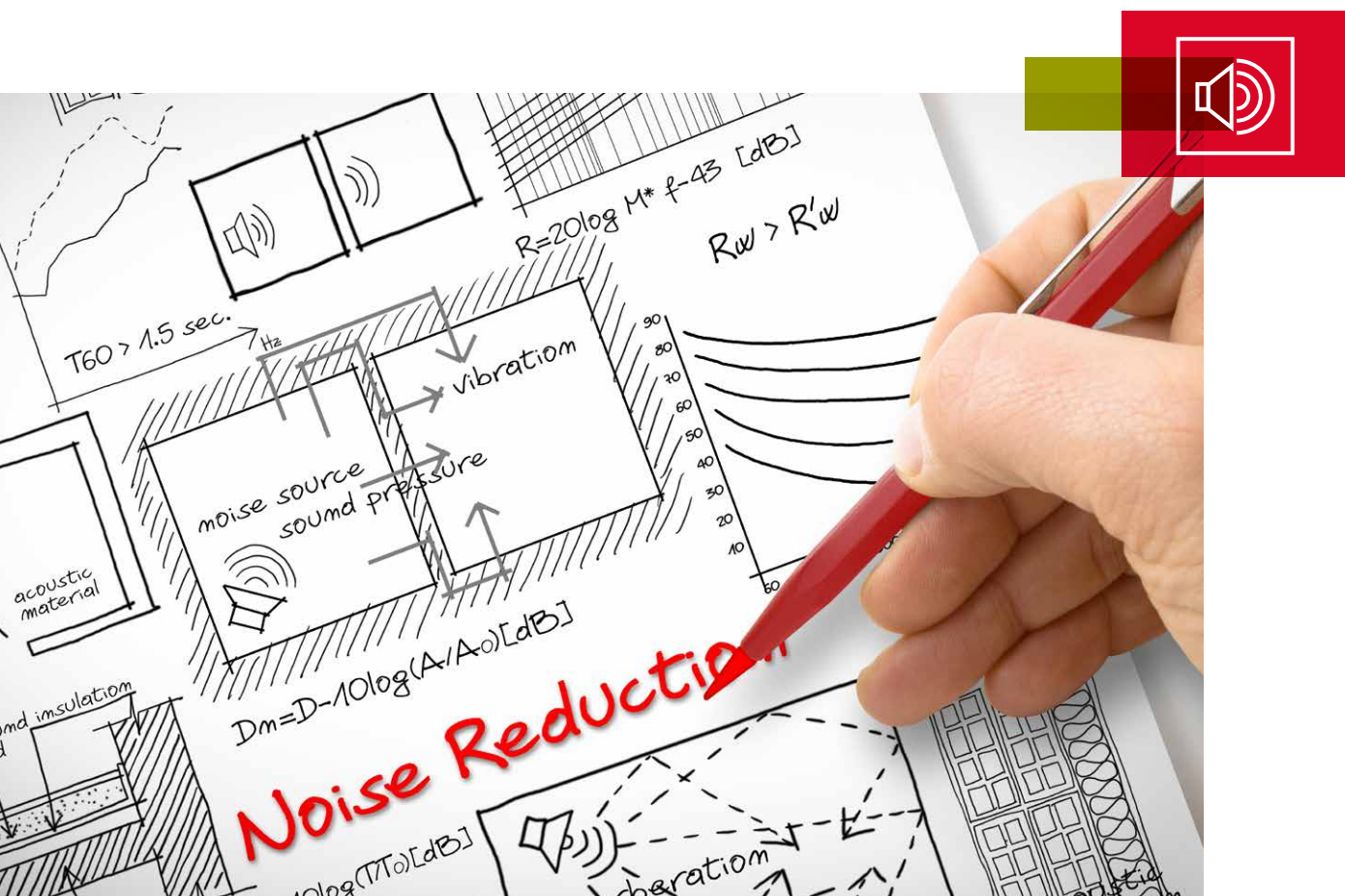


Acustica in edilizia

Teoria, metodi e applicazioni per l'isolamento acustico con lana di roccia



Premessa

La nuova edizione del manuale di acustica in edilizia ROCKWOOL nasce dalla volontà di aggiornare uno strumento dimostratosi utile per comprendere e interagire con gli aspetti legati all'acustica edilizia. Pensato per tutti coloro che quotidianamente si trovano a dover affrontare le problematiche acustiche, il libro permette di essere consultato su più livelli di approfondimento, consentendo così sia una facile lettura al neofita che l'approfondimento degli aspetti più specifici all'esperto. Ciascun capitolo è stato infatti organizzato in modo da risultare il più possibile indipendente dagli altri per tematiche e contenuti. Il manuale parte dagli aspetti teorici per poi affrontare gli aspetti applicativi e di modellazione fino a giungere al non meno importante contesto normativo. La versione aggiornata del manuale di acustica edilizia, la cui prima edizione è stata pubblicata nel 2004, traccia, nell'arco di cinque capitoli, un quadro esaustivo delle potenzialità di miglioramento delle prestazioni acustiche attraverso sistemi con lana di roccia.

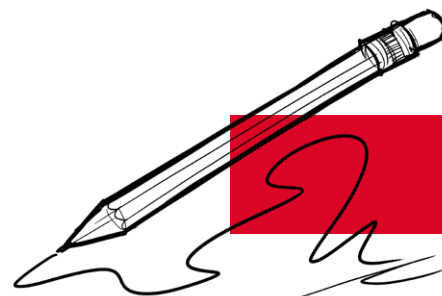
Il primo capitolo, che tratta i principi base di acustica, è rimasto sostanzialmente invariato rispetto alla versione originale. Sono stati introdotti i concetti fondamentali che serviranno al lettore per affrontare gli argomenti trattati nei capitoli successivi.

Il secondo capitolo è interamente incentrato sull'acustica degli edifici, sulle misurazioni in opera ed in laboratorio dei requisiti prestazionali e sulla caratterizzazione dei materiali utilizzati in edilizia. Rispetto alla versione precedente, vengono trattati alcuni argomenti aggiuntivi, quali, per esempio, la misura sperimentale del rumore da pioggia e la determinazione dell'indice di valutazione dell'incremento del potere fonoisolante.

Il terzo capitolo presenta invece tematiche nuove rispetto alla versione precedente del manuale, con approfondimenti sui modelli di calcolo previsionale delle prestazioni acustiche degli edifici, con particolare riferimento all'aggiornamento delle norme tecniche UNI EN ISO 12354.

Nel quarto capitolo viene descritto un modello previsionale sviluppato per i materiali in lana di roccia ROCKWOOL, aggiornato rispetto alla precedente formulazione, includendo anche la possibilità di considerare strati resistivi.

Nell'ultimo capitolo viene presentato il quadro legislativo e normativo aggiornato, soprattutto in riferimento all'adozione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) acustici e alle relative norme sulla classificazione acustica degli edifici e sul comfort degli ambienti interni.



La nuova edizione del manuale è stata curata da *Patrizio Fausti* che ha coordinato il lavoro di aggiornamento dei vari capitoli ed inserimento delle nuove parti.

LA REDAZIONE DEI VARI CAPITOLI È STATA CURATA DA:

Capitolo 1 – Principi base di acustica, *Patrizio Fausti*

Capitolo 2 – Acustica edilizia, *Patrizio Fausti, Paolo Bonfiglio, Andrea Santoni e Riccardo Gandolfi*

Capitolo 3 – Modelli di calcolo elementi edilizi, *Patrizio Fausti, Paolo Bonfiglio, Andrea Santoni e Riccardo Gandolfi*

Capitolo 4 – Assorbimento acustico dei materiali in lana di roccia ROCKWOOL, *Francesco Pompoli e Paolo Bonfiglio*

Capitolo 5 – Legislazione e rispetto dei requisiti acustici passivi degli edifici, *Patrizio Fausti*

AUTORI

Patrizio Fausti

Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara.

Andrea Santoni

Assegnista di Ricerca Post-Doc, Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara.

Paolo Bonfiglio

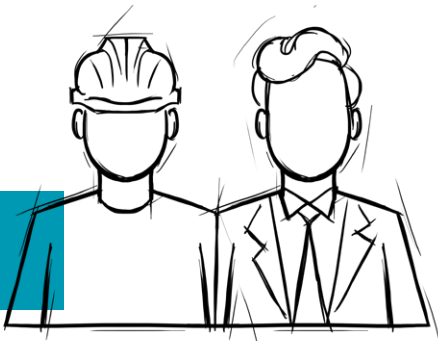
Consulente Materiacustica s.r.l.

Francesco Pompoli

Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara.

Riccardo Gandolfi

Acoustic Knowledge Manager LAT, ROCKWOOL Italia S.p.A.





Indice

1 - PRINCIPI BASE DI ACUSTICA

| | |
|---|----|
| 1.1 - Il suono e le grandezze acustiche | 13 |
| 1.1.1 - Sorgente sonora e mezzo elastico | 13 |
| 1.1.2 - Pressione acustica p | 15 |
| 1.1.3 - Impedenza acustica Z | 15 |
| 1.1.4 - Intensità acustica I | 15 |
| 1.1.5 - Densità di energia sonora D | 15 |
| 1.1.6 - Potenza sonora W | 16 |
| 1.1.7 - Livelli sonori | 16 |
| 1.2 - Analisi in frequenza | 17 |
| 1.2.1 - Composizione dello spettro sonoro | 17 |
| 1.2.2 - Rumore bianco | 20 |
| 1.2.3 - Rumore rosa | 20 |
| 1.2.4 - Audiogramma normale e curve di ponderazione in frequenza | 21 |
| 1.3 - Assorbimento, riflessione e trasmissione del suono | 24 |
| 1.3.1 - Interazione tra onde acustiche e materiali | 24 |
| 1.3.2 - Coefficiente di assorbimento, riflessione e impedenza acustica superficiale | 25 |
| 1.3.3 - Il potere fonoisolante R di pareti omogenee e "sottili" | 28 |
| 1.4 - Il suono in ambiente esterno: modalità di propagazione ed effetti di attenuazione | 32 |
| 1.4.1 - La propagazione in campo libero | 32 |
| 1.4.2 - Effetti di attenuazione sonora nella propagazione | 36 |
| 1.5 - Acustica degli ambienti chiusi | 40 |
| 1.5.1 - Densità di energia sonora e tempo di riverberazione | 40 |
| 1.5.2 - Campo sonoro semiriverberante e riverberante in regime stazionario | 44 |
| 1.5.3 - Modi propri di risonanza | 46 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1.6 - Bibliografia | 47 |
| 1.6.1 - Riferimenti normativi | 47 |
| 1.6.2 - Riferimenti scientifici | 47 |

2 - ACUSTICA EDILIZIA

| | |
|---|----|
| 2.1 - Premessa | 53 |
| 2.2 - Tipologie di rumore nel contesto edilizio | 53 |
| 2.3 - Comportamento dei materiali nei confronti dell'assorbimento acustico | 54 |
| 2.3.1 - Materiali porosi | 54 |
| 2.3.2 - Risuonatori acustici..... | 56 |
| 2.3.3 - Pannelli vibranti..... | 57 |
| 2.3.4 - Sistemi misti | 58 |
| 2.4 - Comportamento dei materiali nei confronti dell'isolamento acustico | 59 |
| 2.4.1 - Pareti monostrato | 59 |
| 2.4.2 - Pareti doppie..... | 63 |
| 2.4.3 - Come i materiali fibrosi modificano le prestazioni acustiche delle pareti multistrato | 65 |
| 2.5 - Comportamento dei materiali nei confronti dei rumori impattivi | 67 |
| 2.6 - Proprietà fisiche dei materiali correlate con le prestazioni acustiche..... | 68 |
| 2.6.1 - Resistenza al flusso | 68 |
| 2.6.2 - Rigidità dinamica..... | 70 |
| 2.6.3 - Loss factor | 73 |
| 2.6.4 - Scorrimento viscoso a compressione (creep) | 74 |
| 2.6.5 - Comprimibilità (c) e classe di comprimibilità..... | 77 |
| 2.7 - La misura sperimentale dell'isolamento acustico..... | 78 |
| 2.7.1 - Misura sperimentale del potere fonoisolante | 78 |
| 2.7.2 - Misura sperimentale del potere fonoisolante apparente | 79 |
| 2.7.3 - Misura sperimentale dell'isolamento acustico di facciata | 80 |
| 2.7.4 - Misura sperimentale del rumore di calpestio | 81 |
| 2.7.5 - Incremento delle prestazioni acustiche mediante rivestimenti di pareti e pavimenti | 81 |
| 2.7.6 - Misura sperimentale del rumore da pioggia | 82 |
| 2.8 - Indici di valutazione..... | 82 |
| 2.8.1 - Indice di valutazione dell'isolamento acustico | 83 |
| 2.8.2 - Indice di valutazione del livello di rumore da calpestio | 84 |

| | |
|--|----|
| 2.8.3 - Indice di valutazione dell'incremento di potere fonoisolante e riduzione del rumore di calpestio | 85 |
| 2.8.4 - Termini di adattamento spettrale per l'isolamento al rumore aereo | 86 |
| 2.8.5 - Termini di adattamento spettrale per il livello di rumore di calpestio | 86 |
| 2.9 - Bibliografia | 88 |
| 2.9.1 - Riferimenti legislativi | 88 |
| 2.9.2 - Riferimenti normativi | 88 |
| 2.9.3 - Riferimenti scientifici | 89 |

3 - MODELLI DI CALCOLO ELEMENTI EDILIZI

| | |
|--|-----|
| 3.1 - Premessa | 93 |
| 3.2 - Comportamento dei diversi tipi di parete nei confronti dell'isolamento acustico | 93 |
| 3.2.1 - Pareti pesanti monostrato | 93 |
| 3.2.2 - Pareti leggere in lastre di gesso rivestito | 95 |
| 3.2.3 - Pareti pesanti multistrato | 98 |
| 3.2.4 - Strati aggiuntivi sulla parete di base..... | 99 |
| 3.2.4.1 - Placcaggi | 101 |
| 3.2.4.2 - Contropareti leggere..... | 102 |
| 3.2.5 - Pareti in legno: CLT e timber frame | 103 |
| 3.3 - Comportamento acustico delle facciate | 104 |
| 3.3.1 - Progettazione della facciata in funzione di livello ammissibile | 107 |
| 3.4 - Sistemi d'isolamento a cappotto (ETICS)..... | 107 |
| 3.4.1 - Comportamento acustico degli ETICS..... | 107 |
| 3.4.2 - Calcolo previsionale delle prestazioni acustiche degli ETICS in accordo alla norma 12354-1 | 110 |
| 3.5 - Comportamento acustico delle coperture | 114 |
| 3.6 - Comportamento acustico dei solai | 116 |
| 3.6.1 - Massetto galleggiante su solaio massivo | 117 |
| 3.6.2 - Massetto galleggiante su solaio leggero | 122 |
| 3.7 - Comportamento acustico in opera delle strutture: la trasmissione laterale..... | 124 |
| 3.7.1 - UNI EN ISO 12354-1: isolamento acustico per via aerea..... | 124 |
| 3.7.2 - Aggiornamento della norma 12354: rumore da calpestio | 126 |
| 3.7.3 - UNI EN ISO 12354-3: isolamento acustico di facciata | 128 |
| 3.7.4 - Aggiornamento della norma UNI 11175..... | 129 |

| | |
|---|-----|
| 3.8 - Bibliografia | 134 |
| 3.8.1 - Riferimenti legislativi | 134 |
| 3.8.2 - Riferimenti normativi | 134 |
| 3.8.3 - Riferimenti scientifici e tecnici | 135 |

4 - ASSORBIMENTO ACUSTICO DEI MATERIALI IN LANA DI ROCCIA ROCKWOOL

| | |
|--|-----|
| 4.1 - Premessa | 141 |
| 4.2 - Parametri che influenzano l'assorbimento acustico | 141 |
| 4.3 - Modello teorico-sperimentale per la previsione dell'assorbimento acustico del materiale ROCKWOOL | 143 |
| 4.3.1 - Applicazione del modello teorico-sperimentale a materiali ROCKWOOL monodensità | 143 |
| 4.3.2 - Applicazione del modello teorico-sperimentale a materiali ROCKWOOL doppia densità | 144 |
| 4.4 - Valutazione degli effetti di uno strato resistivo superficiale | 146 |
| 4.5 - Assorbimento acustico per incidenza casuale: passaggio da α_n a α_r | 146 |
| 4.6 - Bibliografia | 148 |

5 - LEGISLAZIONE E RISPETTO DEI REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI

| | |
|---|-----|
| 5.1 - Premessa | 153 |
| 5.2 - Contenuti del D.P.C.M. 5/12/1997 | 154 |
| 5.2.1 - Generalità | 154 |
| 5.3 - Riferimenti normativi | 155 |
| 5.4 - Osservazioni sul D.P.C.M. 5/12/1997 | 156 |
| 5.4.1 - Generalità | 156 |
| 5.4.2 - Potere fonoisolante apparente | 156 |
| 5.4.3 - Isolamento di facciata | 157 |
| 5.4.4 - Rumore di calpestio dei solai | 157 |
| 5.4.5 - Rumore degli impianti | 157 |
| 5.4.6 - Tempo di riverberazione | 158 |
| 5.4.7 - Applicabilità nel caso di ristrutturazioni e cambio di destinazione d'uso | 158 |
| 5.5 - CAM criteri ambientali minimi | 159 |
| 5.5.1 - Generalità e valori di riferimento per i requisiti acustici passivi | 159 |

| | |
|---|-----|
| 5.5.2 - Requisiti di qualità interna degli ambienti e riferimento alla serie di norme UNI 11532 | 160 |
| 5.6 - La classificazione acustica delle unità immobiliari..... | 162 |
| 5.6.1 - Le procedure previste dalla norma UNI 11367 | 162 |
| 5.6.2 - La procedura prevista dalla norma UNI 11444..... | 163 |
| 5.6.3 - La norma internazionale ISO/TS 19488..... | 163 |
| 5.7 - Considerazioni sulla revisione delle norme UNI 11367 e UNI 11444 | 164 |
| 5.8 - Bibliografia | 165 |





Principi base di acustica

A cura di Patrizio Fausti

1. Principi base di acustica

1.1 - Il suono e le grandezze acustiche

1.1.1 - Sorgente sonora e mezzo elastico

Il suono è caratterizzato dalla propagazione di onde di pressione in un mezzo elastico dovute alla rapida successione di compressioni ed espansioni del mezzo stesso. Affinché il fenomeno nasca e si propaghi è necessaria la presenza di una sorgente sonora e di un mezzo elastico che ne consenta la propagazione, e proprio per quest'ultimo motivo, il suono non può diffondersi nel vuoto. La sorgente sonora è costituita da un elemento vibrante che trasmette il suo movimento alle particelle del mezzo circostante, le quali oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio.

Uno dei parametri che caratterizza il suono è la **frequenza** f , cioè il numero di oscillazioni effettuate in un secondo. Si parla di fenomeno sonoro quando la frequenza è compresa nell'intervallo:

$$20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$$

ovvero l'intervallo in cui si assume convenzionalmente che l'orecchio umano sia sensibile. I segnali aventi frequenze inferiori e superiori sono detti rispettivamente infrasuoni ed ultrasuoni.

Generalmente un suono non corrisponde ad un tono puro, caratterizzato da una sola frequenza di emissione, ma ad un segnale complesso costituito da un gran numero di frequenze che danno origine ad uno spettro continuo. Con riferimento alla figura sottostante, costituita da una lamina vincolata all'estremità inferiore che viene fatta vibrare, si consideri l'andamento nel tempo e nello spazio della generazione e propagazione del fenomeno sonoro.

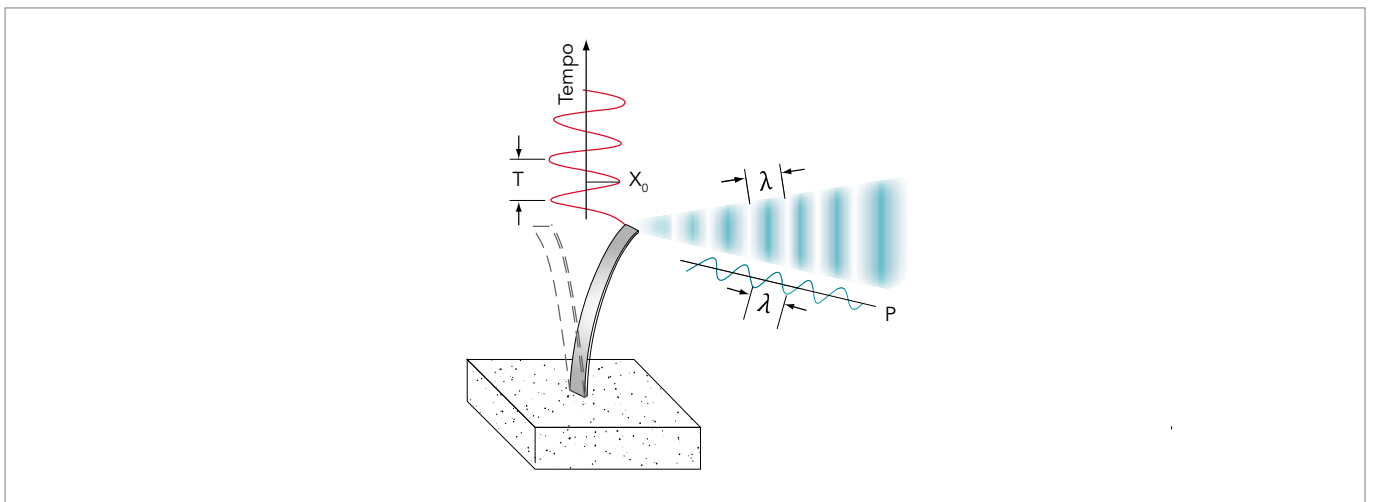


Figura 1.1: Elemento vibrante con visualizzazione dell'oscillazione delle particelle d'aria e indicazione delle grandezze lunghezza d'onda λ , periodo T e ampiezza dell'oscillazione x_0

Come si osserva, essendo il fenomeno sonoro di natura ondosa, può essere descritto oltre che dalla frequenza, anche da altri parametri quali il **periodo T** e la **lunghezza d'onda λ** , cioè il tempo e lo spazio richiesto per una oscillazione completa.

Le relazioni che intercorrono tra i suddetti parametri sono:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ [s]} \quad \lambda = \frac{c}{f} = \lambda = cT \text{ [m]}$$

dove $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione e c la velocità del suono nel mezzo.

In figura 1.2 e in Tabella 1.1 si possono confrontare i valori di frequenza con i corrispondenti valori di lunghezza d'onda per un suono che si propaga in aria.

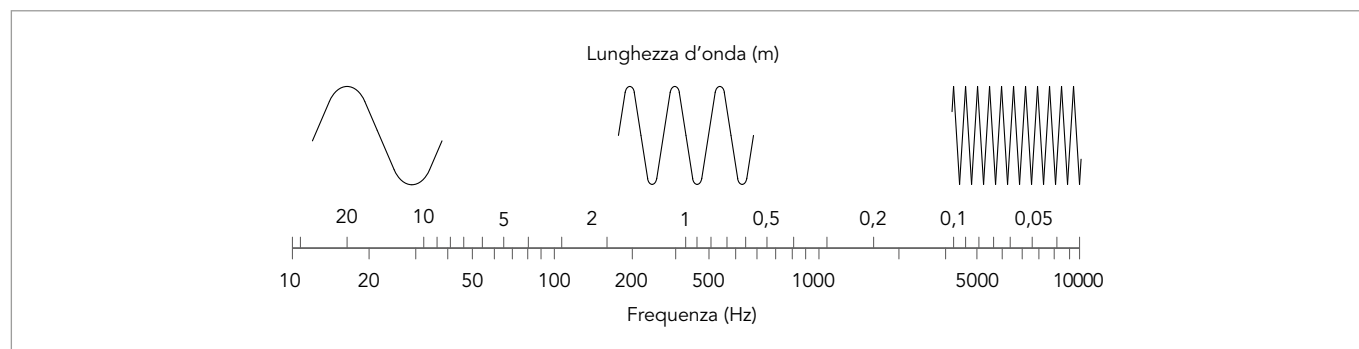


Figura 1.2: Relazione tra frequenza e lunghezza d'onda

| f (Hz) | λ (m) |
|----------|---------------|
| 20 | 17 |
| 1000 | 0,34 |
| 10000 | 0,034 |
| 20000 | 0,017 |

Tabella 1.1: Relazione tra frequenza e lunghezza d'onda

La velocità del suono non dipende dalla frequenza, ma dalle sole condizioni termodinamiche del mezzo in cui la perturbazione si propaga. Nel caso dell'aria si può calcolare la velocità del suono in funzione della temperatura con la seguente espressione:

$$c \cong 331 + 0,6 t \quad (\text{con } t \text{ temperatura in } ^\circ\text{C})$$

valida per temperature che vanno da -10°C a $+40^\circ\text{C}$.

1.1.2 - Pressione acustica p

Si definisce **pressione acustica** lo scostamento della pressione attorno al suo valore di equilibrio che generalmente è rappresentato dalla pressione atmosferica. Tale scostamento può assumere sia valori positivi che negativi. Essendo la pressione acustica una grandezza oscillante, andrebbe descritta mediante l'ampiezza e la fase o con una rappresentazione complessa (parte reale e parte immaginaria). Per semplificare la trattazione viene introdotto il valore efficace della pressione sonora, grandezza misurabile strumentalmente e rappresentativa del fenomeno sonoro per quanto riguarda la capacità di percezione umana.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad [\text{Pa}]$$

1.1.3 - Impedenza acustica Z

Si definisce **impedenza acustica specifica**, in un punto, il rapporto tra la rappresentazione complessa della pressione acustica e la rappresentazione complessa della velocità delle particelle:

$$Z = \frac{p(x, t)}{u(x, t)} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] = [\text{rayl}]$$

dove:

$p(x, t)$ pressione acustica
 $u(x, t)$ velocità delle particelle

L'impedenza acustica è, quindi, una grandezza complessa. È utile mantenere tale notazione in quanto in alcuni casi fornisce una descrizione più accurata del fenomeno. Questa grandezza quantifica la resistenza che il mezzo in cui l'onda si propaga oppone alla sollecitazione di una forza quale può essere quella di pressione del suono. In presenza di propagazione di onde piane nell'aria (o qualsiasi onda in campo lontano) l'espressione dell'impedenza si riduce a $Z = \rho c$ (**impedenza acustica caratteristica**) dove ρ è la densità del mezzo.

1.1.4 - Intensità acustica I

L'intensità acustica è l'energia che nell'unità di tempo attraversa in direzione normale una superficie unitaria. Nel caso di onde piane (o qualsiasi onda in campo lontano) in un mezzo elastico non viscoso, si ottiene:

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c} \quad [\text{W/m}^2]$$

Poiché I dipende dalla direzione della superficie considerata, risulta essere una grandezza vettoriale.

1.1.5 - Densità di energia sonora D

La densità di energia sonora è l'energia acustica per unità di volume che caratterizza lo stato del mezzo acustico in un certo istante.

$$D(t) = \frac{E(t)}{V} \quad [\text{J/m}^3]$$

Per onde piane (o qualsiasi onda in campo lontano) in un mezzo elastico non viscoso:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho c^2} = \frac{I}{c} \quad [J/m^3]$$

1.1.6 - Potenza sonora W

È la potenza trasmessa dalla sorgente acustica al mezzo elastico. Per onde piane in mezzi in quiete non viscosi vale:

$$W = IS = DcS \quad [W]$$

La relazione tra l'intensità acustica e la potenza sonora è quella su cui si basano alcuni dei metodi di misura della potenza sonora delle sorgenti. Tali metodi sono descritti nelle normative della serie UNI EN ISO 3740 [1] e nelle normative UNI EN ISO 9614 [2].

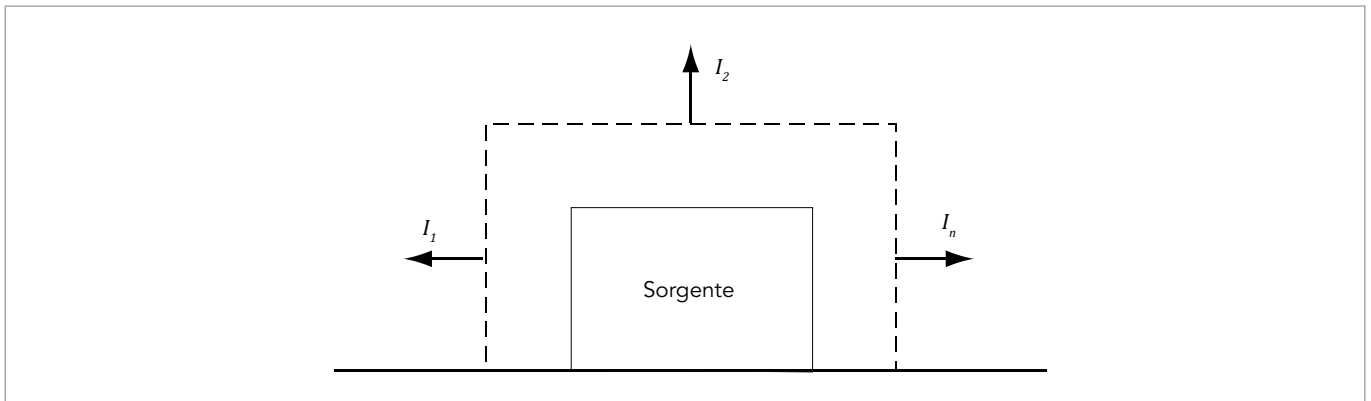


Figura 1.3: Schema di misura della potenza sonora

$$W = \sum_{i=1}^n (I_i \cdot S_i) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c} \right)_i \cdot S_i \right] \cong S_{tot} \cdot \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c} \right)_i \right]$$

1.1.7 - Livelli sonori

Le grandezze acustiche caratteristiche hanno un ampio campo di variabilità e per tale motivo è nata l'esigenza di fare uso di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere il logaritmo del rapporto tra quello stesso valore ed un prefissato valore di riferimento (scala dei Bel). Più comunemente, però, le grandezze acustiche vengono espresse in decibel (dB) ossia dieci volte il logaritmo in base dieci del suddetto rapporto.

