L_n + R = 30 \log f + 38 \quad (\text{dB}) \quad (1.35)$$

dato che superata la frequenza di 800 – 1000 Hz la curva di Heckl e la curva sperimentale presentano pendenze diverse. La relazione avanzata in buona approssimazione risulta [12]:

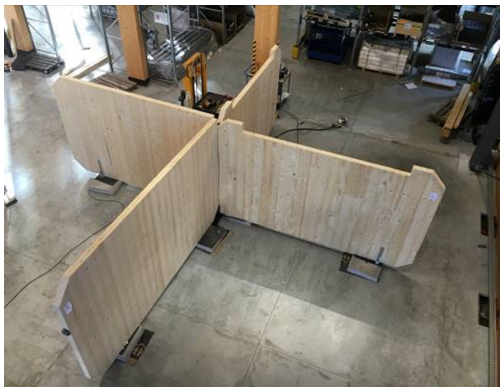
$$L_n = 30 \log f - \frac{f}{R} - 20 \quad (\text{dB}) \quad (1.36)$$



Si osserva che nei casi in cui è presente il controsoffitto comunque questa relazione non viene soddisfatta.

Il lavoro, illustrato nell'articolo [13], rappresenta una delle prime campagne di misure sistematiche a livello europeo sulla trasmissione laterale attraverso giunti di strutture in cross laminated timber. L'obiettivo di tale ricerca è di dare un contributo al quadro normativo che risulta ancora carente sui nuovi sistemi costruttivi. Le misure di trasmissione laterale sono state condotte nel rispetto della ISO 10848-1 [14]. Sono stati misurati i valori di indice di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  per giunti a T e a croce, giunti realizzati con sistemi di ancoraggio costituiti da viti, hold-down e angolari a taglio.

I risultati ottenuti permettono di avere una prima serie di dati che potranno essere impiegati nel calcolo del potere fonoisolante apparente, secondo la normativa UNI EN 12354-1 [15] e anche in accordo con le novità introdotte dalla ISO 12354.



(a) Configurazione del giunto verticale



(b) Configurazione del giunto orizzontale



(c) Esempio di angolare TTN240 con l'inserimento di materiale resiliente Xylofon



(d) Attuatore elettrodinamico, sorgente sonora per le misure

Figura 1.8: Configurazioni e accorgimenti per i test sui giunti verticali ed orizzontali [13]

Questa ricerca ha individuato una significativa variazione dei risultati riconducibile alla tipologia di viti utilizzate per la connessione e al numero, ponendosi in disaccordo con le formule empiriche proposte dall'aggiornamento ISO/DIS 12354-1. Lavori futuri potranno stabilire quanta di questa variabilità può essere associata al montaggio degli stessi oppure all'efficienza di radiazione dei pannelli [13].

# Capitolo 2

## Normativa tecnica per la progettazione acustica in edilizia: UNI EN 12354

### 2.1 UNI EN 12354-1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti

La parte prima della UNI EN 12354 [15] espone la procedura del modello di calcolo, dettagliato e semplificato, per valutare l'isolamento acustico al rumore aereo tra due ambienti sovrapposti o adiacenti.

Il modello dettagliato calcola le prestazioni acustiche delle componenti edilizie in bande di frequenza e deve essere applicato almeno per bande di ottava comprese fra 125 Hz e 2000 Hz o per bande di un terzo di ottava comprese tra 100 Hz e 3150 Hz. A partire da questi risultati si potranno ottenere gli indici di valutazione delle prestazioni dell'edificio.

Invece, il modello semplificato calcola direttamente le prestazioni di un edificio sotto forma di indice di valutazione, a partire da quelli relativi alle prestazioni dei singoli elementi, non più in funzione della frequenza.

#### 2.1.1 Grandezze rilevanti per l'isolamento dal rumore aereo

Il potere fonoisolante apparente  $R'$  è definito come meno dieci volte il logaritmo del rapporto tra la potenza sonora totale  $W_{tot}$ , trasmessa attraverso tutte le partizioni, e la potenza sonora incidente  $W_i$  su un elemento di

separazione [15]:

$$R' = -10 \log \tau' = -10 \log \frac{W_{tot}}{W_i} \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

Questa grandezza si può determinare anche attraverso misurazioni in opera rispettando la relazione:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_s}{A} \quad (\text{dB}) \quad (2.2)$$

dove  $L_1$  (dB) è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente,  $L_2$  (dB) è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente,  $A$  (m<sup>2</sup>) è l'area di assorbimento equivalente nell'ambiente ricevente e  $S_s$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento di separazione [15].

Le grandezze utilizzate per esprimere le prestazioni degli elementi di edificio possono essere determinate sia in bande di terzo di ottava o in bande di ottava e sia con un indice di valutazione  $R_w$  calcolato in conformità alla UNI EN ISO 717-1 [16].

Si definisce il potere fonoisolante  $R$  come dieci volte il logaritmo del rapporto tra la potenza sonora che attraversa un campione di prova  $W_2$  e la potenza sonora incidente sul campione  $W_1$ , come segue:

$$R = -10 \log \frac{W_2}{W_1} \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

e l'incremento del potere fonoisolante  $\Delta R$  è la differenza tra il potere fonoisolante di un elemento strutturale di base con uno strato addizionale (ad esempio un pavimento galleggiante) e dell'elemento strutturale di base senza questo strato [15].

### 2.1.2 Principi generali del modello di calcolo

Il modello di calcolo distingue la trasmissione diretta ed indiretta. La trasmissione sonora diretta è quella dovuta solo al rumore incidente sull'elemento di separazione che viene direttamente irradiato per via strutturale o per via aerea, attraverso parti dell'elemento stesso. Invece, la trasmissione indiretta riguarda la parte di energia sonora che arriva nell'ambiente ricevente tramite percorsi diversi da quelli descritti in precedenza. A sua volta la trasmissione indiretta può essere per via aerea (sistemi di ventilazione, controsoffitti e corridoi) e per via strutturale, attraverso percorsi vibratorii nella costruzione, costituendo la cosiddetta trasmissione laterale.

Si può affermare che la potenza sonora nell'ambiente ricevente è dovuta al suono irradiato dall'elemento strutturale di separazione e dagli elementi

laterali che costituiscono l'ambiente e dalla relativa trasmissione sonora diretta e indiretta per via aerea. Si deduce che il fattore di trasmissione totale può essere suddiviso in quattro contributi secondo la relazione:

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (2.4)$$

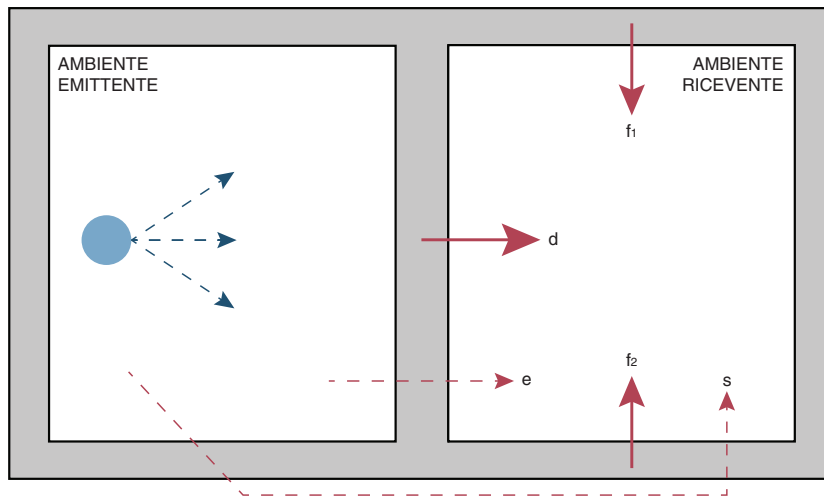


Figura 2.1: Rappresentazione dei differenti contributi della trasmissione sonora totale

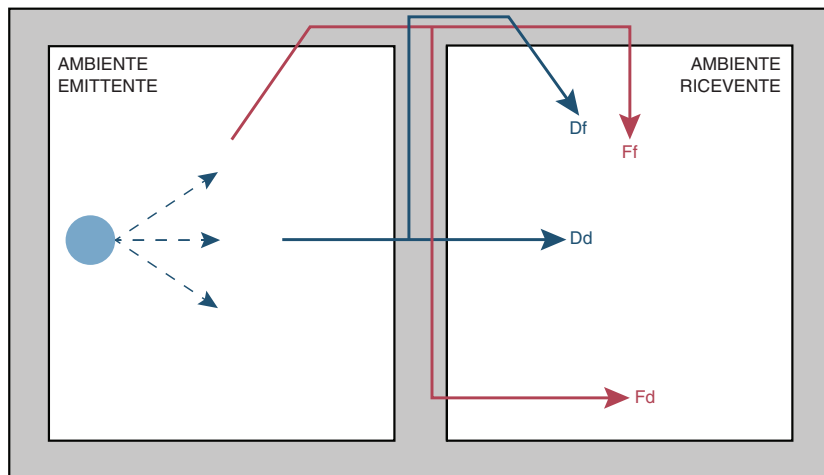


Figura 2.2: Rappresentazione dei differenti percorsi  $ij$  tra i due ambienti

Facendo riferimento alle figure 2.1 e 2.2, i vari contributi si definiscono di seguito [15]:

- $\tau_d$  è il fattore di trasmissione per l'elemento di separazione e si compone dei contributi della trasmissione diretta e degli  $n$  percorsi di trasmissione laterale:

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{f=1}^n \tau_{Fd} \quad (2.5)$$

- $\tau_f$  è il fattore di trasmissione per ciascuno degli elementi laterali  $f$  e si compone dei due contributi della trasmissione laterale:

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \quad (2.6)$$

- $\tau_e$  è il fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente da un elemento nell'elemento di separazione, dovuta alla trasmissione diretta per via aerea del rumore incidente su questo elemento, e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione;
- $\tau_s$  è il fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente da un sistema  $s$ , dovuta alla trasmissione indiretta per via aerea del rumore incidente su questo sistema di trasmissione, e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione;
- $n$ ,  $m$  e  $k$  sono rispettivamente il numero di elementi laterali, il numero degli elementi con trasmissione diretta per via aerea e il numero di elementi con trasmissione indiretta per via aerea.

Occorre sottolineare che i primi due fattori di trasmissione si riferiscono alla trasmissione sonora strutturale (linee continue nella figura 2.1), mentre gli ultimi due alla trasmissione sonora aerea (linee tratteggiate nella figura 2.1). Ogni percorso può essere identificato dall'elemento  $i$  su cui incide il suono nell'ambiente emittente e dall'elemento radiante  $j$  nell'ambiente ricevente. Da ora in poi si assumerà l'ipotesi fondamentale per cui i percorsi di trasmissione laterale possano essere considerati indipendenti.

Il modello ha dei limiti che valgono sia per quello dettagliato che semplificato: può essere applicato solo ad ambienti adiacenti e ad elementi che hanno approssimativamente le stesse caratteristiche di irradiazione per entrambi i lati e il tipo di prodotti è limitato soprattutto dalle informazioni a disposizione riguardo l'indice di riduzione delle vibrazioni riferite solo agli elementi monolitici e agli elementi doppi leggeri.

### 2.1.3 Modello dettagliato

Del modello dettagliato verrà illustrato solo il modello per la trasmissione per via strutturale, in quanto per la trasmissione laterale per via aerea ci sono ancora delle lacune normative.

I dati acustici relativi a tutti gli elementi devono essere convertiti in valori *in situ*, prima di procedere alla determinazione effettiva della trasmissione sonora. E' valida la seguente relazione [17]:

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (\text{dB}) \quad (2.7)$$

dove  $T_{s,situ}$  (s) è il tempo di riverberazione strutturale dell'elemento in opera e  $T_{s,lab}$  (s) è il tempo di riverberazione strutturale dell'elemento in laboratorio.

Il potere fonoisolante di laboratorio può essere applicato al di sopra della frequenza critica, al di sotto si rischia una valutazione non affidabile a causa di una trasmissione non risonante. Bisogna considerare  $T_{s,situ}$  uguale a  $T_{s,lab}$  e, quindi, il termine di correzione si assume pari a zero nei seguenti casi riportati dalla normativa [17]:

- elementi a pareti doppie leggere, quali tramezzi con intelaiatura di legno o metallo;
- elementi che abbiano un fattore di smorzamento interno maggiore di 0,03;
- elementi molto più leggeri rispetto agli elementi strutturali circostanti (con un rapporto almeno di 1 a 3);
- elementi che non sono raccordati in modo rigido agli elementi strutturali circostanti.

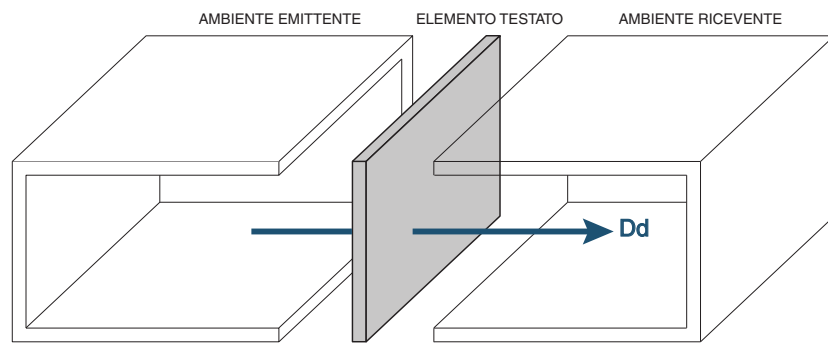
Per quanto riguarda gli strati addizionali, il valore di laboratorio può essere usato come un'approssimazione del valore in opera dell'incremento  $\Delta R_{situ} = \Delta R$  (dB).

Per la trasmissione diretta il potere fonoisolante è determinato mediante la relazione [15]:

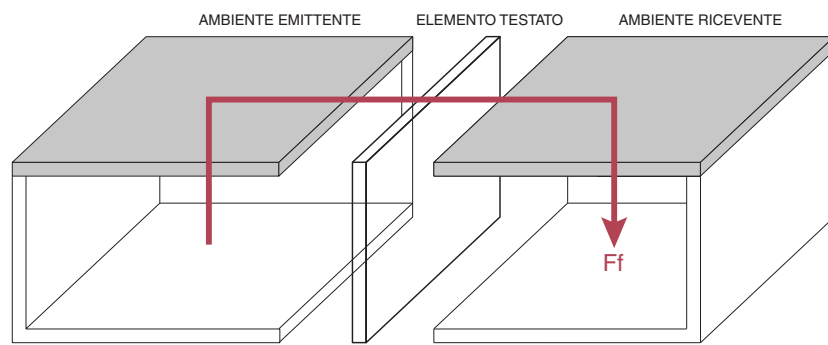
$$R_{D,d} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} \quad (\text{dB}) \quad (2.8)$$

Invece, il potere fonoisolante  $R_{ij}$  (dB) per la trasmissione laterale è determinato dai valori di ingresso corretti inserendoli nella relazione che segue e ponendo  $ij = Ff, Fd$  e  $Df$  (Figura 2.3).

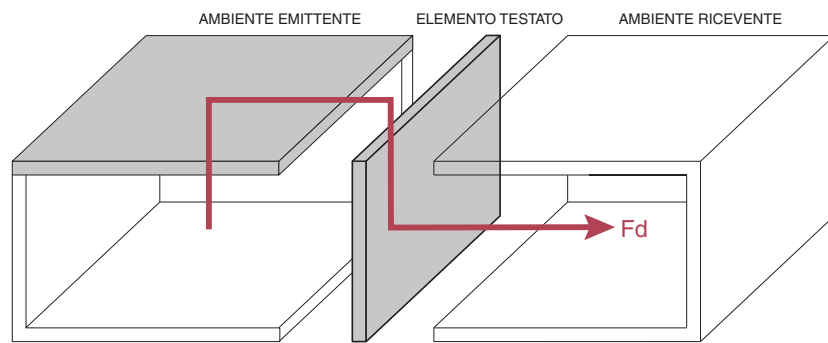
$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (2.9)$$



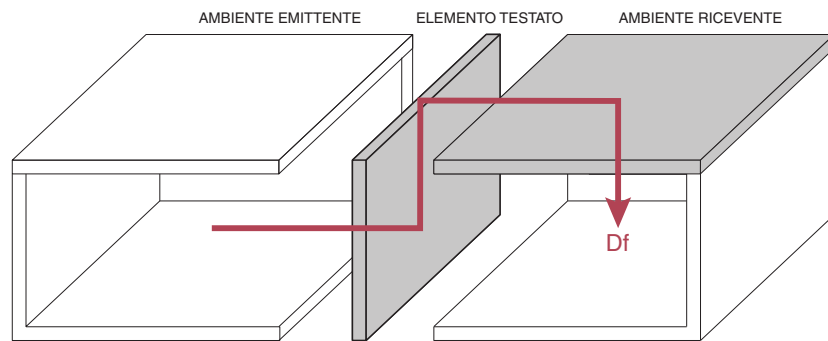
(a) Percorso di trasmissione diretto  $D_d$



(b) Percorso di trasmissione laterale  $F_f$



(c) Percorso di trasmissione laterale  $F_d$



(d) Percorso di trasmissione laterale  $D_f$

Figura 2.3: Percorsi di trasmissione sonora tra due ambienti adiacenti



dove:

- $R_{i,situ}$  (dB) è il potere fonoisolante dell'elemento  $i$  nell'ambiente emittente;
- $R_{j,situ}$  (dB) è il potere fonoisolante dell'elemento  $j$  nell'ambiente ricevente;
- $\Delta R_{i,situ}$  (dB) è l'incremento del potere fonoisolante dovuto ai rivestimenti interni dell'elemento  $i$  nell'ambiente emittente;
- $\Delta R_{j,situ}$  (dB) è l'incremento del potere fonoisolante dovuto ai rivestimenti interni dell'elemento  $j$  nell'ambiente emittente;
- $S_i$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento laterale  $i$  nell'ambiente emittente;
- $S_j$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente emittente;
- $S_s$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento di separazione;
- $\overline{D_{v,ij,situ}}$  (dB) è l'isolamento medio di vibrazioni del giunto, tra gli elementi  $i$  e  $j$  nell'effettiva situazione in opera [15].

Quest'ultima grandezza è determinata in base all'indice di riduzione delle vibrazioni così come segue:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \right); \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \quad (\text{dB}) \quad (2.10)$$

con

$$a_{i,situ} = \frac{2, 2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (\text{m}) \quad a_{j,situ} = \frac{2, 2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (\text{m}) \quad (2.11)$$

dove  $f_{ref}$  (Hz) è la frequenza di riferimento pari a 1000 Hz [15].

La norma fornisce una serie di indicazioni per affrontare più agevolmente le situazioni reali: presenza di aperture negli elementi, elementi laterali che non si trovano su un unico piano o gestione degli strati addizionali per capire quali percorsi devono essere considerati e quali possono essere trascurati.

### Calcolo del potere fonoisolante in bande di frequenza

Di seguito vengono analizzati degli aspetti fondamentali che sono alla base del modello di calcolo per il potere fonoisolante in bande di frequenza, che la norma riporta nelle appendici B e C [15].

Definendo  $f_c$  (Hz) la frequenza critica, si calcola il fattore di trasmissione  $\tau$  della relazione

$$R = -10 \log \tau \quad (\text{dB}) \quad (2.12)$$

con le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \tau &= \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( \frac{\pi f_c \sigma^2}{2 \eta_{tot}} \right) & f > f_c \\ \tau &= \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( \frac{\pi \sigma^2}{2 \eta_{tot}} \right) & f = f_c \\ \tau &= \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( 2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 l_2^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma^2}{\eta_{tot}} \right) & f < f_c \end{aligned} \quad (2.13)$$

dove  $\eta_{tot}$  è il fattore di smorzamento totale;  $\sigma$  è il fattore di radiazione per le onde flessionali libere;  $\sigma_f$  è il fattore di radiazione delle onde forzate;  $m'$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa per unità di area;  $\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) è la massa volumetrica dell'aria;  $l_1$  e  $l_2$  (m) sono le lunghezze dei bordi dell'elemento (rettangolare).

Il fattore di smorzamento totale  $\eta_{tot}$  si calcola secondo il metodo illustrato nell'appendice C della norma [15]. Si utilizza l'equazione che mette in relazione il tempo di riverberazione strutturale di un elemento  $T_s$  e il fattore di smorzamento totale  $\eta_{tot}$ :

$$T_s = \frac{2,2}{f \eta_{tot}} \quad (\text{s}) \quad (2.14)$$

Il fattore di smorzamento totale  $\eta_{tot}$  comprende le dispersioni interne  $\eta_{int}$ , le dispersioni dovute alla radiazione e le dispersioni al perimetro dell'elemento, rispettivamente primo, secondo e terzo termine nella seguente relazione [15]:

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f m'} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \quad (2.15)$$

dove  $\alpha_k$  è il coefficiente di assorbimento per le onde flessionali al giunto  $k$  di lunghezza  $l_k$  (m) e nella situazione in opera può variare da 0,005 a 0,5. Questo coefficiente viene dedotto dall'indice di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  del giunto tra l'elemento considerato  $i$  e l'elemento  $j$  a lui connesso [15]:

$$\alpha_k = \sum_{j=1}^3 \sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{ref}}} 10^{-\frac{K_{ij}}{10}} \quad (2.16)$$

dove  $f_{ref} = 1000$  Hz e  $j$  indica gli elementi che sono collegati all'elemento considerato  $i$  al giunto  $k$ .

Questo approccio nonostante fornisca il tempo di riverberazione strutturale  $T_s$  effettivo e non quello reale consente di ottenere i risultati esatti per il potere fonoisolante in opera  $R'$ .

I fattori di radiazione dell'equazione 2.13 vengono determinati mediante le seguenti relazioni [15]:

- per il fattore di radiazione per le onde forzate, considerando  $l_1 > l_2$  si ha:

$$\sigma_f = 0,5[\ln(k_0\sqrt{l_1l_2}) - \Lambda]; \quad \sigma_f \leq 2 \quad (2.17)$$

$$\Lambda = -0,964 - \left(0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2}\right) \quad (2.18)$$

dove  $k_0 = 2\pi f/c_0$  (rad/m) è il numero d'onda.

- per il fattore di radiazione per le onde libere si ha:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{\sqrt{1 - f_c/f}} & \sigma_2 &= 4l_1 l_2 \left(\frac{f}{c_0}\right)^2 & \sigma_3 &= \sqrt{\frac{2\pi f(l_1 + l_2)}{16c_0}} \\ f_{11} &= \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2}\right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Si possono presentare due casi:

- $f_{11} \leq f_c/2$ , ed in questo caso si ha:

$$\begin{cases} \text{se } f \geq f_c & \Rightarrow \sigma = \sigma_1 \\ \text{se } f < f_c & \Rightarrow \sigma = \frac{2(l_1 + l_2)c_0}{l_1 l_2} \delta_1 + \delta_2 \\ \text{se } f < f_{11} < f_c/2 \text{ e } \sigma > \sigma_2 & \Rightarrow \sigma = \sigma_2 \end{cases}$$

con

$$\delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \ln\left(\frac{1+\lambda}{1-\lambda}\right) + 2\lambda}{4\pi^2(1 - \lambda^2)^{1,5}}; \quad \text{con } \lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (2.20)$$

$$\delta_2 = 0 \quad \text{se } f > \frac{f_c}{2} \quad (2.21)$$

$$\delta_2 = \frac{8c_0^2(1 - \lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 l_1 l_2 \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad \text{se } f \leq \frac{f_c}{2} \quad (2.22)$$

–  $f_{11} > f_c/2$  e si ha:

$$\begin{cases} \text{se } f < f_c \text{ e } \sigma_2 < \sigma_3 & \Rightarrow \sigma = \sigma_2 \\ \text{se } f > f_c \text{ e } \sigma_1 < \sigma_3 & \Rightarrow \sigma = \sigma_1 \\ \text{altrimenti :} & \sigma = \sigma_3 \end{cases}$$

In ogni caso si deve verificare la condizione di  $\sigma < 2,0$ .

### Indice di riduzione delle vibrazioni per i giunti

La normativa [15] offre diversi metodi per la determinazione dell'indice di riduzioni delle vibrazioni  $K_{ij}$ :

- in relazione all'isolamento di vibrazioni del giunto con l'equazione 2.50;
- per prodotti omogenei, in funzione del fattore di trasmissione di potenza per via aerea strutturale  $\gamma_{ij}$ , utilizzando la relazione:

$$K_{ij} = -10 \log \gamma_{ij} + 5 \log \frac{f_{c,j}}{f_{ref}} = -10 \log \gamma_{ij} + 5 \log \frac{f_{c,i}}{f_{ref}} \quad (\text{dB}) \quad (2.23)$$

- per giunti comuni, ci sono a disposizione delle relazioni empiriche dove i valori di  $K_{ij}$  sono espressi in funzione delle masse areiche degli elementi che costituiscono il giunto. Si definisce la grandezza adimensionale:

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad (2.24)$$

dove  $m'_{\perp i}$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa areica dell'elemento  $i$  nel percorso  $ij$  e  $m'_i$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa areica dell'elemento perpendicolare che costituisce il giunto.

I dati misurati mostrano un divario di  $\pm 3$  dB attorno alle curve indicate, valore che aumenta per giunti di elementi leggeri fino a  $\pm 5$  dB.

Si riportano di seguito le relazioni empiriche riportate nell'appendice E della normativa [15]:

- Giunto rigido a croce (Figura 2.4):

$$\begin{aligned} K_{13} &= 8,7 + 17,1 M + 5,7 M^2 \quad (\text{dB}) \\ K_{12} &= 8,7 + 5,7 M^2 = K_{23} \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

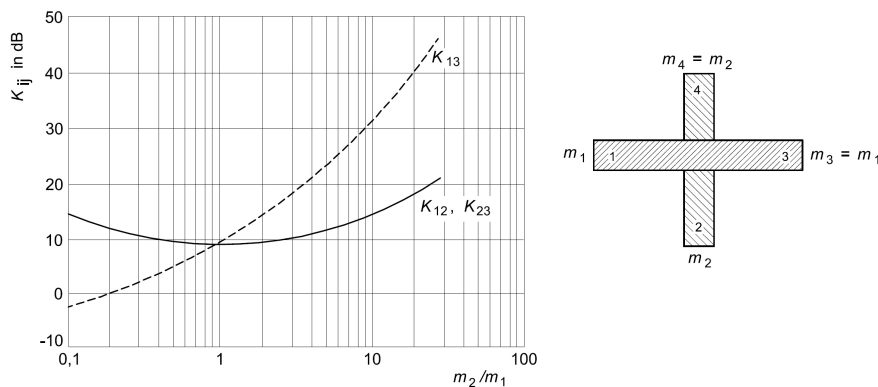


Figura 2.4: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra del giunto rigido a croce [15]

- Giunto di parete con strati intermedi flessibili (Figura 2.5):

$$\begin{aligned}
 K_{13} &= 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 + 2\Delta_1 \quad (\text{dB}) \\
 K_{24} &= 3,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 \quad (\text{dB}); \quad 0 \leq K_{24} \leq -4 \quad (\text{dB}) \\
 K_{12} &= 5,7 + 5,7 M^2 + \Delta_1 = K_{23} \quad (\text{dB}) \\
 \Delta_1 &= 10 \log \frac{f}{f_1 = 125} \quad (\text{dB})
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

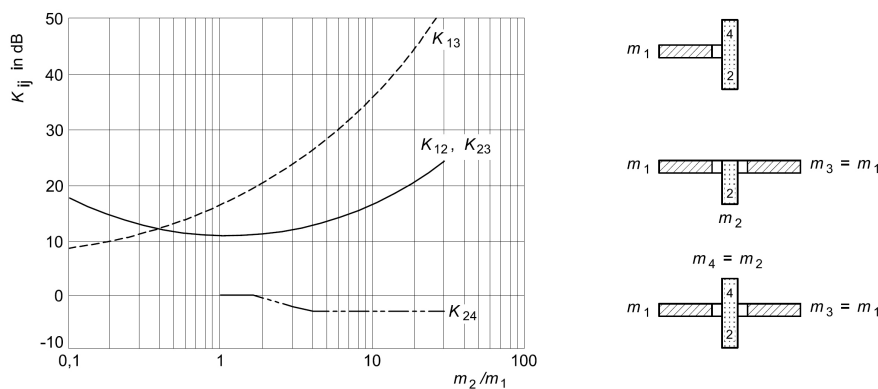


Figura 2.5: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra dei possibili giunti di parete con strati intermedi flessibili [15]

- Giunto rigido a T (Figura 2.6):

$$\begin{aligned}
 K_{13} &= 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 \quad (\text{dB}) \\
 K_{12} &= 5,7 + 5,7 M^2 = K_{23} \quad (\text{dB})
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

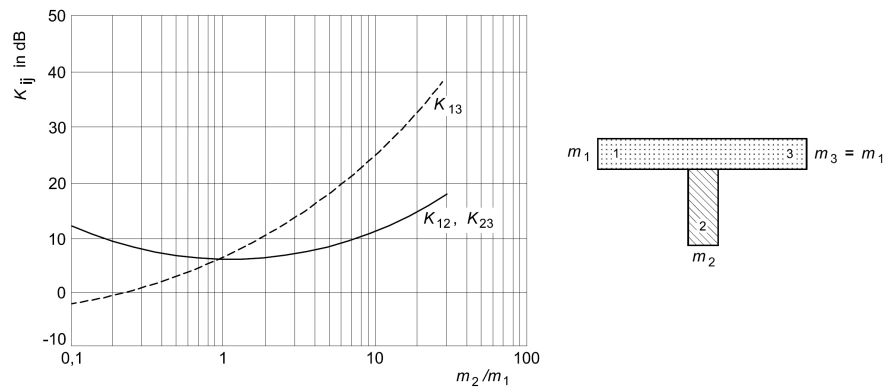


Figura 2.6: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra del giunto rigido a T [15]

- Giunto di una facciata leggera (Figura 2.7):

$$\begin{aligned} K_{13} &= 5 + 10 M \quad (\text{dB}) \text{ e minimo } 5 \text{ dB} \\ K_{12} &= 10 + 10 |M| = K_{23} \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

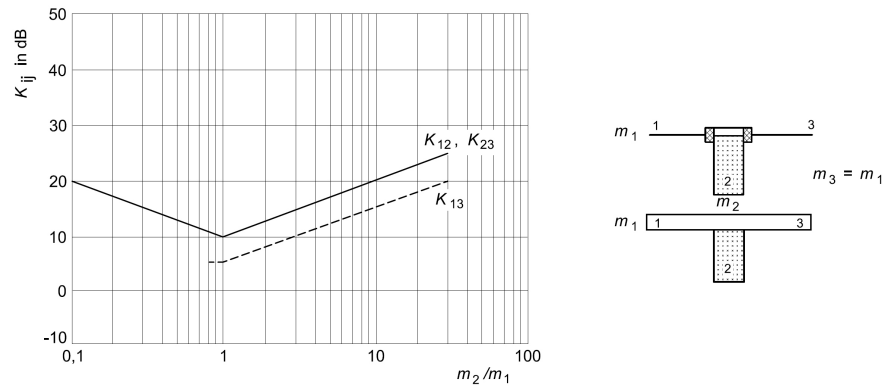


Figura 2.7: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra dei possibili giunti di una facciata leggera [15]

- Giunto di una parete leggera a doppio strato e di elementi omogenei (Figura 2.8):

$$\begin{aligned} K_{13} &= 10 + 20 M - 3,3 \log f/f_k \quad (\text{dB}) \\ K_{24} &= 3,0 + 14,1 M + 5,7 M^2 \quad (\text{dB}); \quad \frac{m_2}{m_1} > 3 \text{ dB} \\ K_{12} &= 10 + 10 |M| + 3,3 \log f/f_k = K_{23} \quad (\text{dB}) \\ f_k &= 500 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2.29)$$

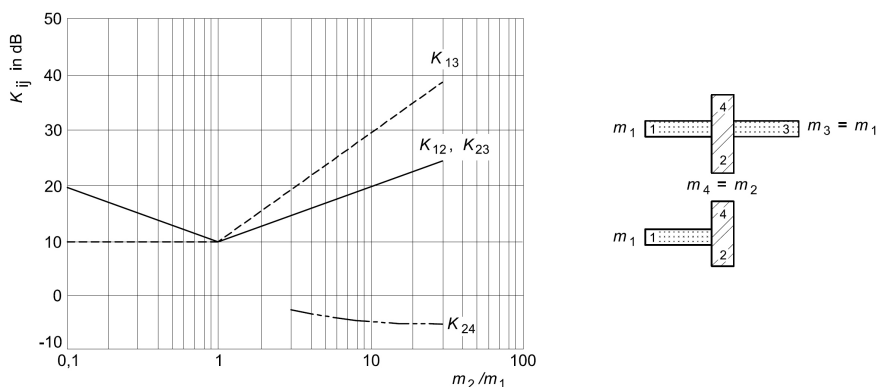


Figura 2.8: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra dei possibili giunti di una parete leggera a doppio strato e di elementi omogenei [15]

- Giunto di muri leggeri a doppio strato accoppiati (Figura 2.9):

$$\begin{aligned}
 K_{13} &= 10 + 20 M - 3,3 \log f/f_k \quad (\text{dB}) \\
 K_{12} &= 10 + 10 |M| = K_{23} \quad (\text{dB}) \\
 f_k &= 500 \text{ Hz}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

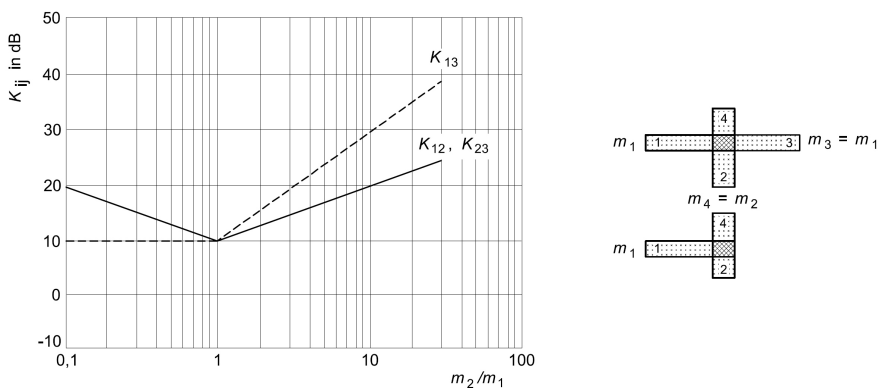


Figura 2.9: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra dei possibili giunti di muri leggeri a doppio strato accoppiati [15]

- Angolo o variazione di spessore (Figura 2.10):

$$\begin{aligned}
 \text{Angolo: } K_{12} &= 15 |M| - 3 = K_{21} \quad (\text{dB}) \text{ e minimo } - 2 \text{ dB} \\
 \text{Variazione spessore: } K_{12} &= 15 M^2 - 5 = K_{21} \quad (\text{dB})
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

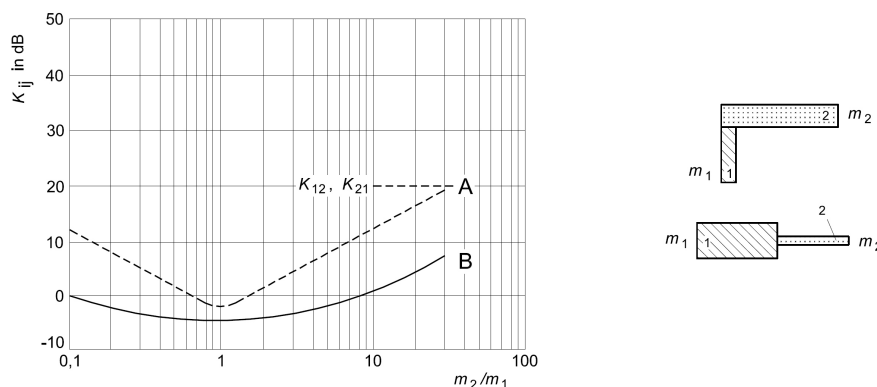


Figura 2.10: Andamento degli indici di riduzione delle vibrazioni per i percorsi illustrati a destra nei casi di giunti ad angolo o con variazioni di spessore [15]

### Incremento del potere fonoisolante dovuto a strati aggiuntivi

Se gli strati aggiuntivi (rivestimenti a parete, pavimenti galleggianti o controsoffitti) sono fissati ad una struttura omogenea, allora il loro contributo è determinato dalla frequenza di risonanza  $f_0$  del sistema.

Per elementi in cui lo strato è posto direttamente sulla costruzione di base, la frequenza di risonanza  $f_0$  si calcola con la relazione [15]:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (\text{Hz}) \quad (2.32)$$

dove  $s'$  (MN/m<sup>3</sup>) è la rigidità dinamica dello strato resiliente,  $m'_1$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa per unità di area della struttura di base e  $m'_2$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa per unità di area dello strato aggiuntivo.

Invece, se gli strati aggiuntivi non sono direttamente fissati ma sono costruiti su montanti o traversi, dove l'intercapedine è riempita di materiale fonoassorbente con una resistività all'aria di  $r \geq 5 \text{ s/m}^2$ , allora deve essere utilizzata la relazione [15]:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (\text{Hz}) \quad (2.33)$$

dove  $d$  (m) è la profondità dell'intercapedine.

Una volta calcolato il valore della frequenza critica, la normativa [15] mette a disposizione un prospetto da cui si può estrapolare l'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante associato al rivestimento in base al valore di  $f_0$ .



### 2.1.4 Modello semplificato

La versione semplificata del modello di calcolo [15] prevede l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente a partire dagli indici di valutazione del potere fonoisolante degli elementi in esame, in conformità con la EN ISO 717-1 [16]. L'applicazione di questo modello è circoscritta alla trasmissione diretta e laterale di elementi essenzialmente omogenei, dato che lo smorzamento strutturale è considerato solo in modo mediato.

L'indice di potere fonoisolante apparente  $R'_w$  (dB) tra due ambienti è determinato mediante l'equazione [15]:

$$R'_w = -10 \log \left[ 10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right] \quad (2.34)$$

dove gli  $R_w$  sono gli indici di valutazione del potere fonoisolante per i diversi percorsi di trasmissione sonora e  $n$  è il numero di elementi laterali in un ambiente. Per ogni percorso (figura 2.2) l'indice di valutazione è previsto in base ai dati di ingresso relativi agli elementi ed ai giunti e sono determinati nel seguente modo:

- per la trasmissione diretta, percorso  $Dd$ , si ha:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (\text{dB}) \quad (2.35)$$

dove  $R_{s,w}$  (dB) è l'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento di separazione e  $\Delta R_{Dd,w}$  (dB) è l'incremento dell'indice del potere fonoisolante mediante strati addizionali sull'elemento di separazione;

- per la trasmissione laterale, percorsi  $Ff$ ,  $Fd$  e  $Df$ , si calcolano i seguenti indici:

$$\begin{aligned} R_{Ff,w} &= \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (\text{dB}) \\ R_{Fd,w} &= \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (\text{dB}) \\ R_{Df,w} &= \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

dove:

- $R_{F,w}$  (dB) è l'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento  $F$  nell'ambiente emittente;

- $R_{f,w}$  (dB) è l'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento  $f$  nell'ambiente ricevente;
- $\Delta R_{Ff,w}$  (dB) è l'incremento dell'indice del potere fonoisolante mediante strati addizionali sull'elemento laterale;
- $\Delta R_{Fd,w}$  (dB) è l'incremento dell'indice del potere fonoisolante mediante strati addizionali sull'elemento laterale lato emittente e/o sull'elemento di separazione al lato ricevente;
- $\Delta R_{Df,w}$  (dB) è l'incremento dell'indice del potere fonoisolante mediante strati addizionali sull'elemento di separazione lato emittente e/o sull'elemento laterale al lato ricevente;
- $K_{Ff}$  (dB) è l'indice di riduzione delle vibrazioni per il percorso di trasmissione  $Ff$ ;
- $K_{Fd}$  (dB) è l'indice di riduzione delle vibrazioni per il percorso di trasmissione  $Fd$ ;
- $K_{Df}$  (dB) è l'indice di riduzione delle vibrazioni per il percorso di trasmissione  $Df$ ;
- $S_s$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento di separazione;
- $l_f$  (m) è la lunghezza di accoppiamento comune del giunto tra l'elemento di separazione;
- gli elementi laterali  $F$  e  $f$  e  $l_0$  (m) è lunghezza di riferimento pari a 1 (m) [15].

### 2.1.5 Accuratezza dei modelli

La normativa [15] fornisce delle indicazioni ed è difficile definire con certezza la precisione delle previsioni per tutte le casistiche.

L'accuratezza della previsione tramite i modelli presentati dipende da molti fattori: l'accuratezza dei dati di ingresso, l'adattabilità della situazione al modello, il tipo di prodotti e giunti implicati, la geometria della situazione e la mano d'opera [15].

Fin ad ora è stata acquisita una buona esperienza sull'applicazione di questi modelli su edifici con elementi strutturali di base omogenei. In questi casi la previsione è mediamente corretta con uno scarto tipo da 1,5 dB a 2,5 dB. Invece, le previsioni con il modello semplificato mostrano uno scarto tipo di circa 2 dB, con una tendenza a sopravvalutare leggermente l'isolamento [15].

## 2.2 UNI EN 12354-2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti

La UNI EN 12354-2 [17] fornisce gli elementi necessari all'elaborazione di modelli di calcolo per valutare l'isolamento acustico al calpestio tra ambienti sovrapposti. Tali modelli sono principalmente basati sui dati di trasmissione diretta e laterale ed illustrano le diverse modalità di approccio, le procedure per il calcolo e i limiti dei modelli stessi.

### 2.2.1 Grandezze rilevanti per il calpestio

Il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico  $L'_n$  è definito dalla relazione [17]:

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.37)$$

dove  $L_i$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio nell'ambiente ricevente,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente e  $A_0$  ( $\text{m}^2$ ) è l'area di assorbimento equivalente di riferimento che per le abitazioni si pone pari a  $10 \text{ m}^2$ .

Analogamente, il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto al tempo di riverberazione  $L'_{nT}$  è definito dalla relazione [17]:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.38)$$

dove  $T$  (s) è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente e  $T_0$  (s) è il tempo di riverberazione di riferimento che per le abitazioni si pone pari a 0,5 s.

Le due grandezze sono legate dall'equazione [17]:

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \log \frac{0,16V}{A_0 T_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.39)$$

dove  $V$  ( $\text{m}^3$ ) è il volume dell'ambiente ricevente.

Tra le due grandezze appena definite, nella norma è stato scelto il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico  $L'_n$  come grandezza da valutare. Oltre a questa grandezza, per esprimere le prestazioni di un elemento viene presa in considerazione l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L_d$  calcolata dalla differenza tra

il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato in assenza di rivestimento  $L_{n0}$  (dB) e il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato con rivestimento in opera  $L_n$  (dB) [17]:

$$\Delta L_d = L_{n0} - L_n \quad (\text{dB}) \quad (2.40)$$

Il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato con rivestimento in opera  $L_n$  (dB) è determinato a partire dai livelli di pressione sonora di calpestio  $L_i$ , misurati in accordo alla normativa EN ISO 140: 6-8, ora sostituite dalla ISO 10140 [18].

### 2.2.2 Principi generali del modello di calcolo

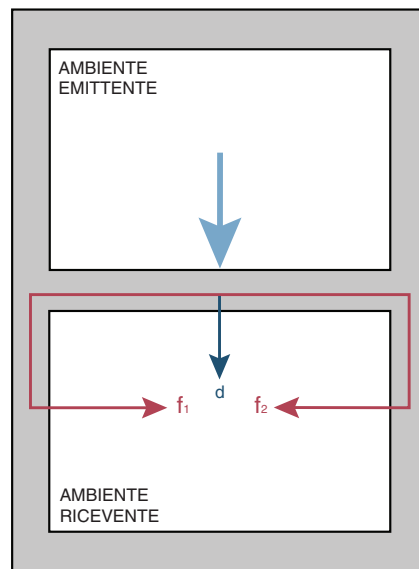


Figura 2.11: Definizione delle diverse vie di trasmissione sonora tra due ambienti sovrapposti

La potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente è determinata dal suono irradiato da ciascun elemento strutturale costituente il sistema. L'ipotesi fondamentale è che la trasmissione per mezzo di ciascuna delle vie possibili sia indipendente, cosicché il livello di pressione sonora  $L'_n$  possa essere ottenuto dalla somma dell'energia trasmessa per mezzo di ciascuna via.

Si consideri la figura 2.11 e si notino i diversi percorsi possibili per la trasmissione sonora: con la lettera  $d$  è indicata la componente di trasmissione diretta e con  $ij$  la componente di trasmissione laterale.

Per ambienti sovrapposti (Figura 2.11) il livello totale della pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico  $L'_n$  è determinato dalla relazione [17]:

$$L'_n = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.41)$$

dove  $L_{n,d}$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione diretta,  $L_{n,ij}$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale e  $n$  è il numero degli elementi ed in genere è uguale a 4 [17].

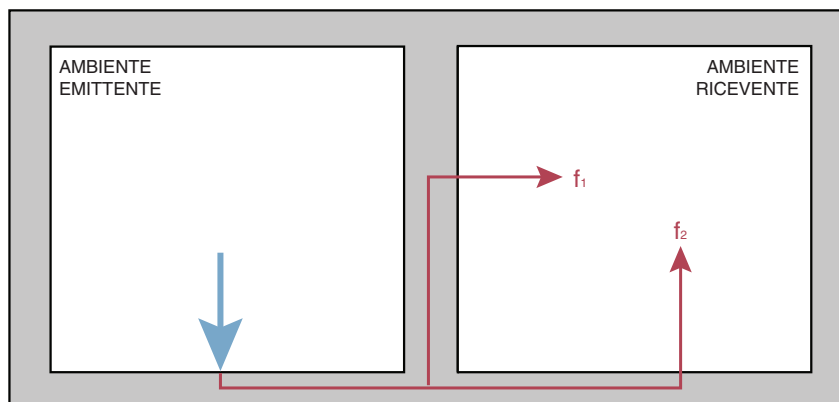


Figura 2.12: Percorsi di trasmissione sonora per due ambienti adiacenti

Invece, per ambienti adiacenti (Figura 2.12) il livello totale della pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico  $L'_n$  è determinato dalla relazione [17]:

$$L'_n = 10 \log \left( \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.42)$$

dove  $n$  è il numero degli elementi e in situazioni comuni è uguale a 2 [17].

### 2.2.3 Modello dettagliato

I dati acustici relativi a tutti gli elementi devono essere convertiti in valori *in situ*, prima di procedere alla determinazione effettiva della trasmissione

sonora. Sono valide le seguenti relazioni:

$$L_{n,situ} = L_n + 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (\text{dB}) \quad (2.43)$$

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (\text{dB}) \quad (2.44)$$

dove  $T_{s,situ}$  (s) è il tempo di riverberazione strutturale dell'elemento in opera e  $T_{s,lab}$  (s) è il tempo di riverberazione strutturale dell'elemento in laboratorio [17].

I casi in cui si può considerare  $T_{s,situ}$  uguale a  $T_{s,lab}$  sono gli stessi elencati per il calcolo del modello dettaglio del potere fonoisolante.

Per quanto riguarda i rivestimenti, previa corretta messa in opera, i valori possono essere considerati coincidenti tra di loro e, quindi, valgono le uguaglianze [17];

$$\Delta L_{situ} = \Delta L_{lab} \quad (\text{dB}) \quad \text{e} \quad \Delta L_{d,situ} = \Delta L_{d,lab} \quad (\text{dB}) \quad (2.45)$$

La componente di trasmissione diretta è espressa mediante la relazione:

$$L_{n,Dd} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} \quad (\text{dB}) \quad (2.46)$$

dove  $\Delta L$  (dB) è l'attenuazione del livello di pressione sonora dovuta alla presenza di pavimento galleggiante e  $\Delta L_n$  (dB) è l'attenuazione del livello di pressione sonora dovuta alla presenza di un ulteriore rivestimento (controsoffitto) [17].

Per ciascuna delle vie, la trasmissione laterale  $L_{n,ij}$  (dB) viene determinata mediante l'equazione:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{i,situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log (S_i/S_j) \quad (2.47)$$

dove  $L_{n,situ}$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del pavimento;  $R_{i,situ}$  (dB) è il potere fonoisolante dell'elemento eccitato (pavimento);  $R_{j,situ}$  (dB) è il potere fonoisolante per trasmissione diretta dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente ricevente;  $\Delta R_{j,situ}$  (dB) è l'incremento del potere fonoisolante dovuto ai rivestimenti interni dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente ricevente;  $S_i$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento di separazione  $i$ ,  $S_j$  (m<sup>2</sup>) è l'area dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente ricevente e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  (dB) è la differenza dell'isolamento medio di vibrazioni del giunto [17].

Quest'ultima grandezza è determinata in base all'indice di riduzione delle vibrazioni così come segue:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \right); \quad \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \quad (\text{dB}) \quad (2.48)$$

con le lunghezze equivalenti di assorbimento degli elementi  $i$  e  $j$ :

$$a_{i,situ} = \frac{2, 2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ (m)} \quad a_{j,situ} = \frac{2, 2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ (m)} \quad (2.49)$$

dove  $f_{ref}$  (Hz) è la frequenza di riferimento pari a 1000 Hz [17].

La grandezza  $K_{ij}$  (dB) è correlata alla trasmissione della potenza vibratoria attraverso un giunto tra elementi strutturali, normalizzata per renderla invariabile ed è espressa dalla seguente relazione [17]:

$$K_{ij} = \left( \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \right) + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \text{ (dB)} \quad (2.50)$$

dove:

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \text{ (dB)} \quad (2.51)$$

è l'isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$ , quando viene eccitato l'elemento  $i$  e

$$D_{v,ji} = L_{v,j} - L_{v,i} \text{ (dB)} \quad (2.52)$$

è l'isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$ , quando viene eccitato l'elemento  $j$ . Le altre grandezze che costituiscono l'equazione 2.50 sono:  $l_{ij}$  (m) è la lunghezza del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$ ;  $a_i$  (m) è la lunghezza di assorbimento equivalente dell'elemento  $i$  e  $a_j$  (m) è la lunghezza di assorbimento equivalente dell'elemento  $j$  [17].

Nella normativa [17] sono riportati i limiti del modello di calcolo appena descritto. Uno dei limiti più rilevante è che l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L$ , misurata su un pavimento compatto, non può essere utilizzata combinata a pavimenti in legno o altri pavimenti composti leggeri.

## 2.2.4 Modello semplificato

L'applicazione di questo metodo è limitata agli ambienti sovrapposti ed ai pavimenti omogenei. La trasmissione laterale è considerata in modo globale. La relazione che esprime l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico  $L'_{n,w}$  è :

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \text{ (dB)} \quad (2.53)$$

dove  $L_{n,w,eq}$  (dB) è l'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato del pavimento,  $\Delta L_w$  (dB) è l'indice di

valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora del rivestimento della pavimentazione e  $K$  (dB) è la correzione per la trasmissione dei rumori di calpestio attraverso gli elementi laterali omogenei, da estrapolare dal prospetto della norma (Tabella 2.1) [17].

Massa per unità di area dell'elemento divisorio (kg/m <sup>2</sup> )	Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari (kg/m <sup>2</sup> )								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tabella 2.1: Termine di correzione  $K$  per la trasmissione laterale [17]

I dati acustici in ingresso degli elementi dovrebbero essere i risultati di prove di laboratorio normate e i singoli indici di valutazione per esprimere le prestazioni degli elementi sono calcolati in conformità alla EN ISO 717-2 [19]. Se i dati di laboratorio non sono disponibili si può ricorrere alle formule sperimentali per pavimenti di uso comune contenute dell'appendice B della norma [17].

Ad esempio, per pavimenti omogenei in calcestruzzo, l'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_{n,w,eq}$  (dB) può essere determinato a partire dalla massa per unità di area,  $m'$  (kg/m<sup>2</sup>), con la seguente relazione:

$$L'_{n,w,eq} = 164 - 35 \log \frac{m'}{[1 \text{ kg/m}^2]} \quad (\text{dB}) \quad (2.54)$$

e si tratta di una formula di tipo previsionale che può essere utilizzata per diverse tipologie di solaio che secondo il prospetto della normativa [17] si comportano come strutture omogenee.

Per quanto riguarda la valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora da calpestio  $\Delta L$  dei pavimenti galleggianti si seguono le indicazioni riportate nell'appendice C della normativa [17].



In assenza di valori di laboratorio, si possono applicare le seguenti formule, rispettivamente per pavimenti galleggianti in cemento sabbioso o asfalto di calcio e pavimenti galleggianti in asfalto o a secco [17]:

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.55)$$

$$\Delta L = 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.56)$$

dove  $f$  (Hz) è la frequenza centrale delle bande di ottava o di terzi di ottava,  $f_0$  (Hz) è la frequenza centrale del sistema calcolata dalla relazione:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.57)$$

in cui  $s'$  (MN/m<sup>3</sup>) è la rigidità dinamica per unità di area dello strato resistente e  $m'$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa per unità di area del pavimento galleggiante.

### 2.2.5 Accuratezza dei modelli

I modelli di calcolo forniscono una previsione delle prestazioni degli edifici ed è difficile specificare, per tutte le applicazioni, il livello di accuratezza delle previsioni, poiché entrano in gioco molti fattori (adattabilità della situazione rispetto al modello, il tipo di elementi e di giunti, ecc.) [17]. Tuttavia, la norma fornisce alcune direttive: per il modello dettagliato la previsione dell'indice di valutazione per la trasmissione verticale è corretta con uno scarto tipo di  $L'_{n,w}$  pari a 2 dB e per la trasmissione orizzontale, invece, ha un errore sistematico variabile da 0 dB a 5 dB, con uno scarto tipo di  $L'_{n,w}$  pari a 3 dB. Con riferimento al modello semplificato, gli esempi di calcolo con questo modello hanno evidenziato che circa il 60% dei valori della previsione hanno un intervallo di  $\pm 2$  dB rispetto ai valori misurati, mentre il 100% varia entro un intervallo di  $\pm 4$  dB [17].

## 2.3 Aggiornamento della UNI EN ISO 12354: 2016

La norma sviluppata dal CEN sarà acquisita a livello internazionale dalla ISO e le novità introdotte dalla UNI EN ISO 12354 interesseranno principalmente le parti 1 e 2.

L'aggiornamento si prefigge come obiettivo il miglioramento del modello dettagliato della trasmissione laterale da 100 Hz a 3150 Hz e del modello di

calcolo semplificato e il dare maggior spazio a formulazioni specifiche per strutture costituite da elementi leggeri.

### 2.3.1 Novità introdotte nella parte prima

La prima novità importante è l'ampliamento del metodo. La classificazione degli elementi che costituiscono il sistema è cambiata: non si parla più di strutture pesanti e leggere, ma di strutture omogenee, dove il fattore determinante è il tempo di riverberazione strutturale  $T_s$  (come strutture in calcestruzzo), e strutture non omogenee, influenzate maggiormente dal fattore di smorzamento dei singoli elementi  $\eta$ . Quindi, per la prima tipologia si continua a far fede a ciò che veniva illustrato nella vecchia normativa [15], mentre per la seconda vengono fornite nuove indicazioni.

#### Trasmissione laterale nel modello dettagliato

Secondo la nuova normativa, per i nuovi elementi come:

- strutture con doppie pareti come muri a telaio in legno,
- elementi con fattori di smorzamento interno maggiori di 0,03,
- elementi che sono rigidamente connessi agli elementi strutturali circostanti,

gli indici di potere fonoisolante della trasmissione laterale  $R_{ij}$  (dB) sono calcolati mediante la seguente equazione [1]:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{l_0 l_{ij}}} \quad (2.58)$$

in cui l'isolamento medio normalizzato di vibrazioni  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB) del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$  è descritto dalla relazione:

$$\overline{D_{v,ij,n}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} - 10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{m,i} S_{m,j}}} \quad (\text{dB}) \quad (2.59)$$

dove  $S_{m,i}$  e  $S_{m,j}$  ( $\text{m}^2$ ) sono le aree rispettive degli elementi  $i$  e  $j$  sopra le quali il livello di velocità può essere considerato mediato.

Per trasformare questo valore in un valore *in situ* deve essere applicata la relazione:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{i,situ} S_{j,situ}}} \quad (\text{dB}) \quad (2.60)$$

All'interno dell'appendice E dell'aggiornamento [1] sono riportati diversi casi e le rispettive formule empiriche per la determinazione di  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB).

### Trasmissione laterale nel modello semplificato

Non sono state apportate modifiche al metodo semplificato, riferito alle strutture omogenee, che è rimasto fedele a quello descritto nella normativa precedente. Invece, per le strutture leggere gli indici di valutazione  $R'_{ij,w}$  riferiti ai percorsi  $Ff$ ,  $Df$  e  $Fd$  possono essere determinati in base all'isolamento medio normalizzato laterale di vibrazioni  $D_{n,f,ij}$  (dB), mediante la relazione:

$$R_{ij,w} = D_{n,f,ij,w} - 10 \log \frac{l_{lab} S_s}{l_{ij} A_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.61)$$

dove per gli elementi laterali orizzontali di solito  $l_{lab} = 4, 5$  m e per gli elementi laterali verticali di solito  $l_{lab} = 2, 5$  m [1].

### Appendice B: potere fonoisolante

Per il calcolo dell'efficienza di radiazione in frequenza non sono state avanzate modifiche, ad eccezione di una correzione per la formula 2.13 nel caso  $f < f_c$ . Invece, è stata introdotta una novità importante per il calcolo del potere fonoisolante affinché si possa considerare la sola trasmissione di risonanza. Il potere fonoisolante effettivo si calcola per ogni frequenza mediante la relazione:

$$R^* = R + 10 \log \frac{\sigma_a}{\sigma_b} \quad (\text{dB}) \quad (2.62)$$

ovvero si applica un fattore di correzione al valore di laboratorio  $R$  che dipende dai fattori di radiazione degli elementi.

Per strutture non omogenee leggere è indispensabile applicare questa correzione in quanto gli elementi che le costituiscono hanno fattori di smorzamento significativi. Ciò incide sul valore della frequenza di coincidenza e per queste strutture la frequenza di coincidenza ricade nel range delle medio-alte frequenze. In buona approssimazione si può applicare un fattore di correzione pari a 0 dB per frequenze al di sotto della frequenza critica e pari a 8 dB per frequenze al di sopra di questa.

Inoltre, in un prospetto della nuova normativa [1] sono riportate le proprietà meccaniche e fisiche tipiche dei materiali da costruzione e per la prima volta vengono considerati dei materiali non tradizionali (Tabella 2.2).

### Incremento del potere fonoisolante dovuto a rivestimenti

Per l'incremento del potere fonoisolante rimane inalterato il discorso sulle tipologie di rivestimenti che sono fissate ad elementi strutturali di base omogenei. L'aggiornamento ha introdotto i criteri per poter calcolare le prestazioni previsionali di strati aggiuntivi interni ed esterni per diverse situazioni

Materiali	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità delle onde quasi longitudinali $c_L$ (m/s)	Fattore di smorzamento interno $\eta_{int}$
Calcestruzzo	2200	3800	0,005
Blocchi di silicato di calcio	1800	2500	0,01
Blocchi di calcestruzzo aerati in aut.	400-800	1900	0,0125
Blocchi di aggregati leggeri	1400	2200	0,01
Blocchi di aggregati densi	2000	3200	0,01
Mattoni	1500-2000	2700	0,01
Cartongesso (natural gypsum)	860	1490	0,0141
Cartongesso (flue gas)	680	1810	0,0125
Truciolato	760	2200	0,01

Tabella 2.2: Proprietà meccaniche e fisiche di alcuni materiali da costruzione [1]

di riferimento. Le formule previsionali e i grafici che descrivono l'andamento dei vari incrementi di potere fonoisolante sono illustrate nell'appendice D della nuova norma [1].

### Indici di riduzione delle vibrazioni

Nell'appendice E dell'aggiornamento della normativa, viene esplicitato il modello per la determinazione della trasmissione laterale per elementi omogenei:

$$K_{ij} = -10 \log \gamma_{ij} + 5 \log \frac{f_{c,j}}{f_{ref}} = -10 \log \gamma_{ij} + 5 \log \frac{f_{c,i}}{f_{ref}} \quad (\text{dB}) \quad (2.63)$$

$$K_{ij} = -10 \log \eta_{ij} \frac{\pi^2 S_i}{c_{0l_{ij}}} \sqrt{\frac{f_{c,i}}{f_{c,j}}} \sqrt{f_{ref} f} \quad (\text{dB}) \quad (2.64)$$

dove i fattori  $\gamma_{ij}$  e  $\eta_{ij}$  sono rispettivamente il fattore di potenza di trasmissione aerea e il fattore di perdita accoppiato, tra gli elementi  $i$  e  $j$ .

I fattori possono essere determinati attraverso il metodo basato sulla *Statistical Energy Analysis* (SEA) o da misure sperimentali.

Sono confermate le tipologie di giunti nel caso di strutture omogenee pesanti e viene illustrato nel dettaglio il modello di calcolo per la trasmissione laterale nel caso di giunti con materiali resilienti interposti (Figura 2.5).

Novità importanti riguardano l'ampliamento delle casistiche dei giunti per le strutture leggere. Vengono fornite formule empiriche per il calcolo degli indici di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  dei giunti per strutture leggere in CLT e per il calcolo degli isolamenti medi di vibrazione normalizzati  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB) per strutture leggere in legno [1].

Infine, nell'appendice J, la norma illustra le linee guida per affrontare i casi reali, dando indicazioni su come schematizzare le giunzioni non riconducibili agli schemi delle appendici E ed F.

Nell'appendice K viene esposto nel dettaglio il metodo per la stima dell'incertezza da associare alla previsione del potere fonoisolante totale, a partire da quelle dei singoli dati in ingresso.

### 2.3.2 Novità introdotte nella parte seconda

Per il calpestio è stato fatto principalmente un lavoro di miglioramento sulla trasmissione laterale nel modello dettagliato, di sviluppo del modello semplificato e sono state avanzate proposte per la trattazione di strutture parzialmente omogenee, come solaio in latero-cemento.

#### Trasmissione laterale nel modello dettagliato

Secondo la nuova normativa, per nuovi elementi come:

- strutture con doppie pareti come muri a telaio in legno,
- elementi con fattori di smorzamento interno maggiori di 0,03,
- elementi che sono rigidamente connessi agli elementi strutturali circostanti,

risulta:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{i,situ} S_{j,situ}}} \quad (\text{dB}) \quad (2.65)$$

in cui l'isolamento medio normalizzato di vibrazioni  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB) del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$  è descritto dalla relazione:

$$\overline{D_{v,ij,n}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} - 10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{m,i} S_{m,j}}} \quad (\text{dB}) \quad (2.66)$$

dove  $S_{m,i}$  e  $S_{m,j}$  ( $\text{m}^2$ ) sono le aree rispettive degli elementi  $i$  e  $j$  sopra le quali il livello di velocità può essere considerato mediato [20].

Per questi elementi i livelli di pressione sonora normalizzati per la trasmissione laterale  $L_{n,ij}$  dell'equazione 2.47 diventano:

$$L_{n,ij} = L_n - \Delta L_i + \left( \frac{R_i - R_j}{2} \right) - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \left( \frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.67)$$

### Modello semplificato

Per il calpestio, nel modello semplificato aggiornato, la trasmissione laterale non viene più trattata secondo un indice  $K$  globale (Tabella 2.1), che compariva nella formula 2.53 per il calcolo dell'indice di valutazione del livello di pressione normalizzato.

Secondo le nuove istruzioni il calcolo deve essere eseguito distinguendo la trasmissione diretta e la trasmissione laterale.

Per la trasmissione diretta, l'indice di valutazione del livello di pressione sonora normalizzato al calpestio risulta [20]:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,0,eq} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \quad (\text{dB}) \quad (2.68)$$

Per la trasmissione laterale, per i percorsi  $ij$ , gli indici di valutazione del livello di pressione sonora normalizzato al calpestio, analogamente all'equazione 2.47, si calcolano come segue:

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \left( \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} \right) - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - 10 \log \left( \frac{S_i}{l_{ij} l_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.69)$$

e se il valore per la riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  risulta dipendente dalla frequenza allora si consideri un valore medio sul range in bande di un terzo di ottava tra 125 Hz e 2000 Hz [20].

Per i nuovi elementi introdotti nell'aggiornamento della normativa gli indici di valutazione del livello di pressione sonora normalizzato al calpestio, per i percorsi  $ij$ , sono determinati dalla relazione:

$$L_{n,ij,w} = L_{nf,ij,lab,w} + 10 \log \left( \frac{S_{i,lab} l_{ij}}{S_i l_{ij,lab} l_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.70)$$

dove per gli elementi laterali orizzontali di solito  $l_{lab}$  è pari a 4, 5 m [20].

Inoltre, sono state introdotte nuove formule previsionali per la determinazione dell'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_{n,w,eq}$  (dB).

Per strutture orizzontali di separazione omogenee, come solai in calcestruzzo o misto sabbia, può essere utilizzata la relazione:

$$L'_{n,w,eq} = 164 - 35 \log \frac{m'}{[1 \text{ kg/m}^2]} \quad (\text{dB}) \quad (2.71)$$

mentre per strutture orizzontali parzialmente omogenee, come solai in laterocemento prefabbricati e non, viene utilizzata l'equazione:

$$L'_{n,w,eq} = 160 - 35 \log \frac{m'}{[1 \text{ kg/m}^2]} \quad (\text{dB}) \quad (2.72)$$

a partire dalla massa per unità di area  $m'$  (kg/m<sup>2</sup>) [20].

In conclusione, è possibile calcolare l'indice di valutazione totale del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L'_{n,w}$  per ambienti sovrapposti dalla relazione [20]:

$$L'_{n,w} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{n,d,w}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij,w}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.73)$$

e invece, per ambienti adiacenti, dalla relazione [17]:

$$L'_{n,w} = 10 \log \left( \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij,w}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.74)$$

dove  $L_{n,d}$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione diretta,  $L_{n,ij}$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale e  $n$  è il numero degli elementi in gioco.





# Capitolo 3

## Caso studio di un edificio in legno

### 3.1 Presentazione del caso studio

Il caso studio è un edificio residenziale situato nel comune di Coriano (Rn), realizzato dalla Ecotectsistemi Srl, un'impresa specializzata nel campo delle costruzioni in legno.



Figura 3.1: Vista prospettica del caso studio da Sud

La scelta ricade su questo edificio per il quale, in un precedente lavoro di tesi anno 2011-2012, sono stati raccolti tutti i dati di misura in opera delle prove di isolamento acustico, condotte sia durante il cantiere sia a fine lavori. In questo modo è possibile effettuare un confronto diretto tra i valori



Figura 3.2: Vista prospettica del caso studio da Nord

misurati e simulati, al fine di verificare l'attendibilità del modello di calcolo. Le misurazioni in opera per l'isolamento acustico sono state effettuate in conformità al gruppo di norme UNI EN 140, mentre le misure sperimentali sui livelli di velocità delle vibrazioni sono state condotte nel rispetto della UNI EN 10848-1 [14].

La struttura portante dell'edificio è costituita da un telaio in legno lamellare, con solai in CLT (cross laminated timber) e chiusure verticali leggere multi-strato. Queste scelte costruttive consentono una forte flessibilità progettuale e distributiva degli spazi interni e una rapida realizzazione dell'edificio.

L'edificio presenta tre piani fuori terra più uno interrato ed è costituito da otto unità immobiliari, distribuite sui tre piani.

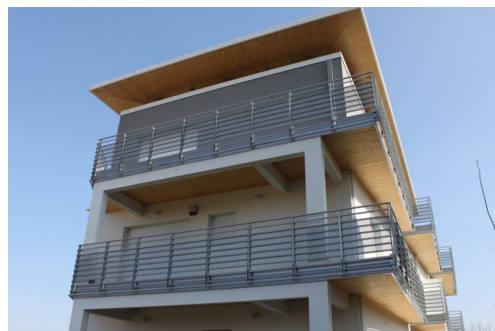


Figura 3.3: Foto dell'edificio in esame a fine lavori, rispettivamente della facciata Sud e della facciata retrostante [21]

### 3.1.1 Elaborati tecnici

La distribuzione interna di ciascuna unità immobiliare può essere vista nelle piante e sezioni riportate di seguito.

Si osserva che l'accesso comune, situato a Sud, porta al vano scale-ascensore centrale, da cui si accede alle diverse unità abitative (Figura 3.5(a)).

All'interno, gli ambienti sono dotati tutti di controsoffitto e delimitati da pareti multistrato che possono essere distinte in tre diverse tipologie: involucro esterno, pareti divisorie tra unità immobiliari e pareti interne.