In generale, dunque, data una grandezza G il corrispondente livello L_G , vale:

$$L_G = 10 \log \frac{G}{G_{rif}} \quad [dB]$$

In particolare, per le grandezze prima definite si ha:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \cdot \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}} \quad \text{livello di pressione}$$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{rif}} \quad \text{livello di intensità}$$

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{rif}} \quad \text{livello di potenza}$$

$$L_D = 10 \cdot \log \frac{D}{D_{rif}} \quad \text{livello di densità}$$

Si osservi che i rapporti G/G_{rif} sono adimensionali e proporzionali all'energia del segnale sonoro; proprio per quest'ultimo aspetto nell'espressione di L_p le pressioni compaiono elevate al quadrato.

I valori di riferimento delle grandezze sopra descritte sono riportati nella normativa UNI EN ISO 1683 [3]. In particolare, si ha che:

$$P_{rif} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad I_{rif} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$W_{rif} = 10^{-12} \text{ W} \quad D_{rif} = 10^{-12} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

In campo libero tali valori delle grandezze di riferimento determinano un livello di pressione uguale a quello di intensità. Per dare un'idea dell'ordine di grandezza del fenomeno acustico e dei rispettivi livelli si riporta la seguente tabella:

| Intensità sonora (W/m ²) | Pressione sonora (Pa) | Livello sonoro (dB) | Esempi |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|---|
| 10 ² | 200 | 140 | Soglia del dolore |
| 1 | 20 | 120 | Vicino motore aereo |
| 10 ⁻² | 2 | 100 | Vicino martello pneumatico, urlo |
| 10 ⁻⁴ | 0.2 | 80 | Ciglio autostrada trafficata, voce alta |
| 10 ⁻⁶ | 0.02 | 60 | Parlato normale |
| 10 ⁻⁸ | 0.002 | 40 | Voce bassa, sussurro |
| 10 ⁻¹⁰ | 0.0002 | 20 | Respiro |
| 10 ⁻¹² | 0.00002 | 0 | Soglia udibile (1-4 kHz) |

Tabella 1.2: Valori delle grandezze acustiche e dei corrispondenti livelli sonori in dB

1.2 - Analisi in frequenza

1.2.1 - Composizione dello spettro sonoro

Un suono può essere costituito da un tono puro, cioè da un segnale costituito da una sola frequenza (monocromatico), da più toni puri (policromatico), da suoni complessi (armonici, periodici, segnale su una sola banda di frequenze), o da rumori a larga banda, cioè costituiti da tutte le frequenze con diversi livelli.

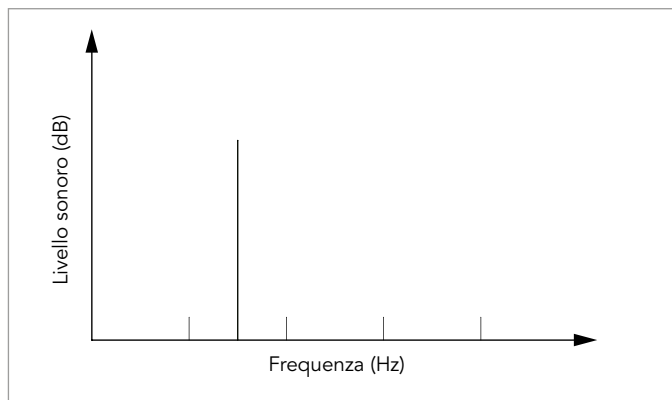


Figura 1.4: Spettro di un "tono puro"

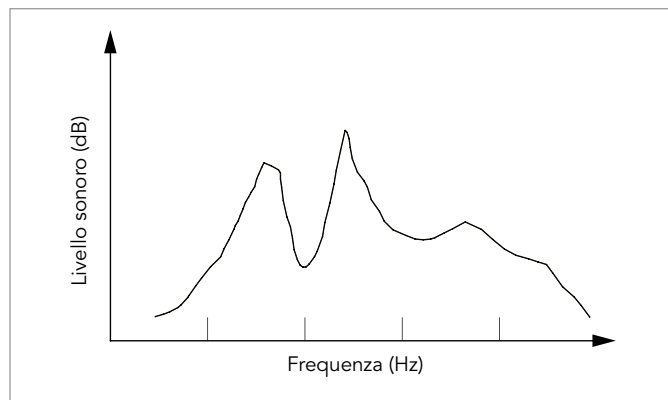


Figura 1.5: Spettro continuo di un rumore

L'analisi della composizione in frequenza dei suoni può essere effettuata con diversi metodi basati sulla suddivisione del contenuto di energia sonora in **bande**, cioè in prefissati intervalli di frequenza. Ciascuna banda è caratterizzata dalla frequenza nominale di centro banda f_c e dalle frequenze di taglio superiore f_s e inferiore f_i .

L'ampiezza di banda, definita dalla differenza tra la frequenza di taglio superiore e inferiore $\Delta f = f_s - f_i$, può essere costante o variabile al variare della frequenza nominale di centro banda. L'analisi ad ampiezza di banda costante, detta anche a banda stretta, viene utilizzata per analisi approfondite sulla composizione in frequenza di rumori generati da sorgenti e macchine, sulla diagnostica e sulle cause generatrici delle emissioni sonore. L'analisi in bande di ampiezza percentuale costante, in particolare la cosiddetta analisi in ottave o terzi di ottava, viene generalmente utilizzata nelle misurazioni nel campo dell'acustica ambientale ed architettonica, ma anche nella caratterizzazione di molte delle proprietà acustiche dei materiali. Questa analisi si basa sulla costanza del rapporto tra la larghezza di banda Δf e la frequenza nominale di centro banda che caratterizza la banda stessa: $\Delta f / f_c = \text{costante}$. La frequenza nominale di centro banda si ottiene con la seguente espressione:

$$f_c = \sqrt{f_s \cdot f_i} \text{ [Hz]}$$

Per l'analisi in bande di ottava si ha $\Delta f / f_c = 0.707$ mentre per l'analisi in terzi di ottava si ha $\Delta f / f_c = 0.232$.

Le frequenze nominali per l'analisi in bande di ottava o frazioni di ottava sono definite dalla normativa UNI EN ISO 266 [4]. Le frequenze inferiori, centrali o superiori delle bande sono normalizzate in modo tale che all'interno di una banda di ottava ricada esattamente un numero intero di bande dell'analisi per frazioni di ottava. La definizione dei filtri per le bande di ottava e terzi di ottava da implementare negli analizzatori di spettro è riportata nella normativa CEI EN 61260 [5].

Nell'analisi in bande di ampiezza percentuale costante, per definizione, l'ampiezza di banda cresce all'aumentare della frequenza nominale di centro banda. La rappresentazione grafica degli spettri ottenuti con questa analisi avviene normalmente utilizzando una scala logaritmica sull'asse delle ascisse (frequenze). Ne risulta un istogramma in cui graficamente ciascuna banda viene visualizzata con la stessa larghezza. Se invece si rappresenta la scala delle ascisse in lineare si può apprezzare l'effettiva larghezza di banda delle varie frequenze.

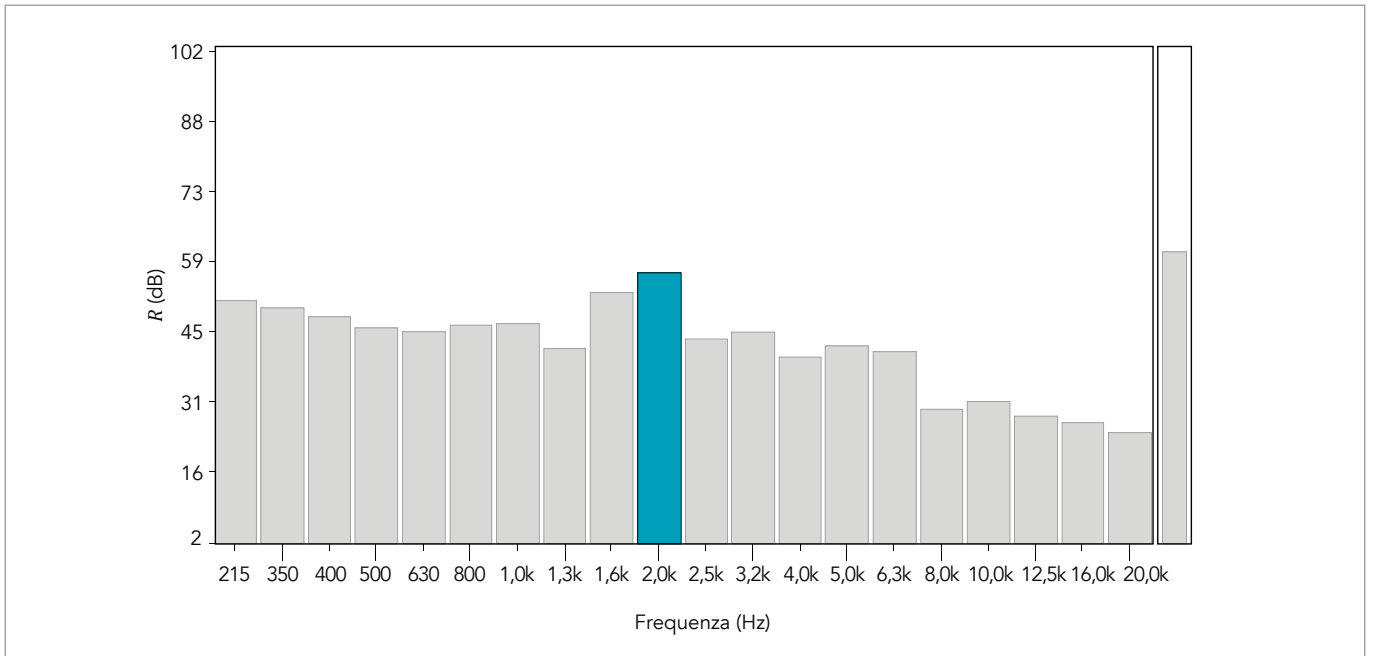


Figura 1.6: Esempio di spettro sonoro in bande di 1/3 di ottava con scala logaritmica delle ascisse

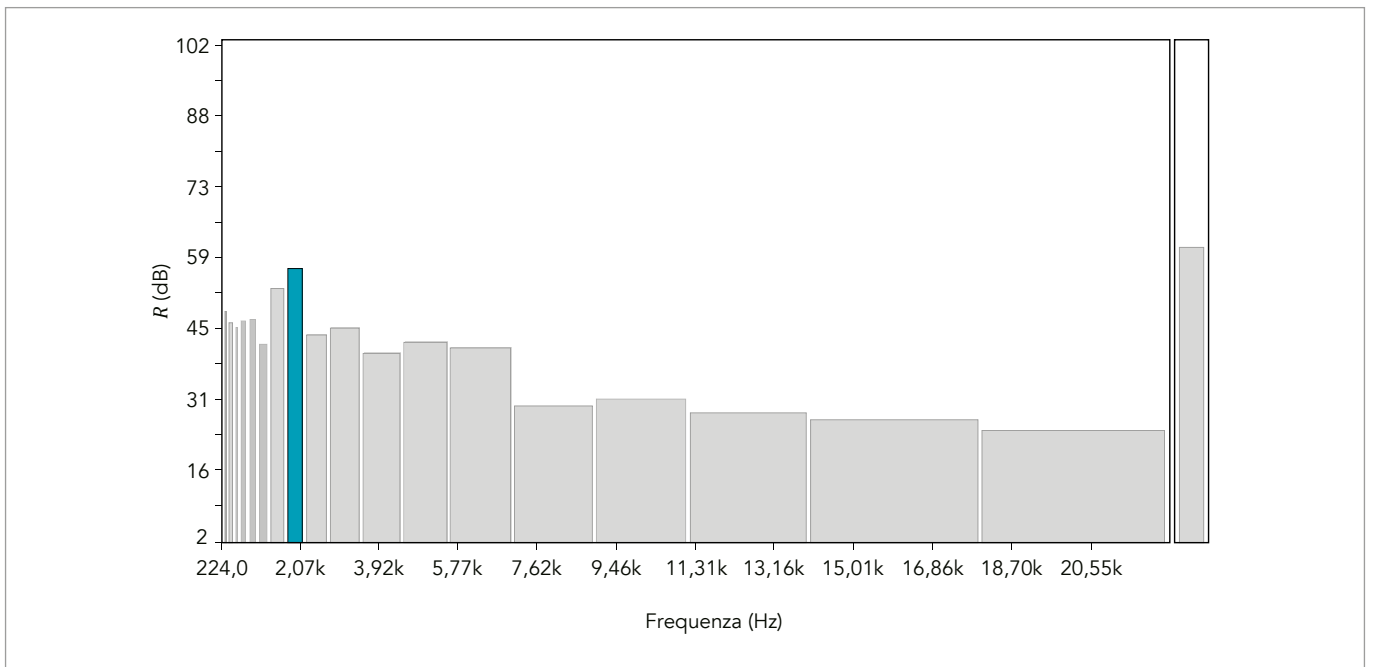


Figura 1.7: Esempio di spettro sonoro in bande di 1/3 di ottava con scala lineare delle ascisse

1.2.2 - Rumore bianco

Il rumore bianco è definito come quel rumore che ha una densità spettrale costante, cioè lo stesso contenuto energetico ad ogni frequenza. In un'analisi in banda stretta il livello di un rumore bianco (livello spettrale L_s) è costante al variare della frequenza. Se si analizza tale rumore in bande di ottava (banda di ampiezza percentuale costante), considerato che l'ampiezza Δf di ciascuna banda è 2 volte quella della banda precedente e che l'energia per ogni frequenza è costante, allora per ogni banda si ha un contenuto energetico doppio della banda precedente con il conseguente aumento del livello di 3 dB. Nel caso dell'analisi in terzi di ottava, considerazioni simili portano al risultato che l'aumento di livello per ciascuna banda rispetto alla precedente è pari ad 1 dB. Il rumore bianco trova applicazione in molti tipi di misurazioni, in particolare per le misure di isolamento acustico e per la qualificazione acustica degli ambienti chiusi.

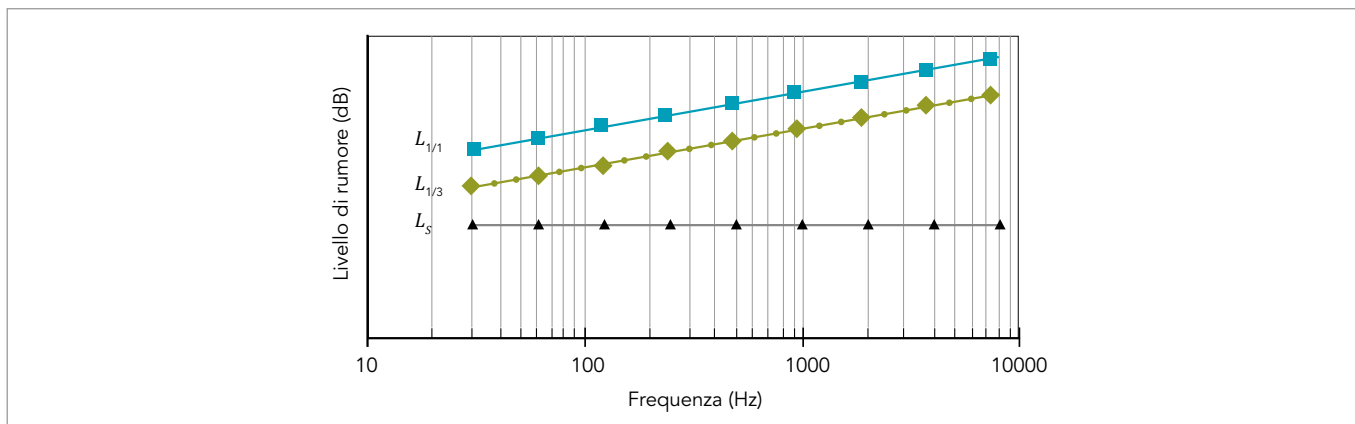


Figura 1.8: Andamento del livello spettrale e dello spettro in ottave e terzi di ottava per un rumore bianco

1.2.3 - Rumore rosa

Il rumore rosa è caratterizzato dal fatto di mantenere lo stesso livello energetico in ciascuna banda nella rappresentazione in bande di ampiezza percentuale costante. Ciò implica che l'andamento del livello spettrale in banda stretta tende a decrescere all'aumentare della frequenza. Questo tipo di rumore viene usato spesso in acustica poiché si adatta a vari tipi di misurazioni. Per il tempo di riverberazione, ad esempio, si hanno solitamente problemi ad avere sufficiente energia a bassa frequenza. Gli altoparlanti comunemente usati come sorgenti, infatti, hanno una capacità di emettere energia che decresce rapidamente al diminuire della frequenza. In questi casi l'utilizzo di un rumore rosa favorisce la linearizzazione della risposta del sistema.

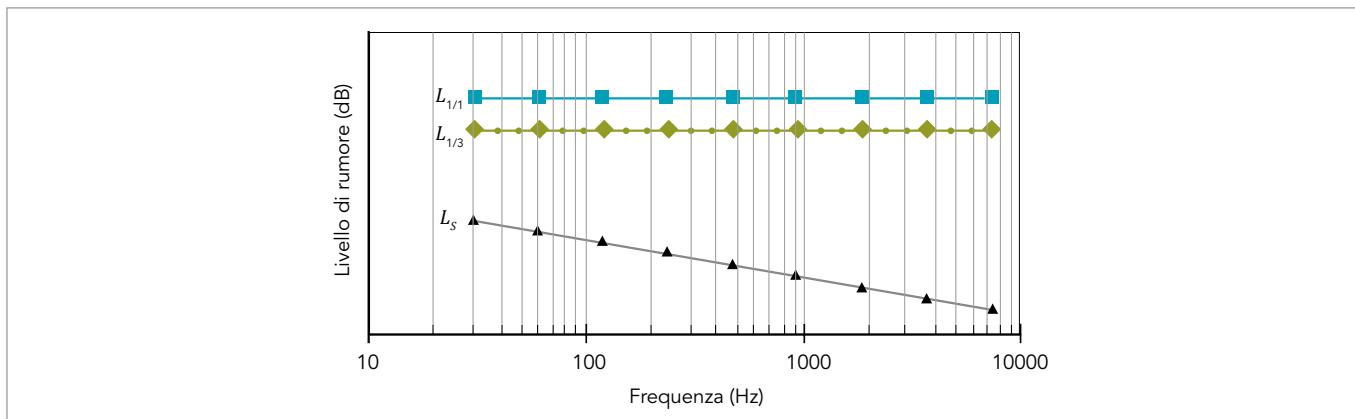


Figura 1.9: Andamento del livello spettrale e dello spettro in ottave e terzi di ottava per un rumore rosa

1.2.4 - Audiogramma normale e curve di ponderazione in frequenza

L'orecchio umano non è sensibile in eguale modo alle diverse frequenze. La sensibilità è generalmente maggiore alle frequenze medio-alte e diminuisce progressivamente verso quelle basse e quelle molto alte. L'andamento della sensibilità dell'orecchio umano al variare dei livelli e della frequenza è stato studiato e rappresentato su un diagramma chiamato **audiogramma normale**. La figura 1.10 mostra l'audiogramma normale proposto dalla UNI ISO 226 [6] per ascolto binaurale, in campo acustico libero, sorgente sonora disposta di fronte all'ascoltatore e suoni puri. Nel diagramma sono riportate le *curve isofoniche* che rappresentano, al variare della frequenza, i livelli di pressione sonora in grado di produrre la stessa sensazione sonora. Ciascuna curva è caratterizzata da un valore di *livello di sensazione sonora*, espresso in *phon*, numericamente uguale al valore di pressione sonora, espressa in dB, del suono a 1000 Hz che ha prodotto la sensazione sonora.

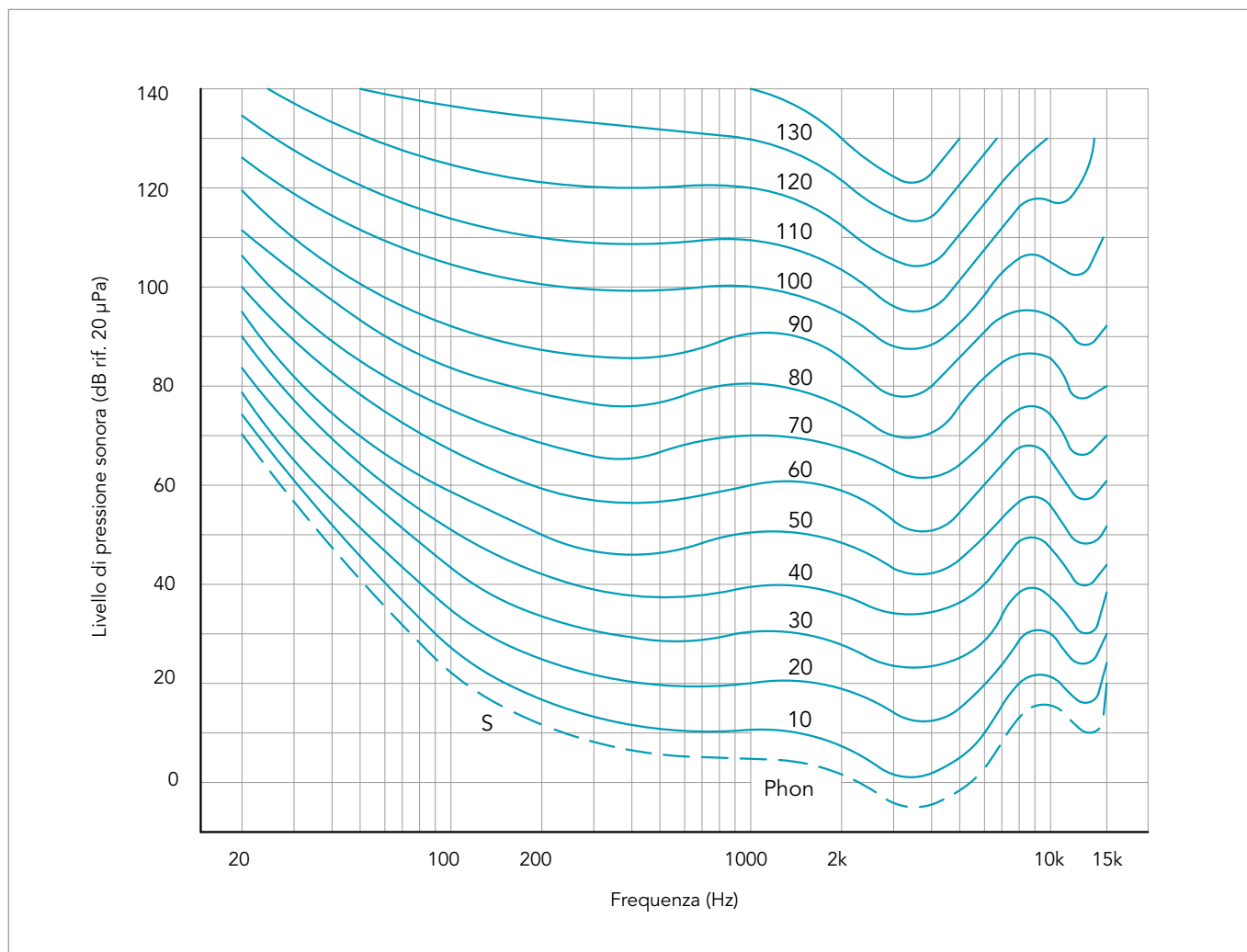


Figura 1.10: Audiogramma normale

Nella seguente figura, estratta dall'audiogramma, sono riportati i livelli e le frequenze udibili per un individuo di udito normale (dai 20 Hz ai 20000 Hz). Le aree interne rappresentano il campo del parlato che va da circa 100 Hz a circa 5000 Hz e il campo della musica che si estende da circa 50 Hz a circa 15000 Hz.

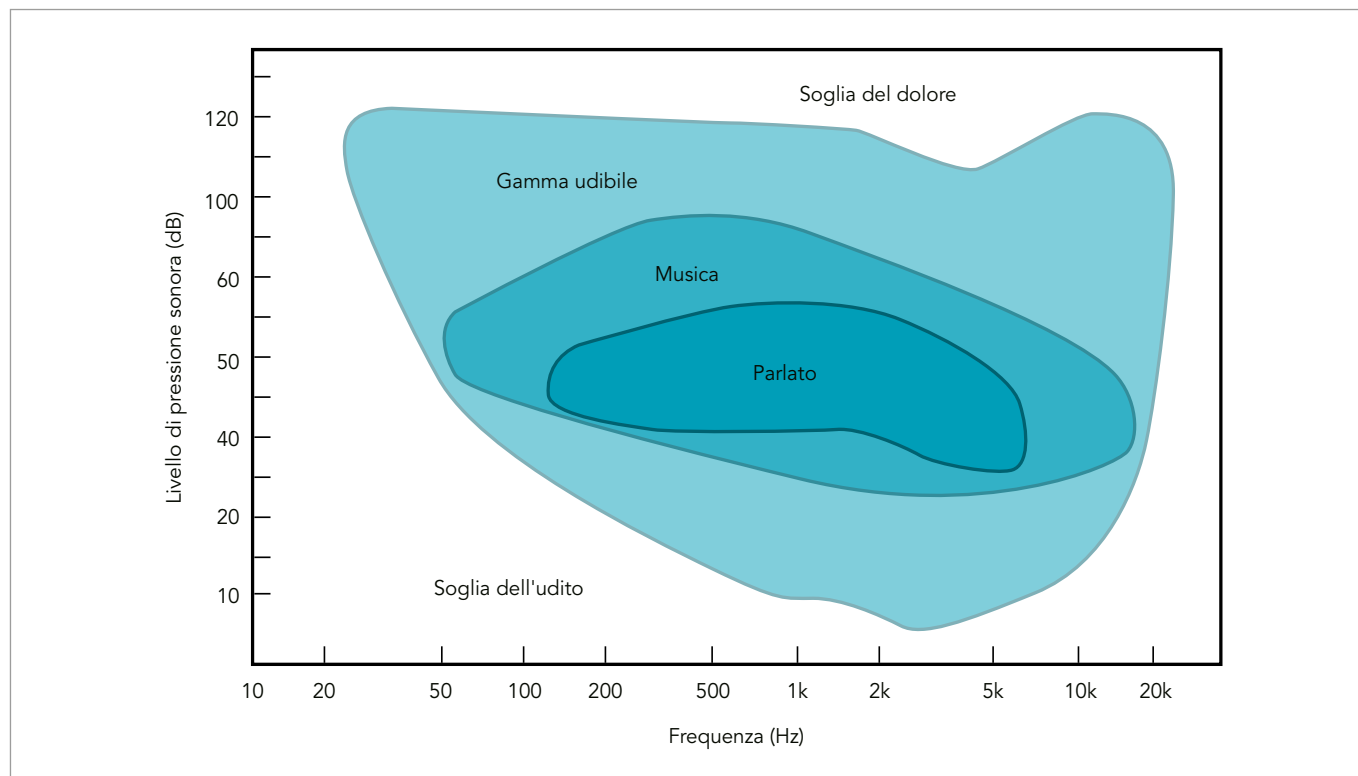


Figura 1.11: Visualizzazione delle aree frequenza-livello per tutto il campo udibile, per la musica e per il parlato

Per tenere conto della diversa sensibilità dell'orecchio nella valutazione del disturbo o danno da rumore si sono affermati metodi semplici basati sull'impiego delle **curve di ponderazione in frequenza** direttamente selezionabili negli strumenti di misura [7]. Le curve di ponderazione inizialmente definite ed implementate nella strumentazione, erano le cosiddette curve A, B, C e D ispirate alla forma dell'audiogramma normale. Ciascuna di queste curve era stata inizialmente predisposta per applicazioni specifiche: curva A sotto i 60 dB, curva B tra 60 e 100 dB, curva C oltre 100 dB (usata per misurazioni nei locali con musica ad elevati livelli sonori), curva D per disturbo prodotto da rumore di aeromobili. Tuttavia, la curva di ponderazione più usata nelle misure che si propongono di valutare gli effetti del rumore sull'uomo (disturbo o danno) è sempre stata la curva A, qualunque sia il valore del livello sonoro totale. Nel 2002, con la pubblicazione della norma ISO 61672-1, successivamente revisionata e adottata anche come CEI EN 61672-1 [7], sono state ridefinite le curve di ponderazione da implementare negli strumenti di misura (figura 1.12). Come si osserva, ora le curve di ponderazione utilizzate nelle misurazioni acustiche sono la A, la C e la Z. Le prime due curve hanno mantenute le loro funzioni ed applicazioni mentre la curva Z, che ha un andamento lineare da 10 Hz a 20000 Hz, viene ora utilizzata per la determinazione del livello complessivo non pesato, al posto della curva "linear" che veniva utilizzata nella precedente versione e che includeva anche infrasuoni ed ultrasuoni.