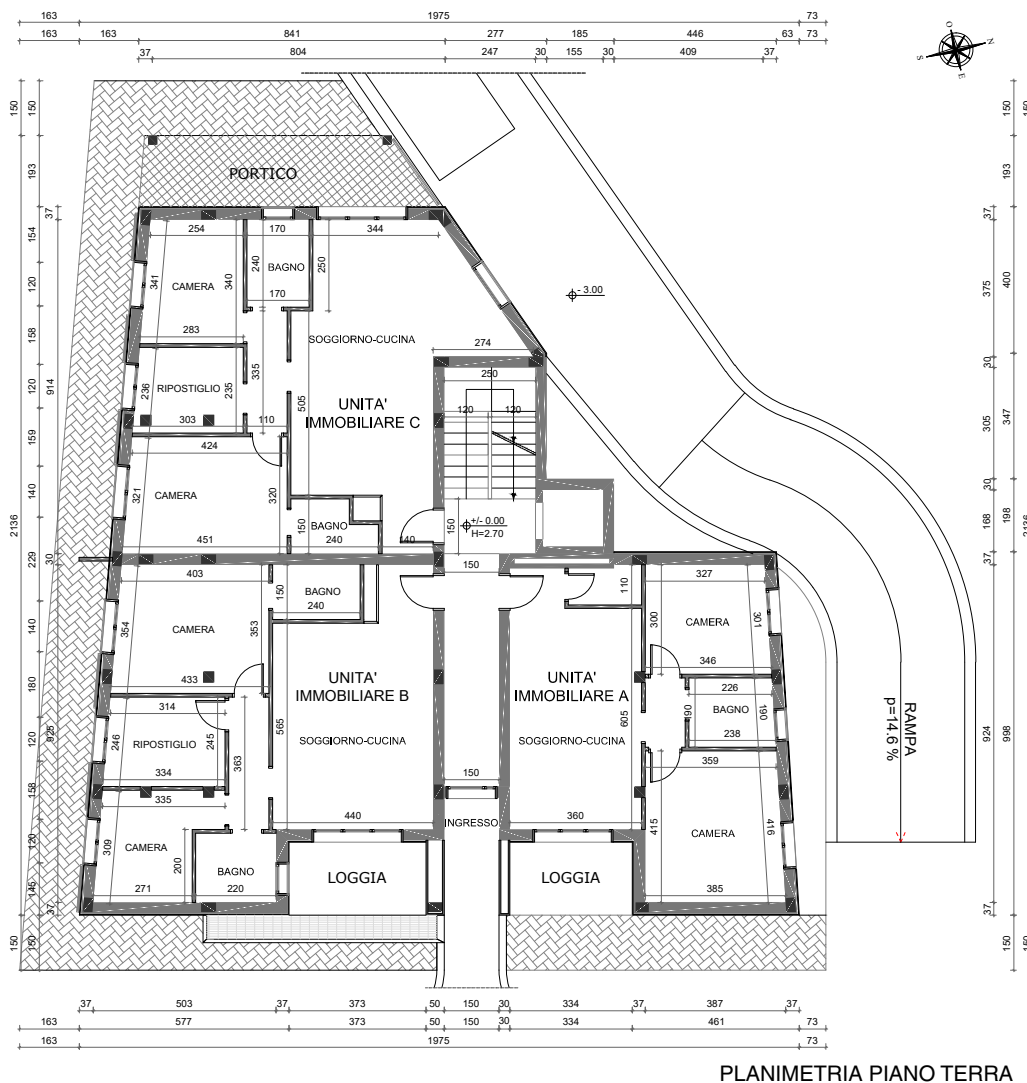


Figura 3.4: Planimetria del piano terra

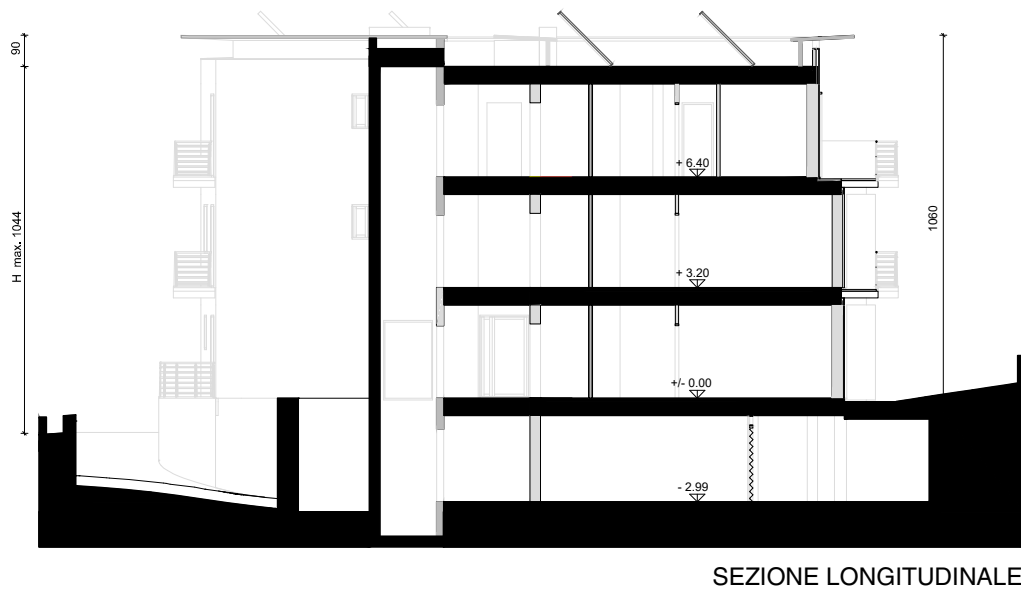
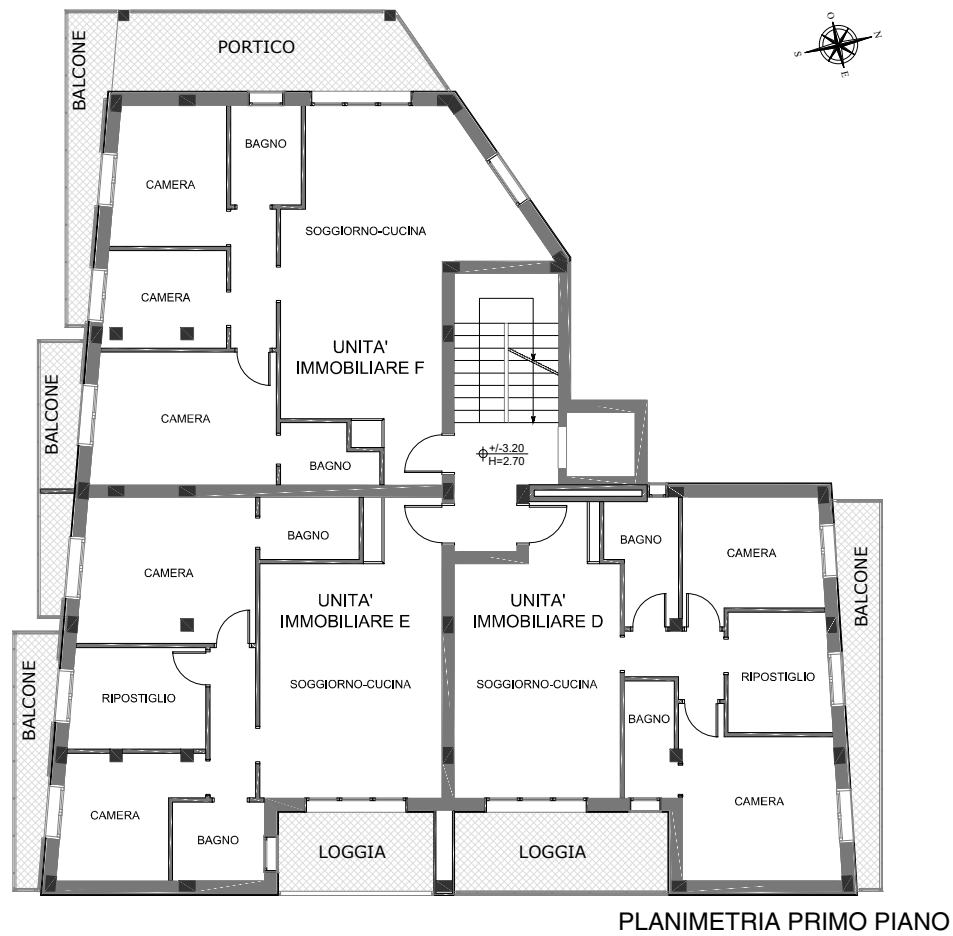
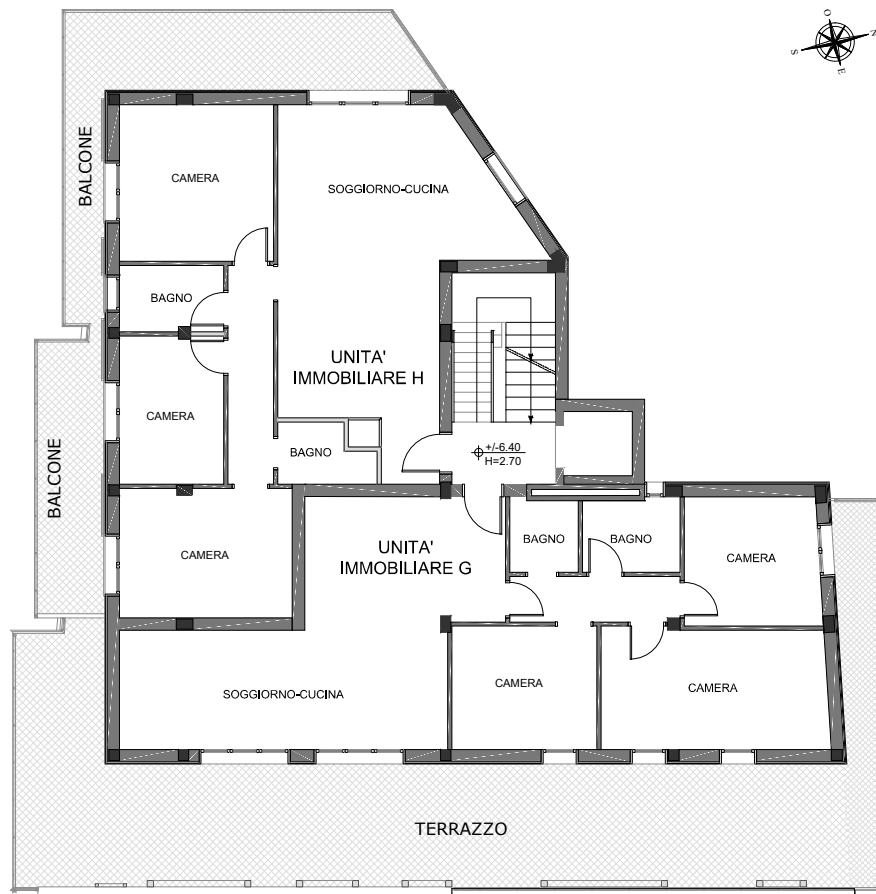


Figura 3.5: Disegni tecnici: in alto la planimetria del primo piano e in basso la sezione longitudinale



PLANIMETRIA SECONDO PIANO



SEZIONE TRASVERSALE

Figura 3.6: Disegni tecnici: in alto la planimetria del secondo piano e in basso la sezione trasversale



(a) Prospetto principale



(b) Prospetto Sud-Est

Figura 3.7: Due dei prospetti dell'edificio-caso studio

## 3.2 Modellazione acustica degli elementi che compongono l'edificio

### 3.2.1 Modellazione delle camere sovrapposte

Il modello di calcolo per la previsione dei parametri di isolamento acustico dell'elemento di separazione orizzontale è applicato su una camera da letto dell'unità immobiliare C, evidenziata nella figura 3.8.

I solai interni hanno come base strutturale un pannello in CLT di spessore 180 mm, su cui poggiano gli strati aggiuntivi, e sono dotati di controsoffitto. Le pareti, evidenziate a destra nella figura 3.8, sono di due tipologie diverse: l'involucro esterno è un sistema di pannelli multistrato per un spessore totale di 330 mm, invece, le pareti interne sono costituite da pannelli sandwich di spessore 110 mm.

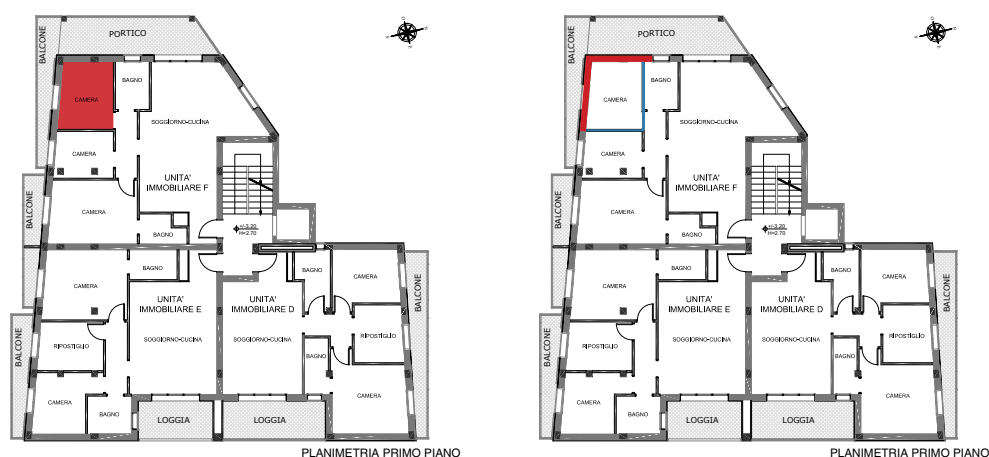


Figura 3.8: Planimetria del primo piano: a sinistra è evidenziato il solaio dei due ambienti sovrapposti; a destra sono evidenziate le due diverse tipologie di chiusure verticali

### Solaio

Di seguito sono riportati: il dettaglio bidimensionale degli elementi unito ad una tabella riassuntiva con le caratteristiche fisiche dei singoli strati e i grafici dell'andamento del potere fonoisolante e del livello di calpestio, con i relativi indici di valutazione del solaio grezzo. I dati di ingresso del livello di pressione sonora normalizzato al calpestio del solaio grezzo sono estrapolati dall'articolo *Direct impact sound insulation of cross laminated timber floors with e without toppings* [22], pubblicato dal gruppo di ricerca universitario canadese.

Per i dati di ingresso del potere fonoisolante si fa riferimento allo studio condotto dal gruppo di ricerca di Bologna pubblicato nell'articolo [12].

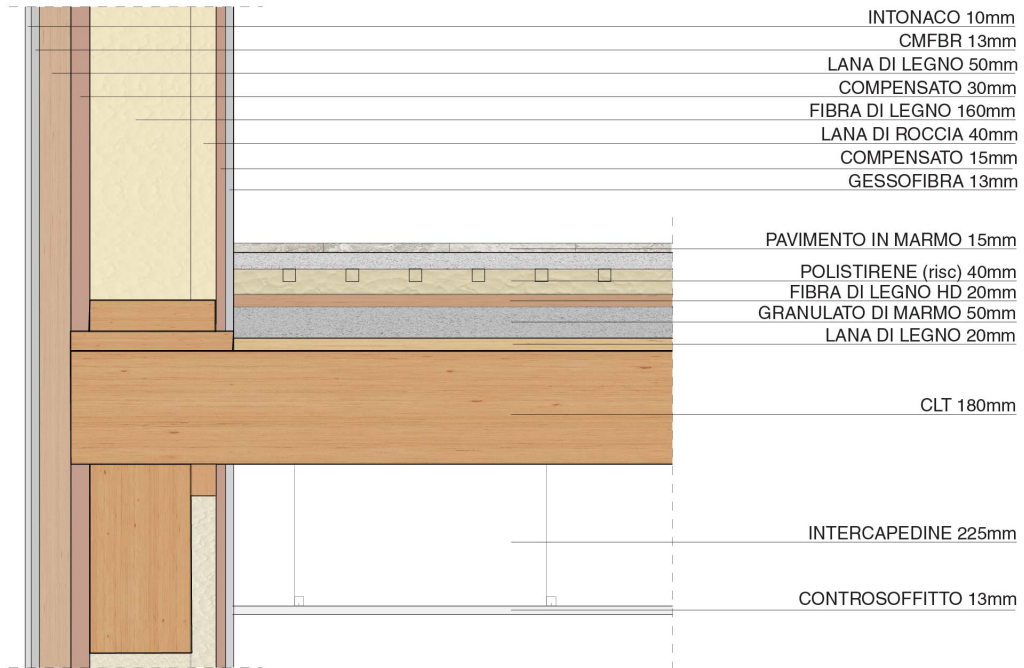


Figura 3.9: Dettaglio costruttivo del solaio interno con la parete esterna

#### SOLAIO FINITO CON CONTROSOFFITTO

Elemento	Spessore (m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Massa areica (kg/m <sup>2</sup> )
Pavimento	0,015	1800	27,0
Gessofibra	0,020	1150	23,0
Lamiera distanziatrice	0,006	800	4,8
Polistirene (risc.)	0,040	100	4,0
Fibra di legno HD	0,020	500	10,0
Graniglia di marmo	0,050	2000	100,0
Lana di legno	0,020	500	10,0
CLT	0,180	600	108,0
Intercapedine	0,225	-	-
Controsoffitto	0,013	1150	15,0
<b>TOTALE</b>	<b>0,589</b>	<b>8600</b>	<b>301,8</b>

Figura 3.10: Caratteristiche fisiche del solaio interno finito con controsoffitto



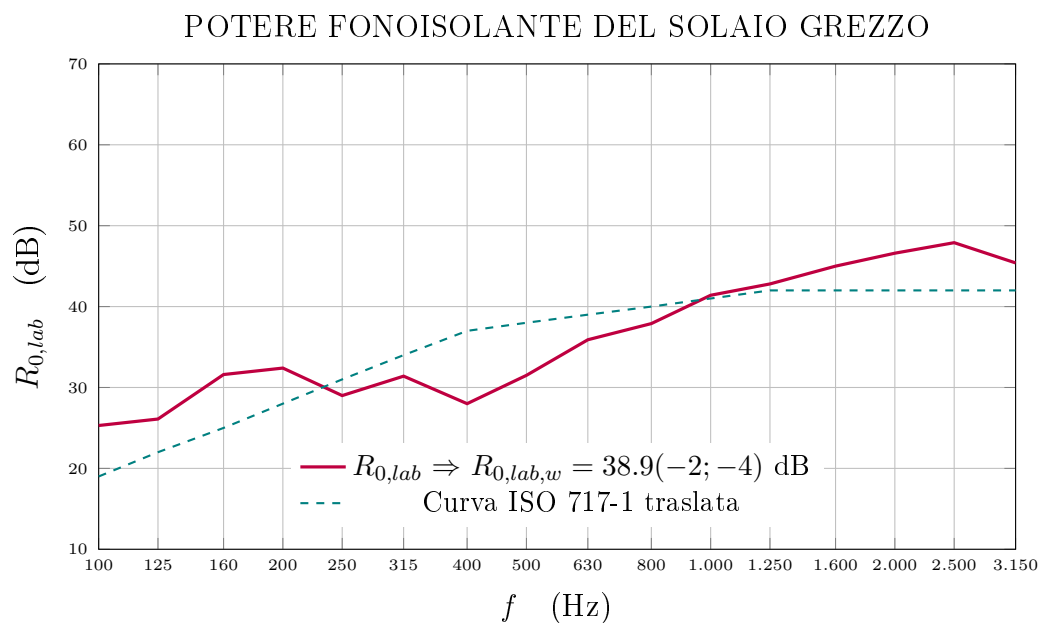
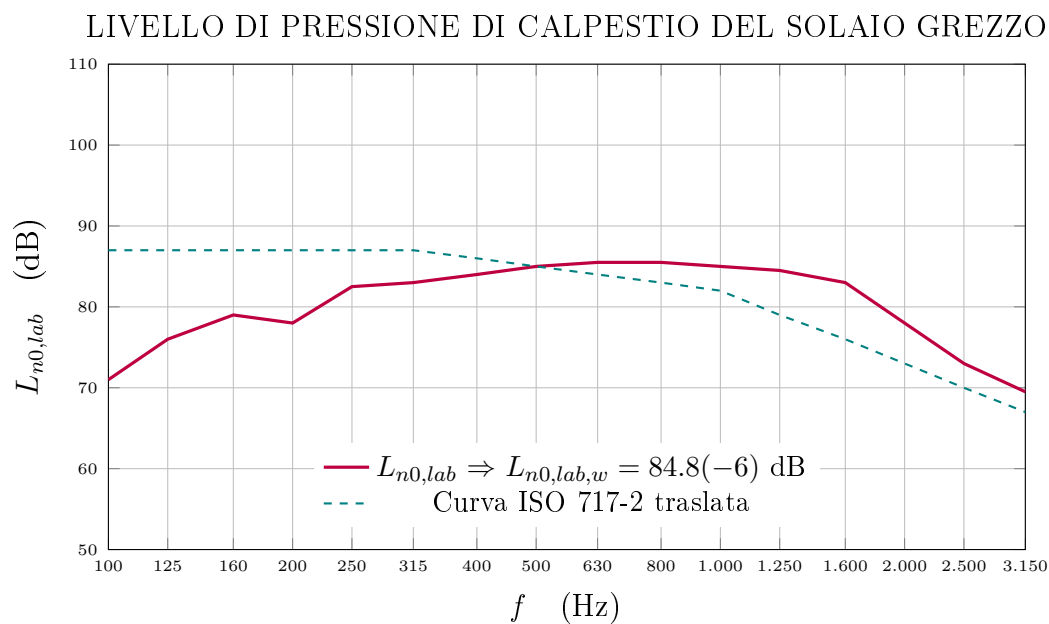


Figura 3.11: Grafici dell'andamento delle curve di  $L_{n0,lab}$  e di  $R_{0,lab}$  del solaio grezzo, nel range di frequenze da 100 Hz a 3150 Hz in bande di terzo di ottava

### Parete esterna

I dati di ingresso del potere fonoisolante della parete esterna  $R_{lab}$  sono calcolati con il software *Insul 8.0*. Facendo riferimento alla figura 3.9, si

riportano nella tabella 3.1 le caratteristiche fisiche degli elementi che costituiscono la parete esterna e nel grafico in figura 3.12 l'andamento del potere fonoisolante.

PARETE ESTERNA			
Elemento	Spessore (m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Massa areica (kg/m <sup>2</sup> )
Intonaco	0,010	1800	18,0
Fibrocemento	0,013	1300	16,3
Lana di legno	0,050	80	4,0
Compensato	0,030	450	13,5
Fibra di legno	0,160	160	25,6
Lana di roccia	0,040	50	2,0
Compensato	0,015	450	6,8
Gessofibra	0,013	1150	14,4
TOTALE	0,330	5440	100,5

Tabella 3.1: Caratteristiche fisiche della parete esterna

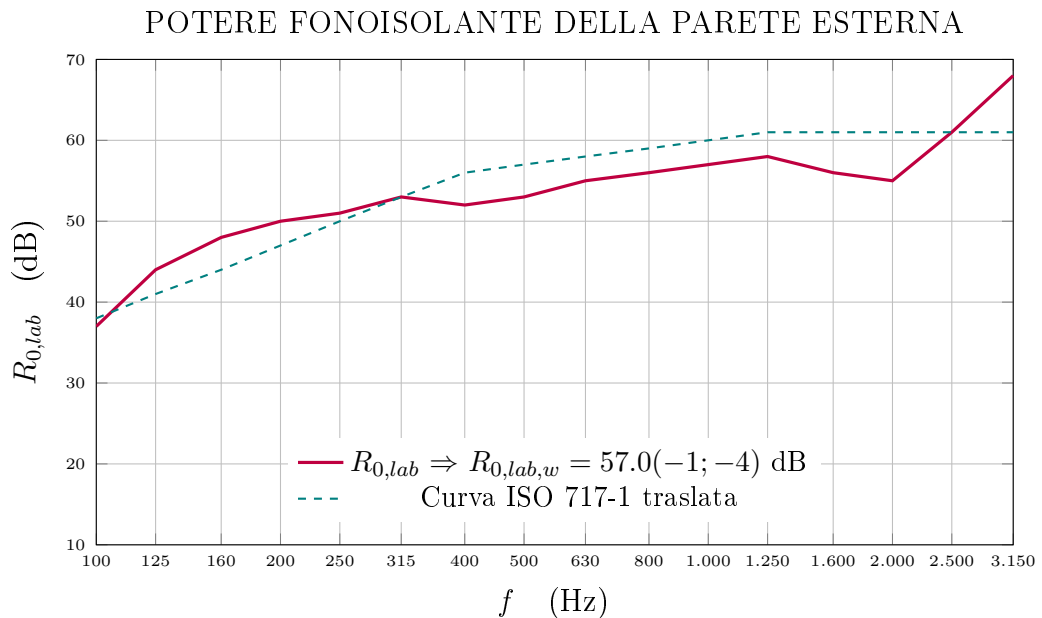


Figura 3.12: Grafico dell'andamento della curva di  $R_{0,lab}$  della parete esterna, nel range di frequenze da 100 Hz a 3150 Hz in bande di terzo di ottava

### Parete interna

I dati di ingresso del potere fonoisolante della parete interna  $R_{lab}$  sono calcolati con il software *Insul 8.0*.

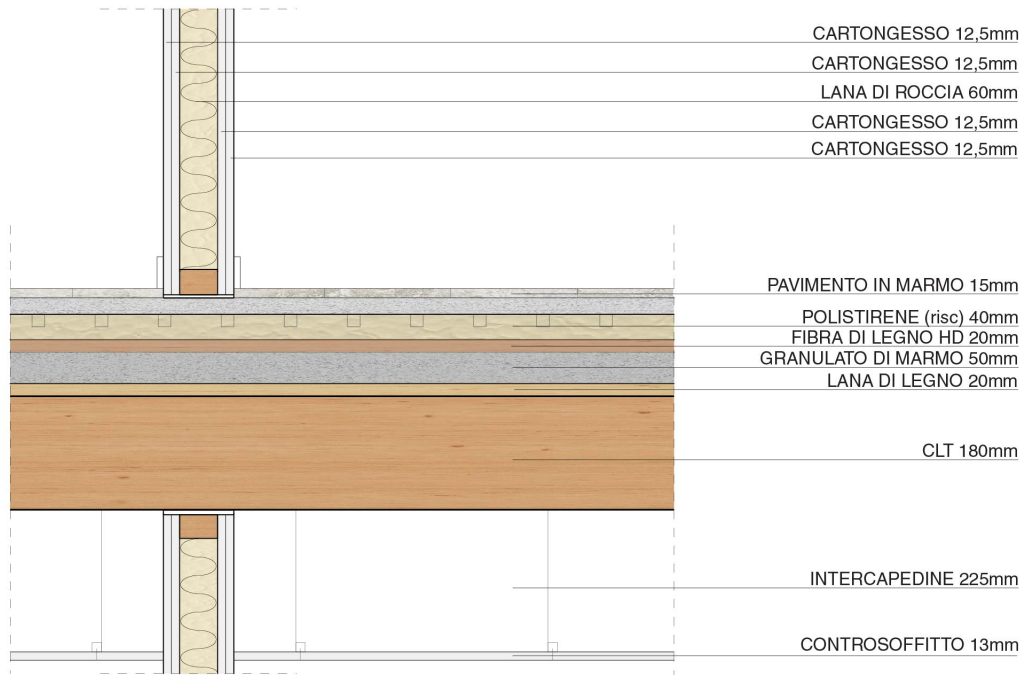


Figura 3.13: Dettaglio tridimensionale della parete interna con il solaio

<b>PARETE INTERNA</b>			
Elemento	Spessore (m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Massa areica (kg/m <sup>2</sup> )
Cartongesso	0,013	875	10,9
Cartongesso	0,013	875	10,9
Lana di roccia	0,060	50	3,0
Cartongesso	0,013	875	10,9
Cartongesso	0,013	875	10,9
<b>TOTALE</b>	<b>0,110</b>	<b>3550</b>	<b>46,8</b>

Tabella 3.2: Caratteristiche fisiche della parete interna

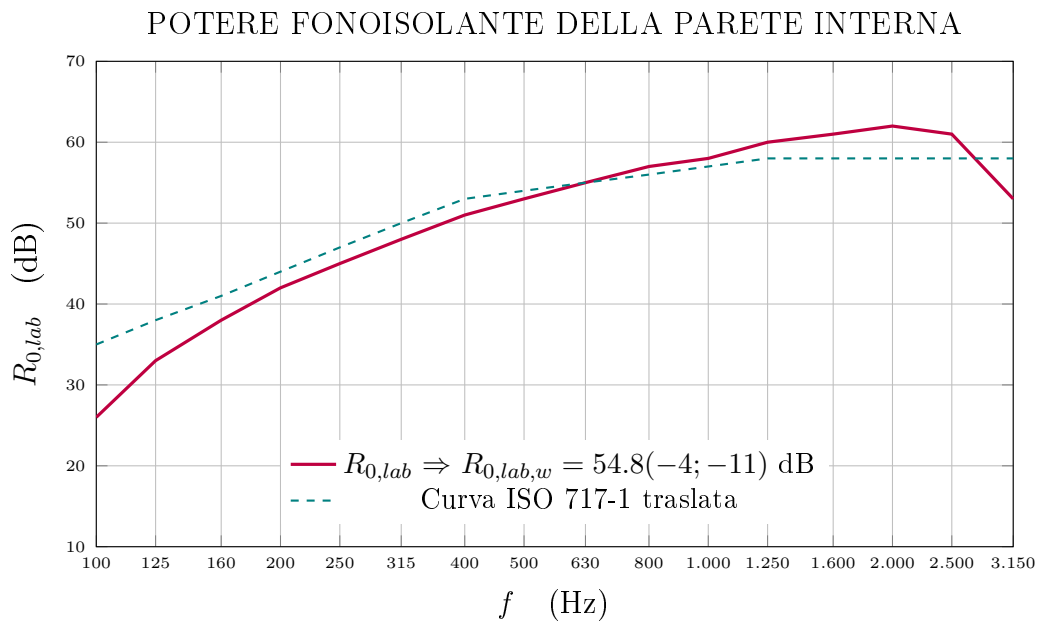


Figura 3.14: Grafico dell'andamento della curva di  $R_{0,lab}$  della parete interna, nel range di frequenze da 100 Hz a 3150 Hz in bande di terzo di ottava

### 3.2.2 Modellazione delle camere adiacenti

Il modello di calcolo per la previsione dei parametri di isolamento acustico dell'elemento di separazione verticale è applicato a due camere da letto di due unità immobiliari differenti, evidenziate nella figura 3.15.

#### Parete divisoria

La parete, evidenziata a destra nella figura 3.15, poggia sul solaio ed è una parete multistrato per un spessore totale di 320 mm.

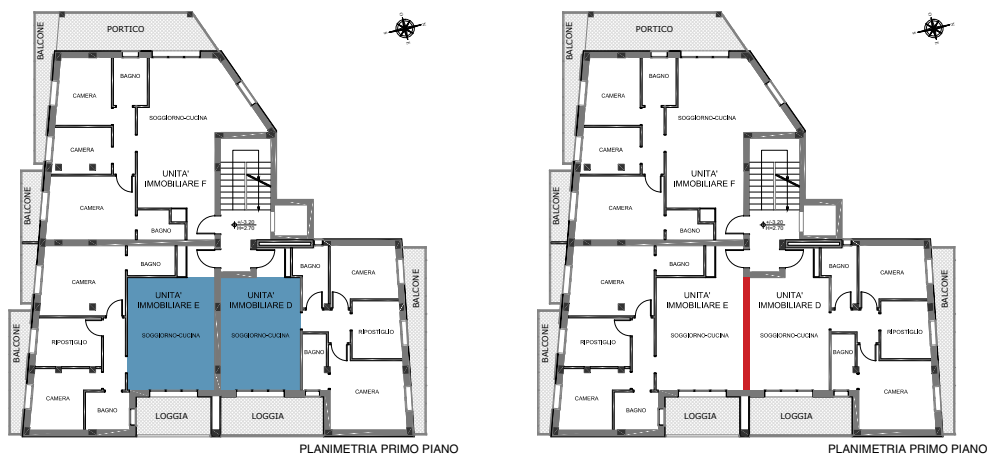


Figura 3.15: Planimetria del primo piano: a sinistra sono evidenziati i due ambienti adiacenti; a destra è evidenziata la chiusura tra i due ambienti considerati

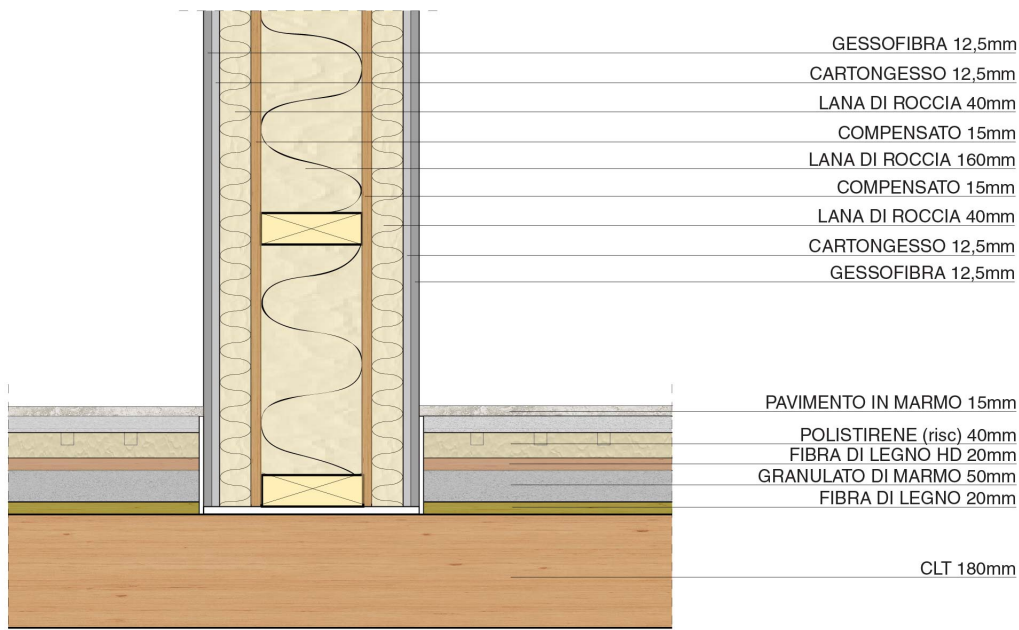


Figura 3.16: Dettaglio costruttivo della parete divisoria con il solaio

**PARETE DIVISORIA**

Elemento	Spessore (m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Massa areica (kg/m <sup>2</sup> )
Gessofibra	0,013	1150	14,4
Cartongesso	0,013	875	10,9
Lana di roccia	0,040	50	2,0
Compensato	0,015	600	9,0
Lana di roccia	0,160	50	8,0
Compensato	0,015	600	9,0
Lana di roccia	0,040	50	2,0
Cartongesso	0,013	875	10,9
Gessofibra	0,013	1150	14,4
<b>TOTALE</b>	<b>0,320</b>	<b>5400</b>	<b>80,6</b>

Figura 3.17: Caratteristiche fisiche della parete divisoria

I dati di ingresso del potere fonoisolante della parete divisoria  $R_{lab}$  sono calcolati con il software *Insul 8.0*.

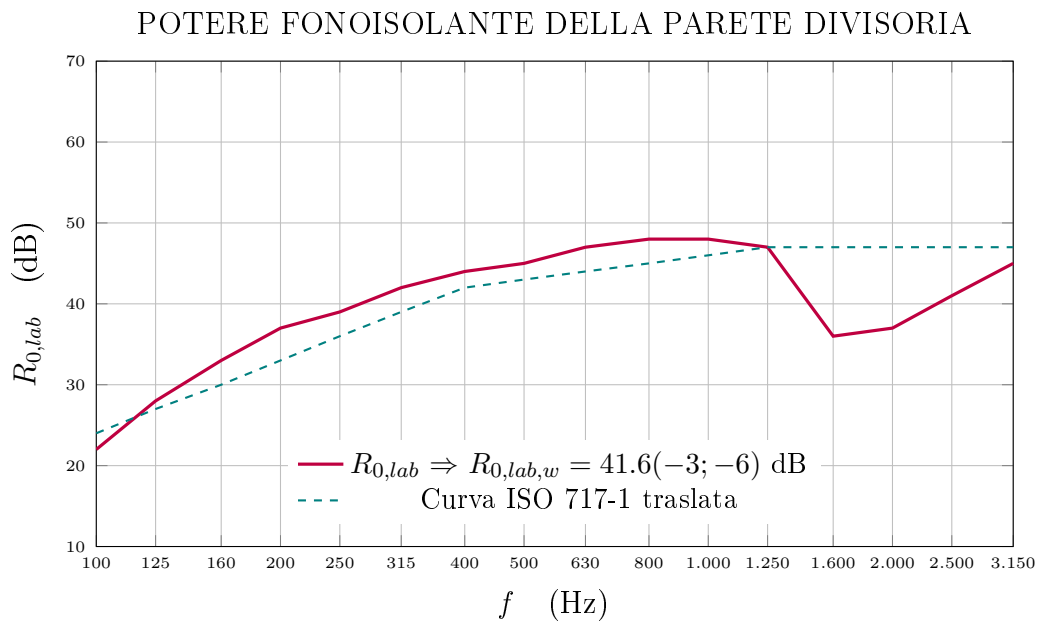


Figura 3.18: Grafico dell'andamento della curva di  $R_{0,lab}$  per la parete divisoria, nel range di frequenze da 100 Hz a 3150 Hz in bande di terzo di ottava

# Capitolo 4

## Il nuovo modello di calcolo previsionale

### 4.1 Presentazione del modello nelle sue parti

Il metodo di calcolo viene illustrato nelle sue fasi principali e sviluppato, passo passo, considerando la frequenza di 2000 Hz che si presta particolarmente all'analisi di più casi.

Si fa riferimento prima al modello di calcolo applicato al caso di due ambienti sovrapposti per la determinazione di  $L'_n$  (dB) del solaio di separazione (Caso A) e successivamente al caso di due ambienti adiacenti per la determinazione del potere fonoisolante  $R'$  (dB) della parete divisoria tra due unità immobiliari (Caso B).

In generale, per la determinazione del potere fonoisolante apparente  $R'$  si fa riferimento alle formule 2.8 e 2.9, richiamate qui di seguito:

$$R_{D,d} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} \quad (\text{dB})$$

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (\text{dB})$$

e il risultato atteso si calcola mediante la somma logaritmica di tutti i contributi di trasmissione sonora, mediante l'equazione:

$$R' = -10 \log \left( 10^{\frac{-R_d}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{-R_{ij}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4.1)$$

Analogamente, per la previsione del livello totale normalizzato di pressione sonora di calpestio  $L'_n$ , si richiamano le formule 2.46 e 2.47:

$$L_{n,d} = L_n - \Delta L - \Delta L_d \quad (\text{dB})$$

$$L_{n,ij} = L_n - \Delta L + \left( \frac{R_i - R_j}{2} \right) - \Delta R_j - K_{ij} - 10 \log \left( \frac{l_{ij} l_0}{S_j} \right) \quad (\text{dB})$$

e il valore atteso è calcolato mediante la formula:

$$L'_n = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4.2)$$

### 4.1.1 Caso A: ambienti sovrapposti

#### Modellazione geometrica degli ambienti

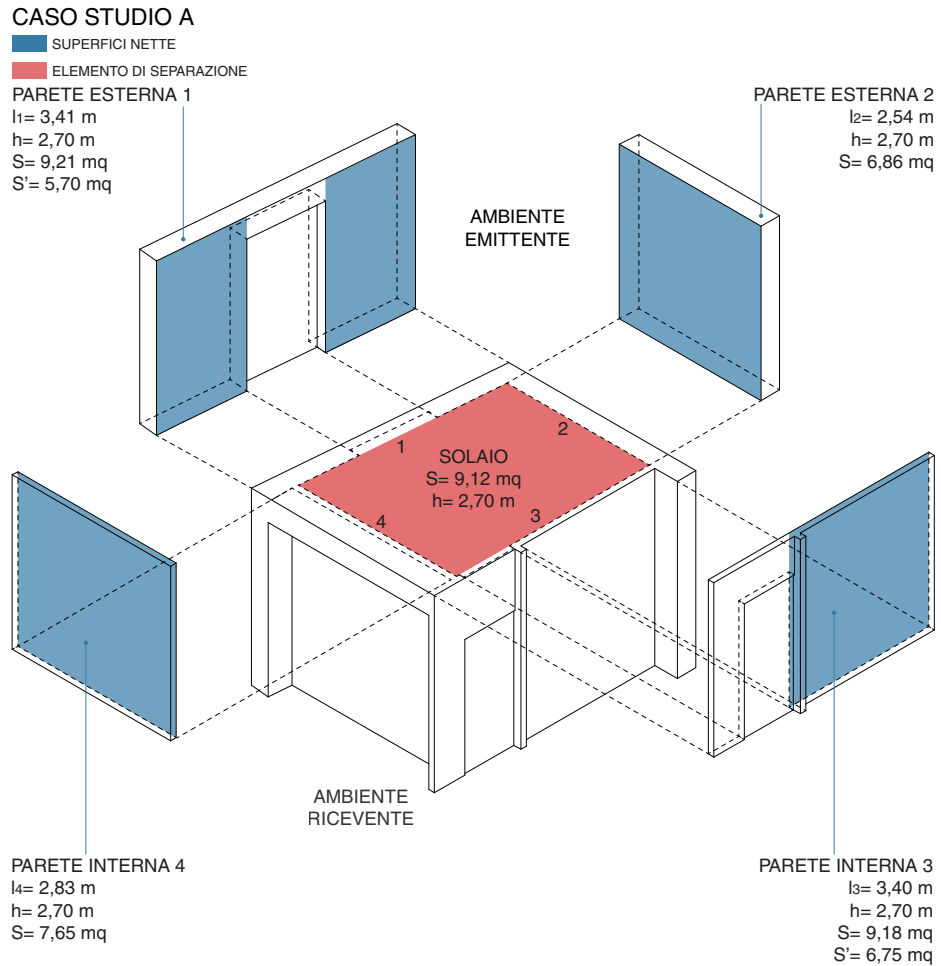


Figura 4.1: Esploso assonometrico, in evidenza le aree effettive degli elementi (Caso A)

La modellazione geometrica degli ambienti è fondamentale per capire le peculiarità degli elementi del sistema e, per questa ragione, bisogna in-



dividuaire l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente e scomporli nei loro elementi base (Figura 4.1).

In prima approssimazione, osservando la figura 4.2, il modello geometrico della situazione reale è stato ricondotto ad un modello più semplice di due ambienti sovrapposti senza aperture esterne o interne, eliminando anche le partizioni che si innestano sulle pareti ma che non influiscono sul calcolo.

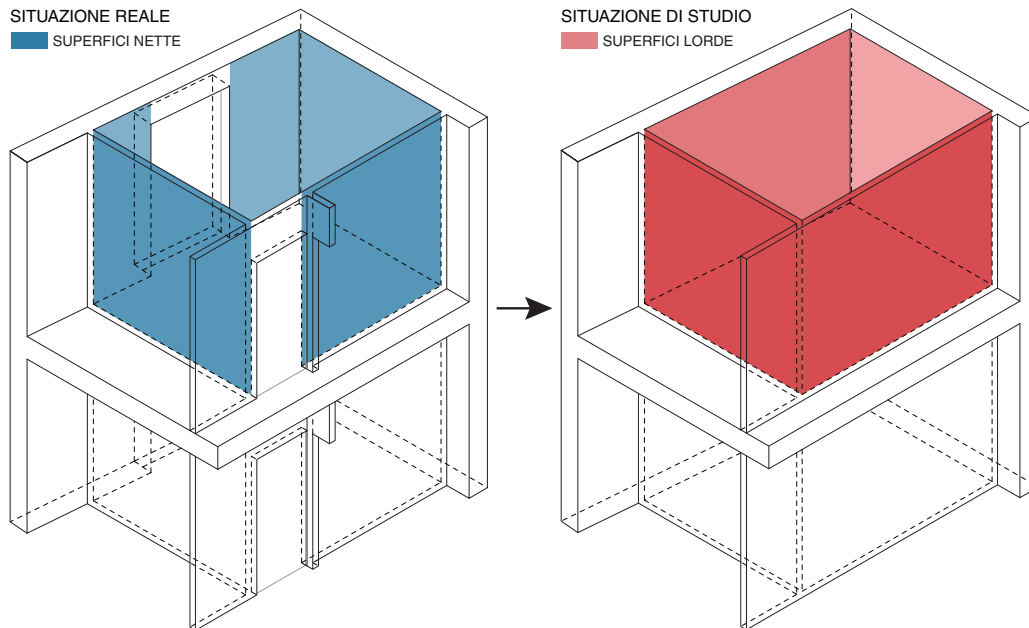


Figura 4.2: Semplificazione del modello geometrico reale in un modello geometrico ideale (Caso A)

In riferimento a quanto descritto nel capitolo precedente, dove le stratigrafie degli elementi di separazione e laterale sono state analizzate nel dettaglio (Figure 3.9, ??, 3.13), ora consideriamo solo le parti di elementi collegate tra di loro e, quindi, interessate dalla trasmissione laterale.

### Dati geometrici ed acustici di ingresso

Riportati nella tabella 4.1, i dati di input fondamentali sono:

- le superfici lorde  $S$  ( $\text{m}^2$ ) e le masse areiche totali  $m'$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) degli elementi,
- gli spessori  $s$  (mm) e i fattori di perdita o di smorzamento interni  $\eta_{int}$  della sola parte dell'elemento che irradia energia sonora nell'ambiente,
- le velocità delle onde longitudinali  $c_L$  (m/s) nel mezzo,

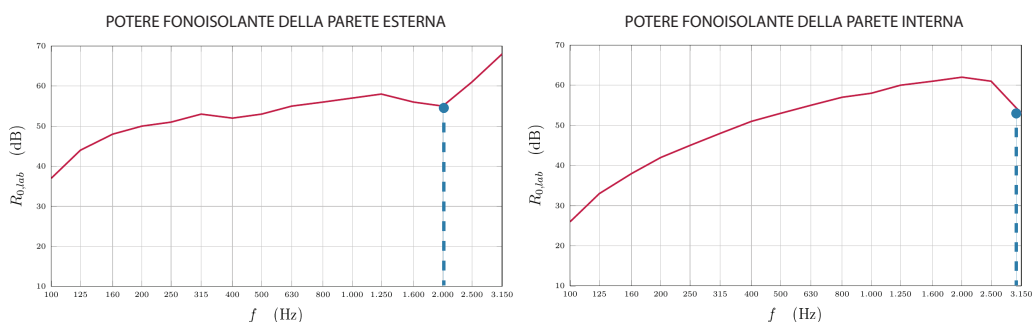
Elementi	Area $S$ ( $m^2$ )	Massa areica $m'$ ( $kg/m^2$ )	Spessore $s$ ( $mm$ )	Fattore di perdita $\eta_{int}$	Velocità delle onde $c_L$ ( $m/s$ )	Frequenza critica $f_c$ ( $Hz$ )
ELEMENTI DI SEPARAZIONE						
Solaio	9,12	108,0	180,0	0,05 [10]	1150 [10]	310
Pavimento gall.	9,12	179,0	171,0	-	-	-
ELEMENTI LATERALI						
Parete esterna 1	9,21	100,5	12,5	0,01 [4]	2500	2055
Parete esterna 2	6,86	100,5	12,5	0,01 [4]	2500	2055
Parete interna 3	9,18	46,8	12,5	0,01 [4]	1800	2854
Parete interna 4	7,64	46,8	12,5	0,01 [4]	1800	2854

Tabella 4.1: Valori delle principali grandezze di input del modello di calcolo (Caso A)

- la frequenza critica dell'elemento  $f_c$  (Hz) che corrisponde alla frequenza critica della sola parte che irradia, calcolata mediante l'equazione 1.20.

Per il valore della velocità delle onde longitudinali  $c_L$  (m/s) per il pannello in CLT di spessore 180 mm è stato utilizzato un valore sperimentale riportato nella *Guide to Calculating Airbone Sound Transmission in Buildings* [10], nella sezione dedicata a misure di laboratorio sul CLT.

Per i pannelli della parete esterna ed interna verso il lato interno della stanza, rispettivamente in compensato più gessofibra e in cartongesso, non si hanno a disposizione dati sperimentali di laboratorio. Per questa ragione, questi ultimi sono stati dedotti da un'osservazione critica dei grafici delle curve di andamento del potere fonoisolante, estrapolando il valore minimo di frequenza per cui si verifica il fenomeno della coincidenza (Figura 4.3).

Figura 4.3: Grafici del potere fonoisolante della parete esterna e interna, dove si può notare una caduta di  $R$  proprio in corrispondenza della frequenza critica

Per i parametri acustici di ingresso, non avendo dati di laboratorio di misure specifiche al caso studio, si è scelto di utilizzare:

- i dati sperimentali raccolti nell'articolo *Direct impact sound insulation of CLT floors with e without toppings* [22] per il livello di calpestio del solaio grezzo  $L_{n,0}$  (dB);
- i dati sperimentali raccolti nell'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [12] per il potere fonoisolante del solaio  $R_i$  (dB);
- il software *Insul 8.0* per stimare gli andamenti dei poteri fonoisolanti  $R_j$  delle pareti verticali.

Per scegliere i contributi aggiuntivi  $\Delta R_{floating}$ ,  $\Delta R_{ceiling}$ ,  $\Delta L_{floating}$  e  $\Delta L_{ceiling}$ , sono state considerate due stratigrafie di solai, con e senza controsoffitto, analoghe al caso studio ed analizzate precedentemente in laboratorio [12]. Nella tabella 4.2 vengono riportati i valori appena descritti.

Frequenza $f$ (Hz)	Pavimento galleggiante		Controsoffitto	
	$\Delta R_{floating}$ (dB)	$\Delta L_{floating}$ (dB)	$\Delta R_{ceiling}$ (dB)	$\Delta L_{ceiling}$ (dB)
100	7,7	12,9	-5,2	12,8
125	15,3	19,0	2,7	6,2
160	17,7	19,1	4,1	10,4
200	18,7	26,9	0,3	5,9
250	23,0	33,8	2,7	14,9
315	22,0	30,8	2,9	21,4
400	25,4	32,1	6,9	22,0
500	23,6	32,4	4,0	22,0
630	21,0	35,5	2,3	22,6
800	23,5	36,5	3,0	24,7
1000	24,0	36,3	2,9	24,7
1250	23,4	35,8	1,8	25,3
1600	24,9	38,3	1,8	25,9
2000	26,2	40,1	2,1	25,1
2500	24,5	39,5	0,7	21,3
3150	30,9	41,1	0,7	23,6

Tabella 4.2: Contributi degli strati aggiuntivi (Caso A)

Nella tabella 4.3 sono riportati i dati di input acustici: i poteri fonoisolanti  $R_{situ}$  (dB) di tutti gli elementi del sistema e il livello di pressione sonora normalizzato  $L_{n,situ}$  (dB) dell'elemento di separazione. Per i valori di  $R_{situ}$  (dB) si è scelto di applicare la correzione degli 8 dB indicata nell'aggiornamento della norma [1] per la trasmissione risonante e, quindi, come dati di partenza si assumono i valori di  $R_{situ}^*$  (dB).

Frequenza $f$ (Hz)	Solaio ( $i$ )			Parete esterna ( $j = 1$ )		Parete esterna ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )		Parete interna ( $j = 4$ )	
	$R_{i,situ}$ (dB)	$R_{i,situ}^*$ (dB)	$L_{n,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)
100	25,3	33,3	71,0	37,0	45,0	37,0	45,0	26,0	34,0	26,0	34,0
125	26,1	34,1	76,0	44,0	52,0	44,0	52,0	33,0	41,0	33,0	41,0
160	31,6	39,6	79,0	48,0	56,0	48,0	56,0	38,0	46,0	38,0	46,0
200	32,4	40,4	78,0	50,0	58,0	50,0	58,0	42,0	50,0	42,0	50,0
250	29,0	37,0	82,5	51,0	59,0	51,0	59,0	45,0	53,0	45,0	53,0
315	31,4	31,4	83,0	53,0	61,0	53,0	61,0	48,0	56,0	48,0	56,0
400	28,0	28,0	84,0	52,0	60,0	52,0	60,0	51,0	59,0	51,0	59,0
500	31,5	31,5	85,0	53,0	61,0	53,0	61,0	53,0	61,0	53,0	61,0
630	35,9	35,9	85,5	55,0	63,0	55,0	63,0	55,0	63,0	55,0	63,0
800	37,9	37,9	85,5	56,0	64,0	56,0	64,0	57,0	65,0	57,0	65,0
1000	41,4	41,4	85,0	57,0	65,0	57,0	65,0	58,0	66,0	58,0	66,0
1250	42,8	42,8	84,5	58,0	66,0	58,0	66,0	60,0	68,0	60,0	68,0
1600	45,0	45,0	83,0	56,0	64,0	56,0	64,0	61,0	69,0	61,0	69,0
2000	46,6	46,6	78,0	55,0	63,0	55,0	63,0	62,0	70,0	62,0	70,0
2500	47,9	47,9	73,0	61,0	61,0	61,0	61,0	61,0	69,0	61,0	69,0
3150	45,4	45,4	69,5	68,0	68,0	68,0	68,0	53,0	53,0	53,0	53,0

Tabella 4.3: Valori di potere fonoisolante  $R_{situ}$  (dB) e di livello di pressione di calpestio  $L_{n,situ}$  (dB), in bande di un terzo di ottava, per ciascun elemento (Caso A)

### Fattori di radiazione

Si procede con il calcolo del fattore di radiazione per le onde libere.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per l'elemento solaio ( $l_1 = 3,41$ m e  $l_2 = 2,54$ m):

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - 310/2000}} = 1,0532$$

$$\sigma_2 = 4 \cdot 3,41 \cdot 2,54 \left( \frac{2000}{340} \right)^2 = 2974$$

$$f_{11} = \frac{340^2}{4 \cdot 310} \left( \frac{1}{3,41^2} + \frac{1}{2,54^2} \right) = 22,45 \text{ Hz}$$

Si verifica il caso in cui  $f_{11} = 22,45 \leq f_c = 310/2$  e quindi si ha:  
 $f = 2000 \geq f_c = 310 \Rightarrow \sigma = \sigma_1 = \mathbf{1,0532}$

- per l'elemento parete esterna 1 ( $l_1 = 3,41$ m e  $l_2 = 2,70$ m):

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - 2055/2000}} = \textit{impossibile}$$

$$\sigma_2 = 4 \cdot 3,41 \cdot 2,54 \left( \frac{2000}{340} \right)^2 = 1274$$

$$f_{11} = \frac{340^2}{4 \cdot 2055} \left( \frac{1}{3,41^2} + \frac{1}{2,70^2} \right) = 3,14 \text{ Hz}$$

Si verifica il caso in cui  $f_{11} = 3,14 \leq f_c = 2055/2$  e quindi si ha:

$$f < f_c \Rightarrow \sigma = \frac{2(3,41 + 2,70)340}{3,41 \cdot 2,70} \delta_1 + \delta_2 = 2,6687 \Rightarrow \sigma = \mathbf{2}$$

con

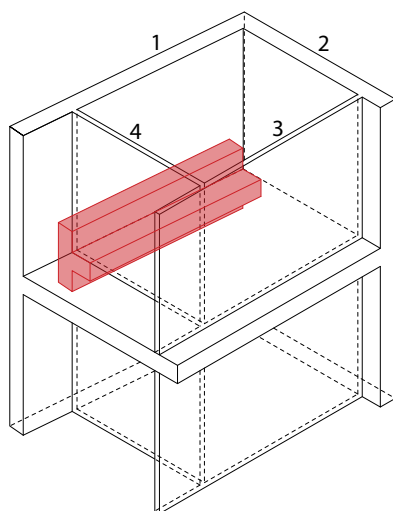
$$\delta_1 = \frac{(1 - 0,9865^2) \ln \left( \frac{1 + 0,9865}{1 - 0,9865} \right) + 2 \cdot 0,9865}{4\pi^2(1 - 0,9865^2)^{1,5}} = 12,1526$$

$$\text{con } \lambda = \sqrt{\frac{2000}{2055}} = 0,9865$$

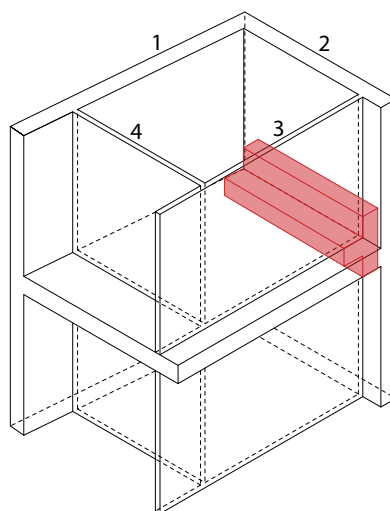
$$\delta_2 = 0, \quad f = 2000 > \frac{f_c = 2055}{2}$$

### Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti

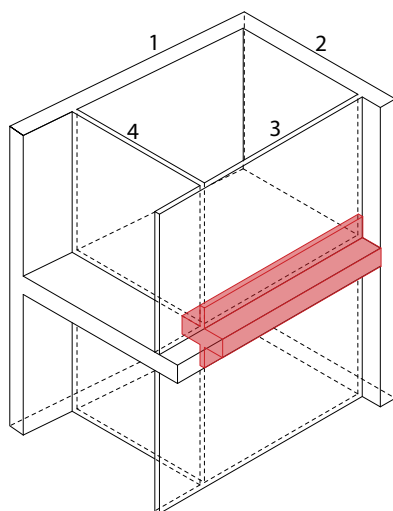
All'inizio della fase di calcolo degli indici di riduzione delle vibrazioni, occorre individuare il numero e la tipologia di giunti che interessano l'elemento di separazione considerato.



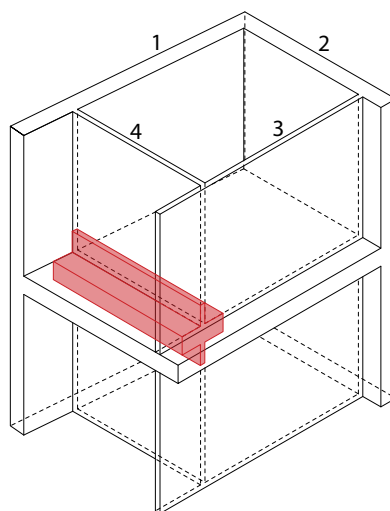
(a) Percorsi  $D1$ ,  $1d$  e  $11$



(b) Percorsi  $D2$ ,  $2d$  e  $22$



(c) Percorsi  $D3$ ,  $3d$  e  $33$



(d) Percorsi  $D4$ ,  $4d$  e  $44$

Figura 4.4: Giunti per la trasmissione laterale che prende in considerazione il solaio come elemento  $i$  e le pareti come elementi  $j$  (Caso A)

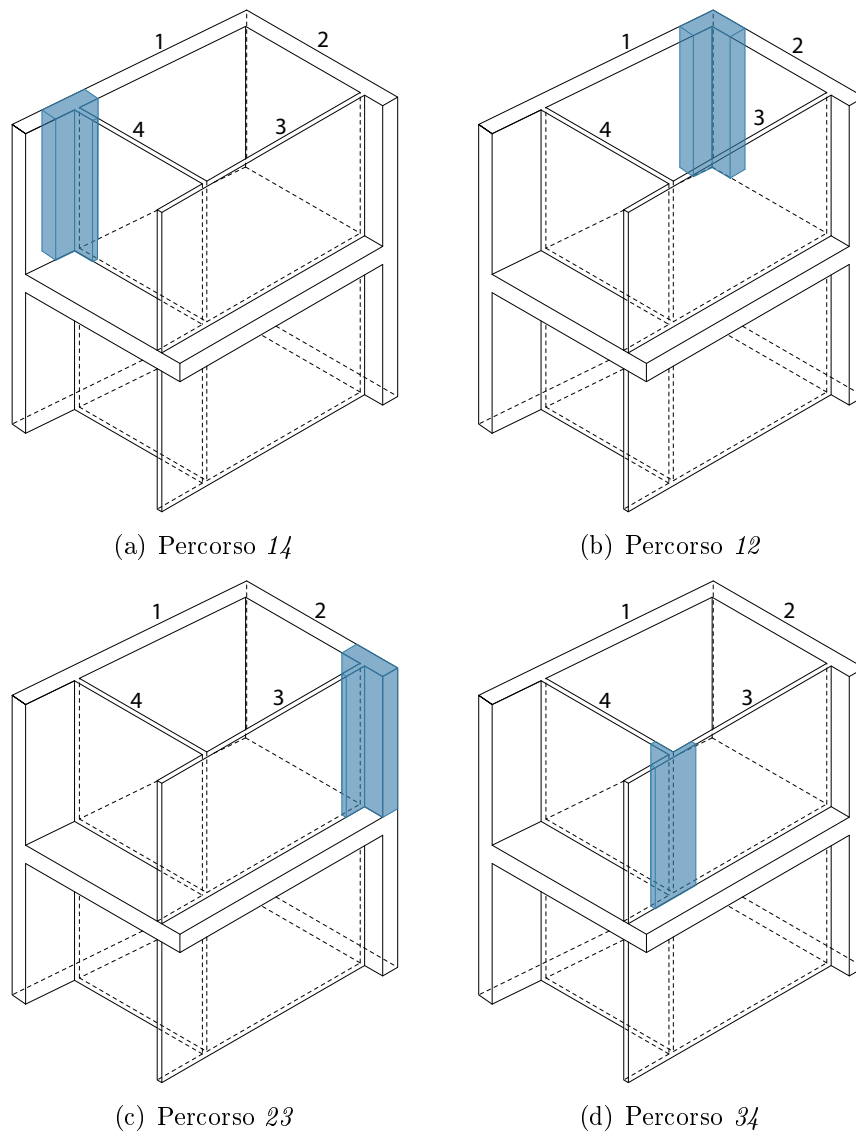


Figura 4.5: Giunti per la trasmissione laterale che considera gli elementi laterali  $j$  (Caso A)

Per il solaio vengono considerati i 4 giunti evidenziati nella figura 4.4. D'ora in poi, a titolo di esempio, si considera il giunto a T tra l'elemento solaio e l'elemento parete esterna 1 e i risultati sono riportati in grassetto.

Le formule empiriche 2.29 utilizzate per queste tipologie di giunti sono quelle di riferimento per i giunti di una parete leggera a doppio strato e di elementi omogenei (Figura 2.8).

Esempio per  $f = 2000$  Hz, con  $l_{ij} = 3,41$  m si ha:

- per il percorso  $D1$  il solaio è l'elemento  $i$  e la parete esterna 1 è l'elemento  $j$ :

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m' i} = \log \frac{62,2}{108} = -0,239$$

$$K_{12} = 10 + 10 |-0,239| + 3,3 \log (2000/500) = \mathbf{14,4} \text{ dB}$$

- per il percorso  $1d$  la parete esterna 1 è l'elemento  $i$  e il solaio è l'elemento  $j$ :

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m' i} = \log \frac{108}{62,2} = 0,239$$

$$K_{12} = 10 + 10 |0,239| + 3,3 \log (2000/500) = \mathbf{14,4} \text{ dB}$$

- per il percorso  $11$  l'unico elemento  $i = j = 1$  è la parete esterna 1:

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m' i} = \log 3 = 0,477$$

$$K_{24} = 3,0 + 14,1 \cdot 0,477 + 5,7 \cdot 0,477^2 = \mathbf{11} \text{ dB}$$

Per gli altri percorsi di trasmissione laterale delle pareti si considerano le tipologie di giunti riportati nella 4.5.

Le formule empiriche considerate fanno riferimento ad una delle nuove tipologie introdotte dall'aggiornamento della normativa [1] per le strutture leggere multistrato e sono riportate qui di seguito:

$$\begin{aligned} \overline{D_{v,13,n}} &= 15 + 20 M - 3,3 \log f/f_k \quad (\text{dB}) \text{ e minimo } 10 \text{ dB} \\ \overline{D_{v,12,n}} &= 15 + 10|M| - 3,3 \log f/f_k = \overline{D_{v,23,n}} \quad (\text{dB}) \\ f_k &= 500 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Questo termine deve essere ricondotto al valore di  $\overline{D_{v,ij,situ}}$ :

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{i,situ} S_{j,situ}}} \quad (\text{dB})$$

in cui è noto l'isolamento medio normalizzato di vibrazioni  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB) del giunto tra gli elementi  $i$  e  $j$ .

A questo punto, l'indice di riduzione delle vibrazioni per i giunti  $K_{ij}$  può essere ricavato dalla formula inversa dell'equazione 2.51.



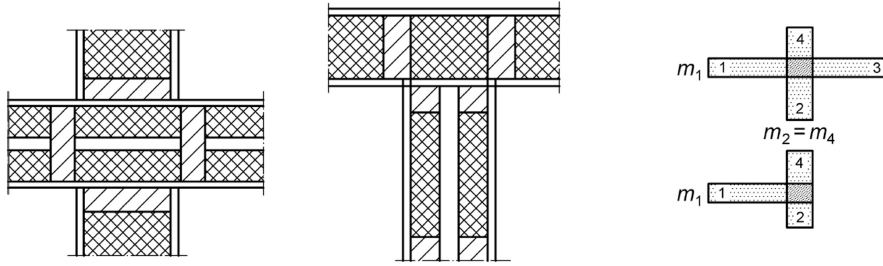


Figura 4.6: Schemi di giunzioni di pareti doppie leggere e elementi omogenei [1]

Avendo a disposizione tutti i dati sugli indici di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  (Tabelle 4.16 e 4.17) è possibile calcolare i coefficienti di assorbimento per le onde flessionali  $\alpha_k$  al giunto  $k$  di lunghezza  $l_k$  (m), utilizzando la formula 2.16. In totale si ottengono i valori:

$$\begin{aligned} \text{Solaio=i} \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,165 \cdot 3,41 + 0,165 \cdot 2,54 + \\ &+ 0,201 \cdot 3,40 + 0,201 \cdot 2,83 = \mathbf{2,239} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete esterna 1=i} \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,145 \cdot 3,41 + 0,020 \cdot 2,70 + \\ &+ 0,145 \cdot 3,41 + 2,272 \cdot 2,70 = \mathbf{7,180} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete esterna 2=i} \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,145 \cdot 2,54 + 0,022 \cdot 2,70 + \\ &+ 0,145 \cdot 2,54 + 2,272 \cdot 2,70 = 6,932 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete interna 3=i} \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,182 \cdot 3,40 + 0,034 \cdot 2,70 + \\ &+ 0,182 \cdot 3,40 + 0,037 \cdot 2,70 = 1,427 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete interna 4=i} \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,182 \cdot 2,83 + 0,034 \cdot 2,70 + \\ &+ 0,182 \cdot 2,83 + 0,034 \cdot 2,70 = 1,211 \end{aligned}$$

### Tempo di riverberazione strutturale

Il tempo di riverberazione strutturale è stimato attraverso le equazioni 2.14 e 2.15.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)		Giunto (b)		Giunto (c)		Giunto (d)	
	$K_{D1,1d}$ (dB)	$K_{11}$ (dB)	$K_{D2,2d}$ (dB)	$K_{22}$ (dB)	$K_{D3,3d}$ (dB)	$K_{33}$ (dB)	$K_{D4,4d}$ (dB)	$K_{44}$ (dB)
100	10,1		10,1		11,3		11,3	
125	10,4		10,4		11,6		11,6	
160	10,8		10,8		12,0		12,0	
200	11,1		11,1		12,3		12,3	
250	11,4		11,4		12,6		12,6	
315	11,7		11,7		13,0		13,0	
400	12,1		12,1		13,3		13,3	
500	12,4		12,4		13,6		13,6	
630	12,7	11,0	12,7	11,0	14,0	11,0	14,0	11,0
800	13,1		13,1		14,3		14,3	
1000	13,4		13,4		14,6		14,6	
1250	13,7		13,7		14,9		14,9	
1600	14,1		14,1		15,3		15,3	
2000	14,4		14,4		15,6		15,6	
2500	14,7		14,7		15,9		15,9	
3150	15,0		15,0		16,3		16,3	

Tabella 4.4: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti del solaio (Fig. 4.4) (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)	Giunto (b)	Giunto (c)	Giunto (d)
	$K_{14}$ (dB)	$K_{12}$ (dB)	$K_{23}$ (dB)	$K_{34}$ (dB)
100	23,1		22,7	24,45
125	22,6		22,2	23,90
160	22,0		21,7	23,27
200	21,6		21,2	22,68
250	21,0		20,7	22,08
315	20,5		20,1	21,45
400	19,9		19,6	20,77
500	19,4		19,0	20,13
630	18,8	-2,0	18,5	19,45
800	18,2		17,9	18,74
1000	17,6		17,3	18,05
1250	17,0		16,7	17,35
1600	16,3		16,0	16,55
2000	14,9		14,8	15,74
2500	13,2		13,0	12,59
3150	12,9		12,7	12,24

Tabella 4.5: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti delle pareti laterali (Fig. 4.5) (Caso A)

- per l'elemento solaio:

$$T_s = \frac{2,2}{f \eta_{tot}} = \frac{2,2}{2000 \cdot 0,0614} = \mathbf{0,02 \text{ s}}$$

dove

$$\begin{aligned} \eta_{tot} &= 0,05 + \frac{2 \cdot 1,29 \cdot 340 \cdot 1,0879}{2\pi 2000 \cdot 108} + \frac{340}{\pi^2 \cdot 29,12 \sqrt{2000 \cdot 310}} \cdot 2,239 \\ &= 0,0614 \end{aligned}$$

- per l'elemento parete esterna 1:

$$T_s = \frac{2,2}{f \eta_{tot}} = \frac{2,2}{2000 \cdot 0,0330} = \mathbf{0,03 \text{ s}}$$

dove

$$\begin{aligned} \eta_{tot} &= 0,01 + \frac{2 \cdot 1,29 \cdot 340 \cdot 2,00}{2\pi 2000 \cdot 14,4} + \frac{340}{\pi^2 5,70 \sqrt{2000 \cdot 2055}} \cdot 7,180 \\ &= 0,0330 \end{aligned}$$

### Isolamento medio di vibrazione del giunto

Avendo a disposizione i dati della trasmissione laterale e i tempi strutturali degli elementi si può calcolare per ogni percorso di trasmissione l'isolamento medio di vibrazione del giunto mediante l'equazione 2.51.

Esempio per  $f = 2000$  Hz, con  $l_{ij} = 3,41$  m si ha:

- per il percorso  $D1$ :

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = 14,4 - 10 \log \left( \frac{3,41}{\sqrt{23,0 \cdot 12,5}} \right) = \mathbf{21,3 \text{ dB}}$$

con

$$\begin{aligned} a_{i,situ} &= \frac{2,2 \pi^2 9,21}{340 \cdot 0,03} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 12,5 \text{ m} \\ a_{j,situ} &= \frac{2,2 \pi^2 9,12}{340 \cdot 0,02} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 23,0 \text{ m} \end{aligned}$$

- per il percorso  $1d$ :

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = 14,4 - 10 \log \left( \frac{3,41}{\sqrt{23,0 \cdot 12,5}} \right) = \mathbf{21,3 \text{ dB}}$$

con

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 9,12}{340 \cdot 0,02} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 23,0 \text{ m}$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 9,21}{340 \cdot 0,03} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 12,5 \text{ m}$$

- per il percorso 11:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = 11 - 10 \log \left( \frac{3,41}{\sqrt{23,0 \cdot 12,5}} \right) = \mathbf{16,7 \text{ dB}}$$

con

$$a_{i,situ} = a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 9,21}{340 \cdot 0,03} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 12,5 \text{ m}$$

Frequenza	Solaio ( $i$ )	Parete esterna ( $j = 1$ )	Parete esterna ( $j = 2$ )	Parete interna ( $j = 3$ )	Parete interna ( $j = 4$ )
$f$ (Hz)	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$
100	0,0999	0,0699	0,0875	0,0205	0,0208
125	0,0948	0,0635	0,0793	0,0194	0,0196
160	0,0901	0,0573	0,0713	0,0183	0,0185
200	0,0867	0,0523	0,0648	0,0174	0,0176
250	0,0858	0,0479	0,0590	0,0166	0,0168
315	0,0853	0,0437	0,0537	0,0159	0,0160
400	0,0805	0,0399	0,0488	0,0152	0,0154
500	0,0757	0,0368	0,0447	0,0147	0,0148
630	0,0720	0,0339	0,0409	0,0142	0,0143
800	0,0690	0,0313	0,0375	0,0137	0,0138
1000	0,0667	0,0291	0,0347	0,0134	0,0135
1250	0,0648	0,0272	0,0322	0,0131	0,0131
1600	0,0629	0,0256	0,0301	0,0128	0,0128
2000	0,0614	0,0330	0,0369	0,0126	0,0127
2500	0,0602	0,0296	0,0331	0,0222	0,0223
3150	0,0590	0,0258	0,0289	0,0199	0,0199

Tabella 4.6: Valori di  $\eta_{tot,situ}$  per ciascun elemento (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	D1			1d			11	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,22	0,31	13,23	0,31	0,22	13,23	0,31	13,41
125	0,19	0,28	13,71	0,28	0,19	13,71	0,28	13,48
160	0,15	0,24	14,27	0,24	0,15	14,27	0,24	13,57
200	0,13	0,21	14,79	0,21	0,13	14,79	0,21	13,66
250	0,10	0,18	15,38	0,18	0,10	15,38	0,18	13,76
315	0,08	0,16	16,00	0,16	0,08	16,00	0,16	13,87
400	0,07	0,14	16,54	0,14	0,07	16,54	0,14	13,99
500	0,06	0,12	17,03	0,12	0,06	17,03	0,12	14,12
630	0,05	0,10	17,58	0,10	0,05	17,58	0,10	14,27
800	0,04	0,09	18,18	0,09	0,04	18,18	0,09	14,43
1000	0,03	0,08	18,75	0,08	0,03	18,75	0,08	14,60
1250	0,03	0,06	19,34	0,06	0,03	19,34	0,06	14,79
1600	0,02	0,05	20,04	0,05	0,02	20,04	0,05	15,07
2000	0,02	0,03	21,34	0,03	0,02	21,34	0,03	16,65
2500	0,01	0,03	21,87	0,03	0,01	21,87	0,03	16,67
3150	0,01	0,03	22,36	0,03	0,01	22,36	0,03	16,57

Tabella 4.7: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete esterna 1 (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	D2			2d			22	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,22	0,25	14,36	0,25	0,22	14,36	0,25	14,39
125	0,19	0,22	14,84	0,22	0,19	14,84	0,22	14,45
160	0,15	0,19	15,38	0,19	0,15	15,38	0,19	14,52
200	0,13	0,17	15,90	0,17	0,13	15,90	0,17	14,59
250	0,10	0,15	16,47	0,15	0,10	16,47	0,15	14,67
315	0,08	0,13	17,09	0,13	0,08	17,09	0,13	14,76
400	0,07	0,11	17,62	0,11	0,07	17,62	0,11	14,86
500	0,06	0,10	18,10	0,10	0,06	18,10	0,10	14,96
630	0,05	0,09	18,63	0,09	0,05	18,63	0,09	15,09
800	0,04	0,07	19,21	0,07	0,04	19,21	0,07	15,22
1000	0,03	0,06	19,77	0,06	0,03	19,77	0,06	15,37
1250	0,03	0,05	20,35	0,05	0,03	20,35	0,05	15,53
1600	0,02	0,05	21,03	0,05	0,02	21,03	0,05	15,77
2000	0,02	0,03	22,22	0,03	0,02	22,22	0,03	17,14
2500	0,01	0,03	22,75	0,03	0,01	22,75	0,03	17,16
3150	0,01	0,02	23,24	0,02	0,01	23,24	0,02	17,07

Tabella 4.8: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete esterna 2 (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	D3			3d			33	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,22	1,07	11,81	1,07	0,22	11,81	1,07	8,09
125	0,19	0,91	12,38	0,91	0,19	12,38	0,91	8,33
160	0,15	0,75	13,04	0,75	0,15	13,04	0,75	8,61
200	0,13	0,63	13,65	0,63	0,13	13,65	0,63	8,88
250	0,10	0,53	14,33	0,53	0,10	14,33	0,53	9,16
315	0,08	0,44	15,06	0,44	0,08	15,06	0,44	9,47
400	0,07	0,36	15,70	0,36	0,07	15,70	0,36	9,81
500	0,06	0,30	16,29	0,30	0,06	16,29	0,30	10,14
630	0,05	0,25	16,94	0,25	0,05	16,94	0,25	10,49
800	0,04	0,20	17,64	0,20	0,04	17,64	0,20	10,86
1000	0,03	0,16	18,31	0,16	0,03	18,31	0,16	11,23
1250	0,03	0,13	19,00	0,13	0,03	19,00	0,13	11,61
1600	0,02	0,11	19,77	0,11	0,02	19,77	0,11	12,05
2000	0,02	0,09	20,50	0,09	0,02	20,50	0,09	12,48
2500	0,01	0,04	22,49	0,04	0,01	22,49	0,04	15,42
3150	0,01	0,04	23,04	0,04	0,01	23,04	0,04	15,44