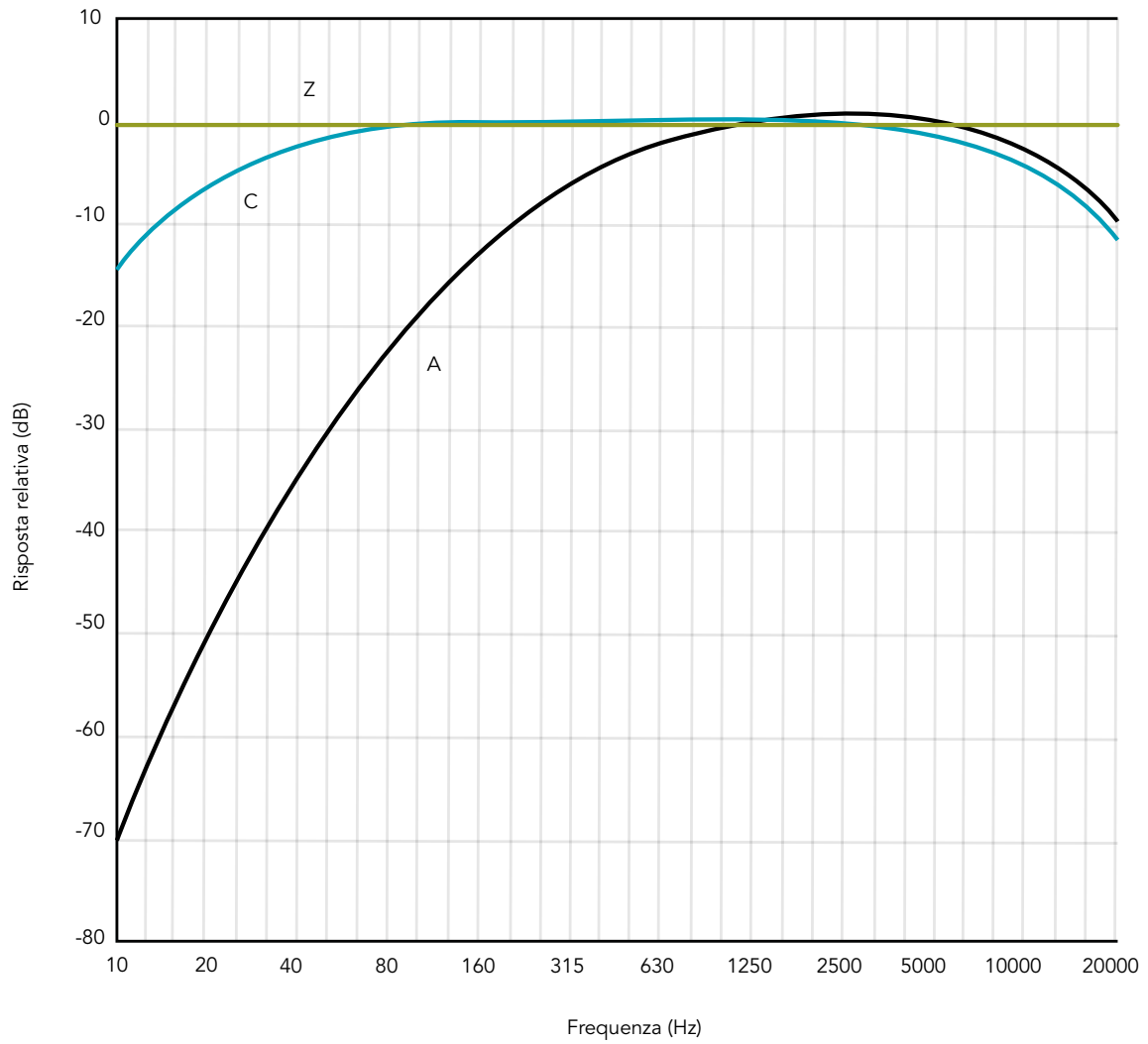


Figura 1.12: Curve di ponderazione in frequenza specificate nella IEC 61672-1 (CEI EN 61672-1)

1.3 - Assorbimento, riflessione e trasmissione del suono

1.3.1 - Interazione tra onde acustiche e materiali

Quando il fronte di un'onda sonora urta contro una parete, generalmente si assiste al verificarsi di tre fenomeni che contribuiscono in maniera diversa alla redistribuzione dell'energia trasportata dall'onda stessa: una parte di questa energia viene riflessa secondo le leggi della meccanica classica, una parte viene dissipata all'interno del materiale di cui è costituita la parete, ed una terza parte attraversa il materiale e procede liberamente oltre.

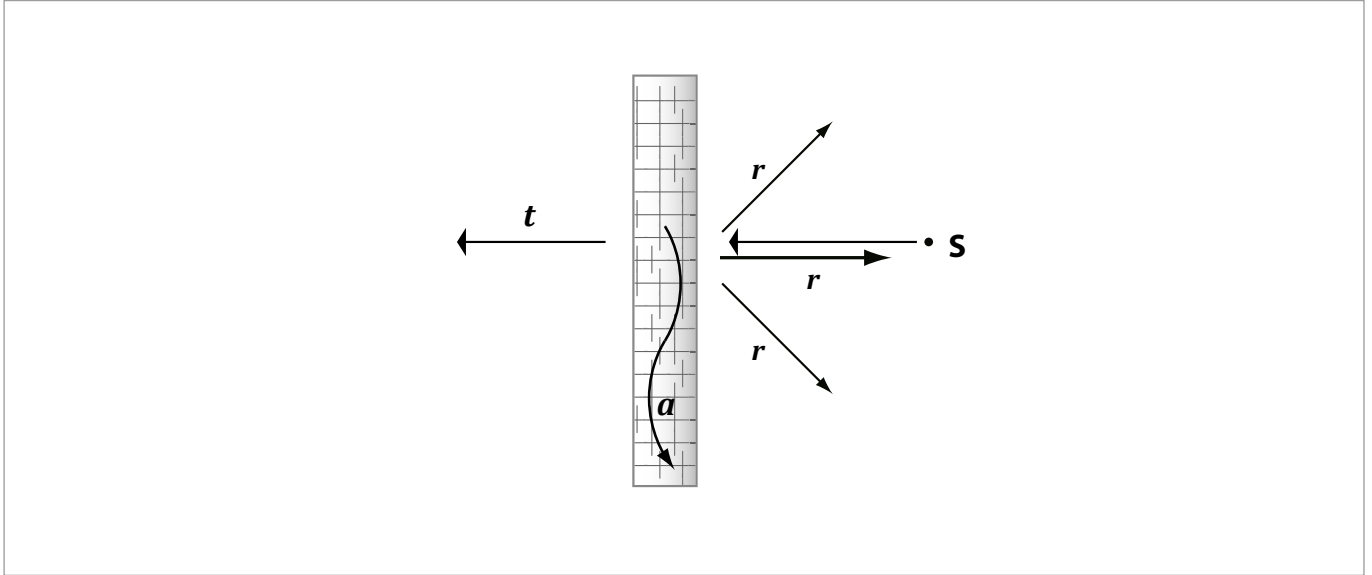


Figura 1.13: Assorbimento, riflessione e trasmissione del suono

Se chiamiamo W_i l'energia totale che nell'unità di tempo (potenza) incide sulla parete e W_a , W_r , W_t le quote di potenza rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa dalla parete, si può scrivere:

$$W_i = W_a + W_r + W_t$$

Ora, dividendo entrambi i membri dell'equazione per la potenza totale W_i incidente sulla parete, possiamo riscrivere l'equazione come:

$$1 = a + r + t$$

dove a (coeff. di assorbimento), r (coeff. di riflessione) e t (coeff. di trasmissione) sono dei coefficienti adimensionali che esprimono rispettivamente le quote di potenza sonora assorbita, riflessa e trasmessa:

$$a = \frac{W_a}{W_i} \quad r = \frac{W_r}{W_i} \quad t = \frac{W_t}{W_i}$$

Dai coefficienti r e t sono state definite le grandezze fisiche che caratterizzano le prestazioni acustiche di una struttura: il *coefficiente di assorbimento acustico apparente* α , che indica la capacità di una struttura di non riflettere energia verso la sorgente sonora e il *potere fonoisolante* R , che quantifica la capacità di isolare l'ambiente ricevente dai rumori provenienti dall'ambiente sorgente.

Il coefficiente di assorbimento acustico apparente α è dato da:

$$\alpha = 1 - r = a + t = 1 - \frac{W_r}{W_i}$$

mentre il potere fonoisolante R è definito come:

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

Le due grandezze hanno un significato fisico diverso: α rappresenta le caratteristiche fonoassorbenti di un materiale mentre R quelle fonoisolanti.

I materiali che forniscono le migliori prestazioni fonoassorbenti presentano bassa massa, alta porosità, superficie cedevole; viceversa i materiali che danno le migliori garanzie di fonoisolamento hanno massa elevata, superficie continua, sono rigidi e non porosi. Solo accoppiando opportunamente materiali dei due tipi è possibile contemporaneamente ottenere un buon grado di isolamento e di assorbimento acustico.

1.3.2 - Coefficiente di assorbimento, riflessione e impedenza acustica superficiale

Il coefficiente di riflessione può essere espresso come $r = 1 - \alpha$ dove il coefficiente α è pari a: $\alpha = (a + t)$. La riflessione del suono sulla superficie della parete può a sua volta avvenire con un diverso grado di diffusione in base alla presenza e alle dimensioni di irregolarità superficiali.

Il coefficiente di riflessione, dal punto di vista energetico, può essere espresso come rapporto tra l'energia riflessa e l'energia incidente. Il coefficiente di riflessione può anche essere espresso come rapporto tra la pressione acustica riflessa e la pressione acustica incidente. Poiché il suono ha una natura ondosa, l'onda sonora riflessa ha un'ampiezza ed una fase diverse da quelle dell'onda sonora incidente. Per esprimere correttamente il coefficiente di riflessione come rapporto tra la pressione riflessa e la pressione incidente, è necessario introdurre la notazione complessa che tiene conto dell'ampiezza e della fase φ .

$$r_p = \frac{p_r}{p_i} = |r_p| \cdot e^{j\varphi}$$

Il coefficiente di riflessione della pressione r_p , detto anche coefficiente di riflessione complesso, è quindi concettualmente diverso dal coefficiente di riflessione energetico r .

Tra i due modi di esprimere il coefficiente di riflessione esiste la seguente uguaglianza:

$$r = |r_p|^2$$

Di conseguenza il coefficiente di assorbimento acustico apparente può essere espresso in funzione del coefficiente di riflessione complesso essendo, per definizione, $\alpha = 1 - r$:

$$\alpha = 1 - |r_p|^2$$

Questa formula è importante perché è quella su cui si basa la misura del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale nel tubo ad onde stazionarie. Un'altra grandezza importante per lo studio del comportamento acustico all'interfaccia parete-aria è l'impedenza acustica superficiale Z , esprimibile anche come impedenza acustica superficiale specifica ζ , cioè come rapporto tra Z e l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.

$$Z = \left(\frac{p}{u_n} \right)_{\text{superficie}}$$

$$\zeta = \frac{Z}{\rho_0 c}$$

Anche queste due grandezze, entrambe complesse, possono essere calcolate in funzione del coefficiente di riflessione complesso. Per onde piane con incidenza normale si ottengono le espressioni di seguito riportate.

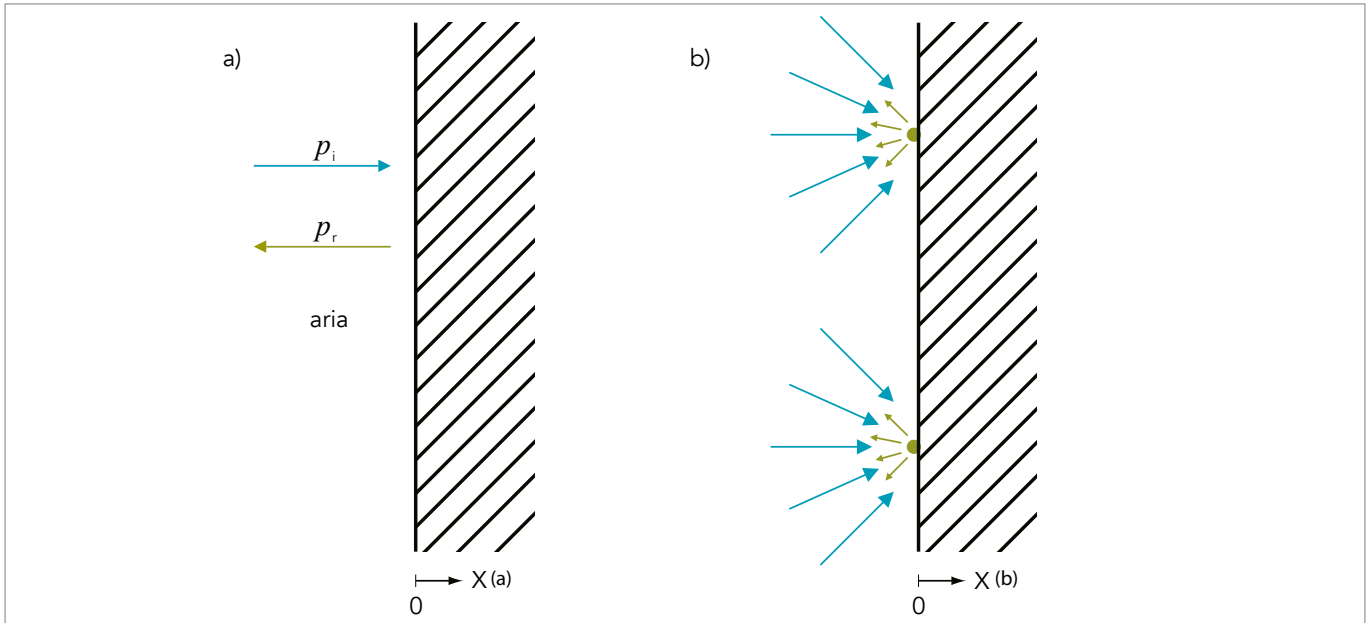


Figura 1.14: interfaccia parete aria: onde piane con incidenza normali (a) ed incidenza diffusa (b)

$$Z_{x=0} = \rho_0 c \cdot \frac{1 + r_p}{1 - r_p}$$

$$\zeta_{x=0} = \frac{Z_{x=0}}{\rho_0 c} = \frac{1 + r_p}{1 - r_p} = \zeta_R + j\zeta_I$$

Attraverso la misura del coefficiente di riflessione complesso nel tubo ad onde stazionarie, è possibile calcolare sia il coefficiente di assorbimento acustico che l'impedenza acustica superficiale del materiale.

Alcuni casi limite forniscono i seguenti valori delle suddette grandezze:

- superficie completamente assorbente: $r_p = 0$ da cui segue $Z = \rho_0 c$ e $\alpha_n = 1$
- parete rigida: $r_p = 1$ da cui segue $Z = \infty$ e $\alpha_n = 0$
- superficie completamente "cedevole": $r_p = 1e^{j\pi} = -1$ da cui segue $Z = 0$ e $\alpha_n = 0$

Il coefficiente di assorbimento acustico dipende inoltre dall'angolo di incidenza dell'onda sonora rispetto alla parete oltre che dall'impedenza acustica superficiale della parete. L'impedenza acustica superficiale può essere considerata indipendente dall'angolo di incidenza per i materiali ideali considerati "localmente reagenti", cioè quei materiali per i quali l'effetto di una sollecitazione puntuale non influenza le parti di materiale non sollecitate. Quando l'ipotesi di materiale localmente reagente non risulta valida, come spesso succede con le fibre minerali, l'impedenza acustica superficiale dipende dall'angolo di incidenza dell'onda acustica sul materiale.

$$Z_{x=0}(\theta) = \left(\frac{\rho_o c_o}{\cos\theta} \cdot \frac{1 + r_p(\theta)}{1 - r_p(\theta)} \right)$$

Nella figura seguente si può osservare come varia il coefficiente di assorbimento acustico al variare dell'angolo di incidenza, per tre diversi materiali aventi diversa impedenza acustica superficiale, ma lo stesso assorbimento per incidenza normale. Si può osservare che, quando ζ è reale e più grande di 1, c'è un angolo di incidenza che fornisce assorbimento totale. Per incidenza radente l'assorbimento tende a zero.

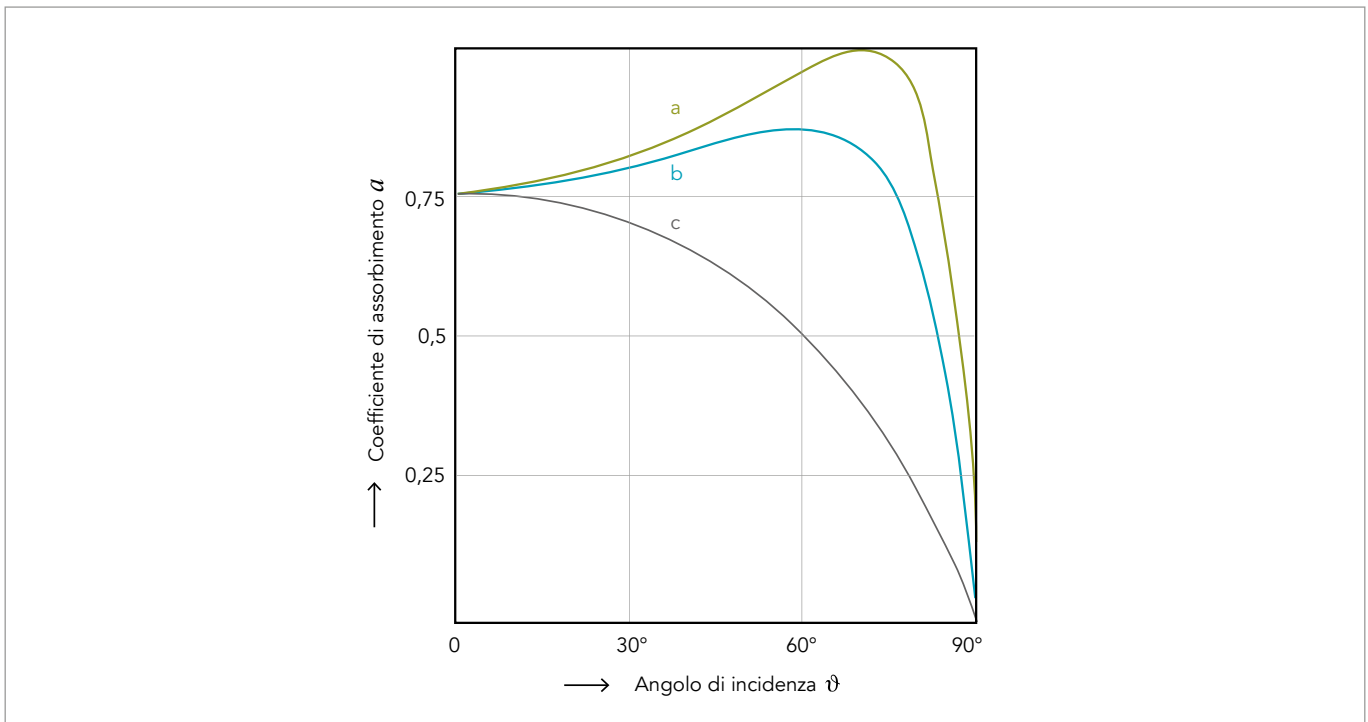


Figura 1.15: Assorbimento acustico al variare dell'angolo di incidenza, per tre diversi materiali aventi diversa impedenza acustica specifica superficiale a) $\zeta = 3$; b) $\zeta = 1,5 + j1,323$; c) $\zeta = 1/3$

Nel caso di incidenza diffusa il coefficiente di assorbimento è il risultato della media spaziale degli assorbimenti nelle diverse direzioni di incidenza dell'onda acustica. Generalmente i materiali hanno un coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa maggiore di quello per incidenza normale ($\alpha_d > \alpha_n$). Il passaggio dai valori per incidenza normale ai valori per incidenza diffusa può essere effettuato, per i materiali localmente reagenti, con formule di calcolo teorico. Per quanto riguarda la lana di roccia, nel capitolo 4 sono riportati i moduli di conversione dei valori di assorbimento acustico per incidenza normale in incidenza casuale. La misura del coefficiente di assorbimento acustico in campo diffuso viene effettuato in camera riverberante mediante calcolo indiretto da misure di tempo di riverberazione (normativa UNI EN ISO 354 [8]).

Non è raro il caso in cui, per materiali altamente fonoassorbenti, la tecnica di misura prevista dalla normativa suddetta fornisca, ad alcune frequenze, valori di assorbimento acustico anche superiori all'unità. Tale risultato è ovviamente un artefatto della tecnica di misura visto che non è possibile assorbire una quantità di energia superiore a quella incidente. Tale artefatto può avvenire poiché la tecnica di misura si basa sull'ipotesi di campo acustico perfettamente diffuso sia in assenza di materiale fonoassorbente che in presenza di materiale fonoassorbente. Evidentemente le condizioni di campo perfettamente diffuso, pur ottenibili in assenza di materiale fonoassorbente, sicuramente sono difficilmente raggiungibili in presenza del materiale.

1.3.3 - Il potere fonoisolante R di pareti omogenee e "sottili"

Come detto precedentemente, la grandezza utilizzata per valutare le proprietà isolanti di una parete è il potere fonoisolante R , che rappresenta la sua attitudine a ridurre la trasmissione del suono incidente su di essa. Il potere fonoisolante R varia al variare della frequenza oltre che delle proprietà fisiche, delle dimensioni e delle condizioni di vincolo della parete.

Per pareti omogenee e sottili, l'andamento teorico del potere fonoisolante, in funzione della frequenza, è quello rappresentato in figura dove si individuano diverse zone in ciascuna delle quali prevale un certo fattore.

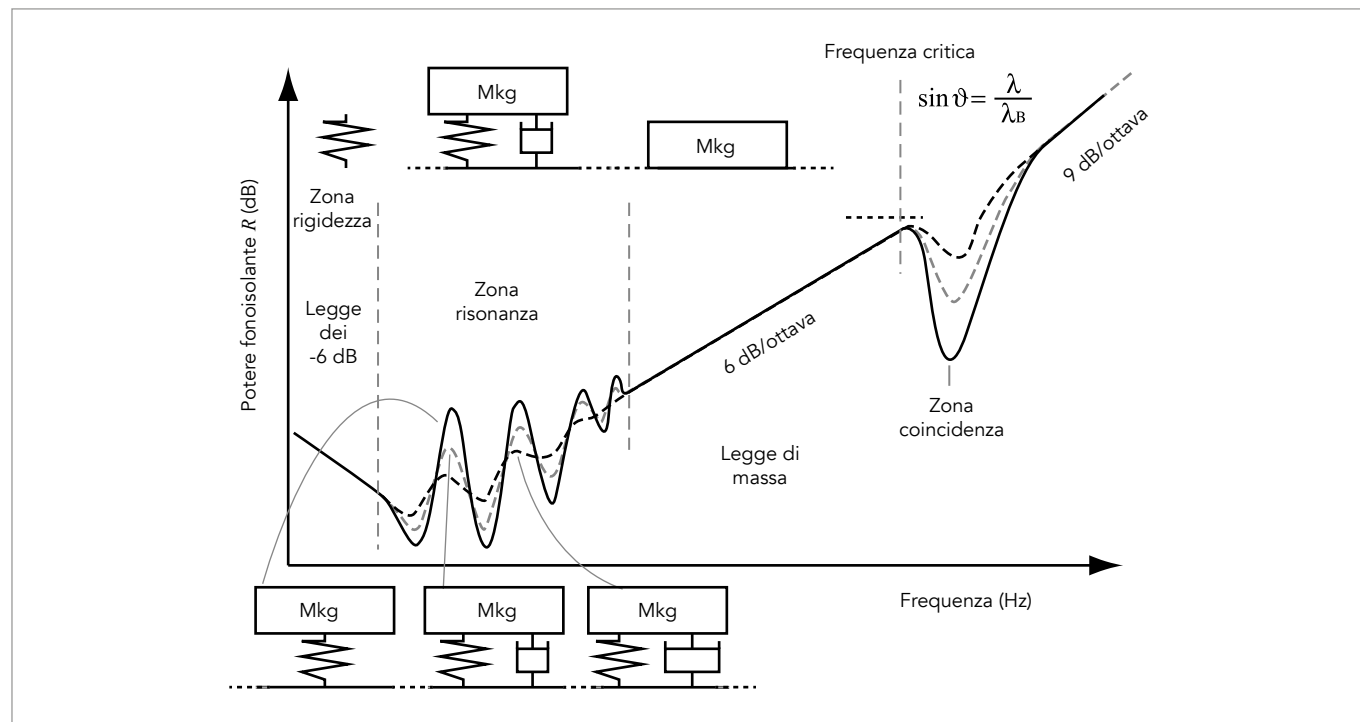


Figura 1.16: Andamento del potere fonoisolante al variare della frequenza e relative leggi

Si può notare, innanzitutto, che il potere fonoisolante assume un valore minimo in corrispondenza della prima frequenza di risonanza del sistema.

Il valore della prima frequenza di risonanza dipende dalla massa per unità di superficie della partizione e dalla sua rigidità. Quest'ultima, a sua volta, è funzione delle proprietà meccaniche (modulo di elasticità E e coefficiente di Poisson ν) e geometriche (spessore h , larghezza a , altezza b).

Semplificando e inserendo anche gli ordini superiori delle frequenze di risonanza, si ottiene la seguente formula:

$$f_{r(i,j)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{h^2}{12} \left[\left(\frac{i\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{j\pi}{b}\right)^2 \right]} \quad [\text{Hz}]$$

dove ρ è la densità del materiale e $i-j$ sono numeri interi per il calcolo delle frequenze di ordine superiore.

Il valore del potere fonoisolante R , nella zona delle frequenze naturali di risonanza, oscilla in maniera irregolare con picchi e valli, rimanendo però sempre su valori piuttosto bassi.

Per valori della frequenza inferiori alla frequenza di risonanza naturale ($f < f_r$) la trasmissione sonora dipende essenzialmente dalla rigidità (o elasticità) della struttura e quindi gli effetti della massa e dello smorzamento sono poco importanti. Si ha una diminuzione di 6 dB per ogni raddoppio della frequenza.

Per valori della frequenza superiori alla zona della risonanza ma comunque inferiori ad un limite superiore fissato dalla cosiddetta frequenza critica ($f_r < f < f_c$), il potere fonoisolante è governato dalla legge di massa. Si ha una crescita di R di 6 dB per raddoppio della frequenza e il comportamento della struttura è indipendente dalla sua rigidità.

In questa zona si può utilizzare la seguente formula di previsione:

$$R_{\theta_i} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{m\pi f \cos \theta_i}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}]$$

Dove m è la massa superficiale, f è la frequenza, θ_i è l'angolo di incidenza, $\rho_0 c$ è l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.

Nel caso di incidenza normale ($\theta_i = 0$), la formula si può riscrivere nel seguente modo:

$$R_0 \cong 20 \log_{10}(mf) - 42.5 \quad [\text{dB}]$$

Le formule viste valgono in un campo sonoro di onde piane che arrivano sulla parete con un certo angolo di incidenza. Solitamente il campo sonoro in un ambiente chiuso è più vicino ad un campo sonoro diffuso. In queste condizioni il potere fonoisolante, detto per incidenza casuale, può essere ottenuto integrando su una semisfera (per θ_i da 0° a 90°) il potere fonoisolante R_{θ_i} . In queste condizioni, con angolo di incidenza fino a 90° , si ottiene

$$R_c \cong R_0 - 10 \log_{10}(0.23 \cdot R_0) \quad [\text{dB}]$$

Secondo diversi autori il valore del potere fonoisolante per incidenza diffusa così calcolato è sottostimato. Una migliore interpretazione del fenomeno reale si ottiene limitando gli angoli di incidenza tra $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 78^\circ$ anziché 90° e ciò perché un'incidenza radente negli ambienti usuali è poco probabile. Il valore più pratico che si ottiene, valido per incidenza mediamente diffusa, è il seguente:

$$R_p = R_0 - c \quad \text{con } c = 5 - 6 \quad [\text{dB}]$$

Nella figura 1.17, a titolo comparativo, sono riportati gli andamenti del potere fonoisolante per incidenza normale, per incidenza mediamente casuale e perfettamente casuale, in funzione del prodotto mf .

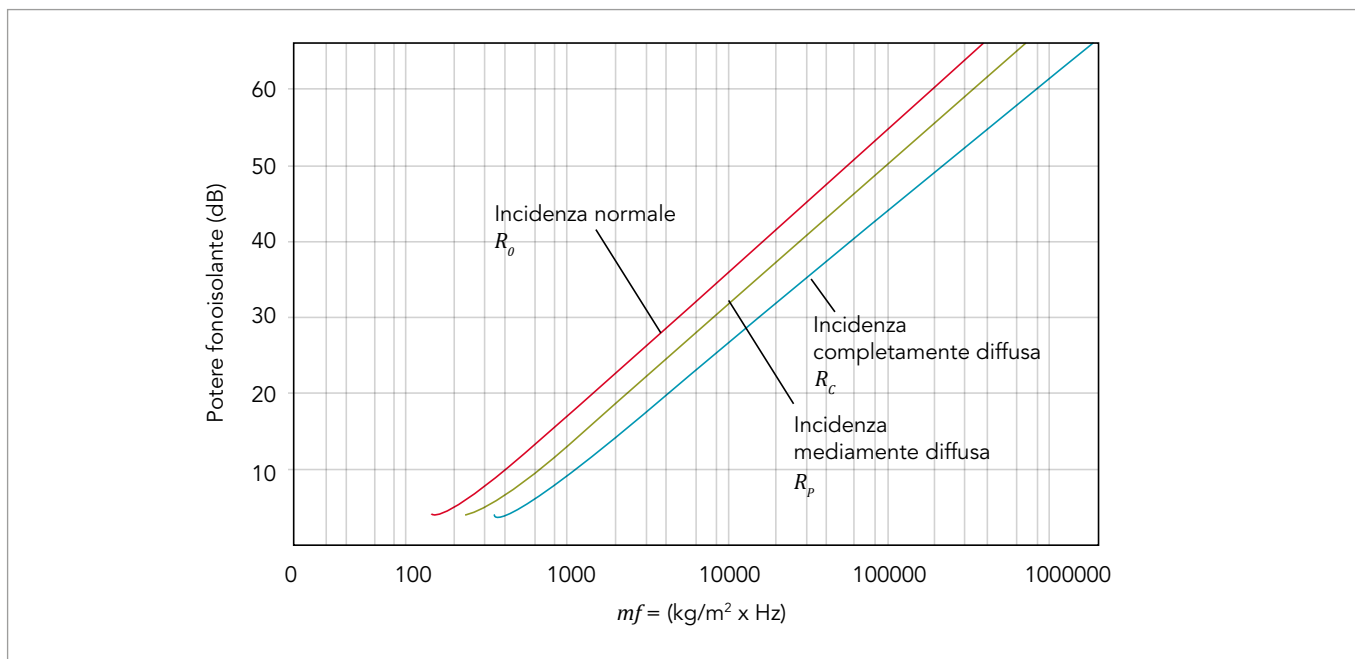


Figura 1.17: Potere fonosolante per incidenza normale R_o , in campo mediamente diffuso R_p ed in campo perfettamente diffuso R_c

La validità della legge della massa è limitata superiormente dal fenomeno della coincidenza. Infatti, mentre la velocità del suono nell'aria è indipendente dalla frequenza, la velocità delle onde flessionali nelle strutture varia al variare della frequenza. La frequenza per cui la velocità delle onde flessionali, che si propagano nella struttura, è uguale alla velocità dell'onda acustica, che si propaga nell'aria, è definita prima coincidenza, o frequenza critica.