Tabella 4.9: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete interna 3 (Caso A)



Frequenza $f$ (Hz)	D4			4d			44	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,22	1,06	12,00	1,06	0,22	12,24	1,06	7,67
125	0,19	0,90	12,57	0,90	0,19	12,81	0,90	7,91
160	0,15	0,74	13,22	0,74	0,15	13,46	0,74	8,19
200	0,13	0,63	13,84	0,63	0,13	14,07	0,63	8,45
250	0,10	0,52	14,52	0,52	0,10	14,75	0,52	8,74
315	0,08	0,44	15,24	0,44	0,08	15,47	0,44	9,04
400	0,07	0,36	15,88	0,36	0,07	16,11	0,36	9,37
500	0,06	0,30	16,47	0,30	0,06	16,71	0,30	9,70
630	0,05	0,24	17,12	0,24	0,05	17,35	0,24	10,05
800	0,04	0,20	17,82	0,20	0,04	18,05	0,20	10,42
1000	0,03	0,16	18,49	0,16	0,03	18,72	0,16	10,79
1250	0,03	0,13	19,17	0,13	0,03	19,41	0,13	11,16
1600	0,02	0,11	19,95	0,11	0,02	20,19	0,11	11,60
2000	0,02	0,09	20,68	0,09	0,02	20,91	0,09	12,04
2500	0,01	0,04	22,66	0,04	0,01	22,89	0,04	14,96
3150	0,01	0,04	23,21	0,04	0,01	23,44	0,04	14,98

Tabella 4.10: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra il solaio e la parete interna 4 (Caso A)

### Trasmissione diretta, laterale e apparente per R

Determinati tutti i termini delle equazioni 2.8 e 2.9 si possono calcolare i potere fonoisolanti associati a ciascun percorso di trasmissione sonora.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per il percorso di trasmissione diretta  $Dd$ :

$$R_{D,d} = 46,6 + 26,2 + 2,1 = 74,9 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $1d$ :

$$R_{1d} = \frac{63,0 + 46,6}{2} + 0 + 2,1 + 21,3 + 10 \log \frac{9,12}{\sqrt{9,21 \cdot 9,12}} = 78,2 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $D1$ :

$$R_{D1} = \frac{46,6 + 63,0}{2} + 26,2 + 0 + 21,3 + 10 \log \frac{9,12}{\sqrt{9,12 \cdot 9,21}} = 102,3 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $11$ :

$$R_{11} = \frac{63,0 + 63,0}{2} + 0 + 0 + 16,7 + 10 \log \frac{9,12}{\sqrt{9,21^2}} = 79,6 \text{ dB}$$

Sommando il contributo di trasmissione diretta con i 12 percorsi di trasmissione laterale (Equazione 4.1), si ottiene:

$$R'_{f=2000 \text{ Hz}} = \mathbf{69,9 \text{ dB}}$$

### Trasmissione diretta, laterale e apparente per $L_n$

Per la previsione del livello apparente normalizzato di pressione sonora di calpestio si fa riferimento alle equazioni 2.46 e 2.47, rispettivamente per il percorso di trasmissione diretta e per i percorsi di trasmissione laterale.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per il percorso di trasmissione diretta  $Dd$ :

$$L_{n,d} = 78,0 - 25,1 - 40,1 = 12,7 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $D1$ :

$$L_{n,ij} = 78,0 - 40,1 + \frac{46,6 - 63,0}{2} - 0 - 21,3 - 10 \log \frac{9,12}{9,21} = 8,4 \text{ dB}$$

Sommando il contributo di trasmissione diretta con i 4 percorsi di trasmissione laterale (Equazione 4.2), si ottiene:

$$L'_{n, f=2000 \text{ Hz}} = \mathbf{15,7 \text{ dB}}$$

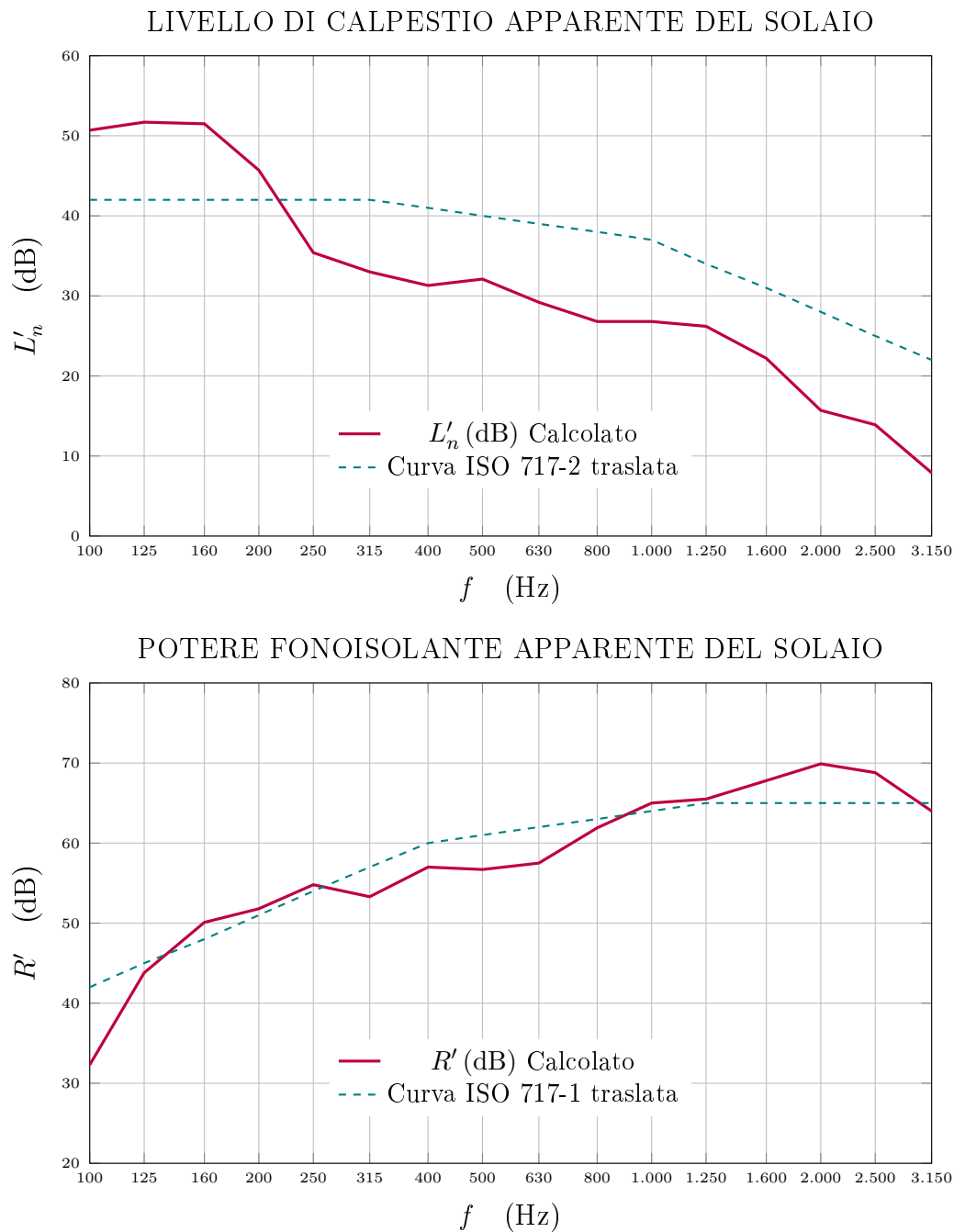
Frequenza $f$ (Hz)	Solaio ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )		Parete esterna ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )		Parete interna ( $j = 4$ )		Totale
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{11}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{33}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	$R'$ (dB)
100	35,8	47,2	48,9	40,3	41,1	60,1	58,4	61,8	60,6	53,2	42,1	54,0	42,9	32,3
125	52,1	59,4	61,2	52,6	53,4	72,0	65,4	73,8	67,7	60,4	49,3	61,2	50,1	43,8
160	61,4	66,1	67,9	59,9	60,7	79,7	69,5	81,5	71,8	69,5	54,6	70,3	55,4	50,1
200	59,4	64,3	66,0	59,1	60,0	82,7	71,6	84,4	73,8	75,4	58,9	76,2	59,7	51,8
250	62,7	66,1	67,8	62,0	62,8	86,4	72,7	88,1	74,9	78,8	62,1	79,6	63,0	54,8
315	56,3	65,1	66,8	61,6	62,5	84,2	74,8	85,9	77,0	81,2	65,4	82,0	66,3	53,3
400	60,3	67,4	69,1	66,1	66,9	85,9	74,0	87,6	76,1	84,8	68,8	85,6	69,6	57,0
500	59,1	67,3	69,0	66,5	67,3	86,9	75,1	88,6	77,2	91,0	71,1	91,8	71,9	56,7
630	59,2	69,3	71,0	68,7	69,5	88,0	77,2	89,7	79,3	97,9	73,5	98,7	74,3	57,5
800	64,4	72,1	73,8	72,1	72,9	92,6	78,4	94,3	80,5	103,7	75,8	104,5	76,7	61,9
1000	68,3	74,8	76,5	74,9	75,7	95,9	79,6	97,6	81,6	109,5	77,2	110,3	78,0	65,0
1250	68,0	75,5	77,2	76,2	77,0	97,1	80,8	98,8	82,8	114,8	79,6	115,6	80,4	65,5
1600	71,7	76,3	77,9	78,6	79,4	99,4	79,0	101,0	81,0	120,4	81,0	121,2	81,8	67,8
2000	74,9	78,2	79,7	80,9	81,7	102,3	79,6	103,8	81,4	125,3	82,5	126,2	83,3	69,9
2500	73,1	77,0	78,5	81,6	82,4	100,8	77,6	102,3	79,4	130,4	84,4	131,2	85,2	68,8
3150	77,0	79,7	81,3	72,9	73,7	109,9	84,5	111,5	86,3	124,7	68,4	125,5	69,2	64,0

Tabella 4.11: Risultati del potere fonoisolante per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	Solaio					Totale $L'_n$ (dB)
	$L_{n,Dd}$ (dB)	$L_{n,D1}$ (dB)	$L_{n,D2}$ (dB)	$L_{n,D3}$ (dB)	$L_{n,D4}$ (dB)	
100	45,3	39,0	37,3	45,9	45,1	50,7
125	50,8	34,3	32,6	41,2	40,3	51,7
160	49,5	37,5	35,7	43,7	42,9	51,5
200	45,2	27,5	25,8	32,6	31,8	45,7
250	33,8	22,3	20,6	26,3	25,5	35,4
315	30,8	21,4	19,7	24,9	24,0	33,0
400	29,9	19,4	17,7	20,7	19,9	31,3
500	30,6	20,8	19,1	21,6	20,8	32,1
630	27,4	18,9	17,2	19,5	18,7	29,2
800	24,3	17,8	16,1	17,8	17,0	26,8
1000	24,0	18,2	16,5	18,1	17,3	26,8
1250	23,4	17,8	16,1	17,1	16,3	26,2
1600	18,8	15,2	13,5	12,9	12,1	22,2
2000	12,7	8,4	6,8	5,7	4,9	15,7
2500	12,3	5,1	3,6	0,5	-0,3	13,9
3150	4,8	-5,3	-6,8	1,6	0,8	7,9

Tabella 4.12: Risultati del livello di calpestio per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso A)

## Indici di valutazione

Figura 4.7: Grafici finali dell'andamento di  $R'$  e  $L'_n$  calcolati del solaio (Caso A)

L'indice di valutazione di potere fonoisolante apparente  $R'_w$  (dB) e l'indice

di valutazione del livello di calpestio apparente  $L'_{n,w}$  del solaio sono rispettivamente determinati in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16] e parte 2 [19].

In conclusione risultano:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 61,4(-3; -10) \text{ dB}$$

$$L'_{n,w}(C_l) = 40,0(2) \text{ dB}$$

### 4.1.2 Caso B: ambienti adiacenti

#### Modellazione geometrica degli ambienti

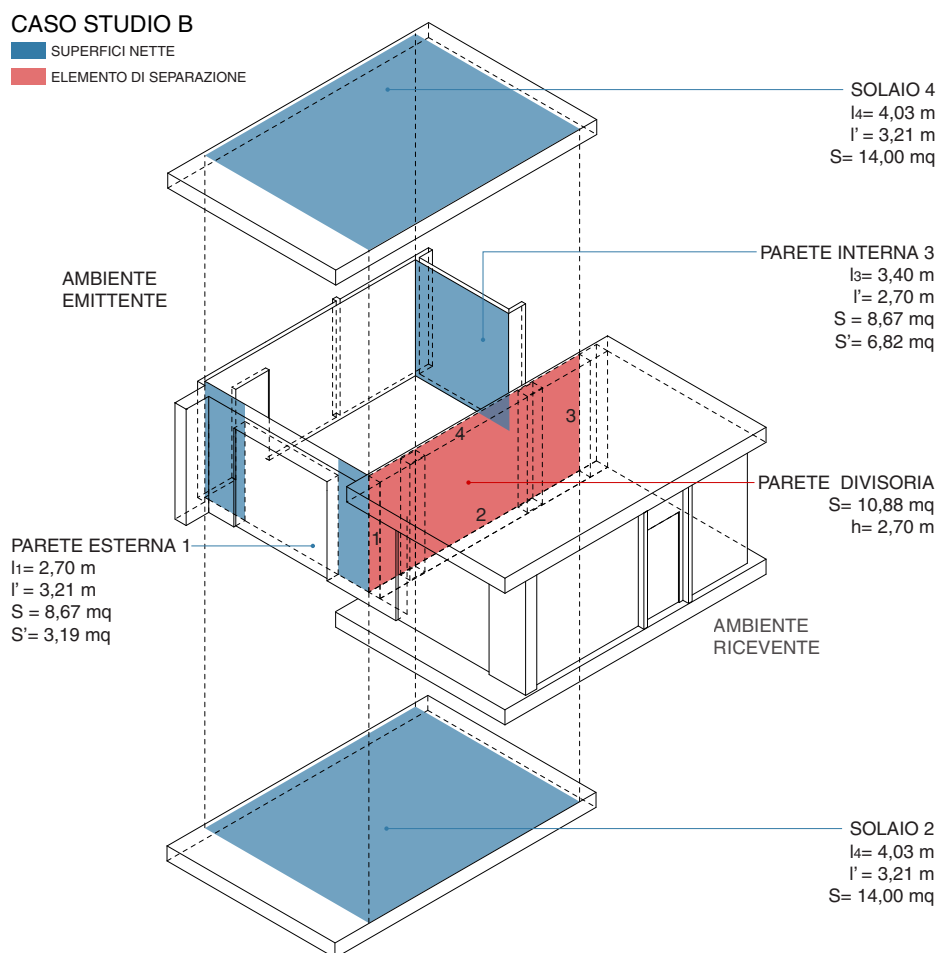


Figura 4.8: Esploso assometrico, in evidenza le aree effettive degli elementi (Caso B)

Si procede come nel caso precedente: individuati l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente vengono scomposti nei loro elementi base (Figura 4.8).

### Dati geometrici ed acustici di ingresso

In corrispondenza del nodo evidenziato in figura 4.8 si nota un disallineamento dei due volumi pari a 0,4 m. Seguendo le indicazioni riportate nell'aggiornamento della normativa [1] nell'appendice J *Guidelines for practical use*, la situazione reale può essere idealizzata per sfasamenti al di sotto di 0,5 m.

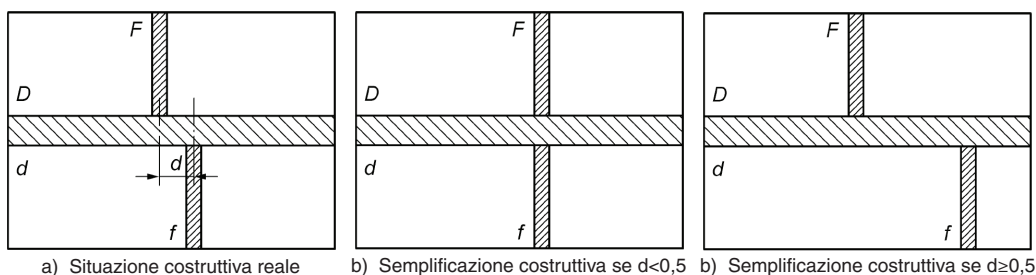


Figura 4.9: Giunzioni con piccoli disallineamenti, appendice J della norma ISO DIS 12354:1

Quindi il modello geometrico della situazione reale è stato ricondotto ad un modello più semplice di due ambienti adiacenti con i muri interni allineati e senza aperture esterne o interne, come si può vedere nella figura 4.10.

In riferimento a quanto visto nel capitolo precedente, dove le stratigrafie degli elementi di separazione e laterale sono state analizzate nel dettaglio (Figure 3.9, ??, 3.13, 3.16), ora consideriamo solo le parti di elementi collegate tra di loro e, quindi, interessate dalla trasmissione laterale.

Elementi	Area $S$ ( $m^2$ )	Massa areica $m'$ ( $kg/m^2$ )	Spessore $s$ (mm)	Fattore di perdita $\eta_{int}$	Velocità delle onde $c_L$ (m/s)	Frequenza critica $f_c$ (Hz)
<b>ELEMENTI DI SEPARAZIONE</b>						
Parete divisoria	10,88	24,0	15,0	0,02 [4]	2500	1710
Rivestimento	10,88	27,3	65,0	-	-	-
<b>ELEMENTI LATERALI</b>						
Parete esterna 1	8,67	100,5	12,5	0,01 [4]	2500	2055
Solaio CLT 2	14,00	108,0	180,0	0,05 [10]	1150 [10]	310
Parete interna 3	8,67	46,8	12,5	0,01 [4]	1800	2854
Solaio CLT 4	14,00	108,0	180,0	0,05 [10]	1150 [10]	310

Tabella 4.13: Valori delle principali grandezze di input del modello di calcolo (Caso B)

Vengono riportati nella tabella 4.13 i dati di input fondamentali di ciascun elemento: le superfici lorde  $S$  ( $m^2$ ), le masse areiche totali  $m'$  ( $kg/m^2$ ), gli

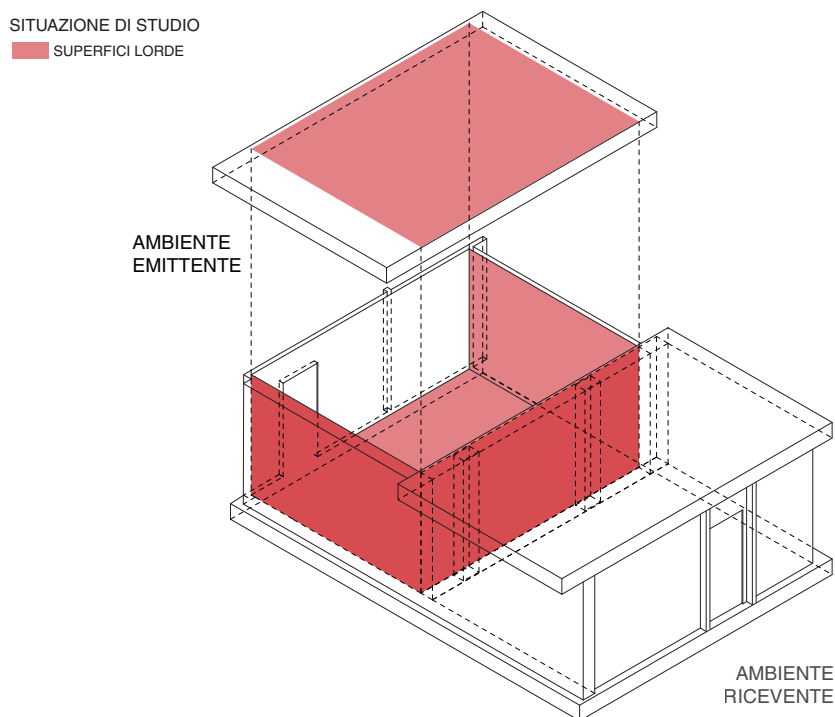


Figura 4.10: Semplificazione del modello geometrico reale in un modello geometrico ideale (Caso B)

spessori  $s$  (mm), i fattori di smorzamento interni  $\eta_{int}$ , le velocità delle onde longitudinali  $c_L$  (m/s) e le frequenze critiche  $f_c$  (Hz). Ad eccezione delle prime due grandezze appena descritte, le altre sono grandezze specifiche al solo strato che irradia energia sonora nell'ambiente.

Come già illustrato per il precedente caso, il valore della velocità delle onde longitudinali  $c_L$  (m/s) della parete divisoria è stato dedotto dall'osservazione critica dell'andamento del grafico del potere fonoisolante simulato con il programma *Insul 8.0* (Figura 4.11).

Per i parametri acustici di ingresso, non avendo dati di laboratorio di misure specifiche al caso studio, si è scelto di utilizzare:

- il software *Insul 8.0* per stimare l'andamento del potere fonoisolante  $R_i$  della parete divisoria;
- i dati sperimentali raccolti nell'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [12] per il potere fonoisolante del solaio  $R_j$  (dB);
- il software *Insul 8.0* per stimare gli andamenti dei poteri fonoisolanti  $R_j$  delle pareti verticali.



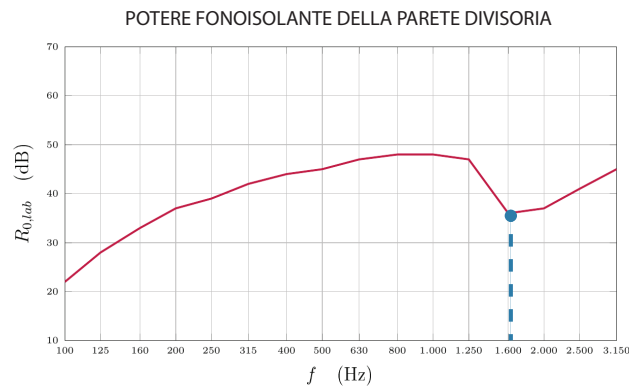


Figura 4.11: Grafico del potere fonoisolante della parete divisoria, in cui si può notare una caduta di  $R$  proprio in corrispondenza della frequenza critica

Occorre precisare che l'elemento di separazione è stato schematizzato come in figura 4.12. Quindi, i valori  $R_i$  in ingresso si riferiscono all'anima della parete (compensato, lana di roccia, compensato) e gli strati aggiuntivi internamente ed esternamente all'ambiente si riconducono rispettivamente ad un  $\Delta R_{int}$  e  $\Delta R_{est}$ . In prima ipotesi si è scelto di considerare  $\Delta R_{int} = \Delta R_{est}$  (dB).

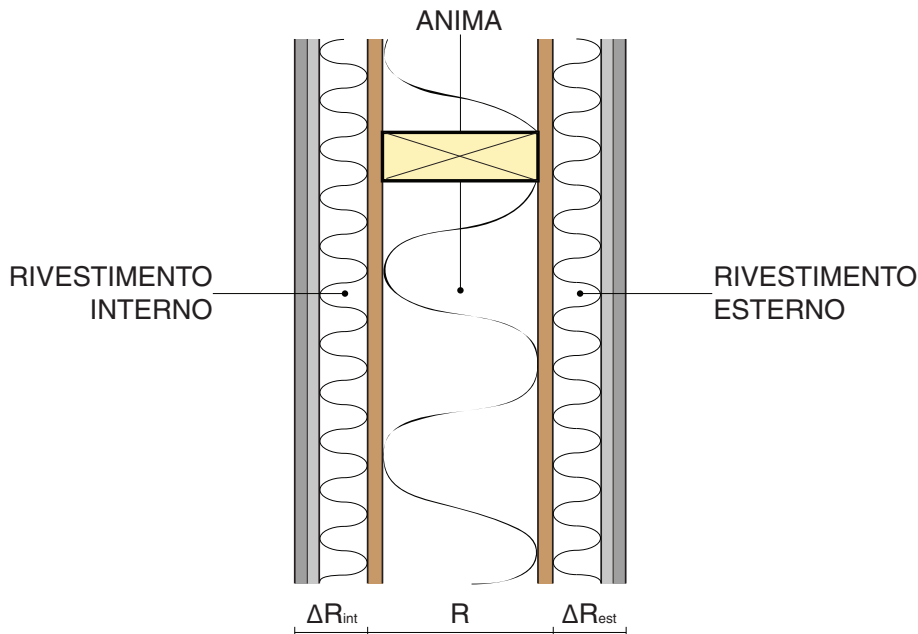


Figura 4.12: Schematizzazione della parete divisoria per il modello di calcolo

Nella tabella 4.14 sono riportati i valori appena descritti e i valori del contributo del controsoffitto che entra in gioco nei percorsi di trasmissione laterale

*Ff* solaio-solaio.

Frequenza $f$ (Hz)	Rivestimenti		Controsoffitto
	$\Delta R_{int}$ (dB)	$\Delta R_{est}$ (dB)	$\Delta R_{ceiling}$ (dB)
100	5	5	2,5
125	3	3	18,0
160	5	5	21,8
200	6	6	19,0
250	7	7	25,7
315	6	6	24,9
400	6	6	32,3
500	7	7	27,6
630	6	6	23,3
800	6	6	26,5
1000	4	4	26,9
1250	5	5	25,2
1600	13	13	26,7
2000	22	22	28,3
2500	19	19	25,2
3150	14	14	31,6

Tabella 4.14: Contributi degli strati aggiuntivi (Caso B)

Nella tabella 4.15 sono riportati tutti i poteri fonoisolanti  $R_{situ}$  dB degli elementi del sistema. Per questi valori si è scelto di applicare la correzione degli 8 dB indicata nell'aggiornamento della norma [1] per la trasmissione risonante e, quindi, come dati di partenza si assumono i valori di  $R_{situ}^*$  (dB).

Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )		Parete esterna ( $j = 1$ )		Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )		Solaio ( $j = 4$ )	
	$R_{i,situ}$ (dB)	$R_{i,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)	$R_{j,situ}$ (dB)	$R_{j,situ}^*$ (dB)
100	22,0	30,0	37,0	45,0	25,3	33,3	26,0	34,0	25,3	33,3
125	28,0	36,0	44,0	52,0	26,1	34,1	33,0	41,0	26,1	34,1
160	33,0	41,0	48,0	56,0	31,6	39,6	38,0	46,0	31,6	39,6
200	37,0	45,0	50,0	58,0	32,4	40,4	42,0	50,0	32,4	40,4
250	39,0	47,0	51,0	59,0	29,0	37,0	45,0	53,0	29,0	37,0
315	42,0	50,0	53,0	61,0	31,4	31,4	48,0	56,0	31,4	31,4
400	44,0	52,0	52,0	60,0	28,0	28,0	51,0	59,0	28,0	28,0
500	45,0	53,0	53,0	61,0	31,5	31,5	53,0	61,0	31,5	31,5
630	47,0	55,0	55,0	63,0	35,9	35,9	55,0	63,0	35,9	35,9
800	48,0	56,0	56,0	64,0	37,9	37,9	57,0	65,0	37,9	37,9
1000	48,0	56,0	57,0	65,0	41,4	41,4	58,0	66,0	41,4	41,4
1250	47,0	55,0	58,0	66,0	42,8	42,8	60,0	68,0	42,8	42,8
1600	36,0	44,0	56,0	64,0	45,0	45,0	61,0	69,0	45,0	45,0
2000	37,0	37,0	55,0	63,0	46,6	46,6	62,0	70,0	46,6	46,6
2500	41,0	41,0	61,0	61,0	47,9	47,9	61,0	69,0	47,9	47,9
3150	45,0	45,0	68,0	68,0	45,4	45,4	53,0	53,0	45,4	45,4

Tabella 4.15: Valori di potere fonoisolante  $R_{situ}$  (dB), in bande di un terzo di ottava, per ciascun elemento (Caso B)

### Fattori di radiazione

Si procede con il calcolo del fattore di radiazione per le onde libere.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per l'elemento parete divisoria ( $l_1 = 2,70$ m e  $l_2 = 4,03$ m):

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - 1710/2000}} = 2,6379$$

$$\sigma_2 = 4 \cdot 2,70 \cdot 4,03 \left( \frac{2000}{340} \right)^2 = 964$$

$$f_{11} = \frac{340^2}{4 \cdot 1710} \left( \frac{1}{2,70^2} + \frac{1}{3,21^2} \right) = 3,35 \text{ Hz}$$

Si verifica il caso in cui  $f_{11} = 3,35 \leq f_c = 1710/2$  e quindi si ha:  
 $f = 2000 \geq f_c = 1710 \Rightarrow \sigma = \sigma_1 = 2,6379 \Rightarrow \sigma = \mathbf{2}$

- per l'elemento parete esterna 1 ( $l_1 = 2,70$ m e  $l_2 = 3,21$ m):

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - 2055/2000}} = \textit{impossibile}$$

$$\sigma_2 = 4 \cdot 2,70 \cdot 3,21 \left( \frac{2000}{340} \right)^2 = 1200$$

$$f_{11} = \frac{340^2}{4 \cdot 2055} \left( \frac{1}{2,70^2} + \frac{1}{3,21^2} \right) = 3,29 \text{ Hz}$$

Si verifica il caso in cui  $f_{11} = 3,29 \leq f_c = 2055/2$  e quindi si ha:

$$f < f_c \Rightarrow \sigma = \frac{2(2,70 + 3,21)340}{2,70 \cdot 3,21} \delta_1 + \delta_2 = 2,7420 \Rightarrow \sigma = \mathbf{2}$$

con

$$\delta_1 = \frac{(1 - 0,9865^2) \ln \left( \frac{1 + 0,9865}{1 - 0,9865} \right) + 2 \cdot 0,9865}{4\pi^2(1 - 0,9865^2)^{1,5}} = 12,1526$$

$$\text{con } \lambda = \sqrt{\frac{2000}{2055}} = 0,9865$$

$$\delta_2 = 0, \quad f = 2000 > \frac{f_c = 2055}{2}$$

### Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti

All'inizio della fase di calcolo degli indici di riduzione delle vibrazioni, occorre individuare il numero e la tipologia di giunti che interessano l'elemento di separazione considerato.

Per la parete divisoria vengono considerati i 4 giunti evidenziati nella figura 4.13. D'ora in poi, a titolo di esempio, si considera il giunto a T tra l'elemento parete divisoria e l'elemento parete esterna 1 e i risultati sono riportati in grassetto.

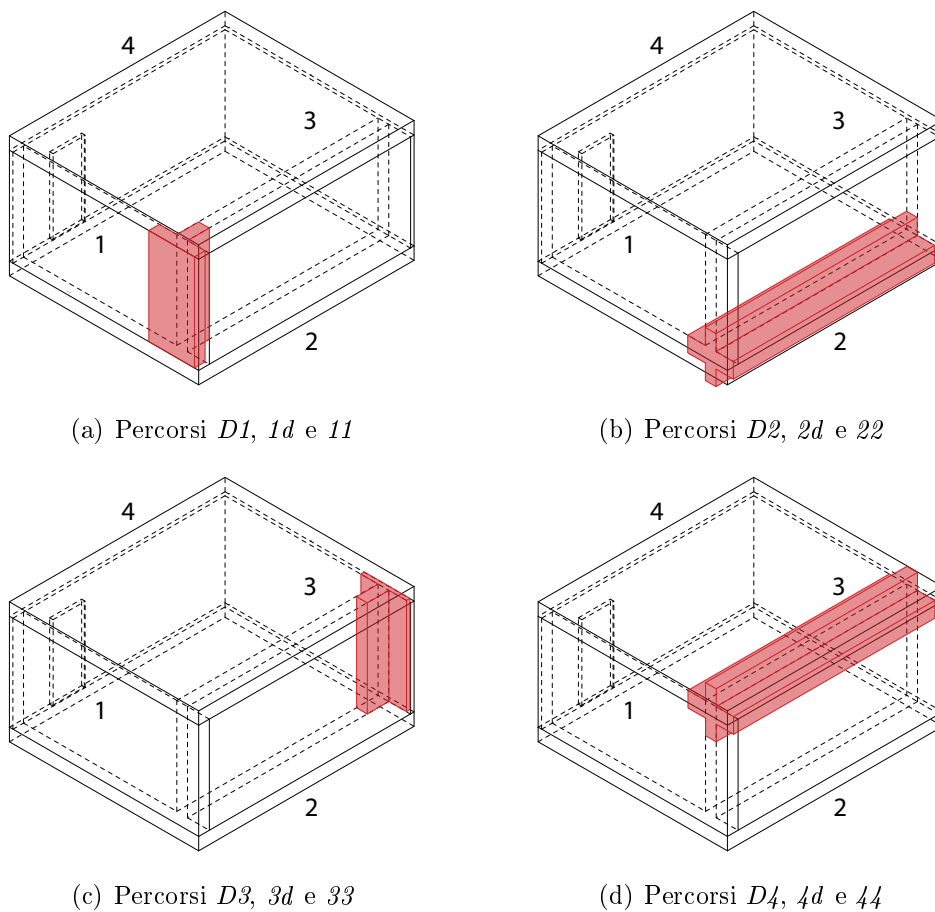


Figura 4.13: Giunti per la trasmissione laterale che prende in considerazione il solaio come elemento  $i$  e le pareti come elementi  $j$  (Caso B)

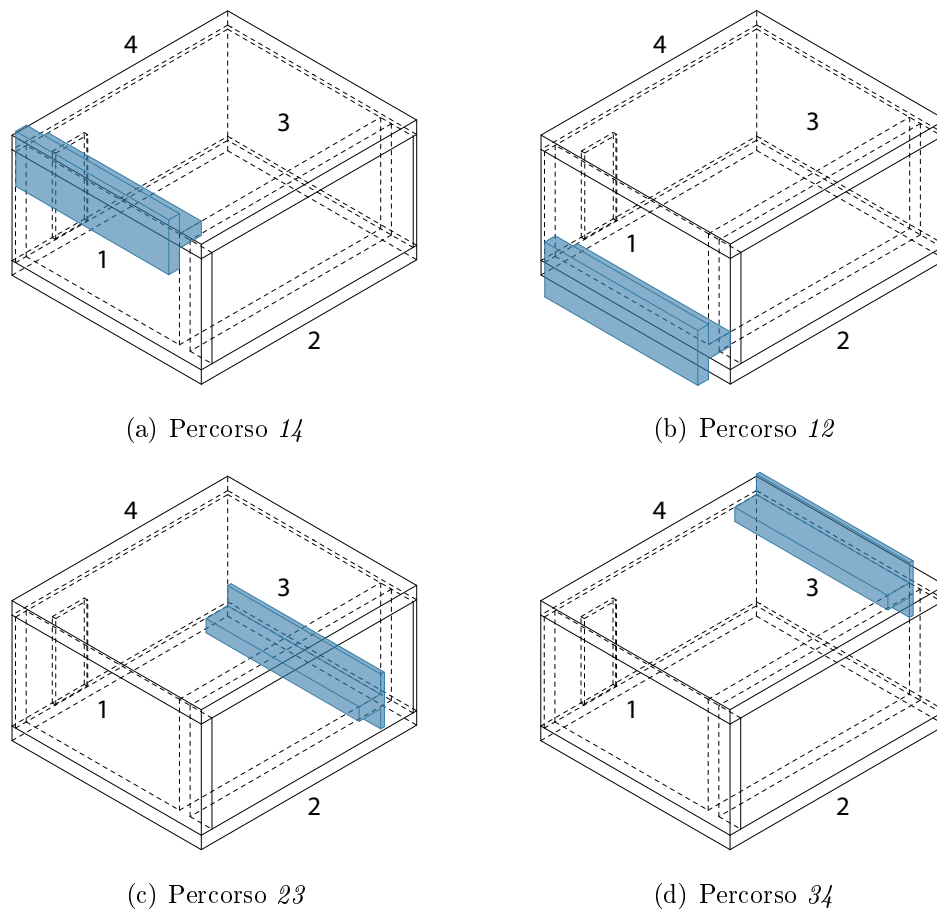


Figura 4.14: Giunti per la trasmissione laterale che considera gli elementi laterali  $j$  (Caso B)

Le formule empiriche considerate per i giunti tra la parete divisoria e la parete laterale fanno riferimento alla nuova tipologia introdotta dall'aggiornamento della normativa [1] per le strutture leggere multistrato (Equazioni 4.3). Una volta calcolato il valore di  $\overline{D_{v,ij,n}}$  (dB), si determina l'indice di riduzione delle vibrazioni per i giunti  $K_{ij}$  dalla formula inversa dell'equazione 2.51.