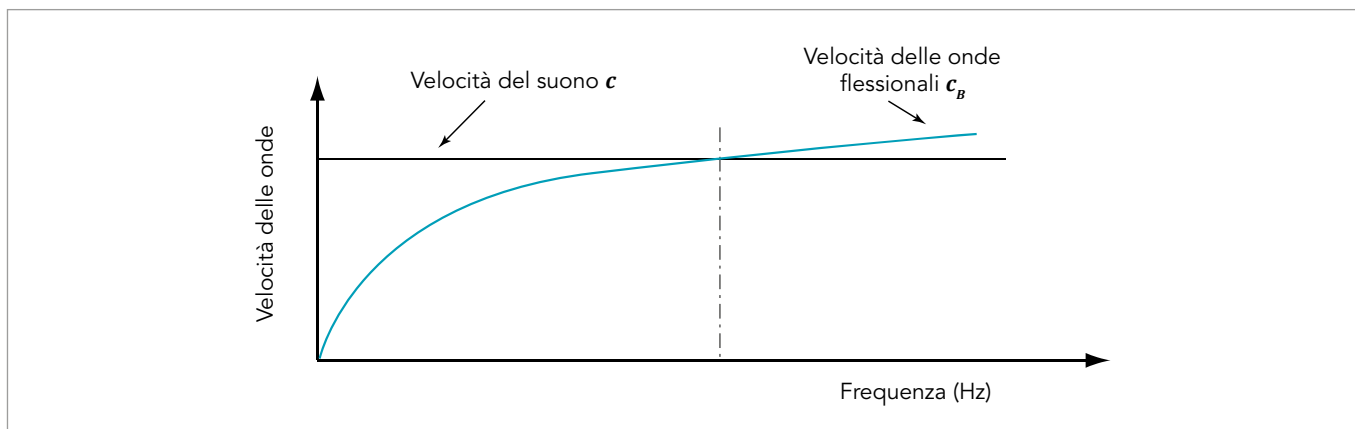


Figura 1.18: Visualizzazione della coincidenza della velocità del suono con la velocità delle onde flessionali

In corrispondenza di questa frequenza si verifica un forte accoppiamento tra le onde sonore e quelle strutturali, con un conseguente incremento della radiazione acustica della struttura e una relativa diminuzione del potere fonoisolante.

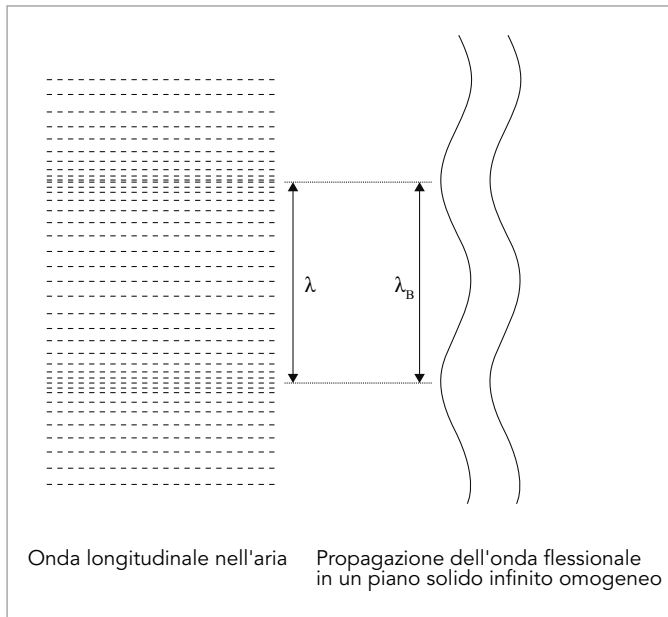


Figura 1.19: per $\theta = 90^\circ$ (incidenza radente), $\lambda = \lambda_B$

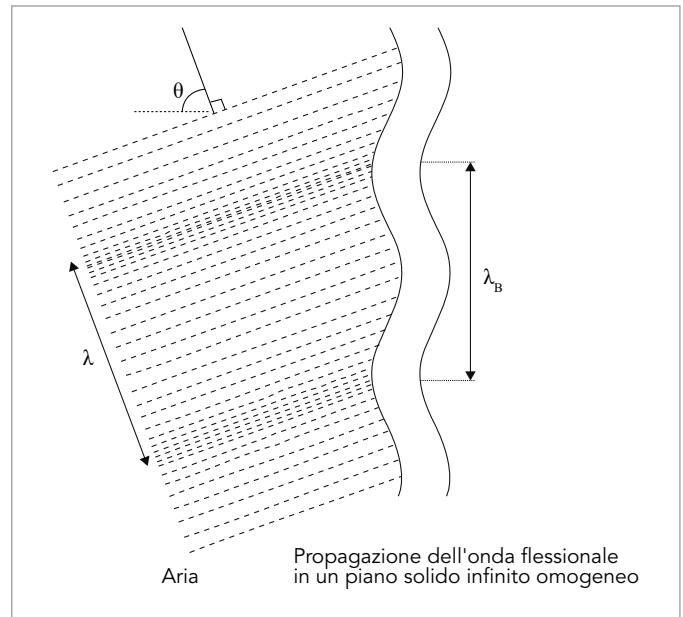


Figura 1.20: per un certo angolo θ di incidenza, $\lambda_{tr} = \lambda / \text{sen}\theta = \lambda_B$

Un'onda piana, incidente con un certo angolo θ su una partizione, induce nella struttura onde flessionali forzate di lunghezza d'onda pari alla lunghezza d'onda di traccia λ_{tr} (proiezione della lunghezza d'onda acustica λ sul piano della parete) dell'onda sonora incidente. Il fenomeno, noto con il nome di coincidenza, si verifica quando la proiezione sul piano della parete della lunghezza d'onda acustica incidente λ_{tr} e la lunghezza d'onda flessionale libera λ_B , (che dipende unicamente dalle caratteristiche della struttura), coincidono:

$$\lambda_{tr} = \lambda_B = \lambda / \text{sen}\theta \quad \text{dove } \lambda = \text{lunghezza d'onda incidente}$$

Poiché il $\text{sen}\theta$ non può eccedere l'unità si ha che la frequenza più bassa per cui si verifica il fenomeno di coincidenza si ottiene per $\theta = 90^\circ$ (incidenza radente); questa frequenza è chiamata *frequenza critica* ed è pari a:

$$f_c = \frac{c^2}{\pi s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

dove E è il modulo di Young, ν è il coefficiente di Poisson, ρ è la densità, s è lo spessore del pannello. Essa si verifica nel caso particolare in cui la lunghezza d'onda flessionale coincide con quella acustica $\lambda = \lambda_B$, o in modo equivalente quando la velocità di propagazione dell'onda flessionale coincide con quella dell'onda acustica $c_B = c$.

In campo diffuso le onde incidono sulla parete da tutte le direzioni. Il fenomeno di coincidenza in questo caso interessa un intervallo di frequenze, infatti per ogni angolo d'incidenza esiste una corrispondente frequenza di coincidenza.

Il fenomeno della coincidenza è particolarmente importante quando si ha incidenza di onde piane con un certo angolo di inclinazione. In un campo diffuso il fenomeno della coincidenza è attenuato da fatto che la quantità di energia trasportata dall'onda che subisce il fenomeno della coincidenza, per una certa frequenza e per uno specifico angolo, è piccola rispetto a tutta quella che incide con angoli diversi alla stessa frequenza.

Nella Tabella 1.3 sono riportati alcuni valori indicativi della frequenza critica di alcuni materiali da costruzione.

| Materiale | Spessore (mm) | Frequenza critica (Hz) |
|-------------|---------------|------------------------|
| Vetro | 3 | 4800 |
| Cartongesso | 13 | 3150 |
| Compensato | 13 | 2000 |
| Cemento | 50 | 630 |
| Cemento | 150 | 200 |

Tabella 1.3: Valore della frequenza critica di alcuni materiali da costruzione

Al di sopra della frequenza critica e della zona dove si verifica il fenomeno della coincidenza, il potere fonoisolante R torna ad aumentare con una pendenza teorica di 9 dB per raddoppio di frequenza e quindi superiore a quella che si verifica nel campo di validità della legge di massa. In campo diffuso si può calcolare il potere fonoisolante sopra la frequenza critica con la seguente espressione:

$$R_d = 20 \log(mf) + 10 \lg\left(\frac{f}{f_c} - 1\right) + 10 \lg \eta - 44 \quad [\text{dB}]$$

dove f_c è la frequenza critica della parete (Hz) e η è il fattore di smorzamento totale della parete. Questo termine sintetizza i meccanismi di smorzamento all'interno della parete eccitata indicando quale frazione dell'energia meccanica vibratoria viene convertita in calore in un ciclo della vibrazione.

I valori elevati dello smorzamento tendono a ridurre le valli di isolamento causati dai fenomeni di risonanza e di coincidenza. Il fattore di smorzamento η indica quale frazione di energia meccanica vibratoria viene persa in calore in un ciclo della vibrazione. Il fattore di smorzamento per i materiali normalmente usati in edilizia varia tra 0,05 e 0,01 circa.

Poiché lo smorzamento dipende non solo dal materiale, ma anche dalle condizioni al contorno, la previsione di R sopra la frequenza critica ha un'affidabilità limitata.

1.4 - Il suono in ambiente esterno: modalità di propagazione ed effetti di attenuazione

1.4.1 - La propagazione in campo libero

Quando il suono si propaga senza incontrare nessun ostacolo che possa causare fenomeni di assorbimento, diffrazione o riflessione, si ha la condizione di campo libero. Le onde sonore si allontanano dalla sorgente subendo il solo fenomeno della divergenza geometrica, cioè dell'attenuazione dovuta al fatto che aumentando la distanza aumenta la superficie di propagazione. In natura esistono innumerevoli tipologie di sorgenti sonore, ciascuna caratterizzata da una certa forma, dimensioni, direttività, spettro di emissione, variabilità nel tempo. Le modalità con cui il suono emesso da queste sorgenti si propaga in campo libero possono essere diverse da sorgente a sorgente. Per semplificare lo studio della propagazione del suono in campo libero è possibile schematizzare le sorgenti sonore in tre tipologie di sorgenti ideali che, in certe condizioni, possono approssimare correttamente il comportamento delle sorgenti reali. Le tipologie considerate sono le seguenti:

- sorgente puntiforme (la propagazione del suono avviene con una divergenza sferica)
- sorgente lineare (la propagazione del suono avviene con una divergenza cilindrica)
- sorgente piana guidata (le onde rimangono piane al variare della distanza)

Il fatto che una sorgente sonora sia considerata puntiforme, lineare o piana non dipende solo dalla sua forma, ma anche dalla dimensione e dalla distanza relativa sorgente-ricevitore. Nella trattazione seguente si considera solo la condizione $d > 1.6 \lambda$, relativa al campo acustico lontano.

Una **sorgente puntiforme** in campo libero produce onde acustiche sferiche, ovvero emette con eguale intensità in tutte le direzioni. In campo lontano, siccome possiamo considerare piana la curvatura della superficie di un fronte d'onda, si ottiene

$$L_p \cong L_l = L_W - 11 - 20 \cdot \log(d) \quad [\text{dB}]$$

L'uguaglianza tra il livello di intensità e quello di pressione si verifica soltanto nelle ipotesi di campo libero (assenza di qualsiasi riflessione).

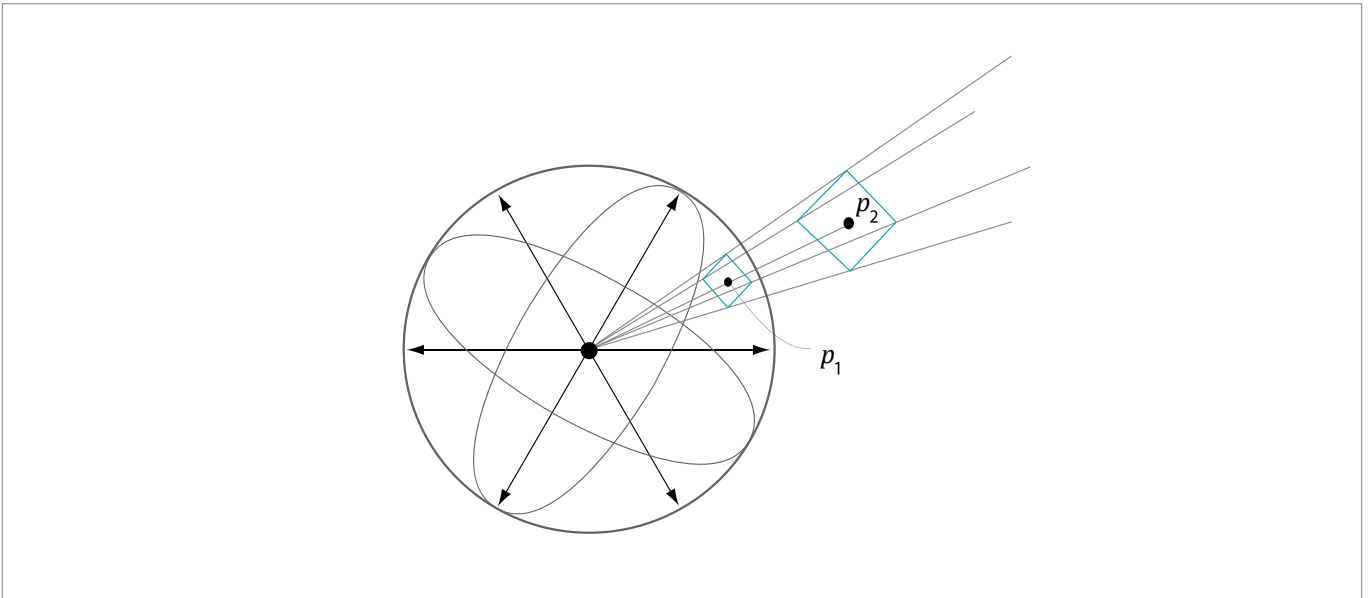


Figura 1.21: Propagazione per onde sferiche di una sorgente puntiforme

L'attenuazione per divergenza sferica ΔL tra i punti p_1 e p_2 si può calcolare nel modo seguente:

$$L_{p_1} \cong L_{l_1} = L_W - 11 - 20 \cdot \log(d_1)$$

$$L_{p_2} \cong L_{l_2} = L_W - 11 - 20 \cdot \log(d_2)$$

$$\Delta L = L_{l_1} - L_{l_2} = -20 \cdot \log(d_1) + 20 \cdot \log(d_2) = 20 \cdot \log \frac{d_2}{d_1}$$

Nel caso particolare in cui $d_2 = 2 \cdot d_1$ l'attenuazione per divergenza sferica fornisce $\Delta L = 6$ dB, cioè una diminuzione di 6 dB dei livelli di intensità e pressione sonora per ogni raddoppio della distanza sorgente-ricevitore. Questo comportamento rispetta la regola dei 3 dB (ad un dimezzamento dell'energia corrisponde un calo del livello di 3 dB): raddoppiare la distanza dalla sorgente equivale a quadruplicare la superficie e quindi a ridurre ad un quarto l'energia ovvero ad un calo di 6 dB.

Una **sorgente lineare** produce delle onde cilindriche; se essa è costante lungo tutta la sua lunghezza le onde sono equidistanti dalla sorgente. Considerando una sorgente sonora di lunghezza unitaria, si ottiene:

$$L_p \cong L_l = L_W - 10 \cdot \log(2\pi) - 10 \cdot \log(d) = L_W - 8 - 10 \cdot \log(d) \quad [\text{dB}]$$

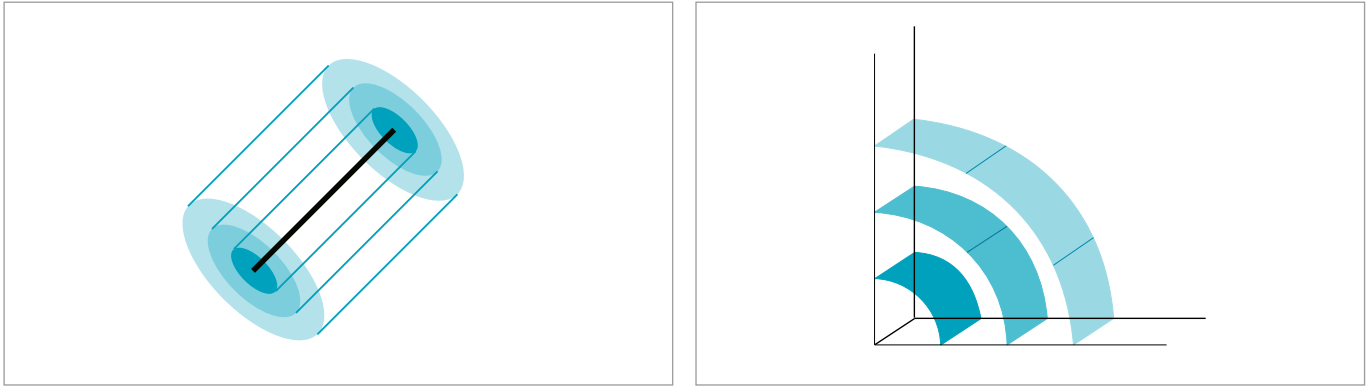


Figura 1.22: Propagazione per onde cilindriche di una sorgente lineare

L'attenuazione per divergenza cilindrica ΔL tra due punti p_1 e p_2 a distanza crescente dalla sorgente, si può calcolare nel modo seguente:

$$L_{p_1} \cong L_{l_1} = L_W - 8 - 10 \cdot \log(d_1)$$

$$L_{p_2} \cong L_{l_2} = L_W - 8 - 10 \cdot \log(d_2)$$

$$\Delta L = L_{l_1} - L_{l_2} = -10 \cdot \log(d_1) + 10 \cdot \log(d_2) = 10 \cdot \log \frac{d_2}{d_1}$$

Nel caso particolare in cui $d_2 = 2 \cdot d_1$ si ottiene $\Delta L = 3$ dB, ciò corrisponde ad una diminuzione di 3 dB dei livelli di intensità e pressione sonora per ogni raddoppio della distanza sorgente-ricevitore. Anche in questo caso viene rispettata la regola dei 3 dB. Una sorgente sonora lineare può essere costituita da un emettitore continuo come un tubo in cui scorre un fluido in moto turbolento oppure da un insieme di sorgenti puntiformi ravvicinate, come ad esempio una strada con flusso di traffico continuo.

Una **sorgente piana** genera onde acustiche piane. Nell'ambito delle normali sorgenti reali, solitamente non si ha a che fare con tale tipo di propagazione. In laboratorio si può costruirne un modello di una guida d'onda utilizzando un tubo, liscio all'interno, avente da un lato un pistone vibrante.

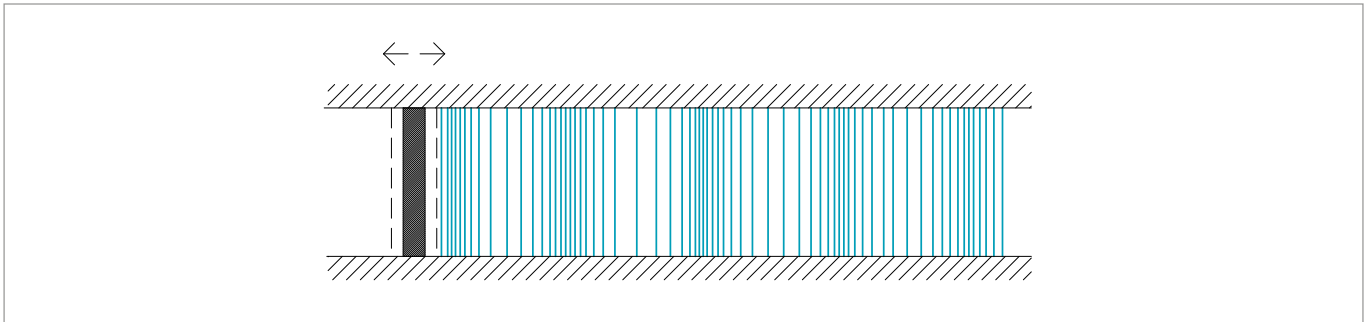


Figura 1.23: Propagazione per onde piane di sorgenti sonore piane

Nelle condizioni in cui le onde risultino perfettamente piane ed in assenza di altri fenomeni dissipativi si verifica che l'intensità acustica rimane costante al variare della distanza tra la sorgente ed il ricevitore. Si vede infatti come:

$$I_1 = \frac{W}{S_1} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{W}{S_2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Poiché $S_1 = S_2$, risulta $I_1 = I_2$ dunque l'attenuazione è nulla.

Onde piane si possono verificare anche in prossimità di grandi lastre vibranti, come ad esempio le facciate dei capannoni industriali. La condizione di onda piana viene però persa facilmente in prossimità dei bordi ed all'aumentare della distanza dal piano vibrante.

In realtà a distanze molto grandi la sorgente piana può essere vista come una sorgente puntiforme.

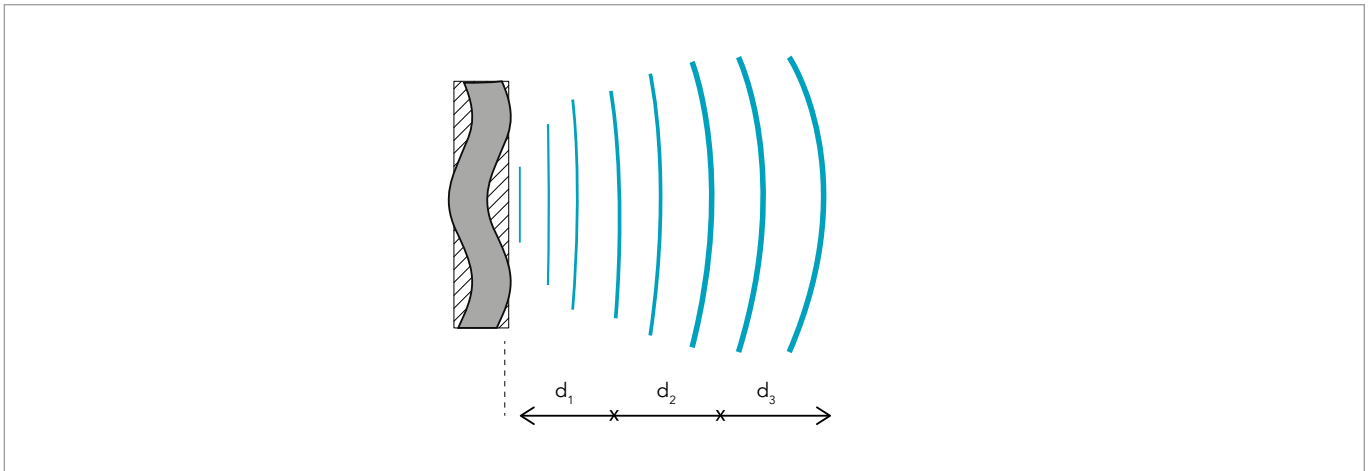


Figura 1.24: Effetto della variazione della distanza relativa sorgente - fronte d'onda

Quando una sorgente sonora è appoggiata ad un pavimento riflettente o ad una parete allora è vincolata ad irradiare solo in una porzione di spazio. Questo comporta che la quantità di energia irradiata in una certa direzione è maggiore che nel caso di radiazione uniforme. Per tenere conto di questa caratteristica, ed in generale per tener conto di una non uniforme irradiazione di energia nello spazio circostante, si introduce il **fattore di direttività** Q , cioè il rapporto tra l'intensità sonora nella direzione θ (I_θ) e l'intensità sonora (I_0) che avrebbe il campo acustico in quel punto se la sorgente fosse omnidirezionale:

$$Q = \frac{I_\theta}{I_0}$$

Per sorgenti puntiformi appoggiate su pareti perfettamente riflettenti il volume a disposizione per la propagazione si dimezza e quindi $Q = 2$. Per sorgenti collocate lungo uno spigolo tra due pareti il volume diventa la quarta parte e quindi $Q = 4$. In un vertice diventa $Q = 8$. Per applicare questo fenomeno alla propagazione in campo libero si può scrivere:

$$L_p \cong L_l = L_W - 11 - 20 \cdot \log(d) + 10 \cdot \log(Q)$$

Il termine $D = 10 \cdot \log(Q)$ viene invece chiamato *indice di direttività*.

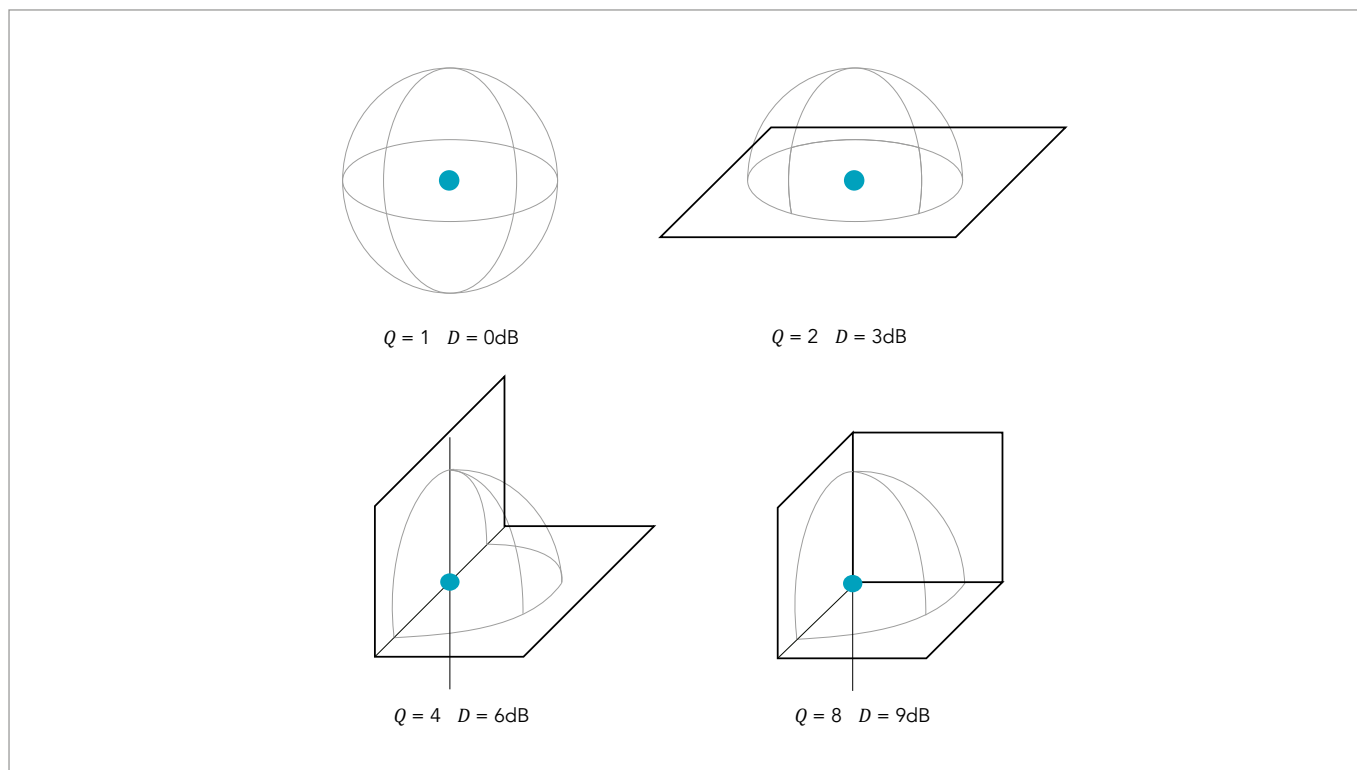


Figura 1.25: Fattori e indici di direttività per diverse situazioni

1.4.2 Effetti di attenuazione sonora nella propagazione

L'attenuazione che il suono subisce propagandosi dalla sorgente al ricevitore dipende, oltre che dalla divergenza geometrica dovuta alla distanza, anche da altri fenomeni dissipativi dovuti all'assorbimento dell'aria o delle superfici con cui l'onda di pressione viene in contatto (diversi tipi di terreno, alberi e vegetazione), dalle condizioni meteorologiche (velocità del vento e gradiente di temperatura) dalla presenza di barriere acustiche. Per sorgenti puntiformi si può scrivere:

$$L_p \cong L_I = L_W - 11 - 20 \cdot \log(d) + 10 \cdot \log(Q) - \Delta L$$

dove ΔL è una somma algebrica di:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{aria}} + \Delta L_{\text{suolo}} + \Delta L_{\text{vegetazione}} + \Delta L_{\text{temperatura}} + \Delta L_{\text{vento}} + \Delta L_{\text{barriere}}$$

Le modalità di calcolo di alcuni termini sono riportati nelle norme UNI ISO 9613 parti 1-2 [9, 10].

L'**assorbimento dell'aria** è associato a diversi processi irreversibili che convertono parte dell'energia dell'onda acustica in calore. Questo effetto diventa rilevante solo quando si considera la propagazione a distanze pari a diverse lunghezze d'onda. L'assorbimento cresce all'aumentare della frequenza secondo un andamento che risente della presenza di umidità.

A bassa frequenza, tanto maggiore è l'umidità tanto minore è l'assorbimento. A frequenze molto alte l'andamento è opposto. Sotto i 100Hz l'assorbimento è molto basso dell'ordine di 1dB/kM mentre oltre i 12-13 kHz c'è un'attenuazione altissima. Gli ultrasuoni, infatti, dopo pochi metri vengono attenuati completamente.