Per i giunti tra la parete divisoria e il solaio, invece, si utilizzano le formule di riferimento della normativa per la tipologia di giunto tra una parete leggera a doppio strato ed elementi omogenei (Figura 2.8 ed Equazioni 2.29).

Esempio per  $f = 2000$  Hz, con  $l_{ij} = 2,70$  m si ha:

- per il percorso  $D1$  la parete divisoria è l'elemento  $i$  e la parete esterna 1 è l'elemento  $j$ :

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m'_{i'}} = \log \frac{62,2}{26} = 0,379$$

$$\overline{D_{v,12,n}} = 15 + 10|0,379| - 3,3 \log(2000/500) = 16,8 \text{ dB}$$

$$\overline{D_{v,12,situ}} = 16,8 - 10 \log \frac{2,70}{\sqrt{10,88 \cdot 8,67}} = 22,4 \text{ dB}$$

$$K_{ij} = 22,4 + 10 \log \left( \frac{2,70}{1,0 \cdot 2,6} \right) = \mathbf{16,3 \text{ dB}}$$

- per il percorso  $1d$  la parete esterna 1 è l'elemento  $i$  e il solaio è l'elemento  $j$ :

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m'_{i'}} = \log \frac{26}{62,2} = -0,379$$

$$\overline{D_{v,12,n}} = 15 + 10|-0,379| - 3,3 \log(2000/500) = 16,8 \text{ dB}$$

$$\overline{D_{v,12,situ}} = 16,8 - 10 \log \frac{2,70}{\sqrt{10,88 \cdot 8,67}} = 22,4 \text{ dB}$$

$$K_{ij} = 22,4 + 10 \log \left( \frac{2,70}{2,6 \cdot 1,0} \right) = \mathbf{16,3 \text{ dB}}$$

- per il percorso  $11$  l'unico elemento  $i = j = 1$  è la parete esterna 1:

$$M = \log \frac{m'_{\perp i}}{m'_{i'}} = \log \frac{26,0}{62,2} = -0,379$$

$$K_{24} = \textit{infinito}$$

ovvero la trasmissione sonora è completamente smorzata lungo questo percorso e quindi non viene considerata.

Una volta determinati i dati sugli indici di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  (Tabelle 4.16 e 4.17) è possibile calcolare i coefficienti di assorbimento per le onde flessionali  $\alpha_k$  al giunto  $k$  di lunghezza  $l_k$  (m), utilizzando la formula

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)	Giunto (b)		Giunto (c)	Giunto (d)	
	$K_{D1,1d}$ (dB)	$K_{D2,2d}$ (dB)	$K_{22}$ (dB)	$K_{D3,3d}$ (dB)	$K_{D4,4d}$ (dB)	$K_{44}$ (dB)
100	29,0	13,9	12,3	27,9	13,9	12,3
125	28,3	14,2	12,0	27,1	14,2	12,0
160	27,5	14,6	11,6	26,3	14,6	11,6
200	26,7	14,9	11,3	25,6	14,9	11,3
250	26,0	15,2	11,0	24,9	15,2	11,0
315	25,2	15,5	10,7	24,1	15,5	10,7
400	24,4	15,9	10,3	23,3	15,9	10,3
500	23,7	16,2	10,0	22,5	16,2	10,0
630	22,9	16,5	9,7	21,7	16,5	9,7
800	22,0	16,9	9,3	20,9	16,9	9,3
1000	21,2	17,2	9,0	20,1	17,2	9,0
1250	20,4	17,5	8,7	19,2	17,5	8,7
1600	18,9	17,9	8,3	17,8	17,9	8,3
2000	16,3	18,2	8,0	16,5	18,2	8,0
2500	16,1	18,5	7,7	14,6	18,5	7,7
3150	15,8	18,8	7,4	14,2	18,8	7,4

Tabella 4.16: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti della parete divisoria (Fig. 4.13) (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a) $K_{14}$ (dB)	Giunto (b) $K_{23}$ (dB)	Giunto (c) $K_{34}$ (dB)	Giunto (d) $K_{12}$ (dB)
100	15,9	15,9	13,9	13,9
125	15,6	15,6	14,2	14,2
160	15,3	15,3	14,6	14,6
200	14,9	14,9	14,9	14,9
250	14,6	14,6	15,2	15,2
315	14,3	14,3	15,5	15,5
400	14,0	14,0	15,9	15,9
500	13,6	13,6	16,2	16,2
630	13,3	13,3	16,5	16,5
800	13,0	13,0	16,9	16,9
1000	12,6	12,6	17,2	17,2
1250	12,3	12,3	17,5	17,5
1600	12,0	12,0	17,9	17,9
2000	11,6	11,6	18,2	18,2
2500	11,3	11,3	18,5	18,5
3150	11,0	11,0	18,8	18,8

Tabella 4.17: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti laterali (Fig. 4.14) (Caso B)



2.16. In totale si ottengono i valori:

$$\begin{aligned} \text{Parete divisoria} = i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,014 \cdot 2,70 + 0,050 \cdot 4,03 + \\ &+ 0,057 \cdot 2,70 + 0,050 \cdot 4,03 = \mathbf{0,589} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete esterna 1} = i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,006 \cdot 2,70 + 0,024 \cdot 3,21 + \\ &+ 0,006 \cdot 2,70 + 0,024 \cdot 3,21 = \mathbf{0,188} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Solaio 2} = i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,054 \cdot 4,03 + 0,073 \cdot 2,31 + \\ &+ 0,054 \cdot 4,03 + 0,035 \cdot 3,21 = \mathbf{0,782} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parete interna 3} = i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,013 \cdot 2,70 + 0,009 \cdot 3,21 + \\ &+ 0,050 \cdot 2,70 + 0,004 \cdot 3,21 = \mathbf{0,211} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Solaio 4} = i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k &= 0,054 \cdot 4,03 + 0,073 \cdot 3,21 + \\ &+ 0,054 \cdot 4,03 + 0,035 \cdot 3,21 = \mathbf{0,782} \end{aligned}$$

### Tempo di riverberazione strutturale

Il tempo di riverberazione strutturale è stimato attraverso le equazioni 2.14 e 2.15.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per l'elemento parete divisoria:

$$T_s = \frac{2,2}{f \eta_{tot}} = \frac{2,2}{2000 \cdot 0,0365} = \mathbf{0,03} \text{ s}$$

dove

$$\eta_{tot} = 0,05 + \frac{2 \cdot 1,29 \cdot 340 \cdot 2,00}{2\pi \cdot 2000 \cdot 9} + \frac{340}{\pi^2 \cdot 10,88 \sqrt{2000 \cdot 1710}} \cdot 0,589 = 0,0365$$

- per l'elemento parete esterna 1:

$$T_s = \frac{2,2}{f \eta_{tot}} = \frac{2,2}{2000 \cdot 0,0201} = \mathbf{0,05} \text{ s}$$

dove

$$\eta_{tot} = 0,01 + \frac{2 \cdot 1,29 \cdot 340 \cdot 2,00}{2\pi \cdot 2000 \cdot 14,4} + \frac{340}{\pi^2 \cdot 8,67 \sqrt{2000 \cdot 2055}} \cdot 0,188 = 0,0201$$

### Isolamento medio di vibrazione del giunto

Avendo a disposizione i dati della trasmissione laterale e i tempi di riverberazione strutturali degli elementi si può calcolare per ogni percorso di trasmissione l'isolamento medio di vibrazione del giunto mediante l'equazione 2.51.

Esempio per  $f = 2000$  Hz, con  $l_{ij} = 2,70$  m si ha:

- per il percorso  $D1$ :

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = 16,3 - 10 \log \left( \frac{2,70}{\sqrt{16,3 \cdot 7,1}} \right) = \mathbf{22,4} \text{ dB}$$

con

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 10,88}{340 \cdot 0,03} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 16,3 \text{ m}$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 8,67}{340 \cdot 0,05} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 7,1 \text{ m}$$

- per il percorso  $1d$ :

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = 16,3 - 10 \log \left( \frac{2,70}{\sqrt{7,1 \cdot 16,3}} \right) = \mathbf{22,4} \text{ dB}$$

con

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 8,67}{340 \cdot 0,05} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 7,1 \text{ m}$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 10,88}{340 \cdot 0,03} \sqrt{\frac{1000}{2000}} = 16,3 \text{ m}$$

Frequenza	Parete divisoria ( $i$ )	Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )	Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )
$f$ (Hz)	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$	$\eta_{tot,situ}$
100	0,0257	0,0123	0,0624	0,0121	0,0624
125	0,0251	0,0120	0,0613	0,0118	0,0613
160	0,0245	0,0118	0,0604	0,0116	0,0604
200	0,0240	0,0116	0,0600	0,0114	0,0600
250	0,0236	0,0114	0,0613	0,0113	0,0613
315	0,0232	0,0113	0,0644	0,0112	0,0644
400	0,0229	0,0112	0,0619	0,0110	0,0619
500	0,0227	0,0110	0,0591	0,0109	0,0591
630	0,0224	0,0110	0,0572	0,0108	0,0572
800	0,0223	0,0109	0,0559	0,0108	0,0559
1000	0,0223	0,0109	0,0550	0,0107	0,0550
1250	0,0226	0,0109	0,0543	0,0107	0,0543
1600	0,0290	0,0112	0,0536	0,0107	0,0536
2000	0,0365	0,0201	0,0531	0,0107	0,0531
2500	0,0320	0,0181	0,0527	0,0205	0,0527
3150	0,0281	0,0155	0,0524	0,0184	0,0524

Tabella 4.18: Valori di  $\eta_{tot,situ}$  per ciascun elemento (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	D1			1d		
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,87	1,79	26,6	1,79	0,87	26,7
125	0,71	1,46	26,3	1,46	0,71	26,3
160	0,57	1,17	26,0	1,17	0,57	26,0
200	0,46	0,95	25,6	0,95	0,46	25,7
250	0,38	0,77	25,3	0,77	0,38	25,3
315	0,30	0,62	25,0	0,62	0,30	25,0
400	0,24	0,49	24,7	0,49	0,24	24,7
500	0,20	0,40	24,3	0,40	0,20	24,3
630	0,16	0,32	24,0	0,32	0,16	24,0
800	0,12	0,25	23,7	0,25	0,12	23,7
1000	0,10	0,20	23,3	0,20	0,10	23,4
1250	0,08	0,16	23,0	0,16	0,08	23,0
1600	0,05	0,12	22,7	0,12	0,05	22,7
2000	0,03	0,05	22,4	0,05	0,03	22,4
2500	0,03	0,05	22,0	0,05	0,03	22,0
3150	0,02	0,04	21,7	0,04	0,02	21,7

Tabella 4.19: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e la parete esterna 1 (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	D2			2d			22	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,87	0,35	14,4	0,35	0,87	14,4	0,35	15,3
125	0,71	0,29	15,1	0,29	0,71	15,1	0,29	15,4
160	0,57	0,23	15,9	0,23	0,57	15,9	0,23	15,5
200	0,46	0,18	16,6	0,18	0,46	16,6	0,18	15,6
250	0,38	0,14	17,5	0,14	0,38	17,5	0,14	15,9
315	0,30	0,11	18,4	0,11	0,30	18,4	0,11	16,3
400	0,24	0,09	19,1	0,09	0,24	19,1	0,09	16,3
500	0,20	0,07	19,8	0,07	0,20	19,8	0,07	16,2
630	0,16	0,06	20,5	0,06	0,16	20,5	0,06	16,3
800	0,12	0,05	21,3	0,05	0,12	21,3	0,05	16,4
1000	0,10	0,04	22,1	0,04	0,10	22,1	0,04	16,4
1250	0,08	0,03	22,9	0,03	0,08	22,9	0,03	16,6
1600	0,05	0,03	24,3	0,03	0,05	24,3	0,03	16,7
2000	0,03	0,02	25,6	0,02	0,03	25,6	0,02	16,8
2500	0,03	0,02	26,1	0,02	0,03	26,1	0,02	16,9
3150	0,02	0,01	26,6	0,01	0,02	26,6	0,01	17,1

Tabella 4.20: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e il solaio (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	D3			3d		
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,87	1,88	25,4	1,88	0,87	25,4
125	0,71	1,53	25,1	1,53	0,71	25,1
160	0,57	1,22	24,7	1,22	0,57	24,7
200	0,46	0,99	24,4	0,99	0,46	24,4
250	0,38	0,80	24,1	0,80	0,38	24,1
315	0,30	0,64	23,8	0,64	0,30	23,8
400	0,24	0,51	23,4	0,51	0,24	23,4
500	0,20	0,41	23,1	0,41	0,20	23,1
630	0,16	0,33	22,8	0,33	0,16	22,8
800	0,12	0,26	22,4	0,26	0,12	22,4
1000	0,10	0,21	22,1	0,21	0,10	22,1
1250	0,08	0,17	21,8	0,17	0,08	21,8
1600	0,05	0,13	21,4	0,13	0,05	21,4
2000	0,03	0,10	21,1	0,10	0,03	21,1
2500	0,03	0,04	20,8	0,04	0,03	20,8
3150	0,02	0,04	20,5	0,04	0,02	20,5

Tabella 4.21: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete di separazione e la parete interna 3 (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	D4			4d			44	
	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i,situ}$ (s)	$T_{s,j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)	$T_{s,i=j,situ}$ (s)	$\overline{D_{v,ij,situ}}$ (dB)
100	0,87	0,35	14,4	0,35	0,87	14,4	0,35	15,3
125	0,71	0,29	15,1	0,29	0,71	15,1	0,29	15,4
160	0,57	0,23	15,9	0,23	0,57	15,9	0,23	15,5
200	0,46	0,18	16,6	0,18	0,46	16,6	0,18	15,6
250	0,38	0,14	17,5	0,14	0,38	17,5	0,14	15,9
315	0,30	0,11	18,4	0,11	0,30	18,4	0,11	16,3
400	0,24	0,09	19,1	0,09	0,24	19,1	0,09	16,3
500	0,20	0,07	19,8	0,07	0,20	19,8	0,07	16,2
630	0,16	0,06	20,5	0,06	0,16	20,5	0,06	16,3
800	0,12	0,05	21,3	0,05	0,12	21,3	0,05	16,4
1000	0,10	0,04	22,1	0,04	0,10	22,1	0,04	16,4
1250	0,08	0,03	22,9	0,03	0,08	22,9	0,03	16,6
1600	0,05	0,03	24,3	0,03	0,05	24,3	0,03	16,7
2000	0,03	0,02	25,6	0,02	0,03	25,6	0,02	16,8
2500	0,03	0,02	26,1	0,02	0,03	26,1	0,02	16,9
3150	0,02	0,01	26,6	0,01	0,02	26,6	0,01	17,1

Tabella 4.22: Valori di  $T_{s,i,situ}$ ,  $T_{s,j,situ}$  e  $\overline{D_{v,ij,situ}}$  per i percorsi di trasmissioni riferiti al giunto tra la parete divisoria e il solaio (Caso B)

### Trasmissione diretta, laterale e apparente per R

Determinati tutti i termini delle equazioni 2.8 e 2.9 si possono calcolare i poteri fonoisolanti associati a ciascun percorso di trasmissione sonora.

Esempio,  $f = 2000$  Hz:

- per il percorso di trasmissione diretta  $Dd$ :

$$R_{D,d} = 41,0 + 22,0 + 22,0 = 81,0 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $D1$ :

$$R_{D1} = \frac{41,0 + 63,0}{2} + 22,0 + 0 + 22,4 + 10 \log \frac{10,88}{\sqrt{10,88 \cdot 8,67}} = 94,8 \text{ dB}$$

- per il percorso di trasmissione laterale  $1d$ :

$$R_{1d} = \frac{63,0 + 41,0}{2} + 0 + 22,0 + 22,4 + 10 \log \frac{10,88}{\sqrt{8,67 \cdot 10,88}} = 94,9 \text{ dB}$$

Sommando il contributo di trasmissione diretta con i 10 percorsi di trasmissione laterale (Equazione 4.1), si ottiene:

$$R'_{f=2000 \text{ Hz}} = \mathbf{78,0 \text{ dB}}$$



Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )		Totale
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	$R'$ (dB)
100	40,0	69,6	50,5	62,9	50,5	69,6	50,5	50,0	62,9	50,5	50,0	38,0
125	42,0	73,8	52,6	67,1	52,6	73,8	52,6	66,4	67,1	52,6	66,4	40,7
160	51,0	80,0	60,6	73,7	60,6	80,0	60,6	75,8	73,7	60,6	75,8	49,4
200	57,0	83,7	64,8	78,4	64,8	83,6	64,8	73,9	78,4	64,8	73,9	54,6
250	61,0	85,8	65,9	81,6	65,9	85,8	65,9	77,5	81,6	65,9	77,5	57,3
315	62,0	87,0	64,5	83,3	64,5	87,0	64,5	71,5	83,3	64,5	71,5	56,6
400	64,0	87,2	64,6	85,4	64,6	87,1	64,6	75,5	85,4	64,6	75,5	57,3
500	67,0	88,8	68,5	87,6	68,5	88,8	68,5	74,3	87,6	68,5	74,3	60,7
630	67,0	89,5	71,4	88,3	71,4	89,5	71,4	74,4	88,3	71,4	74,4	62,5
800	68,0	90,2	73,7	89,4	73,7	90,2	73,7	79,7	89,4	73,7	79,7	64,5
1000	64,0	88,3	74,3	87,6	74,3	88,3	74,3	83,7	87,6	74,3	83,7	62,5
1250	65,0	89,0	76,3	88,8	76,3	89,0	76,3	83,5	88,8	76,3	83,5	63,7
1600	70,0	90,2	81,3	91,4	81,3	90,2	81,3	87,3	91,4	81,3	87,3	68,6
2000	81,0	94,9	88,9	97,1	88,9	94,9	88,9	90,6	97,1	88,9	90,6	78,0
2500	79,0	92,5	89,0	95,3	89,0	92,5	89,0	88,9	95,3	89,0	88,9	76,6
3150	73,0	92,7	85,3	84,0	85,3	92,7	85,3	93,0	84,0	85,3	93,0	71,4

Tabella 4.23: Risultati del potere fonoisolante per i percorsi di trasmissione e in totale (Caso B)

### Indici di valutazione

#### POTERE FONOISOLANTE APPARENTE DELLA PARTE DIVISORIA

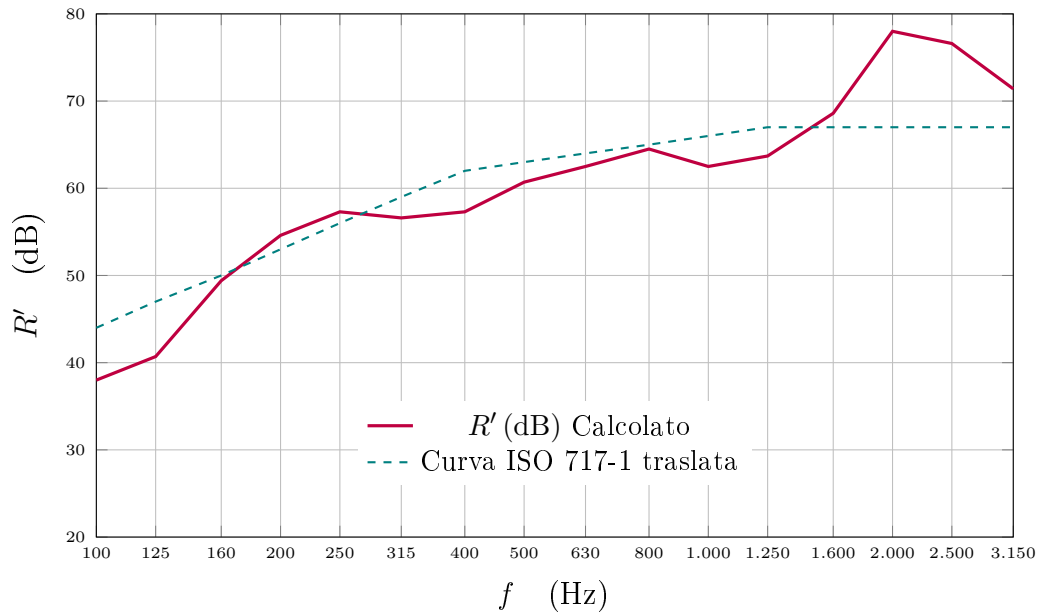


Figura 4.15: Grafico finale dell'andamento di  $R'$  calcolato della parete divisoria (Caso B)

L'indice di valutazione di potere fonoisolante apparente  $R'_w$  (dB) è determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16].

In conclusione risulta:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 63,0 (-2; -8) \text{ dB}$$

# Capitolo 5

## Calcolo ed analisi dei risultati

### 5.1 Identificazione delle variabili applicabili al modello di calcolo

#### 5.1.1 Caso A: ambienti sovrapposti

La validazione del modello dettagliato di calcolo per gli ambienti sovrapposti è incentrata sul livello di calpestio apparente  $L'_n$  del solaio in CLT. Questa scelta è condizionata dalla disponibilità dei dati di misura limitata a quelli del livello di pressione sonora di calpestio, ottenuti da misurazioni eseguite nel corso dei lavori di costruzione.

Il campo delle simulazioni di calcolo condotte sul caso A è legato alla variabile  $K_{ij}$  (dB), indice di riduzione alle vibrazioni per la trasmissione laterale, e in totale saranno applicati quattro diversi modelli.

#### Modello di calcolo base

Il primo modello di calcolo applicato rappresenta la base per le successive computazioni agendo sulle variabili più critiche. Il *modello di calcolo base* è stato trattato nel capitolo precedente per la spiegazione del metodo nelle sue parti. Quindi, per i valori numerici delle grandezze e per lo sviluppo del metodo si fa riferimento al capitolo 4.

Di seguito si riprendono le variabili di ingresso del modello presentate nel capitolo 4 e si mantiene la stessa impostazione:

- le aree  $S$  (m<sup>2</sup>) degli elementi assunte pari alle superfici lorde;
- il potere fonoisolante  $R$  (dB) e il livello di pressione sonora di calpestio  $L_n$  (dB) del solaio riferiti a valori sperimentali (Figura 3.11), presi

rispettivamente dall'articolo *Direct impact sound insulation of cross laminated timber floors with e without toppings* [22] del gruppo di ricerca canadese e dall'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [12] del gruppo di ricerca dell'Università di Bologna;

- i poteri fonoisolante  $R$  (dB) delle pareti esterne ed interne simulati dal programma *Insul 8.0* (Figura 3.12 e Figura 3.14);
- i contributi aggiuntivi  $\Delta R_{floating}$ ,  $\Delta R_{ceiling}$ ,  $\Delta L_{floating}$  e  $\Delta L_{ceiling}$  assunti da prove sperimentali di stratigrafie di solai analoghe al caso studio, con e senza controsoffitto [12] (Tabella 4.2);
- le formule empiriche per il calcolo dei  $K_{ij}$  (dB) riferite ad una soluzione mista che si avvicini al sistema costruttivo reale: per i giunti che hanno come elemento  $i$  il solaio si impiegano le formule empiriche 2.29, riferite a giunti di una parete leggera a doppio strato ed elementi omogenei, mentre per i giunti che hanno come elemento  $i$  le strutture laterali si assumono le formule empiriche 4.3, riferite a giunti di strutture leggere in legno con elementi multistrato, introdotte nell'aggiornamento ISO DIS 12354:1 [1].

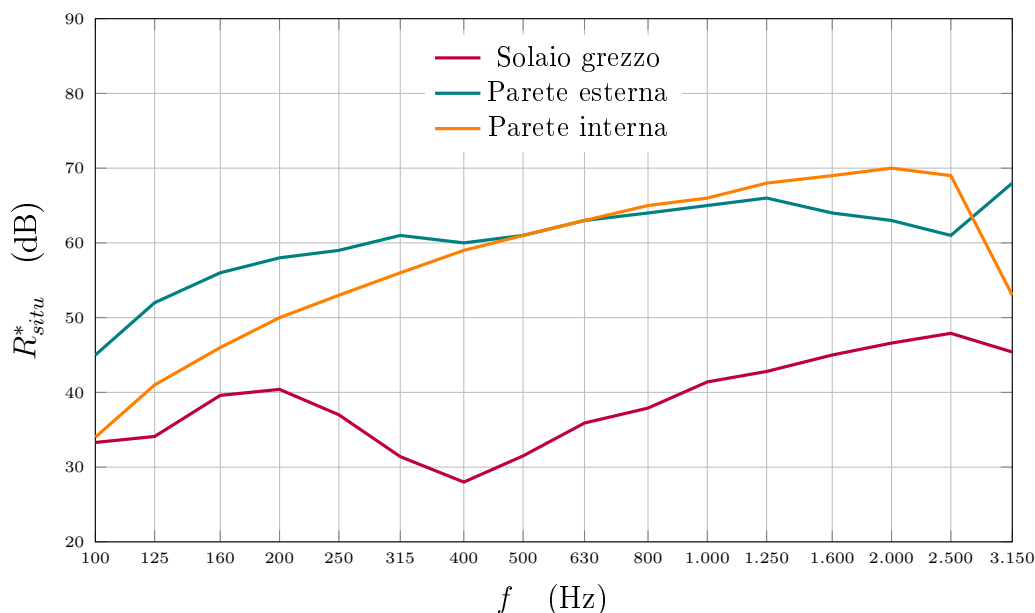


Figura 5.1: Grafico degli andamenti dei poteri fonoisolanti  $R_{situ}^*$  (dB), dati di ingresso del *modello base* (Caso A)

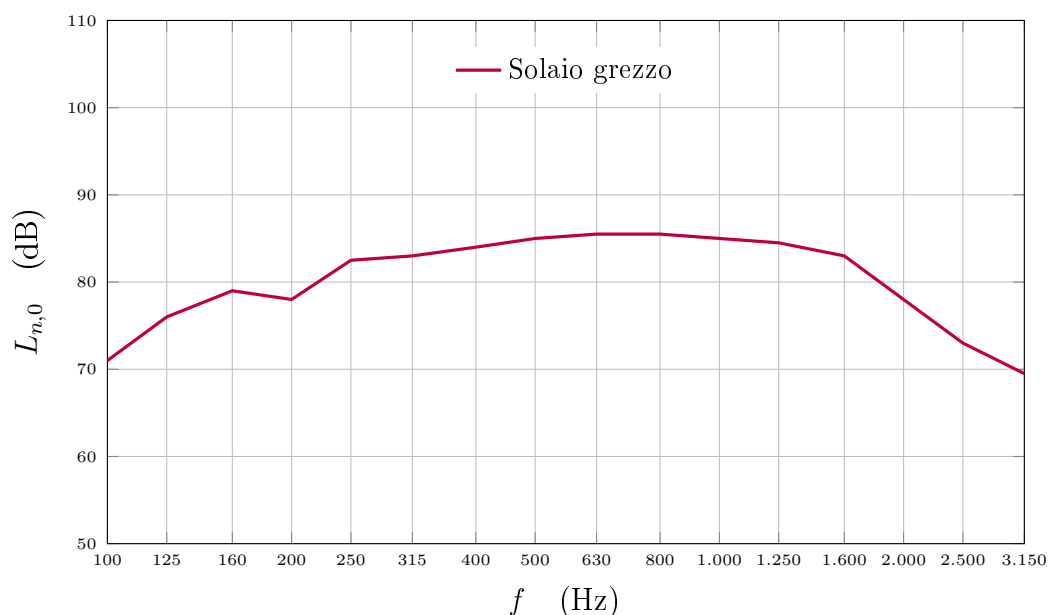


Figura 5.2: Grafico dell'andamento del livello di pressione di calpestio  $L_{n,0}$  (dB), dati di ingresso del *modello base* (Caso A)

La correzione degli 8 dB, introdotta dall'aggiornamento della normativa, è applicata ai poteri fonoisolanti in ingresso e non sul livello di pressione sonora di calpestio poiché quest'ultimo non fa riferimento ad un'eccitazione aerea dell'elemento, bensì meccanica. In figura 5.1 sono riportati gli andamenti dei poteri fonoisolanti corretti  $R_{situ}^*$  (dB), ricavati dall'interpolazione dei dati di ingresso della tabella 4.3 e in figura 5.2 l'andamento del livello di pressione di calpestio  $L_{n,0}$  (dB) (Tabella 4.3).

I dati di input acustici dei singoli elementi sono i medesimi per tutti i modelli del caso A.

### Modello di calcolo 1

Dal *modello di base* al *modello di calcolo 1* avviene la seguente modifica: i contributi aggiuntivi  $\Delta L_{floating}$  e  $\Delta L_{ceiling}$  non sono più dei dati sperimentali, ma vengono assunti uguali ai contributi reali, ricavati da considerazioni sulle misurazioni in opera. Questo è possibile grazie alla disponibilità di dati acquisiti dalle misurazioni eseguite durante la costruzione del solaio.

Di seguito vengono riportati i valori appena descritti:

Frequenza $f$ (Hz)	Strati aggiuntivi	
	$\Delta L_{ceiling}$ (dB)	$\Delta L_{floating}$ (dB)
100	5,9	3,5
125	10,7	5,6
160	9,1	8,1
200	8,5	11,0
250	15,8	12,9
315	16,5	14,5
400	18,8	18,2
500	22,5	19,9
630	25,7	22,2
800	25,4	26,2
1000	24,0	31,7
1250	24,2	33,1
1600	23,8	33,7
2000	18,8	33,8
2500	15,3	32,7
3150	17,0	31,5

Tabella 5.1: Contributi degli strati aggiuntivi del *modello di calcolo 1* (Caso A)

## Modello di calcolo 2

Una volta affinati i dati acustici di ingresso del modello, si analizza l'influenza dell'indice di riduzione delle vibrazioni, per poter fare delle considerazioni su queste nuove tipologie di strutture. Per il calcolo dei  $K_{ij}$  (dB), invece della soluzione mista adottata per il *modello di calcolo base e 1*, si opta per l'adozione delle formule empiriche di riferimento a giunzioni interamente in CLT (Figura 5.3).

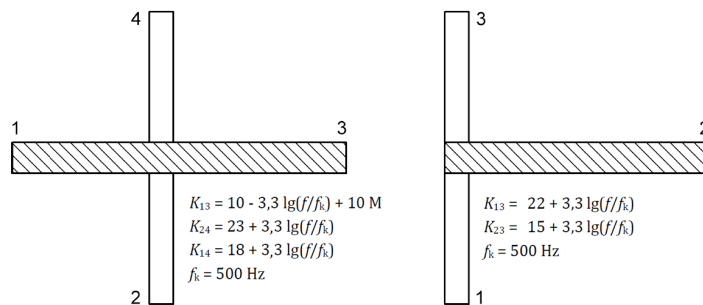


Figura 5.3: Schemi e formule empiriche per giunti tra elementi costruttivi in CLT [1]

Di seguito si riportano i valori degli indici di riduzione delle vibrazioni utilizzati nel *modello di calcolo 2*, facendo riferimento alle figure 4.4 e 4.5:

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)		Giunto (b)		Giunto (c)		Giunto (d)	
	$K_{D1,1d}$ (dB)	$K_{11}$ (dB)	$K_{D2,2d}$ (dB)	$K_{22}$ (dB)	$K_{D3,3d}$ (dB)	$K_{33}$ (dB)	$K_{D4,4d}$ (dB)	$K_{44}$ (dB)
100	12,7	19,7	12,7	19,7	15,7	17,2	15,7	17,2
125	13,0	20,0	13,0	20,0	16,0	18,1	16,0	18,1
160	13,4	20,4	13,4	20,4	16,4	18,0	16,4	18,0
200	13,7	20,7	13,7	20,7	16,7	17,6	16,7	17,6
250	14,0	21,0	14,0	21,0	17,0	17,5	17,0	17,5
315	14,3	21,3	14,3	21,3	17,3	17,5	17,3	17,5
400	14,7	21,7	14,7	21,7	17,7	17,4	17,7	17,4
500	15,0	22,0	15,0	22,0	18,0	17,4	18,0	17,4
630	15,3	22,3	15,3	22,3	18,3	17,3	18,3	17,3
800	15,7	22,7	15,7	22,7	18,7	17,3	18,7	17,3
1000	16,0	23,0	16,0	23,0	19,0	17,2	19,0	17,2
1250	16,3	23,3	16,3	23,3	19,3	17,2	19,3	17,2
1600	16,7	23,7	16,7	23,7	19,7	17,1	19,7	17,1
2000	17,0	24,0	17,0	24,0	20,0	17,1	20,0	17,1
2500	17,3	24,3	17,3	24,3	20,3	17,0	20,3	17,0
3150	17,6	24,6	17,6	24,6	20,6	17,0	20,6	17,0

Tabella 5.2: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti del solaio, *modello 2* (Caso A)

### Modello di calcolo 3

In quest'ultimo modello, si utilizzano gli indici di riduzione delle vibrazioni reali, ovvero i dati misurati attraverso le misure di velocità di vibrazione in opera.

Quindi, si riportano i valori degli indici di riduzione delle vibrazioni utilizzati nel *modello di calcolo 3*, facendo riferimento alla figura 4.4:

Inoltre, avendo posto all'inizio l'ipotesi di approssimazione delle superfici degli elementi al netto delle aperture a quelle totali al lordo delle aperture, si esegue una verifica sull'attendibilità di tale approssimazione. Si riscontra che l'incidenza è minima sui risultati finali.

Ad esempio, applicando al *modello 1* le superfici nette degli elementi dell'ambiente si assiste ad una diminuzione dei poteri fonoisolanti dei singoli percorsi al massimo dell'1% rispetto al modello di calcolo che tiene conto delle superfici lorde. Per l'indice di valutazione del livello di calpestio apparente si ottiene un decremento da  $L'_{n,w} = 52,4$  dB a  $L'_{n,w} = 52,3$  dB.

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a) $K_{14}$ (dB)	Giunto (b) $K_{12}$ (dB)	Giunto (c) $K_{23}$ (dB)	Giunto (d) $K_{34}$ (dB)
100	12,7		12,7	12,7
125	13,0		13,0	13,0
60	13,4		13,4	13,4
200	13,7		13,7	13,7
250	14,0		14,0	14,0
315	14,3		14,3	14,3
400	14,7		14,7	14,7
500	15,0	-2,0	15,0	15,0
630	15,3		15,3	15,3
800	15,7		15,7	15,7
1000	16,0		16,0	16,0
1250	16,3		16,3	16,3
1600	16,7		16,7	16,7
2000	17,0		17,0	17,0
2500	17,3		17,3	17,3
3150	17,6		17,6	17,6

Tabella 5.3: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti delle pareti laterali, *modello 2* (Caso A)

### 5.1.2 Caso B: ambienti adiacenti

La validazione del modello dettagliato di calcolo per gli ambienti adiacenti è incentrata sul potere fonoisolante apparente  $R'$  della parete divisoria tra due unità immobiliari.

I calcoli condotti sul secondo caso sono guidati dalla variabile  $K_{ij}$  (dB), indice di riduzione delle vibrazioni per la trasmissione laterale, e dal comportamento risonante degli elementi leggeri (correzione degli 8 dB) che costituiscono l'ambiente.

#### Modello di calcolo base

Il *modello di calcolo base* rappresenta il punto di partenza su cui poter sviluppare l'analisi dell'andamento del potere fonoisolante in funzione del cambiamento delle variabili ritenute più importanti.

Anche in questo caso, il *modello di calcolo base* è stato già trattato nel capitolo precedente per la presentazione del metodo nelle sue parti. Quindi, per i valori delle grandezze e per la metodologia si fa riferimento al capitolo 4.