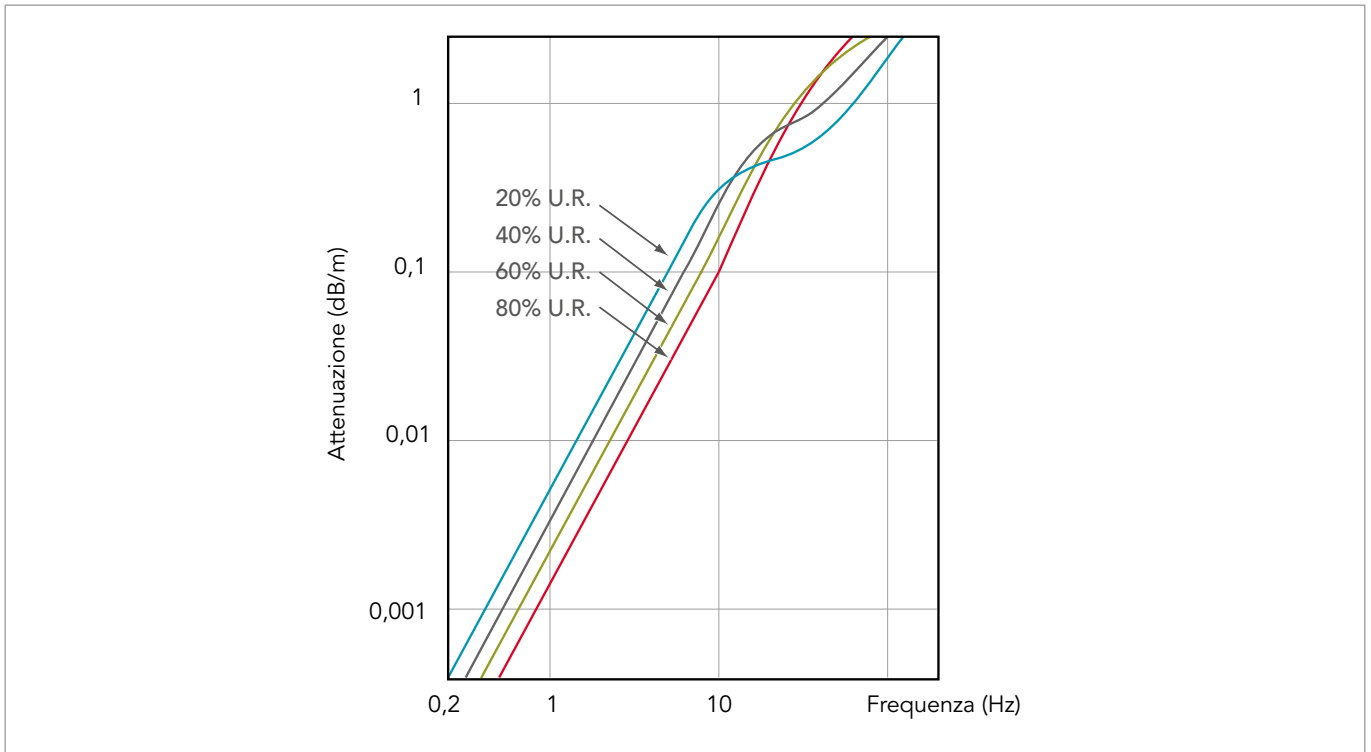


Figura 1.26: Andamento dell'assorbimento dell'aria al variare della frequenza e dell'umidità

Un altro fenomeno di attenuazione che si verifica sempre è il cosiddetto **effetto suolo**. Quando un'onda sonora si propaga in prossimità del terreno, si verifica una attenuazione per effetto radente superiore a quella che si verifica lontano dal terreno. Il risultato è che a livello del terreno si hanno livelli sonori più bassi rispetto a quelli che si verificano ad una certa altezza. Il fenomeno è causato sia dall'assorbimento del terreno, ma anche dall'interferenza distruttiva tra le onde sonore dirette e quelle che si riflettono sul terreno (figura 1.27).

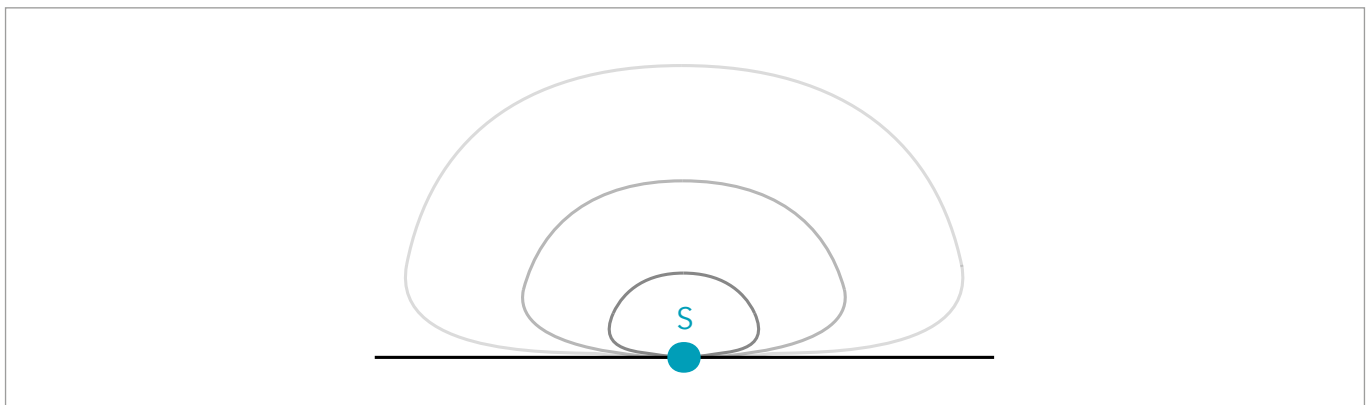


Figura 1.27: Visualizzazione di curve isolivello con effetto suolo

L'attenuazione dovuta alla **vegetazione** è solitamente trascurabile a meno che non si sia in presenza di bosco e sottobosco fitto e profondo. A titolo indicativo, uno spessore di circa 30 metri di alberi con sottobosco fitto produce un'attenuazione di circa 5 dB. Benché una zona di vegetazione non riduca significativamente i livelli di rumore, serve però ad isolare visivamente e per questo determina un effetto soggettivo positivo.

Il **vento** interagisce con l'onda sonora in modo differente in funzione della direzione e del verso. La velocità del suono e quella del vento si sommano vettorialmente generando una disposizione dei raggi sonori secondo l'andamento riportato nella figura 1.28. Tale deviazione può provocare, a grande distanza dalla sorgente, delle zone d'ombra oppure può permettere ai raggi sonori di scavalcare degli ostacoli.

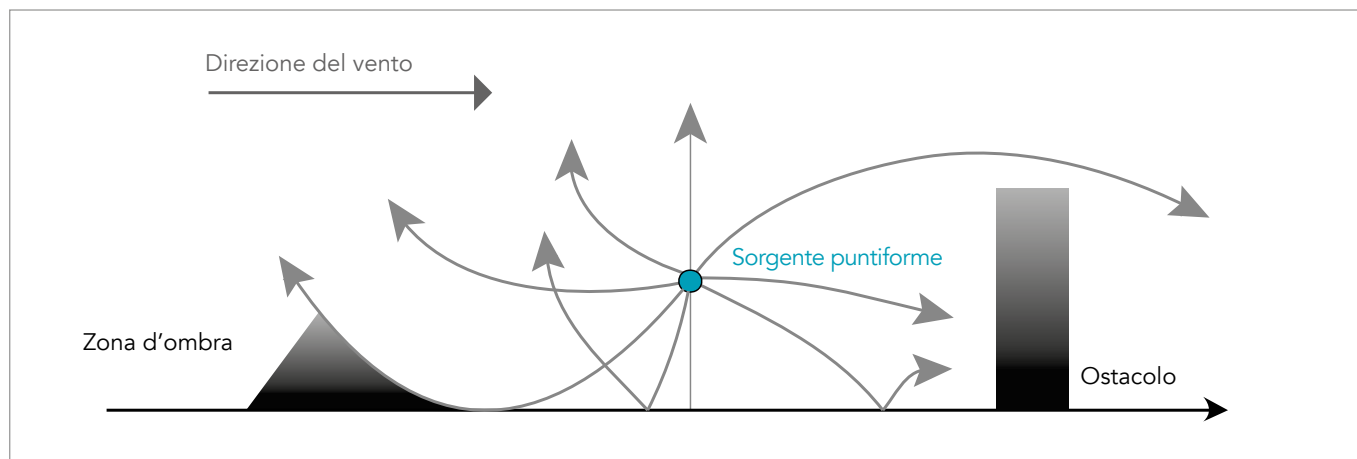


Figura 1.28: Andamento della direzione dei raggi sonori per effetto del vento

Il **gradiente di temperatura** è sempre presente ed è dovuto allo scambio di calore fra la superficie terrestre e l'atmosfera. La presenza del gradiente di temperatura porta ad una variazione della velocità del suono in funzione dell'altezza da terra poiché la temperatura influenza la densità delle particelle che a sua volta influenza la velocità.

Anche per quanto riguarda l'effetto dovuto al gradiente di temperatura, le velocità si sommano vettorialmente. In presenza di un gradiente positivo di temperatura (temperatura che aumenta con l'altezza, generalmente di notte), al crescere dell'altezza da terra si ha un aumento della velocità del suono; un'onda che viaggia nell'aria, quindi, ha una velocità leggermente maggiore nella parte più alta ed è deviata lievemente verso il basso. Analogamente, in presenza di un gradiente negativo (temperatura che cala con l'altezza, generalmente di giorno) si ha una leggera deviazione dell'onda verso l'alto. Il gradiente di temperatura, come il vento, può determinare scavalcamento di ostacoli o zone d'ombra.

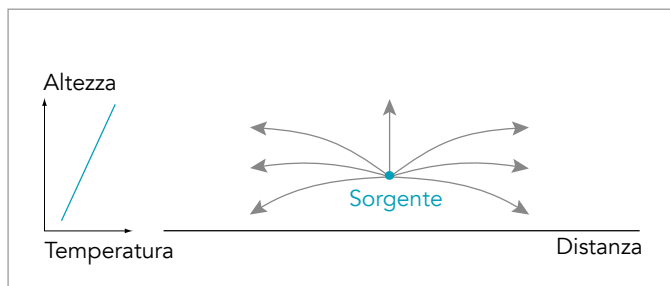


Figura 1.29: Andamento della direzione dei raggi sonori per effetto del gradiente di temperatura (crescente con altezza)

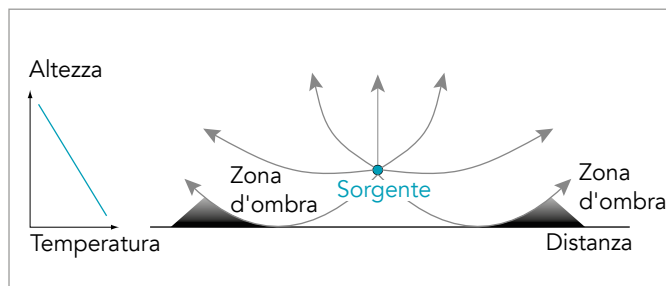
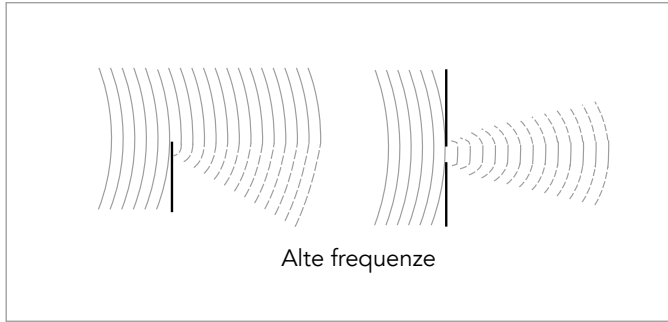


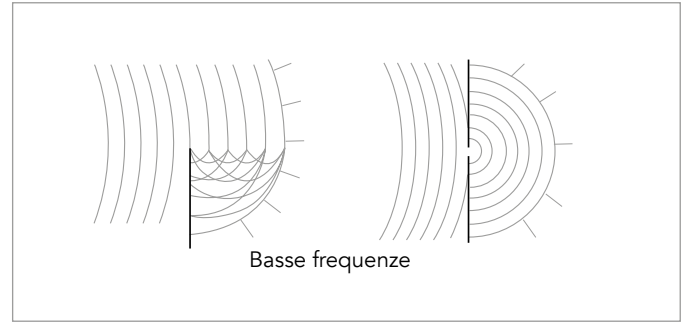
Figura 1.30: Andamento della direzione dei raggi sonori per effetto del gradiente negativo di temperatura

Un ultimo effetto da considerare, ma molto importante a livello pratico, è l'attenuazione dovuta alle **barriere acustiche**. Le barriere acustiche sono costituite da ostacoli interposti tra sorgente e ricevitore e possono determinare una attenuazione acustica che in certi casi può arrivare anche a 20 dB. L'attenuazione delle barriere acustiche è l'unico fenomeno, tra quelli riscontrabili nella propagazione del suono all'esterno, che può essere tecnicamente controllata e per questa ragione svolgono un ruolo importantissimo nel controllo della propagazione dei suoni e dei rumori. Quando un'onda incontra un ostacolo finito, il bordo dell'ostacolo (o un eventuale foro presente su di esso) diviene esso stesso una sorgente di onde. Si verifica il cosiddetto fenomeno di diffrazione.



Alte frequenze

Figura 1.31: Effetto di diffrazione ad alta frequenza



Basse frequenze

Figura 1.32: Effetto di diffrazione a bassa frequenza

La capacità di emettere del punto di contatto dipende in gran parte dalla frequenza delle onde. Le alte frequenze subiscono una limitata diffrazione, mentre per le basse frequenze il fenomeno è molto marcato e per questo tendono a scavalcare di più l'ostacolo. Il suono interagisce con la barriera per riflessione sulla sua superficie, per trasmissione attraverso la barriera stessa e per diffrazione ai bordi. Per essere efficace deve essere resa trascurabile la parte di energia sonora che attraversa la barriera. Per questo motivo la massa superficiale della barriera non dovrebbe essere inferiore a 20 kg/m². In queste condizioni l'energia che raggiunge l'ascoltatore è quella trasmessa per diffrazione sulla parte superiore o ai lati della barriera. Per una barriera sufficientemente lunga da trascurare la diffrazione ai lati, l'attenuazione può essere valutata attraverso la relazione di Maekawa:

$$\Delta L = 10 \cdot \log(3 + 20N) \quad [\text{dB}]$$

dove N rappresenta il numero di Fresnel definito dalla relazione

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

essendo δ la differenza di cammino tra onda diretta e diffratta (in figura 1.33 = $SB + BR - SR$) e $\lambda = c/f$ la lunghezza d'onda della perturbazione sonora.

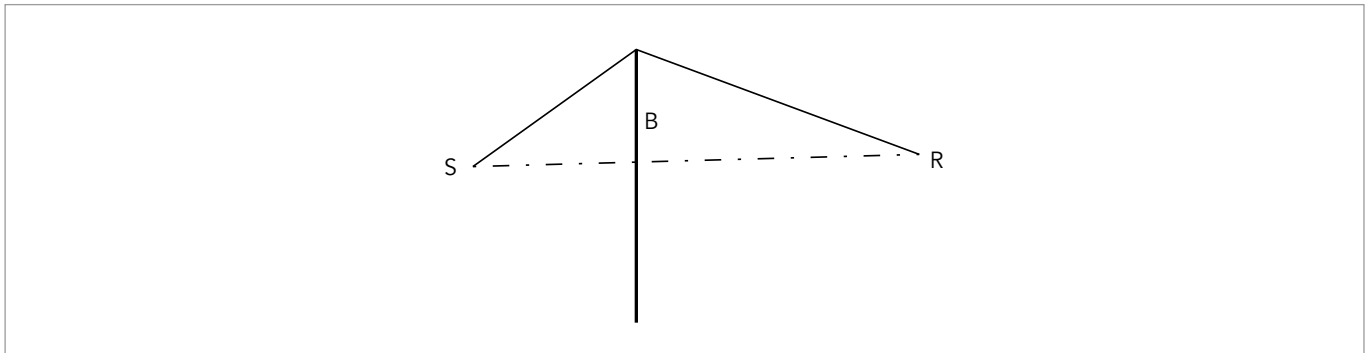


Figura 1.33: Visualizzazione dei raggi diretto e diffratto

Considerando anche la diffrazione attraverso i bordi laterali della barriera (N_1, N_2) si può scrivere:

$$\Delta L = 10 \cdot \log(3 + 20N) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2}\right) \quad [\text{dB}]$$

valida per valori di $N, N_1, N_2 > 1$. Per ridurre l'influenza della diffrazione laterale (< 2 dB), occorre che la larghezza della barriera sia almeno uguale a 4 o 5 volte la sua altezza.

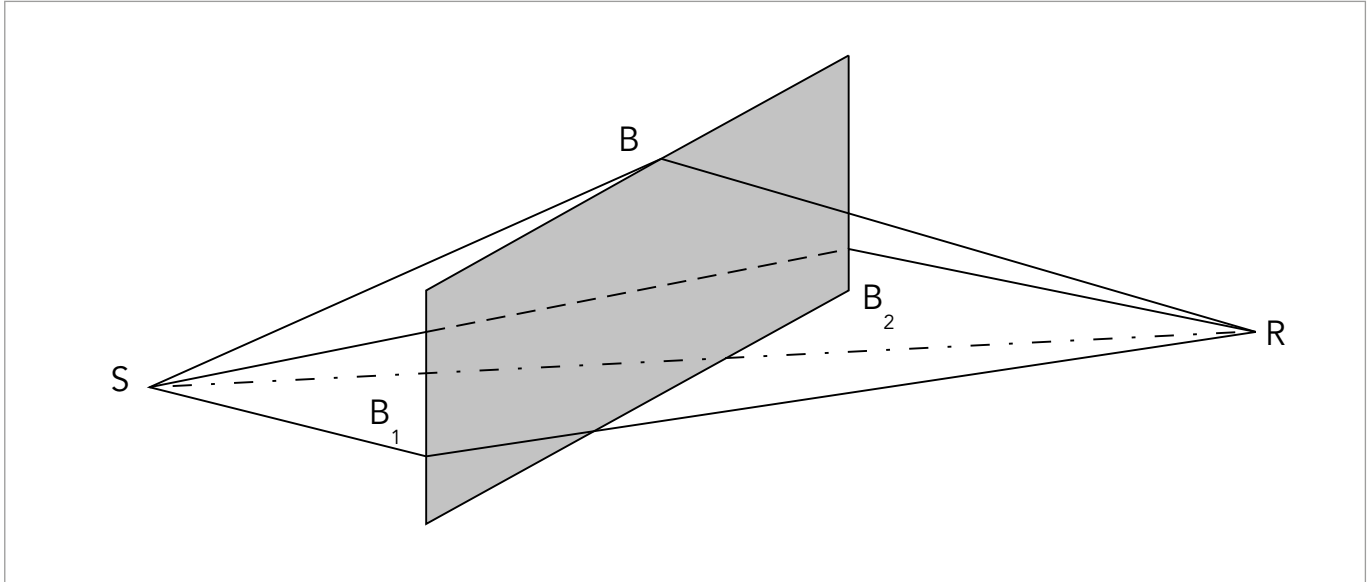


Figura 1.34: Visualizzazione dei raggi diretto e diffratti superiormente e lateralmente

Il livello di pressione sonora di una barriera viene pertanto calcolato come:

$$L_{\text{con barriera}} = L_{\text{senza barriera}} - \Delta L$$

Da notare che si tratta di una differenza aritmetica in dB (es. $L_{\text{con barriera}} = 100 - 20 = 80$).

Se N è molto piccolo la formula di Maekawa non è molto precisa, allora si utilizzano altre formule.

1.5 - Acustica degli ambienti chiusi

1.5.1 - Densità di energia sonora e tempo di riverberazione

Quando un'onda sonora urta contro una parete, l'energia trasportata (incidente), si ridistribuisce nelle tre componenti riflessa, assorbita e trasmessa.

Per lo studio dell'acustica in un ambiente chiuso si considera l'energia che viene riflessa dalle pareti poiché sia la parte assorbita che la parte trasmessa sono irrilevanti ai fini del campo acustico interno. I coefficienti di assorbimento a e trasmissione t vengono quindi generalmente accorpati in un unico valore chiamato coefficiente di assorbimento acustico apparente $\alpha = (a + t)$ senza perdere le informazioni necessarie al campo acustico interno.

Il coefficiente di riflessione viene quindi espresso come $r = 1 - \alpha$.

La riflessione del suono avviene in parte in maniera speculare e in parte in maniera diffusa influenzando parzialmente la qualità del campo acustico all'interno dell'ambiente ma non l'energia che complessivamente entra in gioco nella riflessione.

Quando in un ambiente chiuso, in cui sono contenute una sorgente sonora S ed un ricevitore R , viene accesa la sorgente S il primo fronte d'onda a raggiungere R è quello diretto senza riflessioni sulle pareti, con potenza W_s e caratterizzato da

un'intensità di modulo $I_D = \frac{W_s}{4\pi d^2}$ e da una densità $D_D = \frac{W_s}{4\pi d^2 c}$.

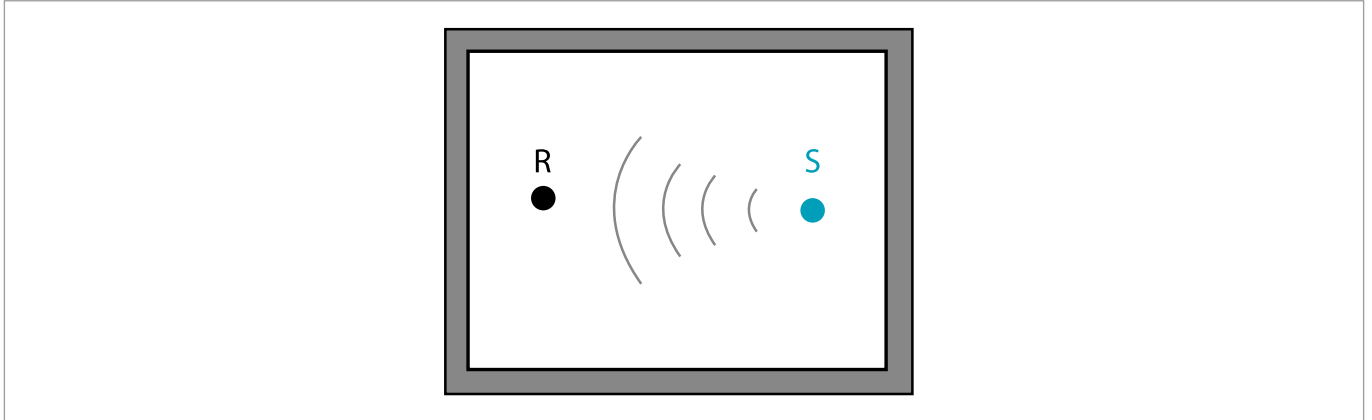


Figura 1.35: Propagazione dell'onda diretta

A seguire si ha la prima riflessione dell'onda sonora contro la parete più vicina alla sorgente S .

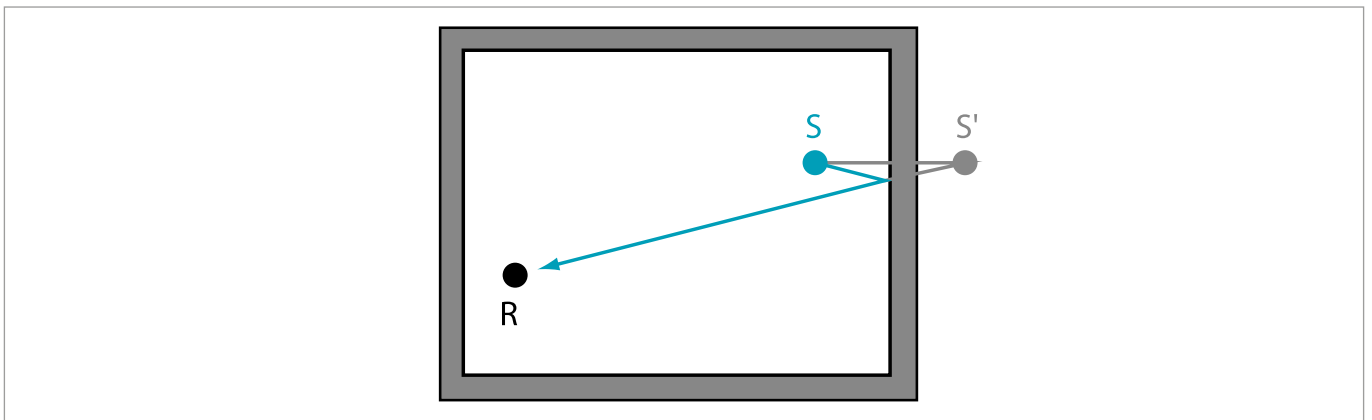


Figura 1.36: Visualizzazione dei raggi diretto e riflesso e della sorgente immagine

La potenza che raggiunge il ricevitore a causa della riflessione è $W_{S'} = W_S \cdot (1 - \alpha)$ che si può anche immaginare come la potenza emessa dalla *sorgente immagine S'* situata simmetricamente a S rispetto alla parete riflettente. Con questo procedimento grafico si ottiene facilmente l'uguaglianza degli angoli di incidenza e riflessione.

L'intensità e la densità avranno invece ampiezza rispettivamente:

$$I_{S'} = \frac{W_{S'}}{4\pi d_r^2} = \frac{W_S(1 - \alpha)}{4\pi d_r^2} \quad \text{e} \quad D_{S'} = \frac{W_{S'}}{4\pi d_r^2 c} = \frac{W_S(1 - \alpha)}{4\pi d_r^2 c}$$

dove la distanza d_r è la distanza fra la sorgente immagine S' e il ricevitore.

Dopo la prima riflessione si verificheranno le cosiddette riflessioni del II ordine, III ordine e così via. Tutte le grandezze relative alle suddette riflessioni si possono ancora una volta calcolare con il metodo delle sorgenti immagine di cui si riporta un esempio grafico fino al II ordine (figura 1.37).

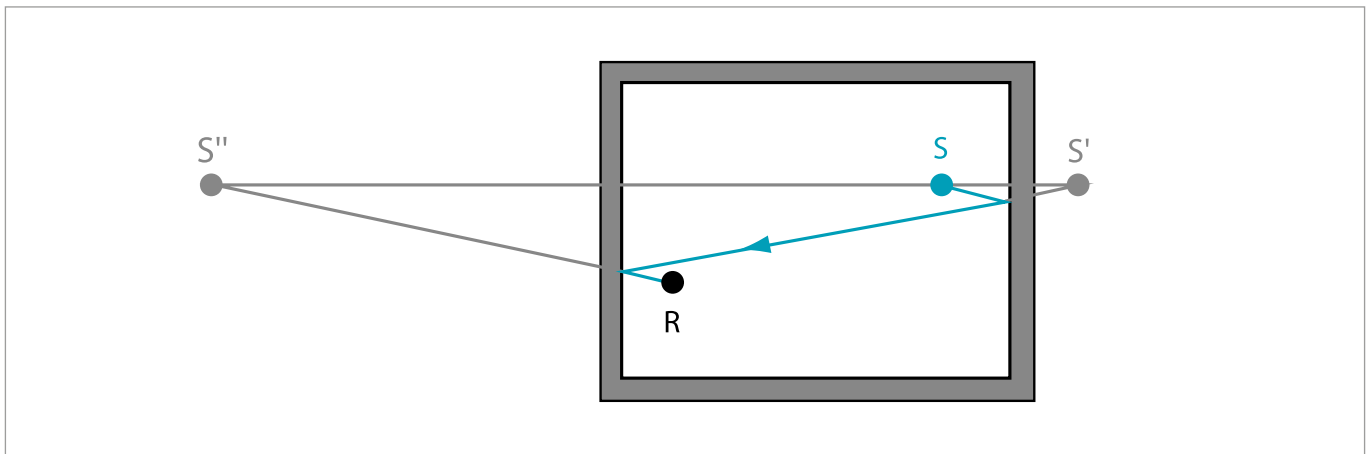


Figura 1.37: Visualizzazione dei raggi diretto e riflessi e delle sorgenti immagine del I° e del II° ordine

Mano a mano che si verificano le successive riflessioni, si assiste contemporaneamente alla diminuzione della potenza sonora che raggiunge il ricevitore e all'aumento della distanza percorsa dall'onda prima di arrivare al ricevitore R. Per l'insieme di questi fenomeni si raggiunge ben presto una situazione di regime in cui R rileva una densità costante, a causa dell'equivalenza che si instaura fra l'energia emessa dalla sorgente e quella assorbita dalle pareti. A regime, la densità di energia sonora nell'ambiente vale:

$$D_{reg} = \frac{4W_S}{\alpha \cdot S \cdot c}$$

Gli stessi ragionamenti fatti per la fase di salita della densità di energia in un ambiente chiuso possono essere ripetuti in maniera opposta per la fase di discesa che si verifica una volta che la sorgente sonora viene spenta. Nel momento in cui la sorgente smette di emettere energia, si verifica la cosiddetta *coda sonora*, cioè il permanere per un breve periodo del campo riflesso che si attenua progressivamente fino a scomparire del tutto. Per valutare questo fenomeno è stato introdotto da Sabine il **tempo di riverberazione** cioè l'intervallo di tempo che trascorre dal momento in cui la sorgente viene spenta al momento in cui la densità di energia si riduce ad un valore pari ad un milionesimo della densità di energia sonora di regime $D_T = 10^{-6} D_{reg}$ (o in maniera equivalente, riferendosi ai livelli, $L_{D/T} = L_{Dreg} - 60\text{dB}$).

Il tempo di riverberazione, che è ricavabile da misure sperimentali, è correlato con il volume e con l'assorbimento dell'ambiente attraverso la formula di Sabine:

$$\tau_0 = 0,161 \frac{V}{\sum \alpha_i s_i + \sum A_i}$$

dove:

- τ_0 è il tempo di riverberazione;
- A_i = area equivalente di assorbimento acustico [m^2];
- s_i = superficie i-esima;
- α_i = coefficiente di assorbimento acustico apparente;
- V = volume.

Nella formula si può osservare che la costante 0.161 non è adimensionale, ma risulta pari a $0.161 = 55.3/c$ [s/m] quando la velocità del suono si considera pari a $c = 343$ m/s, cioè alla temperatura ambiente di circa 20 °C. A temperature diverse da quelle ambiente, cambiando la velocità c , può cambiare anche il valore numerico della costante.