Qui di seguito si riprendono le variabili di ingresso del modello presentate nel capitolo 4 e si mantiene la stessa impostazione:



Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)		Giunto (b)		Giunto (c)		Giunto (d)	
	$K_{D1,1d}$ (dB)	$K_{11}$ (dB)	$K_{D2,2d}$ (dB)	$K_{22}$ (dB)	$K_{D3,3d}$ (dB)	$K_{33}$ (dB)	$K_{D4,4d}$ (dB)	$K_{44}$ (dB)
100	16,0		14,0		19,4		18,1	
125	19,6		11,1		16,1		14,3	
160	17,0		17,0		17,9		16,9	
200	18,0		16,8		18,3		18,1	
250	14,7		13,5		22,3		21,2	
315	13,4		13,2		20,6		20,7	
400	16,9		11,1		18,9		18,5	
500	15,8		13,3		22,6		22,4	
630	12,0	11,0	13,9	11,0	20,6	11,0	18,4	11,0
800	15,2		13,5		19,4		20,4	
1000	16,2		17,3		21,7		22,7	
1250	17,8		19,9		19,8		23,0	
1600	22,6		23,3		23,6		25,8	
2000	23,7		25,2		27,5		29,4	
2500	25,5		24,0		27,8		29,3	
3150	31,6		30,5		35,0		34,9	

Tabella 5.4: Indici di riduzione delle vibrazioni reali per i giunti del solaio, *modello 3* (Caso A)

- le aree  $S$  (m<sup>2</sup>) degli elementi assunte pari alle superfici lorde;
- il potere fonoisolante  $R$  (dB) del solaio riferito a valori sperimentali (Figura 3.11), presi dall'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [12] del gruppo di ricerca dell'Università di Bologna;
- i poteri fonoisolante  $R$  (dB) delle pareti divisoria, esterna ed interna simulati dal programma *Insul 8.0* (Figura 3.18, Figura 3.12 e Figura 3.14);
- i contributi aggiuntivi  $\Delta R_{int}$ ,  $\Delta R_{est}$  dei rivestimenti della parete divisoria assunti dalla simulazione mediante il programma *Insul 8.0* e il contributo  $\Delta R_{ceiling}$  assunto da prove sperimentali di stratigrafie di solai analoghe al caso studio, con e senza controsoffitto [12] (Tabella 4.14);
- le formule empiriche per il calcolo dei  $K_{ij}$  (dB) riferite ad una soluzione mista che si avvicini al sistema costruttivo reale: per i giunti che hanno come elemento  $j$  il solaio si impiegano le formule empiriche 2.29, riferite a giunti di una parete leggera a doppio strato ed elementi omogenei, mentre per i giunti che hanno come elemento  $j$  le strutture laterali si

assumono le formule empiriche 4.3, riferite a giunti di strutture leggere in legno con elementi multistrato introdotte dalla ISO DIS 12354:1 [1];

- la correzione degli 8 dB, introdotta dall'aggiornamento della norma, è applicata ai poteri fonoisolanti in ingresso, in prima ipotesi, facendo riferimento alla frequenza critica dell'anima della parete (Figura 4.12).

In figura 5.4 sono riportati gli andamenti dei poteri fonoisolanti corretti  $R_{situ}^*$  (dB) in ingresso, ricavati dall'interpolazione dei dati della tabella 4.15.

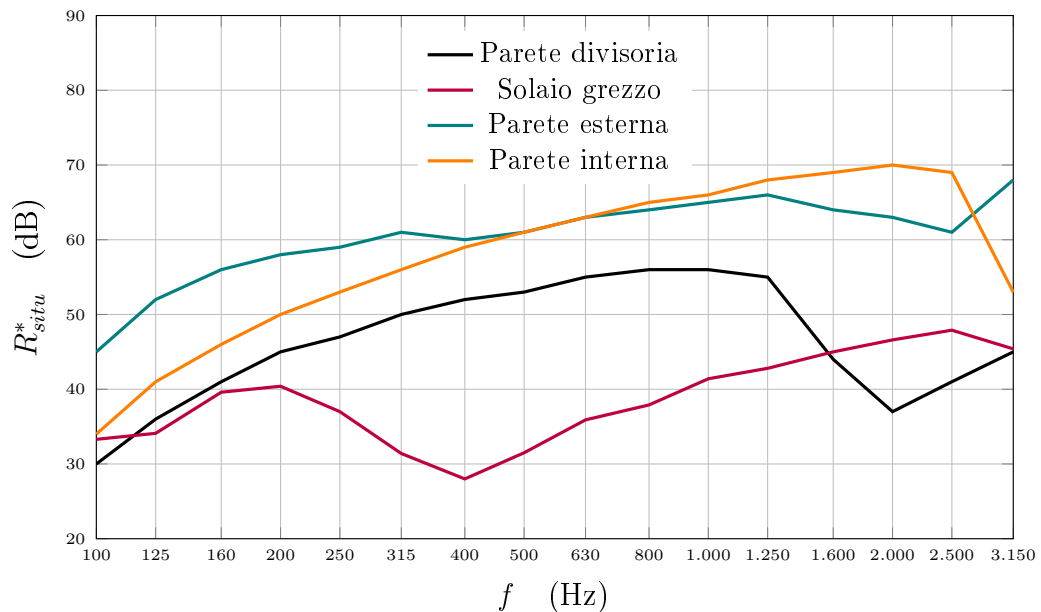


Figura 5.4: Grafico degli andamenti dei poteri fonoisolanti  $R_{situ}^*$  (dB) di ingresso del *modello base* (Caso B)

### Modello di calcolo 1

Nel *modello di calcolo 1* per il calcolo dei  $K_{ij}$  (dB) si adottano le formule empiriche di riferimento a giunzioni interamente in CLT (Figura 5.3).

Di seguito vengono riportati i valori degli indici di riduzione delle vibrazioni utilizzati nel *modello di calcolo 1*, facendo riferimento alle figure 4.13 e 4.14:

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)	Giunto (b)		Giunto (c)	Giunto (d)	
	$K_{D1,1d}$ (dB)	$K_{D2,2d}$ (dB)	$K_{22}$ (dB)	$K_{D3,3d}$ (dB)	$K_{D4,4d}$ (dB)	$K_{44}$ (dB)
100	29,1	27,9		27,8	27,9	
125	28,4	27,2		27,1	27,2	
160	27,6	26,4		26,3	26,4	
200	26,9	25,6		25,6	25,6	
250	26,1	24,8		24,8	24,8	
315	25,3	23,9		24,0	23,9	
400	24,5	23,1		23,2	23,1	
500	23,8	22,5	10,0	22,5	22,5	10,0
630	23,0	21,7		21,7	21,7	
800	22,1	20,9		20,8	20,9	
1000	21,3	20,1		20,0	20,1	
1250	20,5	19,3		19,2	19,3	
1600	19,0	17,9		17,8	17,9	
2000	16,4	16,6		16,5	16,6	
2500	16,1	16,1		14,5	16,1	
3150	15,9	15,6		14,2	15,6	

Tabella 5.5: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti della parete divisoria, *modello 1* (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	Giunto (a)	Giunto (b)	Giunto (c)	Giunto (d)
	$K_{14}$ (dB)	$K_{23}$ (dB)	$K_{34}$ (dB)	$K_{12}$ (dB)
100	27,2	27,2	29,6	29,6
125	26,5	26,5	28,9	28,9
160	25,6	25,6	28,1	28,1
200	24,8	24,8	27,3	27,3
250	24,0	24,0	26,5	26,5
315	23,1	23,1	25,5	25,5
400	22,3	22,3	24,8	24,8
500	21,6	21,6	24,1	24,1
630	20,8	20,8	23,3	23,3
800	20,0	20,0	22,5	22,5
1000	19,2	19,2	21,8	21,8
1250	18,4	18,4	21,0	21,0
1600	17,5	17,5	20,1	20,1
2000	15,4	15,4	19,3	19,3
2500	14,9	14,9	17,1	17,1
3150	14,4	14,4	16,5	16,5

Tabella 5.6: Indici di riduzione delle vibrazioni per i giunti degli elementi laterali, *modello 1* (Caso B)

## Modello di calcolo 2

Nel *modello di calcolo 2* si considera un diverso approccio al comportamento risonante della parete divisoria.

A differenza del modello precedente, la frequenza di coincidenza non si riferisce all'anima della parete, bensì all'ultimo strato della parete completa (Figura 4.12). Quindi, si considera che è l'ultimo strato dell'intera parete a reimmettere energia sonora nell'ambiente.

In questo modo, poiché la frequenza di coincidenza risulta oltre i 3150 Hz, la correzione degli 8 dB è applicata su tutte le bande di frequenza considerate nel calcolo.

## Modello di calcolo 3

Sulla base dei dati di ingresso del *modello di calcolo 2*, nel *modello di calcolo 3* si esegue una correzione empirica del contributo del rivestimento esterno della parete, in prima ipotesi posto uguale a quello del rivestimento interno. Si ritiene opportuna questa correzione in quanto si osserva un problema di dimensionamento di base per il potere fonoisolante stimato dal software utilizzato.

Frequenza $f$ (Hz)	Rivestimenti		Controsoffitto
	$\Delta R_{int}$ (dB)	$\Delta R_{est}$ (dB)	$\Delta R_{ceiling}$ (dB)
100	5,0	5,0	2,5
125	3,0	3,0	18,0
160	5,0	5,0	21,8
200	6,0	6,0	19,0
250	7,0	9,0	25,7
315	6,0	9,0	24,9
400	6,0	10,0	32,3
500	7,0	12,0	27,6
630	6,0	12,0	23,3
800	6,0	13,0	26,5
1000	4,0	12,0	26,9
1250	5,0	14,0	25,2
1600	13,0	23,0	26,7
2000	22,0	22,0	28,3
2500	19,0	19,0	25,2
3150	14,0	14,0	31,6

Tabella 5.7: Contributi degli strati aggiuntivi  $\Delta R$  (dB) di ingresso del *modello 3* (Caso B)

## 5.2 Risultati ottenuti

### 5.2.1 Caso A: ambienti sovrapposti

Per il caso A si presentano solamente i risultati per il livello di calpestio apparente  $L'_n$ , in quanto per i poteri fonoisolanti non ci sono dati di misura con cui poterli confrontare.

#### Modello di calcolo base

L'indice di valutazione del livello di calpestio apparente  $L'_{n,w}$  del solaio, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 2 [19], utilizzando il *modello di calcolo base*, risulta:

$$L'_{n,w}(C_l) = 40,0 (2) \text{ dB}$$

I risultati parziali sono riportati nella tabella 5.8.

#### Modello di calcolo 1

L'indice di valutazione del livello di calpestio apparente  $L'_{n,w}$  del solaio, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 2 [19], utilizzando il *modello di calcolo 1*, risulta:

$$L'_{n,w}(C_l) = 52,4 (1) \text{ dB}$$

I risultati parziali sono riportati nella tabella 5.9.

#### Modello di calcolo 2

L'indice di valutazione del livello di calpestio apparente  $L'_{n,w}$  del solaio, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 2 [19], utilizzando il *modello di calcolo 2*, risulta:

$$L'_{n,w}(C_l) = 51,6 (1) \text{ dB}$$

I risultati parziali sono riportati nella tabella 5.10.

#### Modello di calcolo 3

L'indice di valutazione del livello di calpestio apparente  $L'_{n,w}$  del solaio, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 2 [19], utilizzando il *modello di calcolo 3*, risulta:

$$L'_{n,w}(C_l) = 51,9 (1) \text{ dB}$$

I risultati parziali sono riportati nella tabella 5.11.

Frequenza $f$ (Hz)	Solaio					Totale $L'_n$ (dB)
	$L_{n,Dd}$ (dB)	$L_{n,D1}$ (dB)	$L_{n,D2}$ (dB)	$L_{n,D3}$ (dB)	$L_{n,D4}$ (dB)	
100	45,3	39,0	37,3	45,9	45,1	50,7
125	50,8	34,3	32,6	41,2	40,3	51,7
160	49,5	37,5	35,7	43,7	42,9	51,5
200	45,2	27,5	25,8	32,6	31,8	45,7
250	33,8	22,3	20,6	26,3	25,5	35,4
315	30,8	21,4	19,7	24,9	24,0	33,0
400	29,9	19,4	17,7	20,7	19,9	31,3
500	30,6	20,8	19,1	21,6	20,8	32,1
630	27,4	18,9	17,2	19,5	18,7	29,2
800	24,3	17,8	16,1	17,8	17,0	26,8
1000	24,0	18,2	16,5	18,1	17,3	26,8
1250	23,4	17,8	16,1	17,1	16,3	26,2
1600	18,8	15,2	13,5	12,9	12,1	22,2
2000	12,7	8,4	6,8	5,7	4,9	15,7
2500	12,3	5,1	3,6	0,5	-0,3	13,9
3150	4,8	-5,3	-6,8	1,6	0,8	7,9

Tabella 5.8: Risultati del livello di calpestio calcolati con il *modello base* (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	Solaio					Totale $L'_n$ (dB)
	$L_{n,Dd}$ (dB)	$L_{n,D1}$ (dB)	$L_{n,D2}$ (dB)	$L_{n,D3}$ (dB)	$L_{n,D4}$ (dB)	
100	61,6	48,4	46,7	55,3	54,5	63,4
125	59,7	47,8	46,0	54,6	53,8	61,9
160	61,8	48,5	46,7	54,7	53,9	63,4
200	58,5	43,4	41,7	48,6	47,7	59,4
250	53,8	43,2	41,5	47,3	46,5	55,7
315	52,0	37,7	36,0	41,2	40,3	52,8
400	47,0	33,3	31,6	34,6	33,8	47,7
500	42,6	33,3	31,6	34,1	33,3	44,2
630	37,6	32,2	30,5	32,8	32,0	40,8
800	33,9	28,1	26,4	28,1	27,3	36,7
1000	29,3	22,8	21,1	22,7	21,9	31,8
1250	27,2	20,5	18,8	19,8	19,0	29,5
1600	25,5	19,8	18,2	17,5	16,7	27,9
2000	25,4	14,7	13,2	12,0	11,2	26,3
2500	25,0	11,9	10,4	7,3	6,5	25,5
3150	21,0	4,4	2,8	11,2	10,4	21,9

Tabella 5.9: Risultati del livello di calpestio calcolati con il *modello 1* (Caso A)

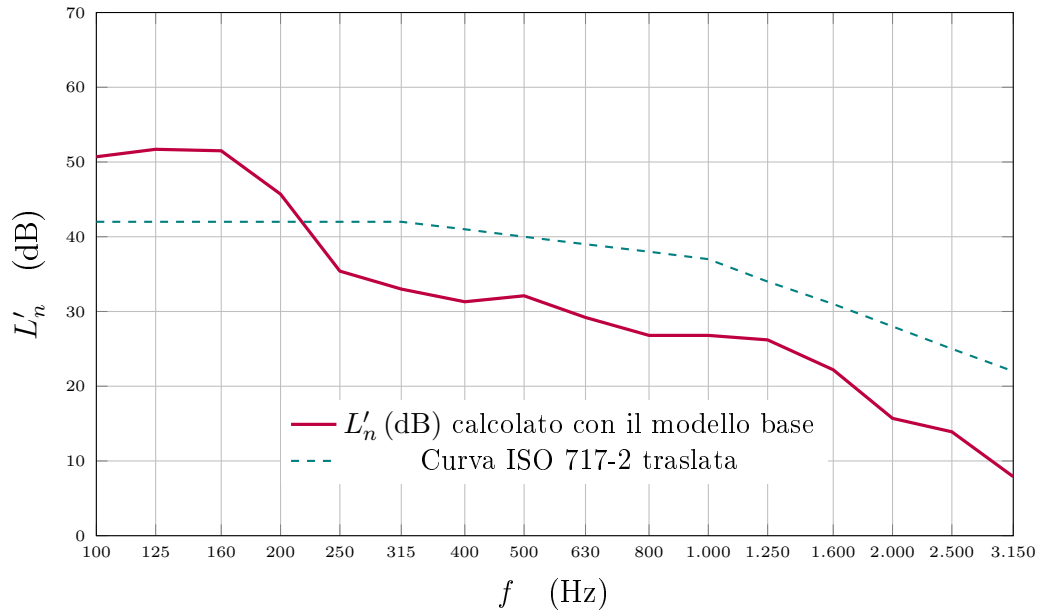
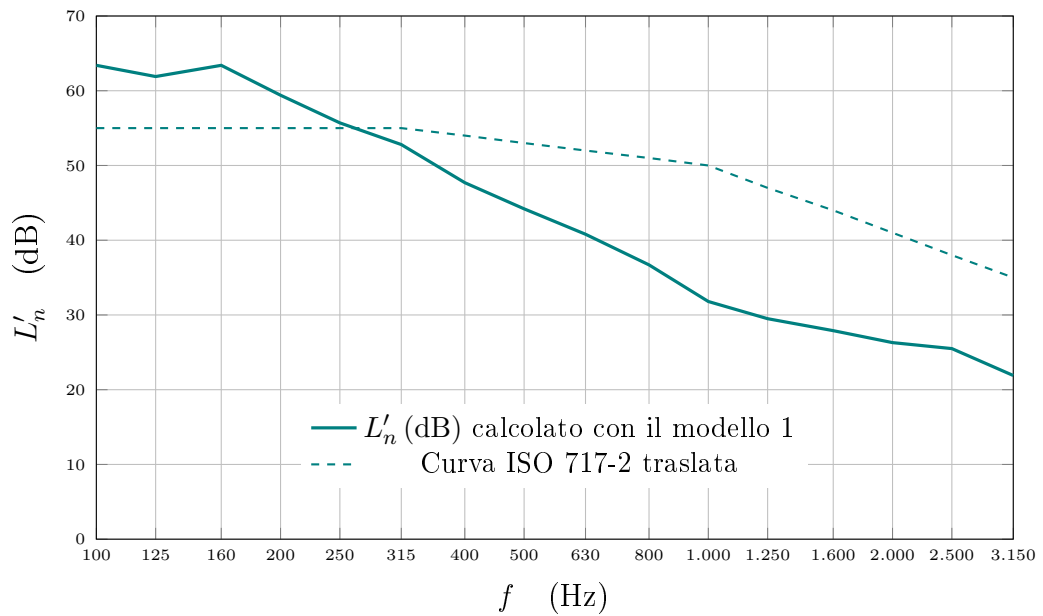
Frequenza $f$ (Hz)	Solaio					Totale $L'_n$ (dB)
	$L_{n,Dd}$ (dB)	$L_{n,D1}$ (dB)	$L_{n,D2}$ (dB)	$L_{n,D3}$ (dB)	$L_{n,D4}$ (dB)	
100	61,6	46,6	44,8	52,0	51,1	62,6
125	59,7	45,9	44,1	51,2	50,3	60,9
160	61,8	46,5	44,7	51,2	50,3	62,6
200	58,5	41,5	39,7	45,0	44,1	59,0
250	53,8	41,2	39,4	43,7	42,8	54,8
315	52,0	35,6	33,9	37,5	36,6	52,4
400	47,0	31,2	29,4	30,9	30,0	47,4
500	42,6	31,2	29,5	30,3	29,4	43,5
630	37,6	30,0	28,3	29,0	28,1	39,5
800	33,9	25,9	24,2	24,3	23,4	35,6
1000	29,3	20,6	18,9	18,8	17,9	30,7
1250	27,2	18,2	16,6	15,9	15,0	28,5
1600	25,5	17,5	15,9	13,5	12,7	26,9
2000	25,4	12,4	10,8	7,9	7,1	25,9
2500	25,0	9,6	8,0	3,2	2,3	25,3
3150	21,0	2,0	0,5	7,0	6,2	21,4

Tabella 5.10: Risultati del livello di calpestio calcolati con il *modello 2* (Caso A)

Frequenza $f$ (Hz)	Solaio					Totale $L'_n$ (dB)
	$L_{n,Dd}$ (dB)	$L_{n,D1}$ (dB)	$L_{n,D2}$ (dB)	$L_{n,D3}$ (dB)	$L_{n,D4}$ (dB)	
100	61,6	43,3	41,5	53,6	48,7	62,5
125	59,7	39,3	37,5	56,0	51,9	61,8
160	61,8	43,0	41,2	50,5	49,7	62,4
200	58,5	37,1	35,4	44,9	42,7	58,8
250	53,8	40,5	38,8	47,1	38,6	55,0
315	52,0	36,6	34,8	41,5	33,2	52,6
400	47,0	28,9	27,2	37,4	29,2	47,6
500	42,6	30,3	28,6	34,9	25,1	43,7
630	37,6	33,4	31,7	33,4	28,1	40,9
800	33,9	26,4	24,7	29,4	21,7	36,2
1000	29,3	20,3	18,7	20,4	14,2	30,7
1250	27,2	16,7	15,1	15,2	11,3	28,1
1600	25,5	11,5	9,9	9,8	6,6	25,9
2000	25,4	5,6	4,1	2,7	-2,3	25,5
2500	25,0	1,3	-0,2	-0,5	-6,6	25,0
3150	21,0	-12,0	-13,5	-2,8	-8,0	21,0

Tabella 5.11: Risultati del livello di calpestio calcolati con il *modello 3* (Caso A)

## Grafici dei risultati dei modelli di calcolo

Figura 5.5: Grafico finale dell'andamento di  $L'_n$  calcolato con il *modello base* (Caso A)Figura 5.6: Grafico finale dell'andamento di  $L'_n$  calcolato con il *modello 1* (Caso A)



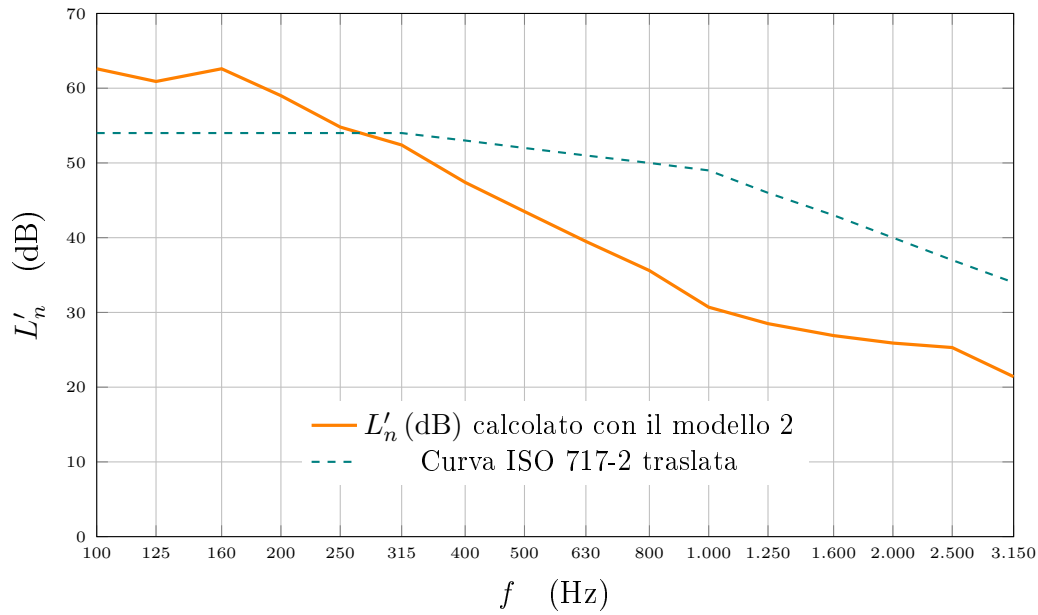


Figura 5.7: Grafico finale dell'andamento di  $L'_n$  calcolato con il *modello 2* (Caso A)

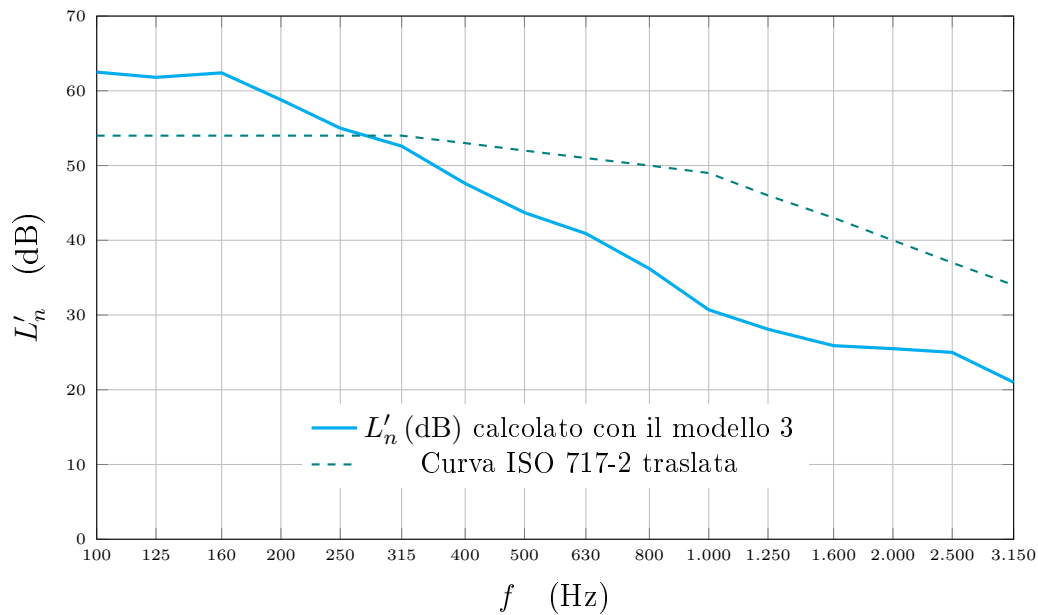


Figura 5.8: Grafico finale dell'andamento di  $L'_n$  calcolato con il *modello 3* (Caso A)

### 5.2.2 Caso B: ambienti adiacenti

Per il caso B si presentano i risultati per il potere fonoisolante apparente  $R'$  della parete divisoria tra due unità immobiliari, di cui sono disponibili i

dati di misura in opera.

### Modello di calcolo base

Il potere fonoisolante apparente  $R'_w$  della parete divisoria, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16], utilizzando il *modello di calcolo base*, risulta:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 63,0 (-2; -8) \text{ dB}$$

Nella tabella 5.12 sono riportati i risultati parziali e totali calcolati per il potere fonoisolante.

### Modello di calcolo 1

Il potere fonoisolante apparente  $R'_w$  della parete divisoria, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16], utilizzando il *modello di calcolo 1*, risulta:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 64,8 (-3; -9) \text{ dB}$$

Nella tabella 5.13 sono riportati i risultati parziali e totali calcolati per il potere fonoisolante.

### Modello di calcolo 2

Il potere fonoisolante apparente  $R'_w$  della parete divisoria, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16], utilizzando il *modello di calcolo 2*, risulta:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 64,7 (-3; -9) \text{ dB}$$

Nella tabella 5.14 sono riportati i risultati parziali e totali calcolati per il potere fonoisolante.

### Modello di calcolo 3

Il potere fonoisolante apparente  $R'_w$  della parete divisoria, determinato in conformità alla UNI EN ISO 717 parte 1 [16], utilizzando il *modello di calcolo 3*, risulta:

$$R'_w(C, C_{tr}) = 67,4 (-4; -11) \text{ dB}$$

Nella tabella 5.15 sono riportati i risultati calcolati parziali e totali calcolati per il potere fonoisolante.

Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )		Totale $R'$ (dB)
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	
100	40,0	69,6	50,5	62,9	50,5	69,6	50,5	50,0	62,9	50,5	50,0	38,0
125	42,0	73,8	52,6	67,1	52,6	73,8	52,6	66,4	67,1	52,6	66,4	40,7
160	51,0	80,0	60,6	73,7	60,6	80,0	60,6	75,8	73,7	60,6	75,8	49,4
200	57,0	83,7	64,8	78,4	64,8	83,6	64,8	73,9	78,4	64,8	73,9	54,6
250	61,0	85,8	65,9	81,6	65,9	85,8	65,9	77,5	81,6	65,9	77,5	57,3
315	62,0	87,0	64,5	83,3	64,5	87,0	64,5	71,5	83,3	64,5	71,5	56,6
400	64,0	87,2	64,6	85,4	64,6	87,1	64,6	75,5	85,4	64,6	75,5	57,3
500	67,0	88,8	68,5	87,6	68,5	88,8	68,5	74,3	87,6	68,5	74,3	60,7
630	67,0	89,5	71,4	88,3	71,4	89,5	71,4	74,4	88,3	71,4	74,4	62,5
800	68,0	90,2	73,7	89,4	73,7	90,2	73,7	79,7	89,4	73,7	79,7	64,5
1000	64,0	88,3	74,3	87,6	74,3	88,3	74,3	83,7	87,6	74,3	83,7	62,5
1250	65,0	89,0	76,3	88,8	76,3	89,0	76,3	83,5	88,8	76,3	83,5	63,7
1600	70,0	90,2	81,3	91,4	81,3	90,2	81,3	87,3	91,4	81,3	87,3	68,6
2000	81,0	94,9	88,9	97,1	88,9	94,9	88,9	90,6	97,1	88,9	90,6	78,0
2500	79,0	92,5	89,0	95,3	89,0	92,5	89,0	88,9	95,3	89,0	88,9	76,6
3150	73,0	92,7	85,3	84,0	85,3	92,7	85,3	93,0	84,0	85,3	93,0	71,4

Tabella 5.12: Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il *modello base* (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )		Totale $R'$ (dB)
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	
100	40,0	69,6	64,5	62,9	64,5	69,6	64,5	47,5	62,9	64,5	47,5	38,6
125	42,0	73,8	65,5	67,1	65,5	73,8	65,5	64,2	67,1	65,5	64,2	41,8
160	51,0	80,0	72,4	73,7	72,4	80,0	72,4	74,0	73,7	72,4	74,0	50,8
200	57,0	83,7	75,5	78,4	75,5	83,7	75,5	72,5	78,4	75,5	72,5	56,5
250	61,0	85,8	75,5	81,6	75,5	85,8	75,5	76,4	81,6	75,5	76,4	60,1
315	62,0	87,0	72,9	83,3	72,9	87,0	72,9	70,7	83,3	72,9	70,7	59,9
400	64,0	87,2	71,8	85,4	71,8	87,2	71,8	75,1	85,4	71,8	75,1	61,3
500	67,0	88,8	74,7	87,6	74,7	88,8	74,7	74,2	87,6	74,7	74,2	63,8
630	67,0	89,5	76,6	88,3	76,6	89,5	76,6	74,6	88,3	76,6	74,6	64,4
800	68,0	90,2	77,8	89,4	77,8	90,2	77,8	80,3	89,4	77,8	80,3	66,0
1000	64,0	88,3	77,2	87,6	77,2	88,3	77,2	84,6	87,6	77,2	84,6	63,1
1250	65,0	89,0	78,1	88,8	78,1	89,0	78,1	84,7	88,8	78,1	84,7	64,1
1600	70,0	90,2	81,3	91,4	81,3	90,2	81,3	88,9	91,4	81,3	88,9	68,7
2000	81,0	94,9	87,3	97,1	87,3	94,9	87,3	92,5	97,1	87,3	92,5	77,6
2500	79,0	92,5	86,6	95,3	86,6	92,5	86,6	91,2	95,3	86,6	91,2	76,1
3150	73,0	92,7	82,1	84,0	82,1	92,7	82,1	95,6	84,0	82,1	95,6	70,7

Tabella 5.13: Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il *modello 1* (Caso B)

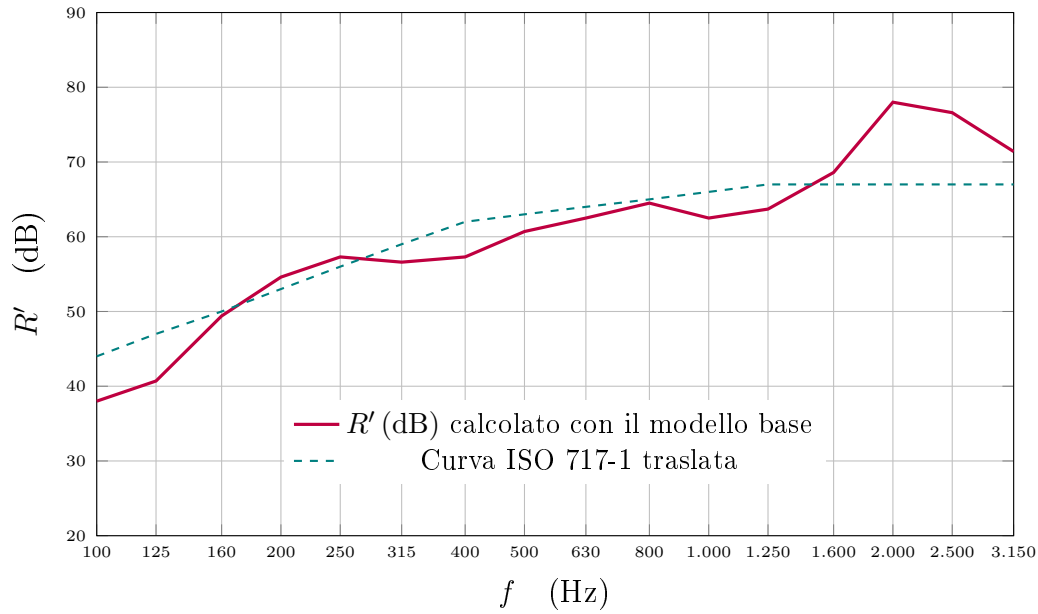
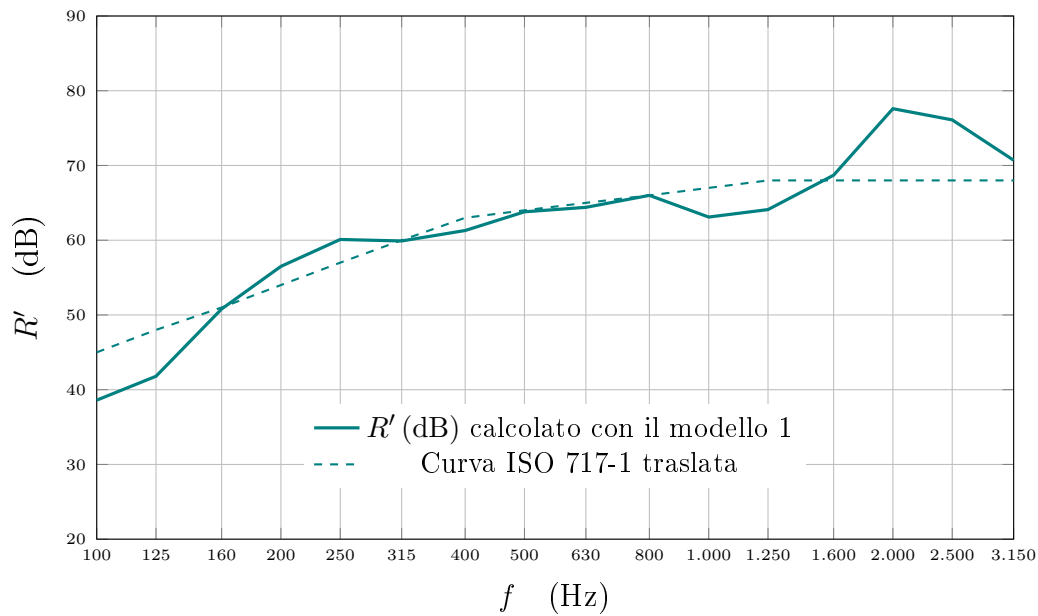
Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )		Totale
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	$R'$ (dB)
100	40,0	69,7	64,5	63,0	64,5	69,4	64,5	47,5	62,8	64,5	47,5	38,6
125	42,0	73,9	65,5	67,1	65,5	73,6	65,5	64,2	67,0	65,5	64,2	41,8
160	51,0	80,0	72,4	73,8	72,4	79,8	72,4	74,0	73,6	72,4	74,0	50,8
200	57,0	83,7	75,5	78,5	75,5	83,5	75,5	72,5	78,3	75,5	72,5	56,5
250	61,0	85,9	75,5	81,6	75,5	85,7	75,5	76,4	81,5	75,5	76,4	60,1
315	62,0	87,0	72,9	83,3	72,9	86,9	72,9	70,7	83,2	72,9	70,7	59,9
400	64,0	87,2	71,8	85,5	71,8	87,0	71,8	75,1	85,4	71,8	75,1	61,3
500	67,0	88,9	74,7	87,6	74,7	88,7	74,7	74,2	87,5	74,7	74,2	63,8
630	67,0	89,5	76,6	88,3	76,6	89,4	76,6	74,6	88,2	76,6	74,6	64,4
800	68,0	90,2	77,8	89,5	77,8	90,1	77,8	80,3	89,4	77,8	80,3	66,0
1000	64,0	88,4	77,2	87,6	77,2	88,3	77,2	84,6	87,6	77,2	84,6	63,1
1250	65,0	89,0	78,1	88,8	78,1	89,0	78,1	84,7	88,8	78,1	84,7	64,1
1600	70,0	90,2	81,3	91,5	81,3	90,1	81,3	88,9	91,4	81,3	88,9	68,7
2000	89,0	98,9	91,3	101,1	91,3	98,8	91,3	92,5	101,1	91,3	92,5	82,4
2500	87,0	96,5	90,6	99,3	90,6	96,5	90,6	91,2	99,3	90,6	91,2	81,2
3150	81,0	96,7	86,1	88,0	86,1	96,7	86,1	95,6	87,9	86,1	95,6	76,6