Nel caso in cui nell'ambiente considerato siano presenti esclusivamente delle pareti o delle superfici, l'area equivalente di assorbimento acustico si ricava semplicemente come $\sum \alpha_i s_i$, mentre, nel caso più generale in cui si debba tenere conto anche della presenza di oggetti o di persone, va calcolata come $\sum \alpha_i s_i + \sum A_i$, dove la seconda sommatoria tiene conto dell'assorbimento equivalente di oggetti o persone. Si può scrivere:

$$\tau_0 = 0.161 \frac{V}{A} \quad \text{dove risulta: } A = \sum \alpha_i s_i + \sum A_i$$

considerando A pari al totale delle aree equivalenti dell'ambiente in analisi.

La validità di questa formula è strettamente correlata con le caratteristiche geometriche ed acustiche dell'ambiente. Il campo acustico deve essere sufficientemente diffuso; le dimensioni devono essere confrontabili; l'assorbimento dei vari elementi e delle pareti deve essere abbastanza omogeneo e sufficientemente basso.

Nelle tre figure sono riportati rispettivamente: l'andamento della potenza sonora emessa dalla sorgente nel tempo, l'andamento della densità di energia sonora nell'ambiente nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta; lo stesso grafico ma utilizzando i livelli sonori anziché la densità di energia. Il diagramma semilogaritmico rappresenta i livelli di densità [dB] in funzione del tempo [t]; si vede chiaramente come i due transitori in scala logaritmica siano delle rette.

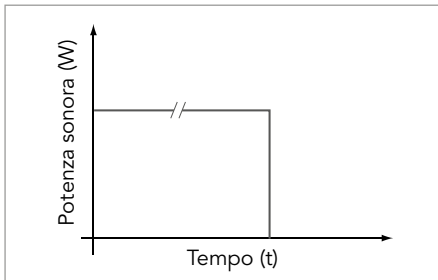


Figura 1.38: Andamento della potenza sonora emessa dalla sorgente nel tempo

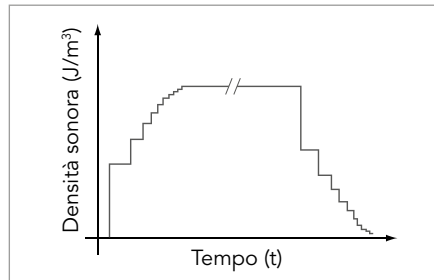


Figura 1.39: Andamento della densità di energia nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta

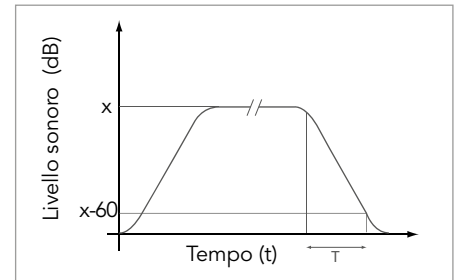


Figura 1.40: Andamento del livello sonoro nella fase iniziale, a regime e quando la sorgente viene spenta

1.5.2 - Campo sonoro semiriverberante e riverberante in regime stazionario

In un ambiente chiuso in cui è in funzione una sorgente sonora, il livello sonoro che si instaura nelle diverse posizioni è influenzato dalle caratteristiche riverberanti dell'ambiente (o dall'assorbimento delle pareti) e dalla distanza sorgente ricevitore. Essendo in un campo acustico diffuso o parzialmente diffuso, le grandezze che si considerano per il calcolo dei livelli sonori sono la densità di energia e la pressione acustica. L'intensità acustica, essendo una grandezza vettoriale, tende ad essere nulla in un campo diffuso.

Il livello sonoro ad una certa distanza dal ricevitore si può calcolare con la seguente espressione:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right)$$

dove R è chiamata *costante dell'ambiente* e vale $R = \frac{\bar{\alpha} S_{TOT}}{(1 - \bar{\alpha})}$, Q è il fattore di direttività dovuto alla posizione della sorgente rispetto alle pareti riflettenti.

Questa formula del campo acustico semiriverberante tiene conto separatamente sia del campo riflesso che del campo diretto. Essa considera il fatto che in un qualsiasi ambiente in cui sia presente una sorgente, nei punti abbastanza vicini ad essa il livello di energia è sempre più elevato rispetto a quello misurato in punti più lontani.

Se si assume valida l'ipotesi di densità di energia sonora costante in tutto l'ambiente, allora si può definire un altro campo acustico, detto campo acustico riverberante, nel quale il livello sonoro si può calcolare con la seguente espressione, indipendente dalla distanza sorgente ricevitore e dalla posizione della sorgente rispetto alle pareti:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{4}{A}$$

Quest'ultima formula permette di calcolare il valore del livello sonoro in campo riverberante in funzione della potenza sonora della sorgente e delle caratteristiche acustiche dell'ambiente.

Essa va usata soltanto nei casi in cui si possa considerare valida, o approssimabile, l'ipotesi di livello costante di energia sonora (ad esempio se le posizioni in cui voglio calcolare il livello sono abbastanza lontane dalla sorgente e se il coefficiente di assorbimento α non è grande).

Nell'ipotesi di campo acustico riverberante si ottiene facilmente il valore dell'attenuazione del livello sonoro (ΔL_{Rl}) conseguente all'installazione di materiale fonoassorbente nell'ambiente. È importante osservare che, poiché α varia con la frequenza del suono incidente, anche il valore della attenuazione è funzione della frequenza.

$$L_{pi,prima} - L_{pi,dopo} = \Delta L_{pi} = 10 \log \frac{A_{i,prima}}{A_{i,dopo}}$$

essendo:

A_{prima} = area di assorbimento acustico equivalente prima del trattamento

A_{dopo} = area di assorbimento acustico del locale dopo il trattamento

Dalla relazione sopra si deduce che raddoppiando l'area di assorbimento equivalente ($A_{dopo} = 2A_{prima}$) si ottiene una riduzione del livello sonoro di 3 dB. Se si volesse ottenere una attenuazione di 10 dB bisognerebbe aumentare di 10 volte l'area di assorbimento equivalente.

Se si vuole valutare un livello vicino alla sorgente, si deve fare riferimento alla formula del campo semiriverberante che tiene conto della presenza preponderante del campo acustico diretto. Nella figura è riportato l'andamento del termine $L_p - L_w$ della formula del campo semiriverberante al variare della distanza dalla sorgente, normalizzata rispetto al fattore di direttività Q , e della costante d'ambiente R .

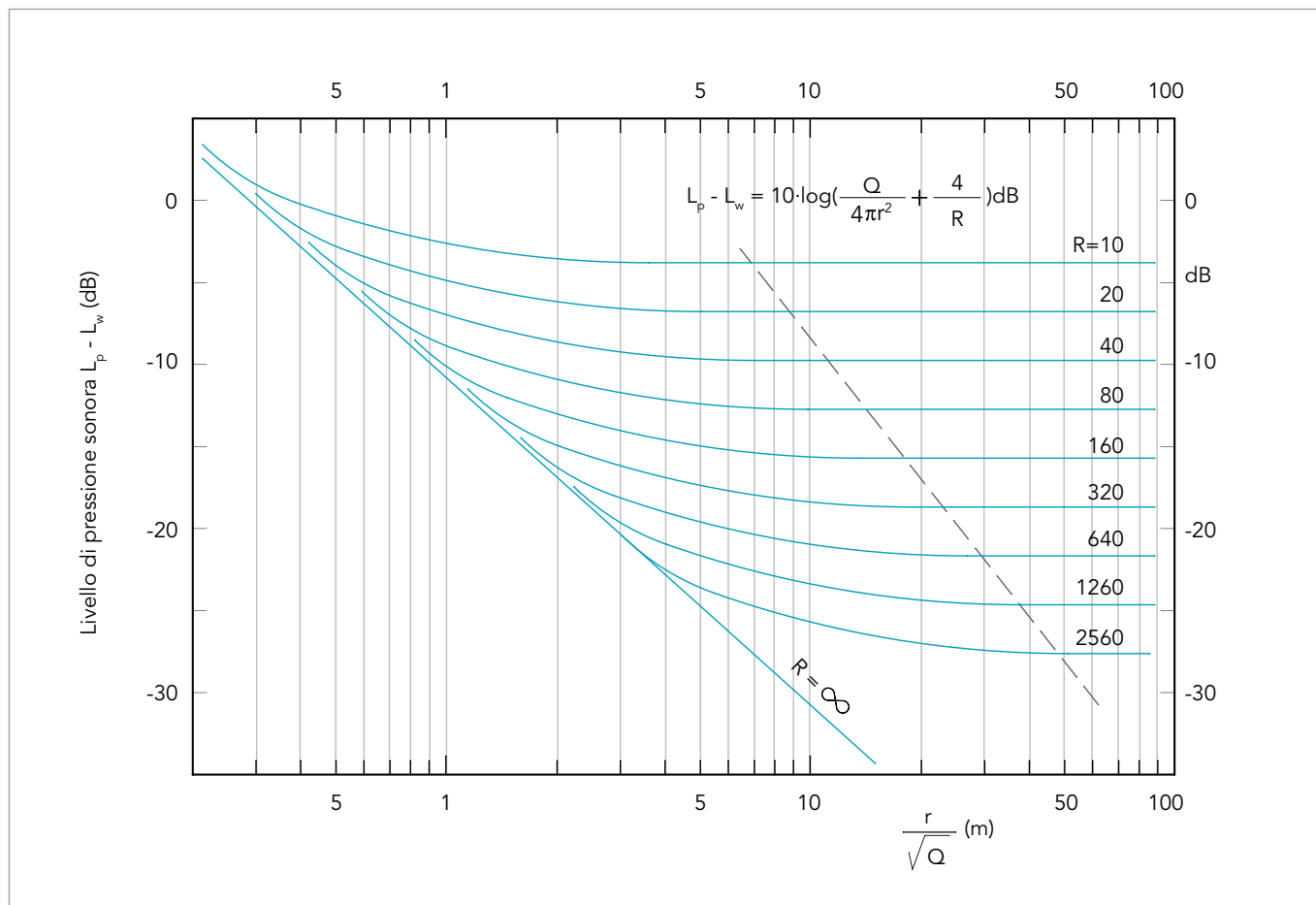


Figura 1.41: $L_p - L_w$ per una sorgente sonora con fattore di direttività Q , in campo semiriverberante ad una certa distanza r , al variare della costante dell'ambiente R

La retta più a sinistra ($R = \infty$) rappresenta il caso limite in cui tutta l'energia incidente viene assorbita dalle pareti; questo equivale ad una situazione di campo libero con una diminuzione di 6 dB per ogni raddoppio della distanza.

Se R è finito, si può notare una influenza notevole sia del campo libero che di quello riflesso (le curve hanno una pendenza molto elevata) fino a valori che si trovano sulla retta obliqua tratteggiata. Da quel punto in poi le curve sono praticamente orizzontali, cioè il livello non cambia al variare della distanza; in queste condizioni il campo acustico è uniforme e quindi riverberante.

1.5.3 - Modi propri di risonanza

All'interno di un ambiente chiuso le riflessioni sonore sulle pareti possono dare luogo a frequenze proprie di risonanza o modi propri di risonanza quando la distanza fra due o più riflessioni successive è esattamente uguale ad un numero intero di lunghezze d'onda. Come si osserva dalla figura, le onde riflesse, avendo segno opposto rispetto alle onde incidenti, generano delle interferenze costruttive e distruttive che danno origine alle cosiddette onde stazionarie.

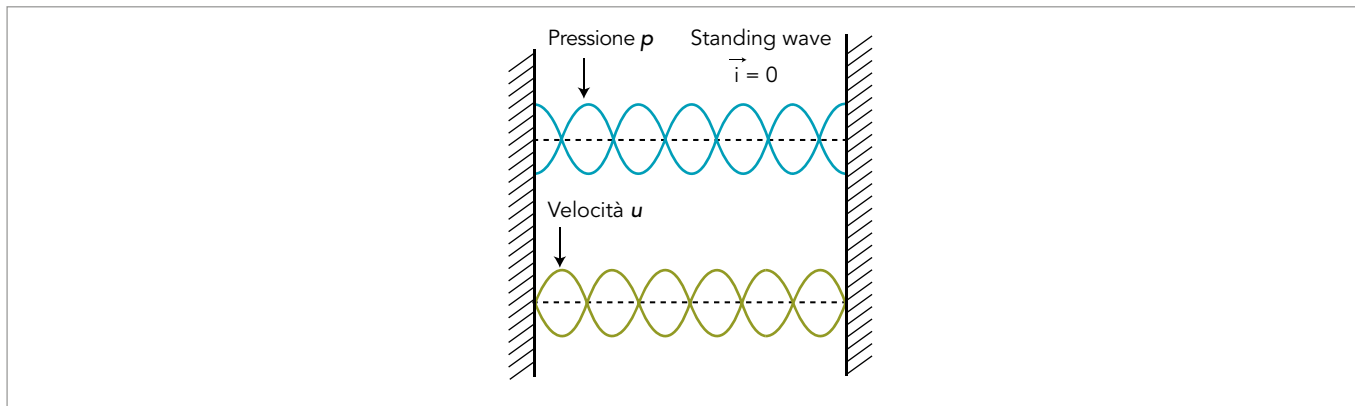


Figura 1.42: Onda stazionaria

In un ambiente reale, nel quale è praticamente impossibile raggiungere una situazione di campo completamente diffuso, si vengono a creare un numero finito di onde stazionarie le quali, proprio a causa del loro numero limitato, diventano critiche per l'acustica dell'ambiente. Questo fenomeno è tuttavia presente soprattutto a bassa frequenza. Si può infatti osservare come il numero di picchi dei livelli di pressione (cui corrisponde un modo proprio) cresca all'aumentare della frequenza fino a diventare molto vicini e quindi con uno spettro omogeneo.

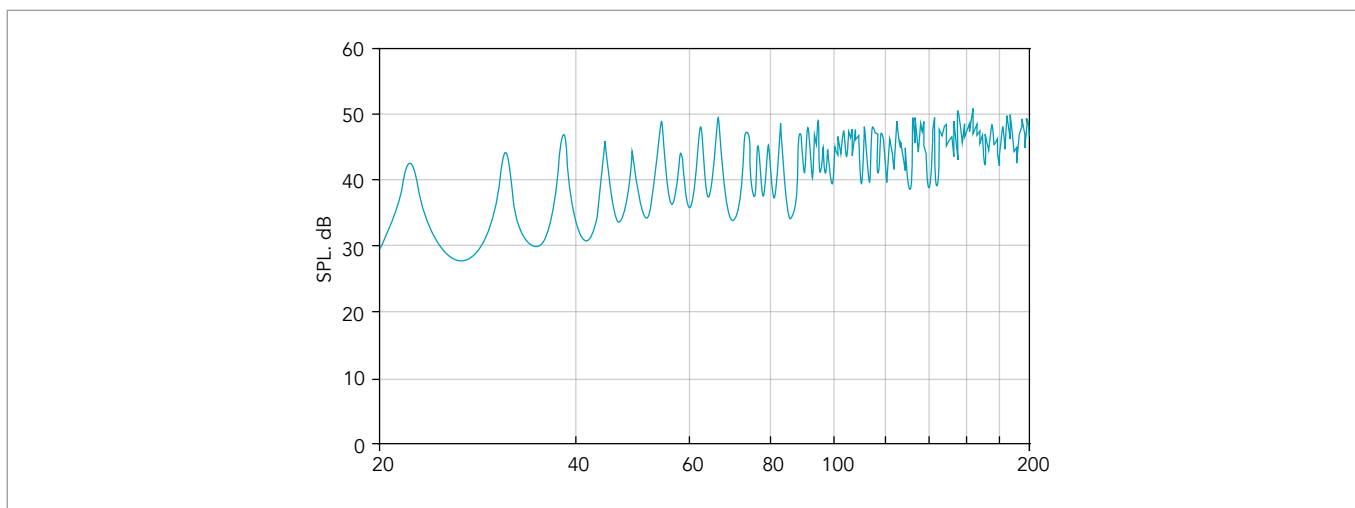


Figura 1.43: Andamento dei modi propri a bassa frequenza all'interno di un ambiente chiuso

1.6 - Bibliografia

1.6.1 - Riferimenti normativi

- [1] UNI EN ISO 3740:2019; Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore - Linee guida per l'uso delle norme di base.
- [2] UNI EN ISO 9614; Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico. Parte 1: 2009 - Misurazione per punti discreti. Parte 2: 1998 - Misurazione per scansione. Parte 3: 2009 - Metodo di precisione per la misurazione per scansione.
- [3] UNI EN ISO 1683:2015; Acustica - Valori di riferimento preferiti per i livelli acustici e vibratorii.
- [4] UNI EN ISO 266:1998; Acustica - Frequenze preferibili.
- [5] CEI EN 61260-1:2017; (Inglese), Elettroacustica - Filtri a banda di ottava e frazione di banda d'ottava - Parte 1: Specifiche di prestazione.
- [6] UNI ISO 226:2007; Acustica - Curve normalizzate di equal livello di sensazione sonora.
- [7] CEI EN 61672-1:2014; (Inglese), Elettroacustica - Misuratori del livello sonoro - Parte 1: Specifiche.
- [8] UNI EN ISO 354:2003; Acustica - Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante.
- [9] UNI ISO 9613-1:2006; Acustica - Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto - Parte 1: Calcolo dell'assorbimento atmosferico.
- [10] UNI ISO 9613-2:2006; Acustica - Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto - Parte 2: Metodo generale di calcolo.

1.6.2 - Riferimenti scientifici

- [11] I. Barducci, Acustica Applicata, Esa Editrice, seconda edizione (1988).
- [12] L.L. Beranek, Noise and vibration control, Mac Graw Hill-New York (1971).
- [13] Bruel & Kjaer, Technical documentation.
- [14] E. Cirillo, Acustica Applicata, McGraw Hill, Milano, (1997).
- [15] F. Fahy, Foundation of Engineering Acoustics, Academic Press (2001).
- [16] A. Farina, Appunti del corso di Fisica Tecnica, Parma, (a.a. 2000-2001).
- [17] R. Spagnolo, a cura di, Manuale di Acustica Applicata, Città Studi (2005).
- [18] R. Spagnolo, a cura di, Acustica - Fondamenti e applicazioni, UTET (2015).
- [19] R.Pompoli, P.Fausti, G.L.Morini, Il fenomeno sonoro, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, (2003).
- [20] R.Pompoli, P.Fausti, Cenni sull'analisi in frequenza dei segnali sonori, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, (2003).

- [21] R.Pompoli, Il sistema uditivo dell'uomo, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, (2003).
- [22] R.Pompoli, P.Fausti, Propagazione del suono in ambiente esterno, dispense del corso per Tecnici in Acustica, Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara, (2003).
- [23] C. Hopkins, Sound Insulation, Elsevier Ltd., (2007).
- [24] J. H. Rindel, Sound Insulation in Buildings, CRC Press, (2018).





Acustica edilizia

A cura di Patrizio Fausti, Paolo Bonfiglio,
Andrea Santoni e Riccardo Gandolfi

2. Acustica edilizia

2.1 - Premessa

A più di vent'anni dall'emanazione della legislazione cogente in materia di acustica edilizia, si è raggiunta una matura consapevolezza degli effetti della qualità acustica dell'ambiente costruito sul benessere della persona.

Trattare di acustica edilizia significa prendere in considerazione tutti quegli aspetti che influenzano la qualità acustica all'interno degli ambienti abitativi. Si devono considerare innanzitutto le sorgenti di rumore che possono essere percepite all'interno degli edifici; che possono essere esterne o interne. Va poi valutato il tipo di rumore prodotto dalle sorgenti (continuo, intermittente, tonale, impattivo, ecc.) e le modalità con cui si propaga all'interno dell'edificio (propagazione aerea o strutturale). Risulta fondamentale, infine, considerare le modalità di attenuazione del rumore, sia di quello aereo mediante materiali isolanti e fonoassorbenti, che di quello strutturale mediante materiali resilienti anticalpestio, antivibranti e desolidarizzanti. Questo è un processo organico che si sviluppa dalla fase di progettazione fino alla fase di realizzazione e di gestione. L'obiettivo minimo deve essere quello di rispettare la legislazione vigente che, pur essendo a volte controversa, ha creato stimoli al settore delle costruzioni e ha sensibilizzato sugli aspetti qualitativi.

2.2 - Tipologie di rumore nel contesto edilizio

Le sorgenti di rumore, come detto, possono essere esterne o interne all'edificio stesso. Le principali fonti di rumore nell'ambiente esterno sono costituite dal traffico, da attività produttive, da centrali termiche ed elettriche, da attività commerciali e ricreative di ogni genere. All'interno delle unità abitative il rumore può essere generato dagli impianti e dalle attività delle persone. Gli impianti da considerare come potenziali sorgenti di rumore sono quelli di climatizzazione (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione), inclusa la produzione dell'energia nella centrale termica (se interna), quelli idraulici (trasporto di fluidi, scarichi, autoclavi, ecc.), quelli di trasporto di persone e cose (ascensori, montacarichi, nastri trasportatori, ecc.). La legislazione vigente, attraverso il decreto sui "limiti delle sorgenti sonore" del 14-11-97 [3] e il decreto sui "requisiti acustici passivi degli edifici" del 5-12-97 [2], impone il controllo e la limitazione delle emissioni di tutte queste sorgenti. Come precisato dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con l'adunanza del 26 giugno 2014, n. prot. 12/2014, in risposta a un quesito, posto dal direttore generale dell'Area Gestione Edilizia dell'Università La Sapienza di Roma: "si rileva che il D.P.C.M. 5 dicembre 1997, nel definire come campo di applicazione *gli edifici ed i loro componenti in opera*, non ha precisato che la normativa introdotta si applica soltanto alle nuove costruzioni". Pertanto, il rispetto ed il soddisfacimento dei requisiti acustici passivi deve essere considerato anche nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti che prevedano il rifacimento, anche parziale, di impianti tecnologici e/o di partizioni orizzontali o verticali (solai, coperture, pareti divisorie, ecc.) e/o delle chiusure esterne dell'edificio (esclusa la sola tinteggiatura delle facciate), la suddivisione di unità immobiliari interne all'edificio e tutti gli interventi di ristrutturazione che interessino le parti dell'edificio soggette al rispetto dei requisiti acustici passivi regolamentati dal D.P.C.M. 5 dicembre 1997. Il rispetto dei requisiti previsti dalla legislazione dovrebbe quindi garantire l'assenza o quantomeno la riduzione del disturbo connesso con la presenza delle varie sorgenti di rumore. Per quanto riguarda le sorgenti di rumore interne causate dalle attività delle persone, queste possono essere dovute ad innumerevoli situazioni, anche imprevedibili, contro le quali non sempre la legislazione vigente può creare limitazioni. Ascoltare musica o la televisione, parlare, camminare, spostare sedie o altri oggetti, aprire le tapparelle, persino dormire, sono alcune delle innumerevoli situazioni che possono determinare rumori disturbanti. L'unica soluzione è avere degli edifici accuratamente realizzati in grado essi stessi, per le loro proprietà acustiche passive, di rendere minimo il disturbo di questo tipo di sorgenti.

2.3 - Comportamento dei materiali nei confronti dell'assorbimento acustico

I materiali fonoassorbenti sono impiegati nei trattamenti acustici degli ambienti per controllare le riflessioni indesiderate, la riverberazione e il rumore. Vengono inoltre utilizzati all'interno delle strutture divisorie per fornire smorzamento ed evitare risonanze, negative per l'isolamento acustico. A seconda del loro principio di funzionamento si possono suddividere in tre categorie:

- materiali porosi (sfruttano la dissipazione viscosa);
- risonatori acustici o di Helmholtz (sfruttano la risonanza delle cavità);
- pannelli o membrane vibranti (sfruttano la risonanza del pannello).

Come si può osservare in figura 2.1, ciascuno di questi meccanismi di assorbimento acustico è maggiormente efficiente in un determinato campo di frequenza. Soltanto dalla combinazione di più meccanismi di assorbimento si riesce ad avere materiali che assorbono su tutto il campo di frequenza udibile.

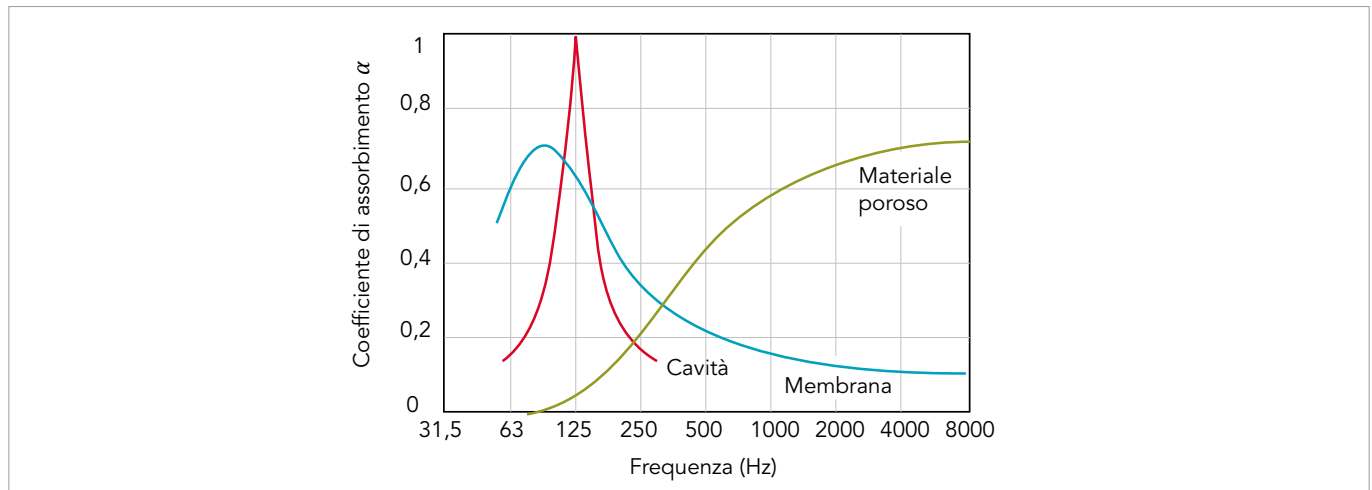


Figura 2.1: Visualizzazione dei diversi meccanismi di assorbimento acustico

2.3.1 - Materiali porosi

L'assorbimento acustico dei materiali porosi è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente attraverso fenomeni di attrito che si sviluppano all'interno delle micro-cavità aperte all'aria. L'onda acustica incidente fa oscillare l'aria interna ai pori che dissipa energia per attrito viscoso. Esempi di materiali fonoassorbenti porosi sono le fibre o lane minerali, i poliuretani espansi a cellule aperte, le fibre vegetali, le schiume melamminiche, le fibre di poliestere, ecc. Le caratteristiche di assorbimento acustico di questi materiali sono legate alla frequenza del suono incidente e allo spessore del materiale stesso e aumentano al crescere di entrambe. Si può notare che valori elevati del coefficiente di assorbimento α si raggiungono alle alte frequenze, mentre alle medie e basse frequenze l'assorbimento acustico aumenta con lo spessore dei pannelli. Per avere valori elevati di assorbimento in un campo di frequenze sufficientemente esteso verso le basse frequenze occorre impiegare spessori adeguati di materiali fonoassorbenti porosi, dimensionati in funzione della lunghezza d'onda incidente. Tuttavia un assorbimento selettivo a frequenze specifiche, anche nel campo delle medie e basse, si può ottenere utilizzando spessori ridotti di materiale collocato ad una certa distanza dalla parete rigida da trattare. Questo effetto può essere spiegato ricordando che l'assorbimento acustico dei materiali fonoassorbenti porosi è dovuto alla dissipazione dell'energia vibrazionale posseduta dalle molecole d'aria per attrito con le superfici della cavità, fenomeno che è massimo laddove si verificano le velocità delle particelle d'aria più elevate. Supponendo che la parete da trattare possa essere considerata perfettamente rigida, in corrispondenza di questa la velocità delle particelle d'aria sarà nulla e quindi l'efficienza del materiale fonoassorbente poroso minima. Come illustrato in figura 2.2, allontanandosi dalla parete la velocità delle particelle d'aria aumenta e con essa l'efficienza del materiale fonoassorbente poroso.

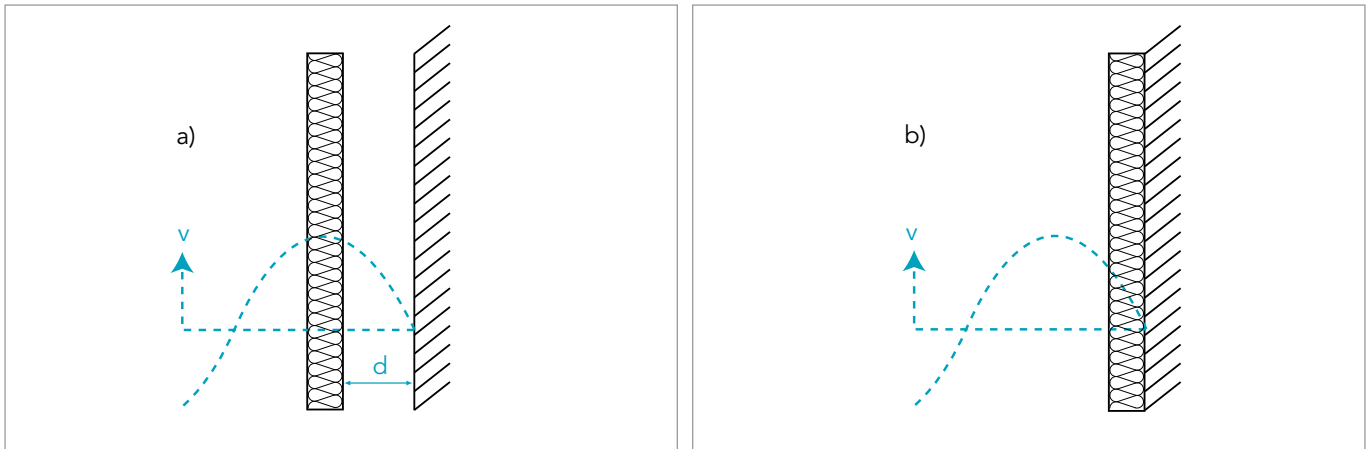


Figura 2.2: Maggiore a) e minore b) efficienza di un materiale fonoassorbente poroso in funzione della configurazione di installazione su una parete rigida

Per una prefissata distanza, quindi, l'assorbimento acustico del materiale varia al variare della frequenza: nel caso di onda sinusoidale la velocità delle particelle e la dissipazione viscosa diventano massime ad una distanza d dalla parete pari a $\lambda/4$ o a $3/4 \lambda$. A titolo esemplificativo, viene riportata in figura 2.3 la variazione in frequenza del coefficiente di assorbimento di un materiale tipo, posto a una distanza prefissata dalla parete.