Tabella 5.14: Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il *modello 2* (Caso B)

Frequenza $f$ (Hz)	Parete divisoria ( $i$ )					Parete esterna ( $j = 1$ )	Solaio ( $j = 2$ )		Parete interna ( $j = 3$ )	Solaio ( $j = 4$ )		Totale
	$R_{Dd}$ (dB)	$R_{1d}$ (dB)	$R_{2d}$ (dB)	$R_{3d}$ (dB)	$R_{4d}$ (dB)	$R_{D1}$ (dB)	$R_{D2}$ (dB)	$R_{22}$ (dB)	$R_{D3}$ (dB)	$R_{D4}$ (dB)	$R_{44}$ (dB)	$R'$ (dB)
100	40,0	69,7	64,5	63,0	64,5	69,4	64,5	47,5	62,8	64,5	47,5	38,6
125	42,0	73,9	65,5	67,1	65,5	73,6	65,5	64,2	67,0	65,5	64,2	41,8
160	51,0	80,0	72,4	73,8	72,4	79,8	72,4	74,0	73,6	72,4	74,0	50,8
200	57,0	83,7	75,5	78,5	75,5	83,5	75,5	72,5	78,3	75,5	72,5	56,5
250	63,0	87,9	77,5	83,6	77,5	85,7	75,5	76,4	81,5	75,5	76,4	61,8
315	65,0	90,0	75,9	86,3	75,9	86,9	72,9	70,7	83,2	72,9	70,7	61,9
400	68,0	91,2	75,8	89,5	75,8	87,0	71,8	75,1	85,4	71,8	75,1	63,9
500	72,0	93,9	79,7	92,6	79,7	88,7	74,7	74,2	87,5	74,7	74,2	66,3
630	73,0	95,5	82,6	94,3	82,6	89,4	76,6	74,6	88,2	76,6	74,6	67,5
800	75,0	97,2	84,8	96,5	84,8	90,1	77,8	80,3	89,4	77,8	80,3	70,3
1000	72,0	96,4	85,2	95,6	85,2	88,3	77,2	84,6	87,6	77,2	84,6	69,3
1250	74,0	98,0	87,1	97,8	87,1	89,0	78,1	84,7	88,8	78,1	84,7	70,7
1600	80,0	100,2	91,3	101,5	91,3	90,1	81,3	88,9	91,4	81,3	88,9	75,1
2000	89,0	98,9	91,3	101,1	91,3	98,8	91,3	92,5	101,1	91,3	92,5	82,4
2500	87,0	96,5	90,6	99,3	90,6	96,5	90,6	91,2	99,3	90,6	91,2	81,2
3150	81,0	96,7	86,1	88,0	86,1	96,7	86,1	95,6	87,9	86,1	95,6	76,6

Tabella 5.15: Risultati del potere fonoisolante della parete divisoria calcolati con il *modello 3* (Caso B)

## Grafici dei risultati dei modelli di calcolo

Figura 5.9: Grafico finale dell'andamento di  $R'$  calcolato con il *modello base* (Caso B)Figura 5.10: Grafico finale dell'andamento di  $R'$  calcolato con il *modello 1* (Caso B)

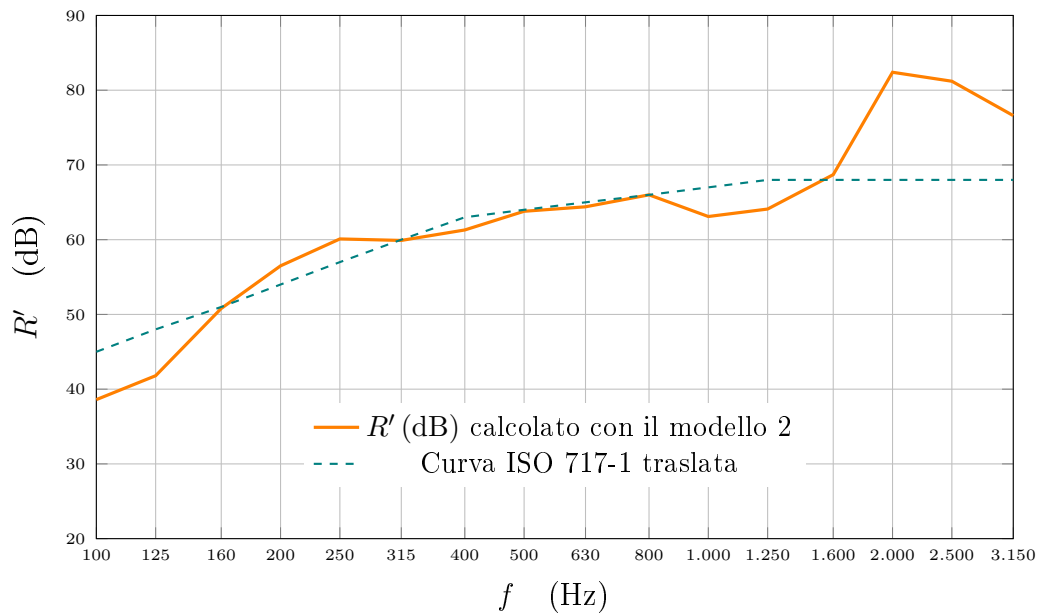


Figura 5.11: Grafico finale dell'andamento di  $R'$  calcolato con il *modello 2* (Caso B)

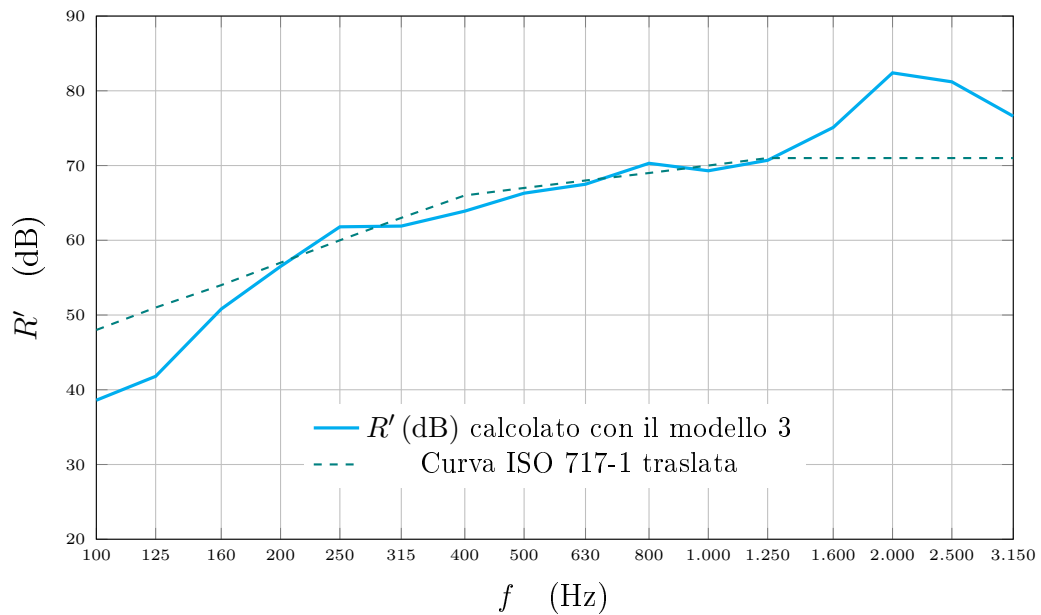


Figura 5.12: Grafico finale dell'andamento di  $R'$  calcolato con il *modello 3* (Caso B)

### 5.3 Confronto con i dati misurati in opera

In questo paragrafo vengono illustrati i grafici finali di confronto dei valori misurati in opera per il caso A e per il caso B.



## 5.3.1 Caso 1: ambienti sovrapposti

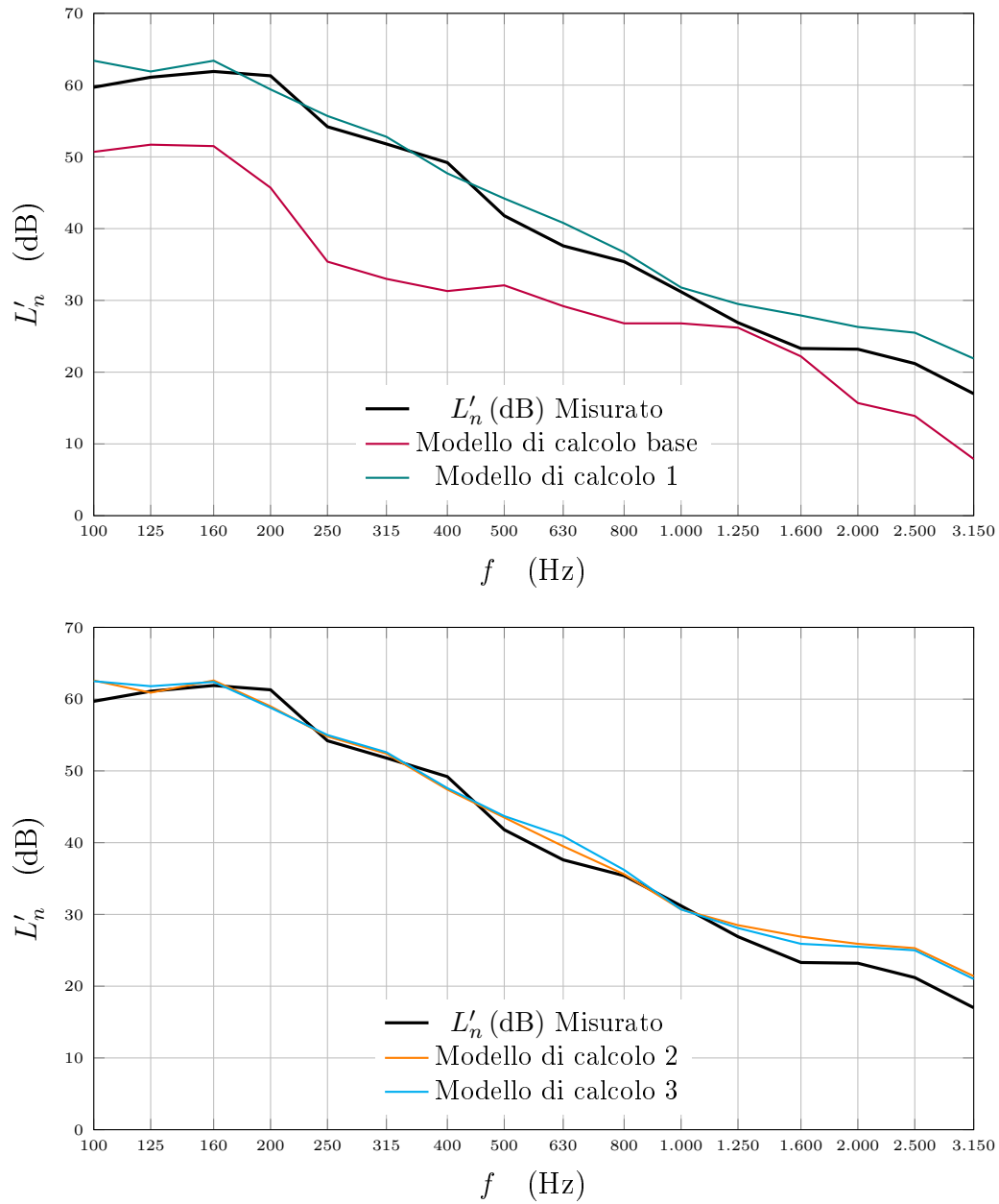


Figura 5.13: Grafici di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso A)

### 5.3.2 Caso 2: ambienti adiacenti

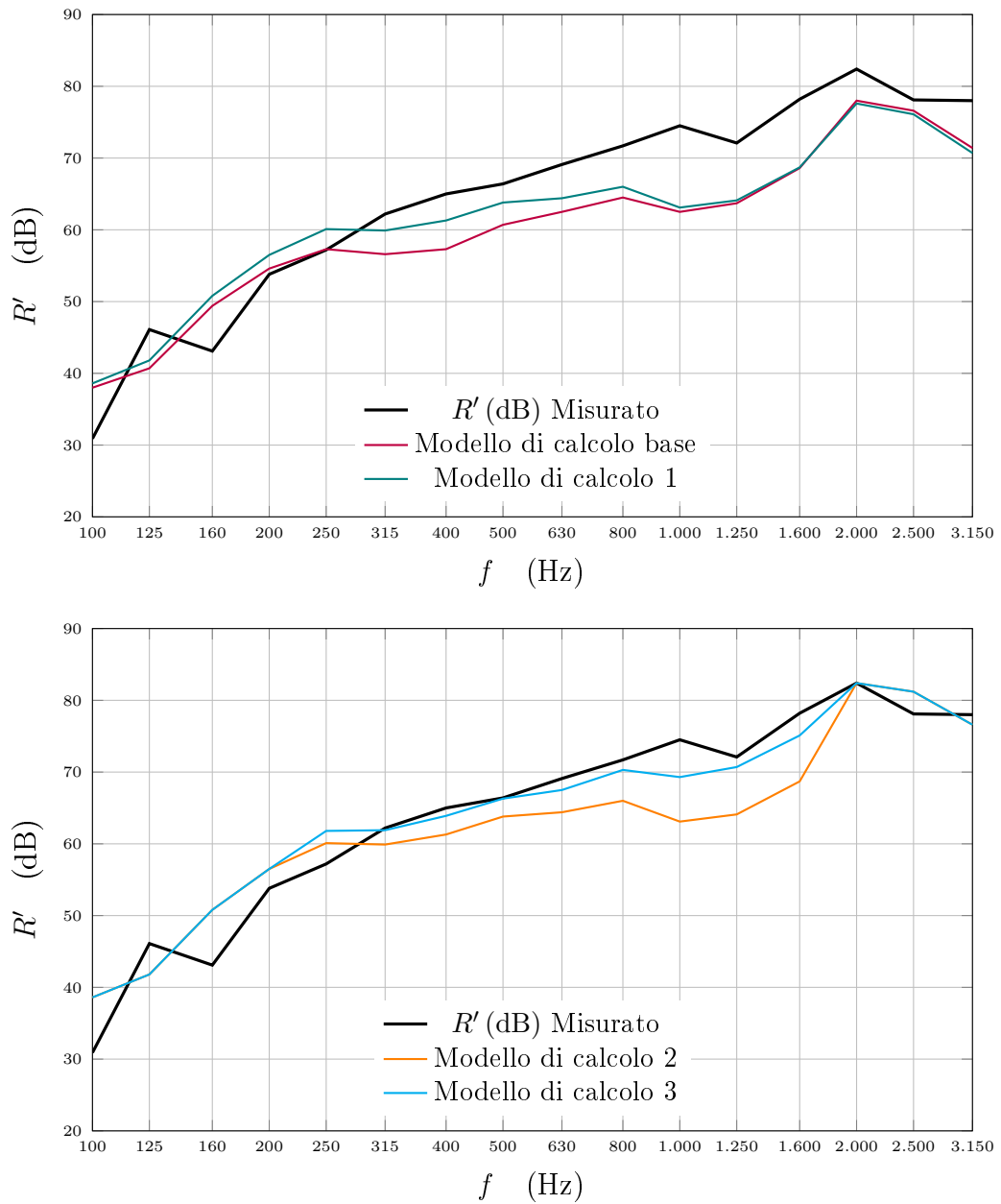


Figura 5.14: Grafici di confronto fra i modelli di calcolo e i valori misurati (Caso B)

## 5.4 Incidenza delle variabili sui risultati finali

Di seguito sono elencate le considerazioni in merito alla validazione del modello di calcolo sia del livello di pressione sonora di calpestio apparente e sia del potere fonoisolante apparente, a partire dai risultati precedentemente illustrati:

- si osserva l'elevata incidenza dei dati  $L_n$  e  $\Delta L_n$  in ingresso al modello di calcolo per il caso A (Figura 5.13): il *modello di base*, che considera in ingresso dei valori sperimentali, risulta molto distante da quello che è il comportamento reale del sistema. Si noti il cambiamento drastico tra la curva del *modello base* in rosso e la curva del *modello 1* in verde.

Inoltre, si osserva l'incidenza dei contributi dei rivestimenti in ingresso  $\Delta R$  al modello di calcolo per il caso B (Figura 5.14): dal *modello di calcolo 2* (in arancione) utilizzando dei valori più idonei, si ottiene con il *modello di calcolo 3* un andamento maggiormente reale (in azzurro).

Pertanto, si può affermare che se non si dispone di dati sperimentali specifici degli elementi del caso studio è difficile ottenere dei risultati attendibili.

- Si riscontra, in entrambi i casi, che è accettabile l'approssimazione del modello geometrico da reale a ideale, poiché l'incidenza delle superfici come variabile del modello di calcolo è minima.
- Risulta corretta la scelta di considerare la correzione degli 8 dB introdotta dall'aggiornamento della normativa. In merito a questo aspetto, però, occorre prestare attenzione a qual è lo strato dell'elemento che irradia energia sonora nell'ambiente (fenomeno della coincidenza). Quanto appena detto si può riscontrare nella figura 5.14, dove il passaggio dal *modello di calcolo 1*, in verde, al *modello di calcolo 2*, in arancione, è tradotto in un miglioramento dell'andamento del potere fonoisolante sulle alte frequenze.
- La scelta delle formule empiriche per il calcolo dei valori degli indici di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$  risulta determinante per l'andamento complessivo delle curve e non per gli indici  $R'$  e  $L_n$  finali. Ciò è giustificato dal fatto che gli indici di valutazione sono semplificativi e non mantengono informazioni relative all'andamento in frequenza dei descrittori.

Di seguito si riporta un esempio esplicativo di quanto appena detto: partendo dal *modello di calcolo 3*, che risulta il più attendibile, e applicando i  $K_{ij}$  del *modello di calcolo di base*, soluzione mista, si osserva un

miglioramento dell'indice di valutazione, anche se nel complesso l'andamento risulta meno realistico. Inoltre, si assiste all'aumento del potere fonoisolante da  $R'_w = 67,4$  dB a  $R'_w = 65,2$  dB avvicinandosi al valore misurato di  $R'_w = 65,6$  dB, ma alle medio-alte frequenze il modello si è discosta dalla curva reale (rispettivamente in magenta e in nero nella figura 5.15).

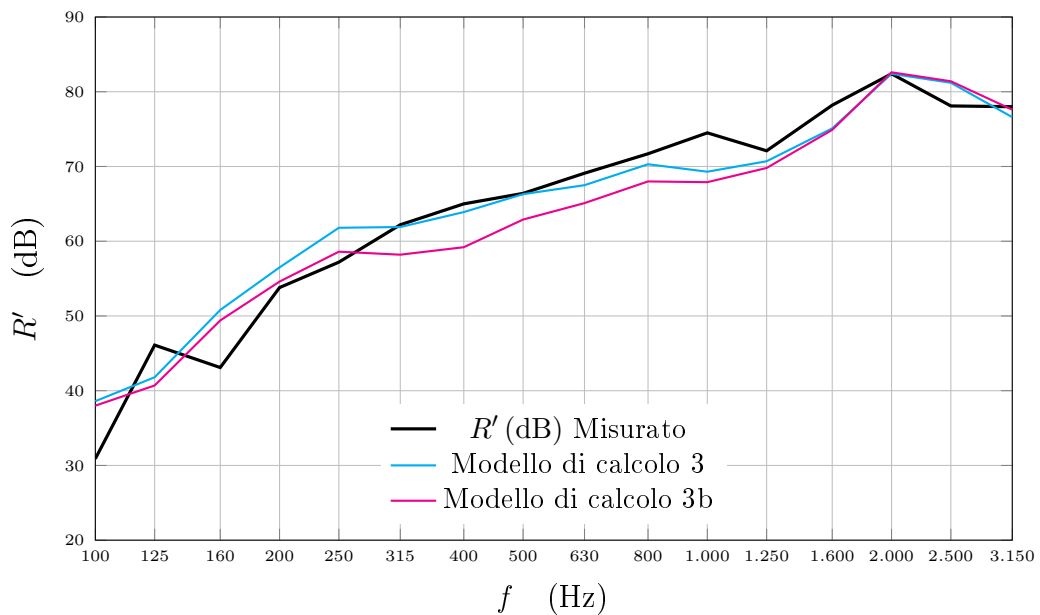


Figura 5.15: Grafico di confronto fra il *modello di calcolo 3* e il *modello di calcolo 3b* (Caso B)

## 5.5 Validazione dei risultati del modello di calcolo

La validazione dei risultati delle grandezze di isolamento acustico viene discussa sia in termini di indici di valutazione apparente e sia di comportamento in frequenza, utilizzando come strumento di analisi la deviazione standard.

Di seguito si riportano gli indici di valutazione finali  $L'_{n,w}$  per il caso A e  $R'_w$  per il caso B:

Modello	Caso A	
	$L'_{n,w}$ (dB)	Deviazione standard
Misurato in opera	51,3	-
Modello di calcolo base	40,0	40,5
Modello di calcolo 1	52,4	8,3
Modello di calcolo 2	<b>51,6</b>	<b>5,2</b>
Modello di calcolo 3	51,9	5,5
Modello	Caso B	
	$R'_w$ (dB)	Deviazione standard
Misurato in opera	65,6	-
Modello di calcolo base	63,0	17,1
Modello di calcolo 1	64,8	11,7
Modello di calcolo 2	64,8	7,6
Modello di calcolo 3	67,4	<b>1,5</b>
Modello di calcolo 3b	<b>65,2</b>	5,1

Tabella 5.16: Valori finali degli indici di valutazione e della deviazione standard

Per il caso A, il valore di  $L'_{n,w}$  che si avvicina maggiormente al valore misurato, pari a 51,3 dB, è calcolato mediante il *modello di calcolo 2*, ovvero il modello che considera i valori di ingresso dedotti da misure e i valori di  $K_{ij}$  relativi a strutture con giunti interamente in CLT. In termini di comportamento in frequenza si riportano nel grafico 5.16 le differenze dei valori di  $L'_{n,w}$  calcolati rispetto ai valori misurati. Il modello di calcolo più attendibile risulta sempre essere il *modello di calcolo 2* (linea arancione), riscontrabile dai valori della deviazione standard riportati nella tabella 5.16.

Per il caso B, il valore di  $R'_w$  che si avvicina maggiormente al valore misurato, pari a 65,6 dB, è calcolato mediante il *modello di calcolo 3b*, ovvero il modello che considera i valori di ingresso dedotti dall'esperienza, i valori di  $K_{ij}$  di una soluzione mista e il comportamento risonante dell'intera parete (combinazione del *modello di calcolo 3* con i  $K_{ij}$  del *modello di calcolo base*). In termini di andamento in frequenza si riportano nel grafico 5.17 le differenze dei valori di  $R'_w$  calcolati rispetto ai valori misurati. In base alla deviazione standard risulta più idoneo il *modello di calcolo 3* (linea azzurra), differente dal *modello di calcolo 3b* in quanto i valori di  $K_{ij}$  utilizzati si riferiscono a giunti composti interamente da elementi leggeri.

Le due valutazioni, in termini di indice di valutazione e di comportamento in frequenza, non combaciano e questo conferma quanto detto sull'indice di valutazione per l'isolamento acustico, ovvero che è una semplificazione del comportamento realistico.

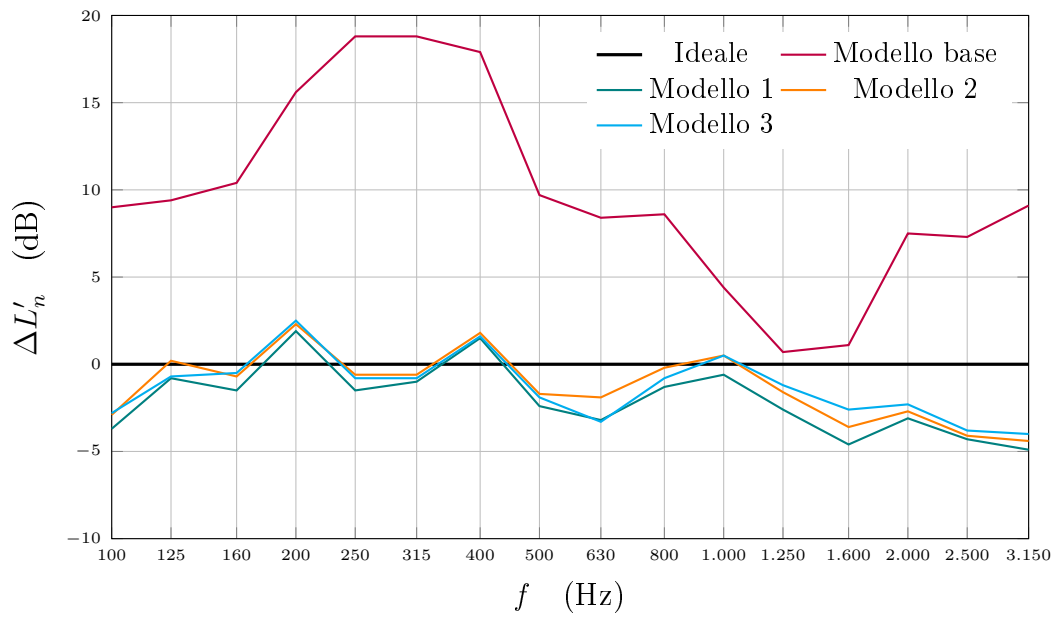


Figura 5.16: Grafici delle differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati con ciascun modello in frequenza

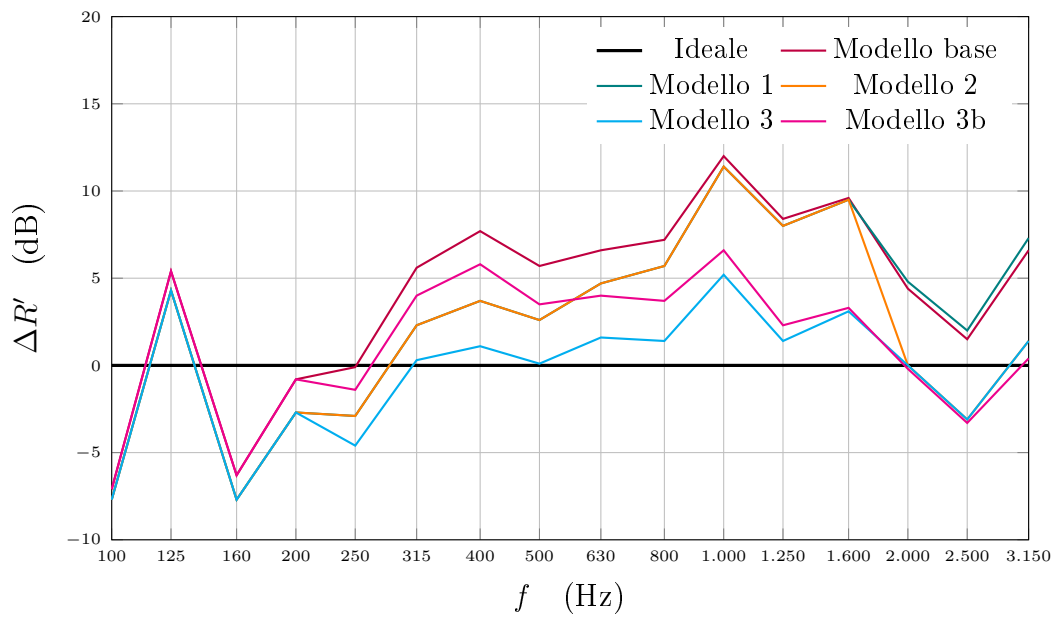


Figura 5.17: Grafici delle differenze tra i valori misurati in opera e i valori calcolati con ciascun modello in frequenza

# Conclusioni

Il lavoro si è svolto in tre fasi principali: la prima sullo studio della teoria di propagazione delle onde sonore nel legno e sull'analisi dell'aggiornamento della normativa ISO DIS 12354, la seconda centrata sull'applicazione del nuovo modello di calcolo su un caso studio reale e l'ultima fase di validazione dei risultati calcolati.

La fase iniziale ha permesso di acquisire le informazioni indispensabili per il controllo del modello di calcolo. In particolare, ha assunto molta importanza il fenomeno della coincidenza di una parete e la trattazione che la normativa propone per il comportamento risonante degli elementi leggeri. Poiché il fenomeno della coincidenza è influenzato dalle caratteristiche meccaniche del materiale, questo concetto è da applicare nel caso specifico del CLT: studi di ricerca hanno dimostrato che il comportamento di una lastra in CLT è influenzato dalla caratteristica di anisotropia del legno.

L'aggiornamento ISO DIS 12354 del 2016 introduce nuovi spunti per la valutazione delle grandezze di isolamento acustico. Nonostante si riscontri un complessivo miglioramento del metodo con cui affrontare la progettazione acustica, si incontrano ancora dei limiti nel modello di calcolo ed errori nella stesura della normativa stessa. Per quest'ultimi si è provveduto ad una comunicazione tempestiva in maniera tale da poter contribuire alla revisione della normativa. Molti errori sono all'interno degli esempi riportati in appendice alla norma, applicazioni che dovrebbero illustrare la metodologia di calcolo corretta da seguire. In particolare, destano delle perplessità la provenienza di alcuni dati acustici di ingresso e l'approssimazione di poter considerare, nel calcolo del potere fonoisolante dell'elemento solaio,  $\Delta R$  uguale a  $\Delta L_n$ . Quest'ultima affermazione è facilmente smentibile: è sufficiente guardare i dati di ingresso del *modello di calcolo base* sviluppato per il caso A nel presente lavoro oppure altri dati sperimentali riportati nell'articolo *Misure di laboratorio dell'isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in CLT* [12].

Come illustrato nel capitolo 2, l'aggiornamento offre dei nuovi strumenti per la progettazione acustica di edifici diversi dalle tipologie tradizionali. Si tratta di un buon inizio per arrivare a comprendere a fondo il compor-

tamento di elementi non omogenei o elementi costituiti da nuovi materiali, come il CLT, e i relativi giunti. Per questa ragione, parallelamente alla formalizzazione di questi aspetti nella normativa, si sta ampliando il campo di ricerca per acquisire dati sperimentali validi. Il modello di calcolo impone l'utilizzo di dati misurati in laboratorio come valori in ingresso, ma allo stesso tempo non offre soluzioni previsionali valide nel caso in cui si è sprovvisti di questi dati.

Infine, nonostante sembri opportuna l'introduzione della correzione degli 8 dB per il comportamento risonante di elementi costruttivi leggeri, occorrono ulteriori chiarimenti sulle sue modalità di applicazione. Maggiori spiegazioni sono necessarie affinché anche i tecnici competenti possano affrontare più agevolmente la progettazione acustica di tipologie costruttive di cui si è accennato precedentemente. Infatti, l'utilizzo della correzione per il comportamento risonante risulta importante quando la frequenza di coincidenza è maggiore di 500 Hz, proprio come accade per gli elementi costruttivi leggeri. Invece diventa poco significativa se le partizioni che si considerano hanno frequenze di coincidenza intorno ai 100 - 250 Hz, come nel caso di pareti monolitiche o con elevata massa superficiale.

Nella fase centrale di implementazione del nuovo modello di calcolo, con gli strumenti disposti dall'aggiornamento della normativa, sono stati trattati separatamente il caso di ambienti sovrapposti (A) per la determinazione del livello di calpestio apparente  $L'_n$  e il caso di ambienti adiacenti (B) per la determinazione del potere fonoisolante  $R'$ . Individuate le variabili principali, lo sviluppo dei diversi modelli di calcolo, ciascuno guidato da una variabile, ha permesso di trarre delle conclusioni importanti:

- limitate variazioni geometriche non incidono sui risultati finali;
- il modello per il calcolo del potere fonoisolante risulta maggiormente sensibile alla scelta degli indici di riduzione delle vibrazioni  $K_{ij}$ , rispetto al modello di calcolo per il livello di calpestio;
- in generale sono determinanti i valori dei dati di isolamento acustico in ingresso al modello di calcolo: se questi non rispecchiano il comportamento reale degli elementi, il modello fornisce risultati non attendibili;
- la correzione degli 8 dB deve essere applicata, ma prima è necessario comprendere il comportamento effettivo dell'elemento leggero risonante;
- il comportamento anomalo, simile per tutti i modelli, alle basse frequenze: per ambienti piccoli, di dimensioni simili a quelle dei casi studio,



la frequenza di Schroeder è compresa tra i 160 Hz e i 250 Hz, banda di frequenza al di sotto della quale il campo sonoro è fortemente influenzato dal comportamento modale dell'ambiente e per questa ragione si assiste ad un brusco calo dell'isolamento acustico.

La validazione del modello di calcolo è stata effettuata tramite il confronto dei risultati ottenuti con i dati raccolti precedentemente da misurazioni in opera sull'edificio in esame. I risultati esposti nel capitolo 5 lasciano intravedere buone potenzialità del nuovo modello di calcolo. Per poterlo validare a pieno è indispensabile ampliare i casi studio, applicarlo su di essi e osservare la congruenza dei risultati.

In conclusione, il presente studio dà l'avvio alla sperimentazione del nuovo modello di calcolo CEN per la determinazione delle prestazioni acustiche di edifici in legno costituendo un'ottima base per gli sviluppi futuri.



# Bibliografia

- [1] *ISO DIS 12354:1, Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1, Air-borne sound insulation between rooms*, International Organization for Standardization, Geneva, 2015.
- [2] R. Spagnolo, *Manuale di acustica applicata*. CittàStudi Edizioni, Milano, 2014.
- [3] *UNI EN ISO 3382:1, Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 1: Sale da spettacolo*, International Organization for Standardization, Geneva, 2009.
- [4] C. Hopkins, *Sound Insulation*. Elsevier, Oxford, 2007.
- [5] L. Cremer and M. Heckl, *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. Springer, Berlin, 2005.
- [6] D. W. Green, J. E. Winandy, and D. E. Kretschmann, *Mechanical properties of wood*. General Technical Report, 1999.
- [7] *UNI EN ISO 3382:2, Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari*, International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- [8] FPInnovations, *CLT Handbook*, Pointe-Claire (QC) Canada, 2013.
- [9] [www.crosslamtimber.com.au](http://www.crosslamtimber.com.au). Cross Laminated Timber - Building Systems, 2015.
- [10] B. Zeitler, D. Quirt, *et al.*, *RR-331: Guide to Calculating Airborne Sound Transmission in Buildings*. National Research Council Canada - Construction, Canada, 2016.

- [11] C. Hopkins, J. L. Davy, *et al.*, “Airborne sound transmission of a cross laminated timber plate with orthotropic stiffness,” *European Acoustics Association, Euronoise*, Prague, 2012.
- [12] L. Barbaresi, D. D’Orazio, M. Garai, *et al.*, “Misure di laboratorio dell’isolamento al calpestio di massetti galleggianti su solai in clt,” *Associazione italiana di Acustica, Convegno Nazionale*, Alghero, 2016.
- [13] L. Barbaresi, F. Morandi, and A. Speranza, “Caratterizzazione sperimentale della trasmissione laterale di diversi sistemi di connessione per pannelli in clt,” *Associazione italiana di Acustica, Convegno Nazionale*, Alghero, 2016.
- [14] *EN ISO 10848:1, Acoustics – Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining - Part 1: Frame document*, International Organization for Standardization, Geneva, 2006.
- [15] *UNI EN 12354:1, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 1, Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2002.
- [16] *UNI EN ISO 717-1, Acustica - Valutazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1, Isolamento acustico per via aerea*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 1997.
- [17] *UNI EN 12354:2, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 2, Isolamento acustico al calpestio tra ambienti*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2000.
- [18] *UNI EN 10140, Acustica - Misurazione dell’isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2010.
- [19] *UNI EN ISO 717-2, Acustica - Valutazione dell’isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2, Isolamento del rumore di calpestio*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 1997.
- [20] *ISO DIS 12354:2, Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2, Impact sound insulation between rooms*, International Organization for Standardization, Geneva, 2015.

- [21] *www.ecotecsistemi.it*. Sito ufficiale Ecotectsistemi, 2013.
- [22] B. Zeitler, S. Schoenwald, and I. Sabourin, “Direct impact sound insulation of cross laminated timber floors with e without toppings,” *International Congress on Noise Control Engineering, Inter.noise*, Melbourne, 2014.