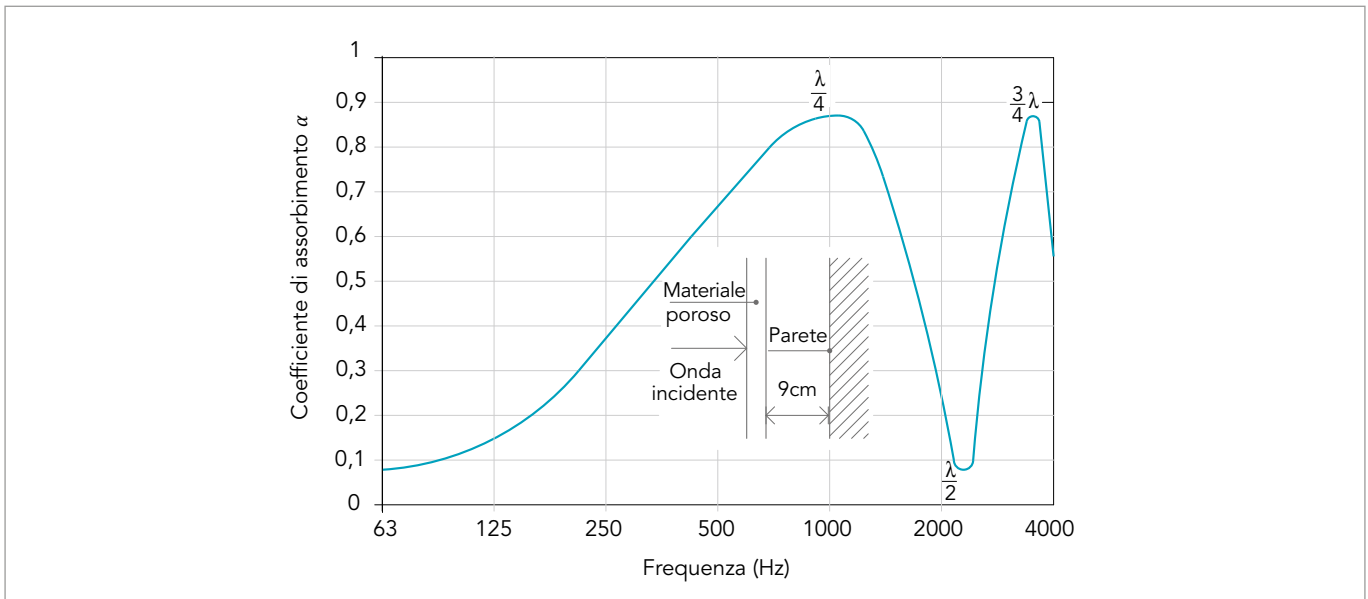


Figura 2.3: Variazione in frequenza del coefficiente di assorbimento α di un materiale tipo posto a una determinata distanza dalla parete

La scelta del materiale poroso dipende dal tipo di applicazione, dall'assorbimento, dalla facilità di lavorazione, dal comportamento al fuoco, ecc. Nelle camere anecoiche, ad esempio, per avere elevati valori di assorbimento si usano cunei a base quadrata di dimensioni elevate costruiti solitamente con materiali fonoassorbenti porosi. Lo scopo della particolare forma a cuneo è quello di aumentare la superficie assorbente e far sì che l'onda incidente subisca una serie di riflessioni tra i cunei tali da impedire un ritorno di energia verso l'ambiente. Ciò risulta tanto più efficace quanto più le frequenze sono elevate.

2.3.2 - Risuonatori acustici

Un risuonatore di Helmholtz è costituito da una cavità di volume V definita da pareti rigide e collegata all'esterno da una apertura detta "collo" di lunghezza l e di sezione S , come illustrato in figura 2.4. Il suono incidente fa vibrare l'aria contenuta nel collo del risuonatore, che si comporta come una massa vibrante collegata a una molla costituita dall'aria contenuta nella cavità. Tale risuonatore è in grado di dissipare energia acustica in calore per effetto dell'attrito viscoso che si verifica a causa delle oscillazioni dell'aria contenuta nel collo.

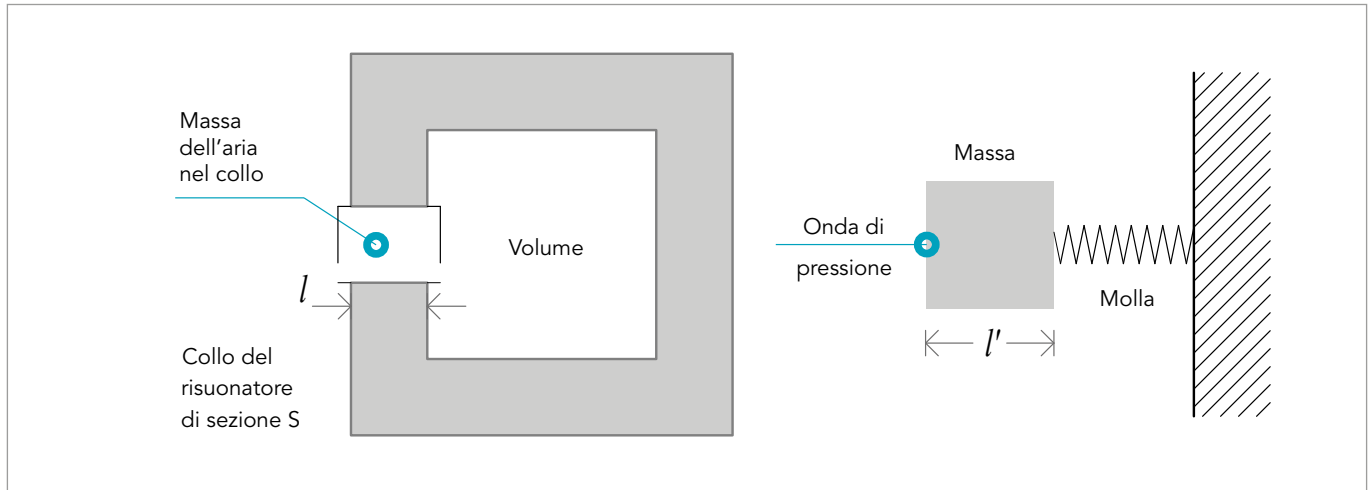


Figura 2.4: Schema e principio di funzionamento del risuonatore

La dissipazione si verifica in particolare in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza del sistema massa-molla generato per effetto dell'onda sonora incidente sulla bocca del risuonatore. La frequenza fondamentale di risonanza del risuonatore di Helmholtz può essere calcolata con la relazione:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{V(l + 1.6r)}} \quad [\text{Hz}]$$

dove c_0 è la velocità di propagazione del suono nel mezzo [m/s], r ed l il raggio e la lunghezza del collo del risuonatore [m], V il volume della cavità [m³].

Quando la cavità del risuonatore è vuota il sistema ha uno smorzamento piccolo, per cui l'assorbimento acustico presenta un picco netto in corrispondenza della frequenza di risonanza, l'unica in grado di penetrare all'interno della cavità. Per le caratteristiche geometriche dei risuonatori normalmente usati la frequenza di risonanza si trova nel campo delle frequenze medio-basse. Per rendere meno selettivi i risuonatori acustici si può inserire del materiale poroso all'interno della cavità. Si ottiene un allargamento dello spettro di assorbimento ma una conseguente riduzione del picco in corrispondenza della frequenza di risonanza, come illustrato nel grafico in figura 2.5.

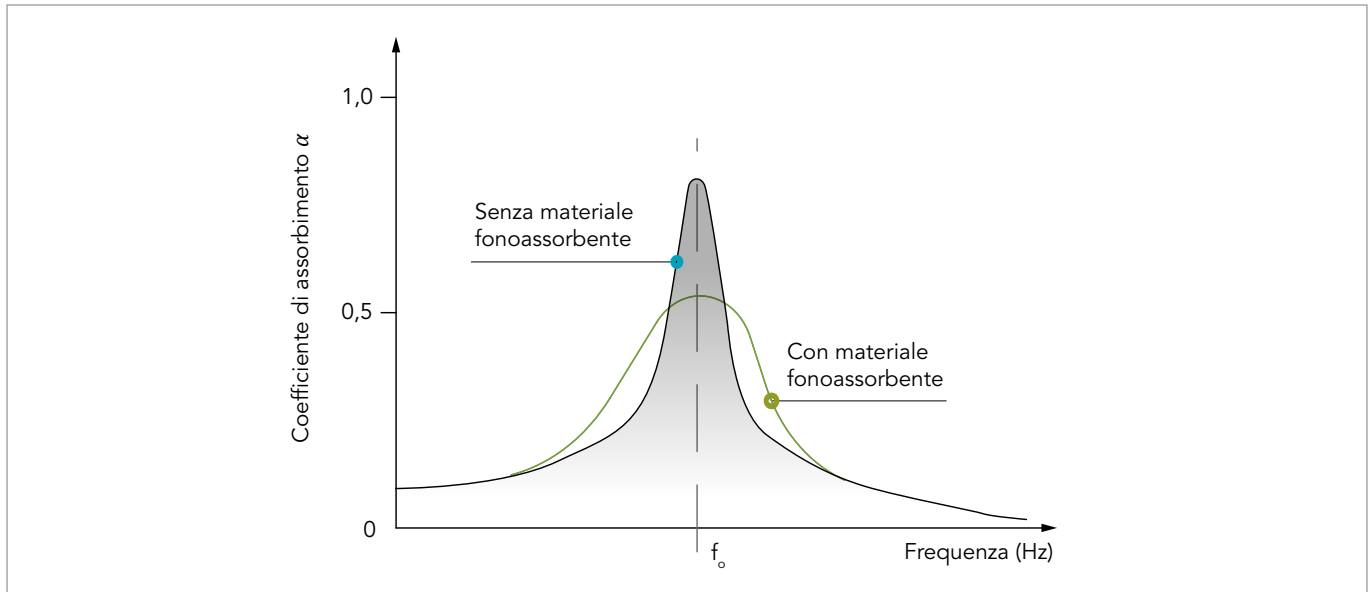


Figura 2.5: Assorbimento di un risonatore al variare della frequenza, con e senza materiale fonoassorbente all'interno della cavità

In genere è possibile realizzare dei risonatori con frequenze di risonanza abbastanza basse, per cui essi trovano impiego come elementi complementari dei materiali porosi. Per esempio, i pannelli forati sono molto utilizzati per il controllo dell'acustica degli ambienti, perché, agendo sullo spessore del pannello, sulle dimensioni dei fori e sulla percentuale di foratura nonché sulla distanza di montaggio dalla parete, si può rendere massimo l'assorbimento nella banda di frequenze desiderata. Il calcolo della frequenza di risonanza di un risonatore di Helmholtz risulta semplice utilizzando la formula di previsione. Risulta invece più complesso il calcolo del coefficiente di assorbimento acustico alla frequenza di risonanza e nel suo intorno. Esistono modelli di calcolo semplificato ma generalmente non riescono a tenere conto di tutti i fenomeni dissipativi che si possono verificare in un pannello fonoassorbente forato riempito o meno di materiale fonoassorbente. Il pannello forato risonante assorbente costituisce un'estensione del singolo risonatore acustico; infatti, montato a una certa distanza dalla superficie da trattare, si comporta come un insieme di risonatori di Helmholtz ciascuno costituito da un collo, corrispondente al foro del pannello, e da una cavità, costituita da una parte del volume compreso tra pannello e parete. Il volume associato ad ogni foro si ottiene dividendo il volume totale della cavità per il numero totale di fori. Non è necessario separare fisicamente i volumi associati ad ogni foro. Il comportamento di un pannello forato si discosta di molto rispetto al comportamento di un risonatore singolo. In presenza della cavità di un risonatore le particelle di aria subiscono delle variazioni di direzione che le portano a confluire maggiormente verso il foro. In presenza di più fori la mutua interazione tra essi determina la comparsa di fenomeni dissipativi anche a frequenze diverse dalla frequenza di risonanza. Per questo motivo i pannelli forati hanno uno spettro di assorbimento più ampio rispetto a quello che si ottiene con risonatori singoli. Utilizzando fori di dimensioni diverse si può contribuire all'allargamento dello spettro di assorbimento anche se l'efficienza alle singole frequenze diminuisce. Questi fenomeni, unitamente all'effetto del materiale poroso all'interno della cavità, permettono di realizzare pannelli fonoassorbenti ad ampio spettro.

2.3.3 - Pannelli vibranti

I pannelli vibranti sono costituiti da lastre di materiale non poroso, quale ad esempio il legno compensato, montate su apposito telaio che le mantiene distanziate dalla superficie da trattare fornendo una intercapedine d'aria, come schematizzato in figura 2.6. Colpiti dall'onda sonora questi materiali fonoassorbenti vibrano come un diaframma su di un cuscino d'aria e assorbono l'energia acustica alle basse frequenze per effetto della dissipazione viscosa determinata dalle vibrazioni flessionali del pannello, in particolare lungo i bordi vincolati.

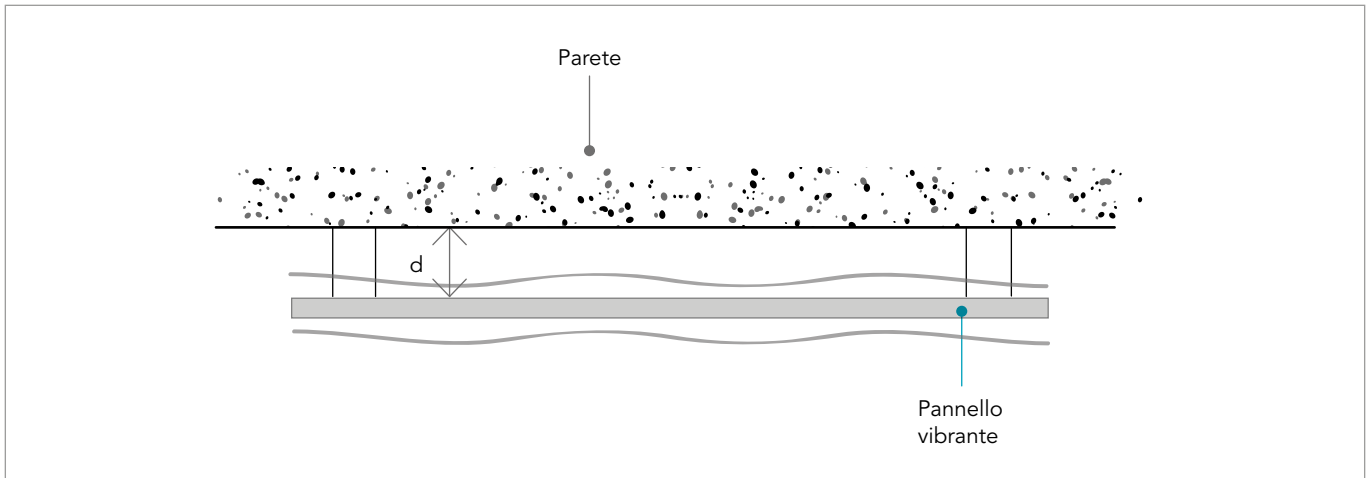


Figura 2.6: Schema di un pannello forato risonante

Il sistema può essere ancora assimilato ad una massa oscillante (il pannello) accoppiata ad un elemento elastico dotato di un certo smorzamento (l'aria racchiusa nell'intercapedine). Anche per questi pannelli è possibile definire la frequenza fondamentale di risonanza che dipende dalla sua massa per unità di superficie, dalla sua rigidità in relazione anche al suo supporto e dalla rigidità dell'intercapedine d'aria. All'aumentare della massa del pannello vibrante e dello spessore dell'intercapedine d'aria diminuisce il valore della frequenza di risonanza, come mostrato dalla seguente relazione:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad [\text{Hz}]$$

dove m' è la densità superficiale del pannello [kg/m^2] e d la distanza del pannello dalla parete [m].

Per i pannelli vibranti l'assorbimento risulta essere molto selettivo nell'intorno della frequenza fondamentale di risonanza e può essere notevole alle basse frequenze. I modi propri di vibrazione del pannello di ordine superiore a quello fondamentale determinano un assorbimento inferiore rispetto a quello che si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale. La previsione teorica del grado di assorbimento alle varie frequenze risulta particolarmente difficile perché è difficile conoscere il grado di smorzamento meccanico del pannello e perché l'assorbimento dipende anche dal campo acustico presente nell'ambiente in cui il materiale è collocato. Per questi motivi si fa solitamente riferimento a risultati sperimentali. La presenza di pannelli leggeri o grosse superfici vetrate sulle pareti determina un elevato grado di assorbimento a bassa frequenza con conseguente basso valore del tempo di riverberazione degli ambienti.

2.3.4 - Sistemi misti

Considerando le caratteristiche di assorbimento delle tre differenti tipologie di materiali fonoassorbenti descritte, si può osservare che ciascun sistema fonoassorbente ha un campo di applicazione ben definito, per cui, per ottenere buoni valori di assorbimento acustico alle alte frequenze si utilizzano materiali fonoassorbenti porosi, alle frequenze intermedie i risuonatori acustici e alle basse frequenze i pannelli vibranti. Per assorbire uno spettro di frequenze ampio si possono usare sistemi misti costituiti da lastre rigide (metallo, legno, gesso, ecc.), sulla cui superficie vengono praticati fori di diversa forma e dimensione, fissate ad una certa distanza dalla parete. L'intercapedine che costituisce la cavità di una molteplicità di risuonatori tra loro comunicanti, viene generalmente riempita con materiale poroso. I grafici riportati in figura 2.7 mostrano il coefficiente di assorbimento di un sistema misto.

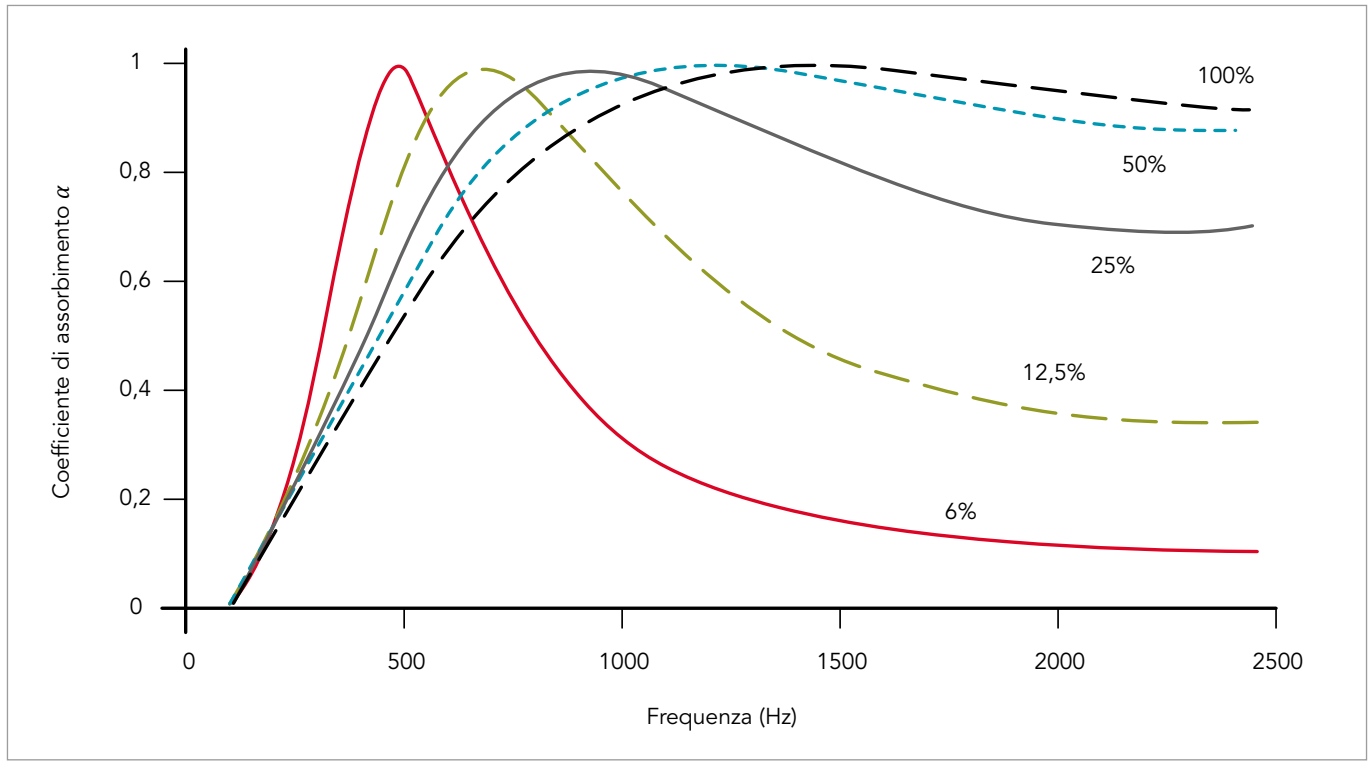


Figura 2.7: Coefficiente di assorbimento di un sistema misto, costituito da un pannello vibrante di spessore pari a 6.3 mm, forato, con percentuale di foratura variabile e raggio dei fori pari a 2.5 mm. L'intercapedine è riempita per l'intero spessore, pari a 2.5 cm, di materiale fonoassorbente con resistività al flusso di 2000 rayl/m

2.4 - Comportamento dei materiali nei confronti dell'isolamento acustico

L'isolamento acustico è direttamente legato alla trasmissione del suono tra due ambienti differenti, in uno dei quali è presente la sorgente sonora e nell'altro il ricevitore. Il suono, emesso dalla sorgente, si propaga nell'aria sino ad incontrare l'elemento di separazione tra i due ambienti, che, entrando in vibrazione, irradia energia sonora che si propaga nell'aria dell'ambiente in cui è presente il ricevitore. In questa schematizzazione della trasmissione del suono per via aerea la struttura di separazione si comporta come elemento passivo e condiziona, attraverso le sue caratteristiche, la trasmissione stessa.

2.4.1 - Pareti monostrato

Si è visto nel capitolo 1 che l'andamento teorico del potere fonoisolante al variare della frequenza, per pareti sottili omogenee e isotrope, ha l'andamento schematizzato in figura 2.8 dove si distinguono diverse zone, in ognuna delle quali il meccanismo di trasmissione sonora è determinato da un fattore prevalente. Si individua infatti la zona governata dalla rigidità (-6 dB/ott.), la zona delle risonanze causate dalle frequenze naturali della partizione, la zona in cui vale la legge della massa (+6 dB/ott.), la zona della coincidenza e la zona governata da massa e smorzamento (+9 dB/ott.). Innanzitutto, si deve osservare che per le comuni partizioni massive monostrato usate in edilizia la frequenza naturale fondamentale si trova generalmente al di sotto dei valori di pratico interesse $f < 100$ Hz. I valori della frequenza critica e la relativa zona della coincidenza dipendono invece dallo spessore e dalle altre caratteristiche del materiale, quali massa e rigidità. Per molte pareti pesanti la coincidenza si verifica all'interno del range di frequenze 100÷300 Hz. Nel grafico riportato in figura 2.8 si evidenzia l'effetto dell'aumento dello spessore di una partizione (a parità di densità e caratteristiche elastiche) sulla zona delle risonanze e sulla frequenza critica.

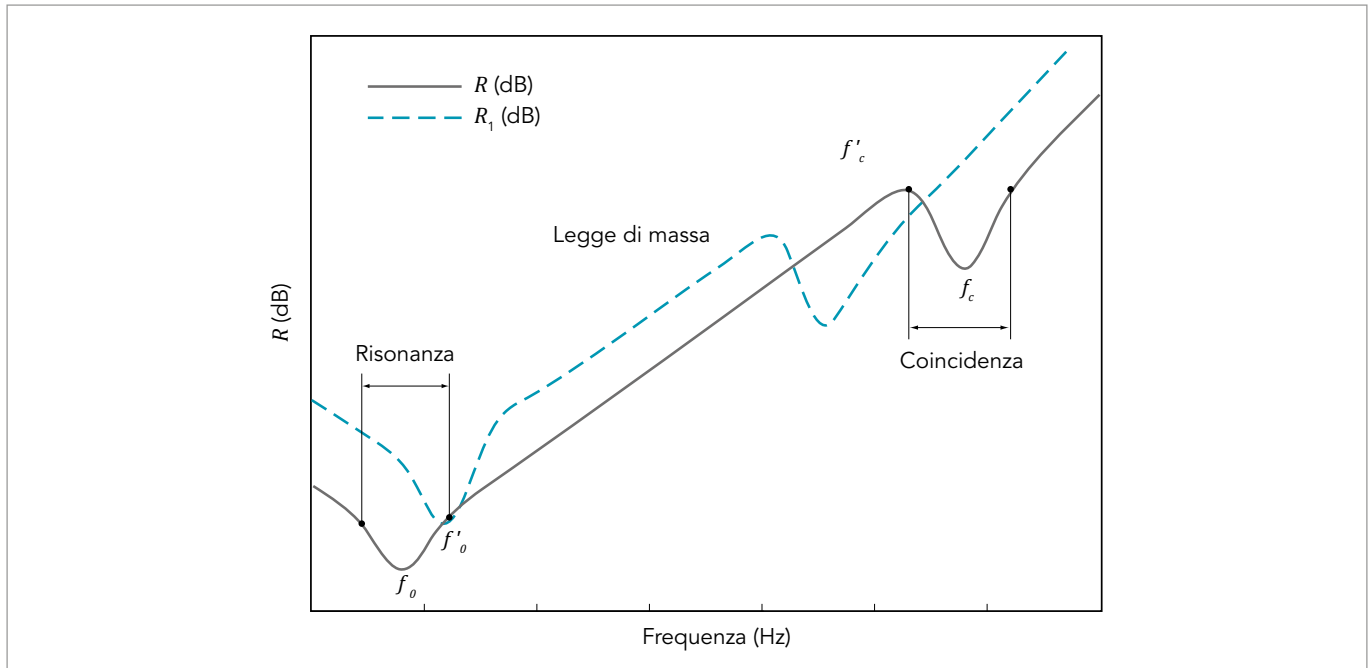


Figura 2.8: Andamento idealizzato dell'isolamento acustico di una partizione
Effetto dell'aumento dello spessore sulle frequenze di risonanza e sulla frequenza critica: spessore di R_1 > spessore di R

Dalle formule di calcolo delle due frequenze si osserva che la rigidità della struttura è direttamente proporzionale alla frequenza naturale ed inversamente proporzionale alla frequenza critica. Essendo la rigidità funzione del modulo di Young E e dello spessore, si osserva che aumentando uno di questi due parametri aumenta la frequenza naturale e diminuisce la frequenza critica. Nella progettazione dei pannelli si cerca di massimizzare R nel campo di frequenze di interesse, che nell'edilizia civile è generalmente compreso tra 100 Hz e 5000 Hz. È quindi desiderabile garantire che sia f_0 che f_c siano situate fuori da questo campo di frequenze. Questo potrebbe accadere con rigidità molto basse, ma a scapito della resistenza della struttura, ottenendo $f_0 < 100$ Hz e $f_c > 5000$ Hz, oppure con rigidità piuttosto alte tali da portare sia f_0 che f_c sotto, o comunque prossimi, a 100 Hz. Aumentando ad esempio lo spessore, si ha un locale aumento di R (tra f_0 e f_c) per effetto del conseguente aumento della massa; come conseguenza si ha che la legge di massa risulta valida in un campo più ristretto. In linea generale si può affermare che il potere fonoisolante di un singolo pannello è determinato dalla sua massa: tanto maggiore è la massa e/o lo spessore del pannello tanto maggiore risulta il suo potere fonoisolante, ma essendo la frequenza critica inversamente proporzionale allo spessore del pannello, ogni tentativo di aumentare il potere fonoisolante tramite un aumento dello spessore comporta come risultato anche una diminuzione della frequenza critica. L'aumento di spessore permette comunque di aumentare l'isolamento alle frequenze medio basse dove è più difficile solitamente avere buoni risultati.

Quando lo spessore è elevato si innescano fenomeni di "risonanza di spessore" alle alte frequenze dovuti alle onde longitudinali e di taglio che si creano all'interno del muro. Il percorso chiuso compiuto dalle onde è in questo caso pari allo spessore della parete. La teoria della "parete sottile" non è in grado di descrivere questo fenomeno dato che considera solo le onde flessionali, trascurando le onde longitudinali e trasversali che, per pareti spesse e ad alte frequenze, assumono invece un ruolo importante. L'insorgenza di risonanze di spessore determina una forte riduzione del potere fonoisolante ad alta frequenza. Per una parete massiva per esempio, l'effetto delle risonanze di spessore si manifesta per spessori superiori a circa 15-20 cm, in base alle altre caratteristiche della parete. Al di sotto di tale spessore le risonanze si verificano con frequenze superiori a 5000 Hz. In figura 2.9 si può osservare l'andamento del potere fonoisolante per una parete tipo di 15-20 cm di spessore. Si vede, in questo caso, che la coincidenza si verifica intorno ai 100 Hz e che insorgono le risonanze di spessore intorno a 5000 Hz.

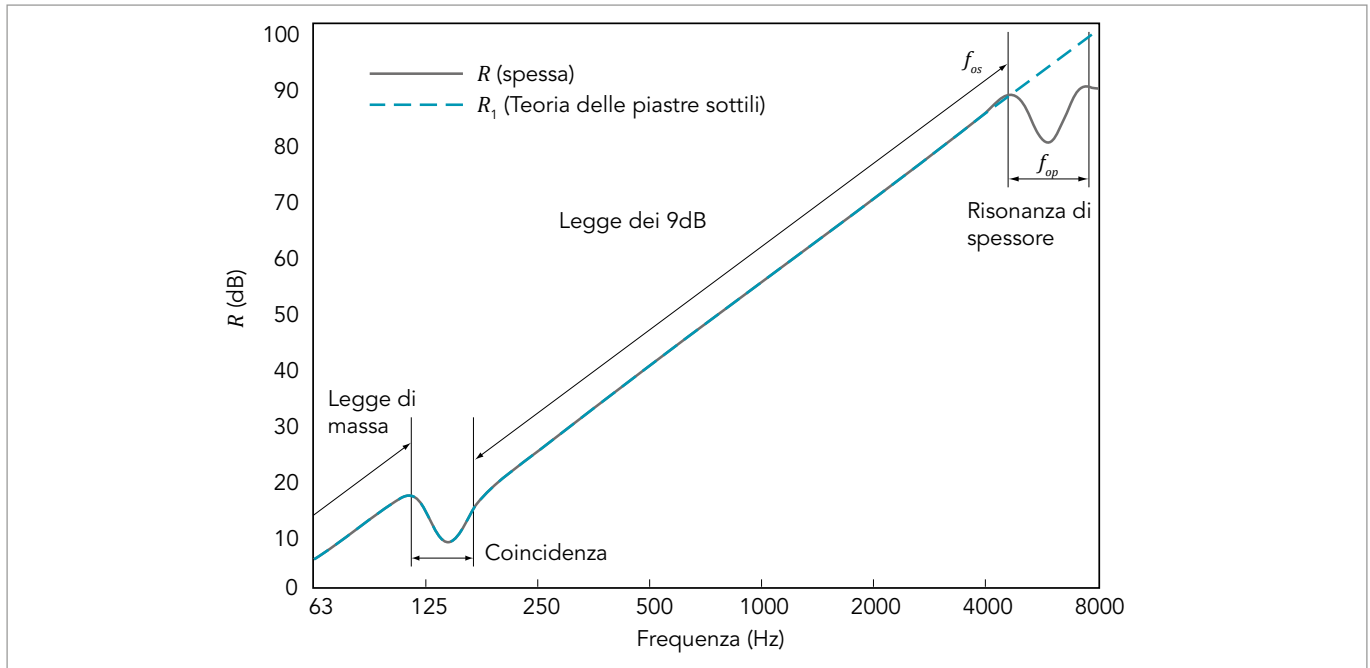


Figura 2.9: Andamento idealizzato del potere fonoisolante di pareti massive spesse: alle alte frequenze si manifestano risonanze di spessore che comportano una riduzione della prestazione acustica

A titolo di esempio, nella tabella seguente si riportano i valori delle frequenze critiche e delle frequenze di risonanza di spessore (trasversali f_{os} Hz e longitudinali f_{op}) per pareti dello stesso tipo (calcestruzzo) ma di diverso spessore.

| Spessore h (cm) | Frequenza critica f_c Hz | Frequenza risonanza f_{os} Hz | Frequenza risonanza f_{op} Hz |
|-----------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 5 | 500 | 15100 | 28200 |
| 10 | 250 | 7550 | 14100 |
| 20 | 125 | 3775 | 7050 |
| 30 | 83 | 2515 | 4700 |
| 40 | 63 | 1890 | 3525 |

Tabella 2.1: Frequenze critiche e di risonanza per pareti di diverso spessore con $E=1.36 \cdot 10^{10}$ Pa, $\rho=2300\text{kg/m}^3$, $\eta=0.02$ e $\nu=0.3$

In figura 2.10 sono riportati gli andamenti del potere fonoisolante sopra la frequenza critica per due pareti di spessore pari a 20 e 40 cm. Si può osservare come il raddoppio dello spessore, e di conseguenza della massa superficiale, determinino un aumento del potere fonoisolante soltanto fino ad una certa frequenza. Per frequenze superiori le due pareti forniscono valori abbastanza simili anche se oscillanti a causa delle risonanze. Per un certo materiale, indipendentemente dal suo spessore, sussiste quindi una sorta di limite superiore (plateau) del valore del potere fonoisolante a tutte le frequenze. Per le partizioni non omogenee, realizzate ad esempio in laterizio o con blocchi di argilla, la teoria delle pareti sottili omogenee e isotrope non è valida. Molto spesso, queste pareti vengono realizzate con uno spessore piuttosto elevato determinando quindi fenomeni di risonanza di spessore alle alte frequenze. In questo range di frequenze, il potere fonoisolante di tali sistemi edilizi massivi è significativamente influenzato da fattori che non vengono presi in considerazione dalla teoria delle piastre sottili. Inoltre, le partizioni in laterizio o in blocchi presentano caratteristiche elastiche e fisiche non costanti sulla parete, che possono essere causa di incertezza nella determinazione delle frequenze di coincidenza. La non omogeneità della parete, infatti, determina l'ampliamento della zona di coincidenza. L'effetto si può schematizzare, per un sistema ortotropo, ipotizzando una zona di coincidenza compresa tra una frequenza critica inferiore e una frequenza critica superiore ottenute rispettivamente dalla rigidità flessionale massima e minima della parete.

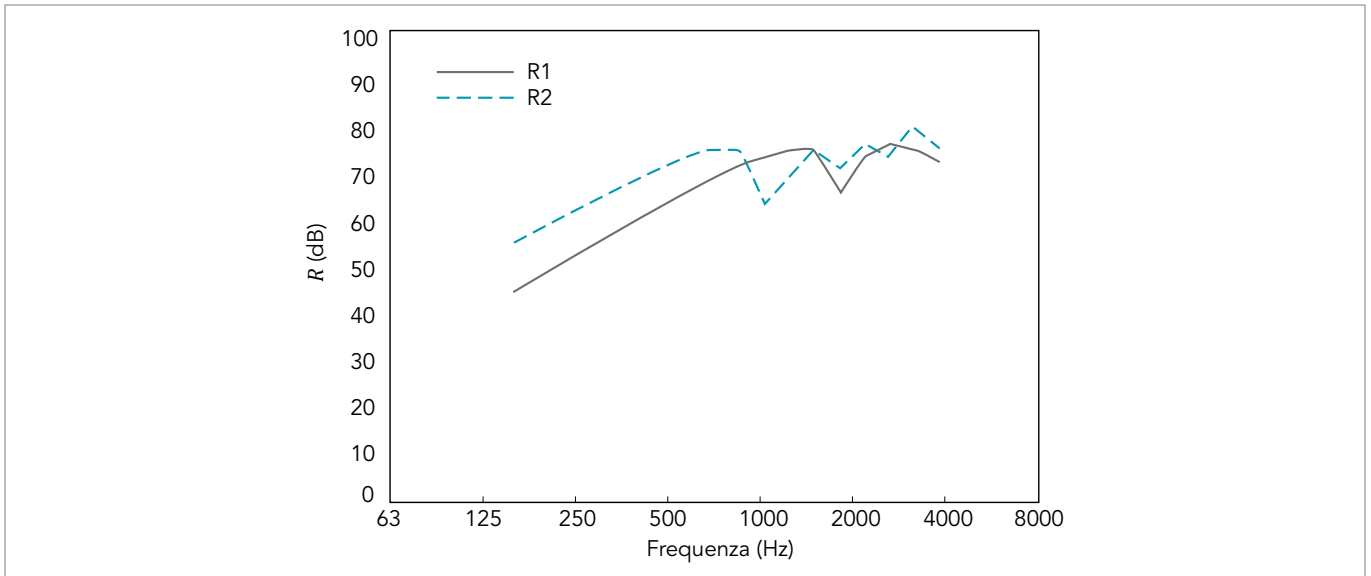


Figura 2.10: Potere fonoisolante calcolato in base alla teoria delle pareti arbitrariamente spesse, nel caso di partizioni con $h = 0.2$ m (R1) e $h = 0.4$ m (R2). In entrambi i casi $E = 13.6$ GPa, $\rho = 2300$ kg/m³, $\nu = 0.3$, $\eta = 0.02$ [30]

Al di sopra della frequenza critica superiore l'andamento teorico del potere fonoisolante R non sembra essere influenzato dalla non omogeneità e può essere ancora ipotizzata la validità della legge dei 9 dB del caso isotropo, almeno fino ad eventuali fenomeni di risonanza di spessore. Confronti tra curve teoriche e sperimentali hanno comunque mostrato come al di sopra della frequenza critica sia più attendibile una crescita del potere fonoisolante secondo la legge dei 6 dB per ottava piuttosto che quella dei 9 dB per ottava, come illustrato in figura 2.11.

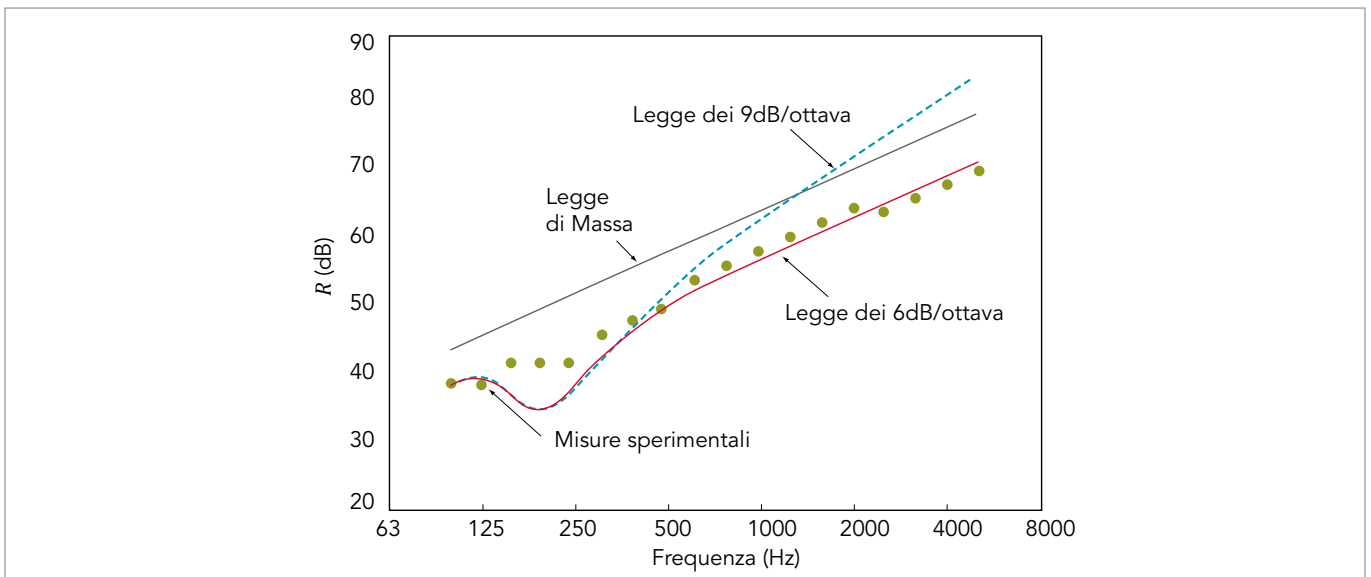


Figura 2.11: confronto tra i valori teorici (linee continue e tratteggiate) e dati sperimentali (punti) del potere fonoisolante di un pannello in calcestruzzo con spessore di 0.15 m

2.4.2 - Pareti doppie

L'andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti doppie (per esempio in cartongesso) è quello riportato in figura 2.12.

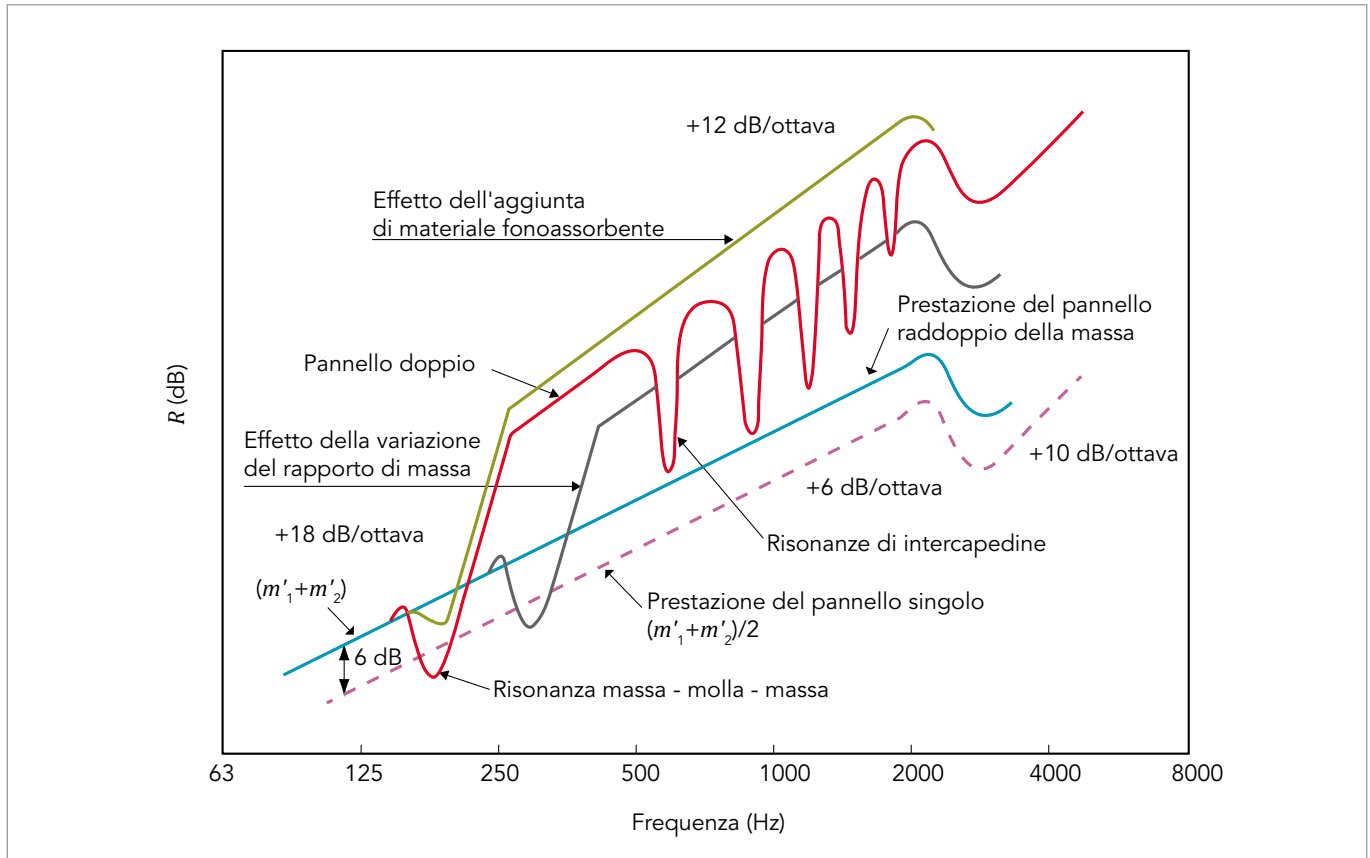


Figura 2.12: Andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti doppie in cartongesso: visualizzazione degli effetti del raddoppio della massa, delle masse separate con e senza materiale fonoassorbente in cavità e della variazione del rapporto delle masse

Le pareti doppie sono caratterizzate da una frequenza di risonanza massa-molla-massa, che dipende dalla massa superficiale delle due partizioni e dalle caratteristiche della cavità. Al di sotto di tale frequenza le due pareti sono completamente accoppiate e il potere fonoisolante della partizione, seguendo la legge di massa, può essere calcolato come quello di una parete monostrato con massa superficiale pari alla somma delle masse dei due pannelli. L'aumentare della massa superficiale dei due pannelli determina una riduzione della frequenza di risonanza del sistema massa-molla-massa e un aumento del potere fonoisolante della partizione, come mostrato in figura 2.13; mentre a parità di massa superficiale dei pannelli, la frequenza di risonanza diminuisce all'aumentare dello spessore dell'intercapedine.

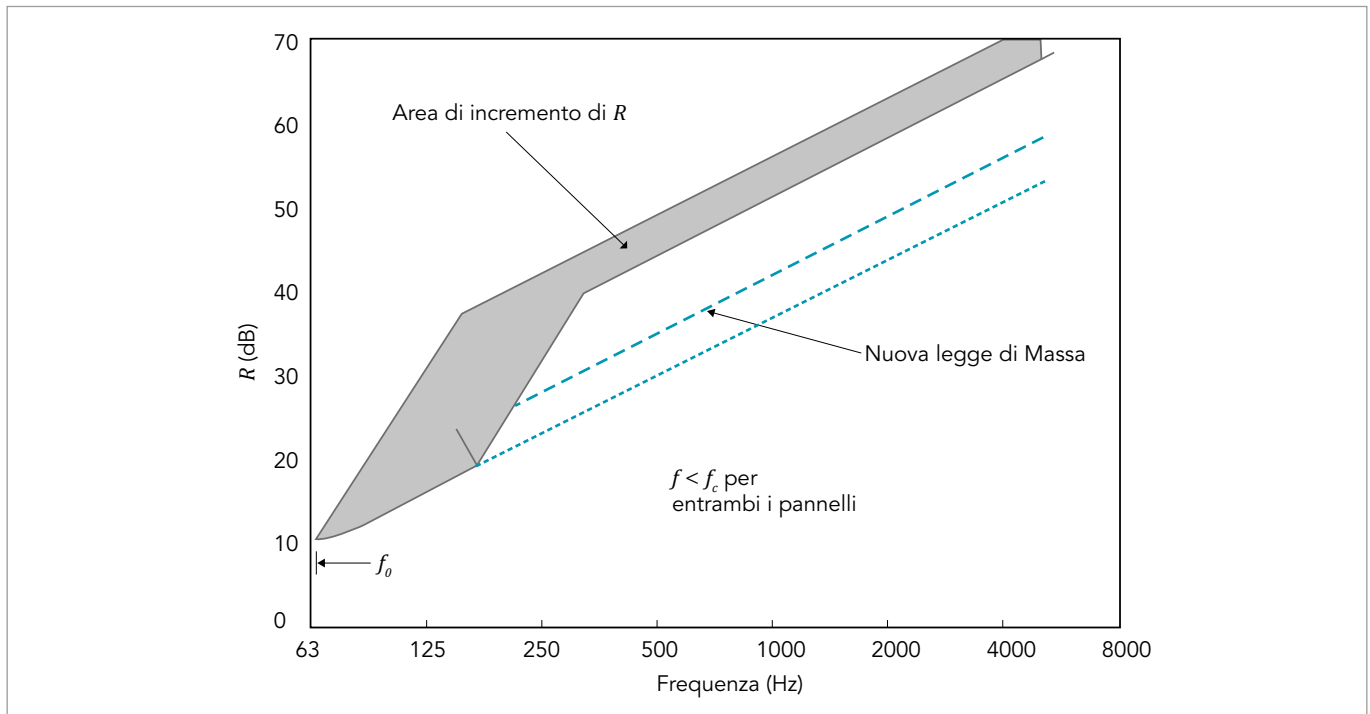


Figura 2.13: effetto dell'incremento della massa superficiale dei pannelli di una parete doppia sull'isolamento acustico

In corrispondenza della risonanza massa-molla-massa, il potere fonoisolante diminuisce in maniera tanto maggiore quanto minore è lo smorzamento del sistema. La presenza o meno di materiale fonoassorbente all'interno della cavità influenza significativamente lo smorzamento della risonanza massa-molla-massa e il potere fonoisolante al di sopra di tale frequenza. A frequenze più alte della risonanza massa-molla-massa si manifestano le risonanze di cavità, in particolare quando la lunghezza d'onda è comparabile con le dimensioni della cavità. Al di sopra della prima risonanza di cavità, i due pannelli che costituiscono la parete doppia sono completamente disaccoppiati e il potere fonoisolante corrisponde all'incirca alla somma dei poteri fonoisolanti dei singoli pannelli; in questo campo il potere fonoisolante aumenta con la frequenza di circa 12 dB/ottava. Tra le due diverse risonanze si osserva un drastico incremento del potere fonoisolante, con una pendenza molto ripida, pari a circa 18 dB/ottava. Alle alte frequenze (circa 2500-3150 Hz) si osserva il fenomeno della coincidenza che rimane presente sia nel pannello singolo che nel pannello doppio. Introducendo materiale fonoassorbente a riempimento della cavità, è possibile attenuare la riduzione del potere fonoisolante che si osserva in corrispondenza delle risonanze massa-molla-massa o di cavità e della frequenza di coincidenza.

Solitamente le strutture leggere sono sorrette da un telaio metallico. L'accoppiamento dei due pannelli tramite viti di fissaggio sul telaio comporta una riduzione del potere fonoisolante, in particolare alle alte frequenze, a causa di un contributo di trasmissione per via strutturale. L'effetto delle connessioni meccaniche è riportato in figura 2.14, dove sono confrontati i poteri fonoisolanti di una parete in cartongesso standard, con intercapedine di 10 cm, riempita con materiale fonoassorbente con resistenza al flusso $r = 10000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, senza (linea blu) e con (linea verde) connessioni lineari ogni 60 cm.

Per le pareti doppie in laterocemento (cosiddette pesanti), il principio di funzionamento è analogo anche se, come visto precedentemente, il campo di frequenze di interesse è quasi tutto fuori dalla validità della legge di massa. A causa delle risonanze che si verificano all'interno dello spessore dei pannelli pesanti, la pendenza della curva di ciascun pannello rimane all'incirca di 6 dB/ottava anche nella zona al di sopra della coincidenza. Nel caso dei pannelli pesanti si verifica un maggiore effetto dovuto all'energia trasmessa al bordo del pannello. Questo perché i singoli pannelli sono più pesanti e più rigidi e sono maggiormente accoppiati alla struttura laterale.

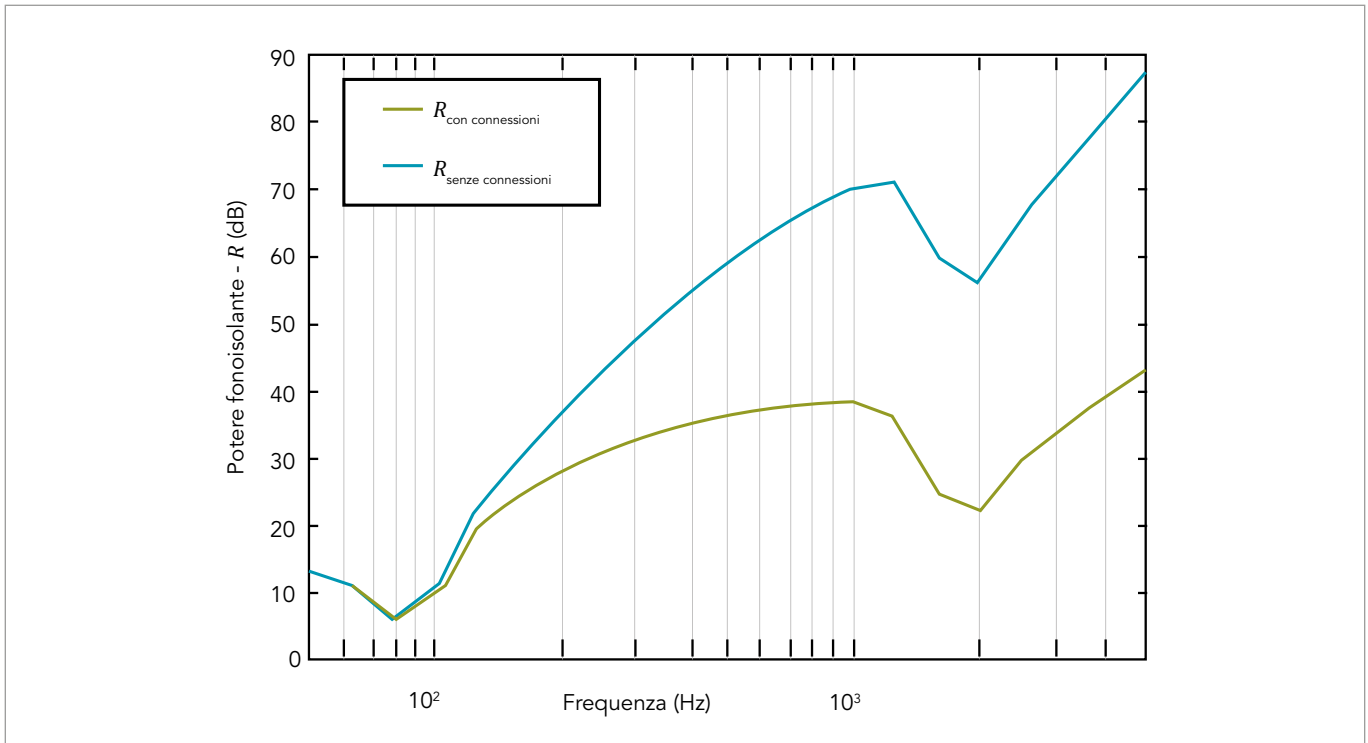


Figura 2.14: Riduzione del potere fonoisolante causato dalla presenza di connessione meccanica tra i due pannelli della parete doppia (parete in cartongesso standard, con intercapedine di 10 cm, riempita con materiale fonoassorbente con resistenza al flusso $r=10000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, con connessioni lineari ogni 60 cm)

2.4.3 - Come i materiali fibrosi modificano le prestazioni acustiche delle pareti multistrato

In figura 2.15 è illustrato l'effetto teorico delle caratteristiche fonoassorbenti del materiale utilizzato all'interno della cavità, sul potere fonoisolante di pareti doppie leggere. Tali caratteristiche sono espresse in termini di resistività al flusso d'aria. La variazione della resistività al flusso è una proprietà fisica dei materiali porosi che sarà introdotta nel capitolo successivo. A scopo illustrativo, in figura 2.15 è riportato il potere fonoisolante calcolato considerando tre diversi materiali a riempimento della cavità, estremizzando le differenze tra i valori di resistività al flusso per enfatizzarne l'effetto. Tuttavia, anche in condizioni realistiche, come quelle rappresentate dai dati sperimentali in figura 2.16, l'effetto smorzante del materiale all'interno della cavità è evidente. È bene evidenziare, tuttavia, che la resistività al flusso del materiale poroso all'interno della cavità non è l'unico parametro che ha un'influenza significativa sul potere fonoisolante della parete. Soprattutto con materiali di densità elevata, generalmente maggiore di $90 \text{ kg}/\text{m}^3$, devono essere valutate anche le loro caratteristiche elastiche, in quanto il contributo di trasmissione attraverso lo scheletro solido del materiale poroso non è trascurabile.

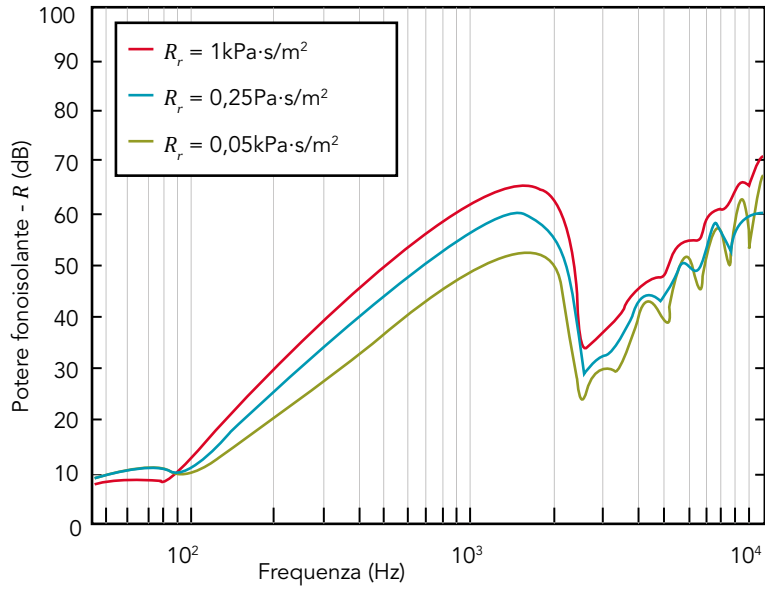


Figura 2.15: Influenza, sul potere fonoisolante, delle caratteristiche del materiale fonoassorbente all'interno della cavità: risultati teorici

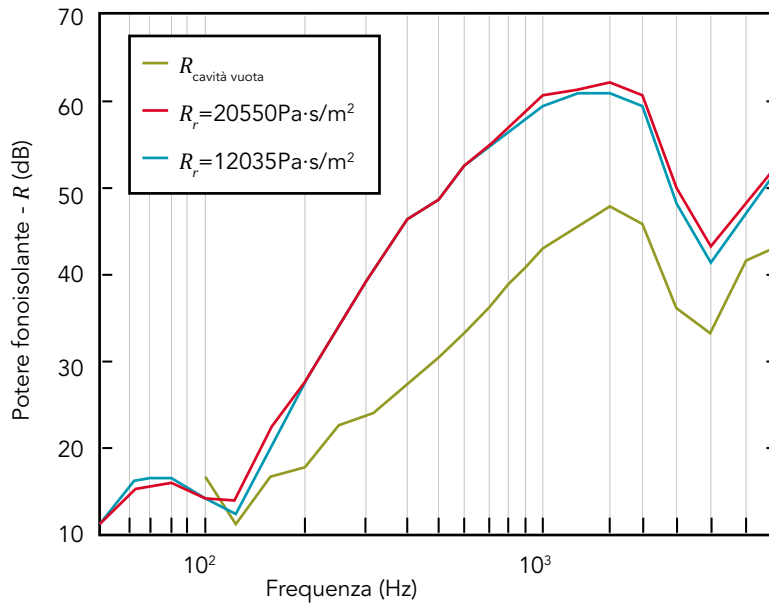


Figura 2.16: Influenza, sul potere fonoisolante, del materiale fonoassorbente all'interno della cavità: confronto tra risultati sperimentali

L'effetto del riempimento parziale della cavità con materiale fibroso è stato studiato anche sperimentalmente. Come evidenziato in figura 2.17, l'introduzione di materiale fonoassorbente all'interno della cavità comporta un incremento significativo del potere fonoisolante della partizione. La percentuale di riempimento della cavità fa migliorare ulteriormente le prestazioni acustiche anche se con benefici meno evidenti. Nella pratica, si saturano generalmente i 2/3 della cavità per garantire facilità di posa nella sovrapposizione dei pannelli, evitando instabilità dei pannelli troppo sottili rispetto allo spessore del montante.

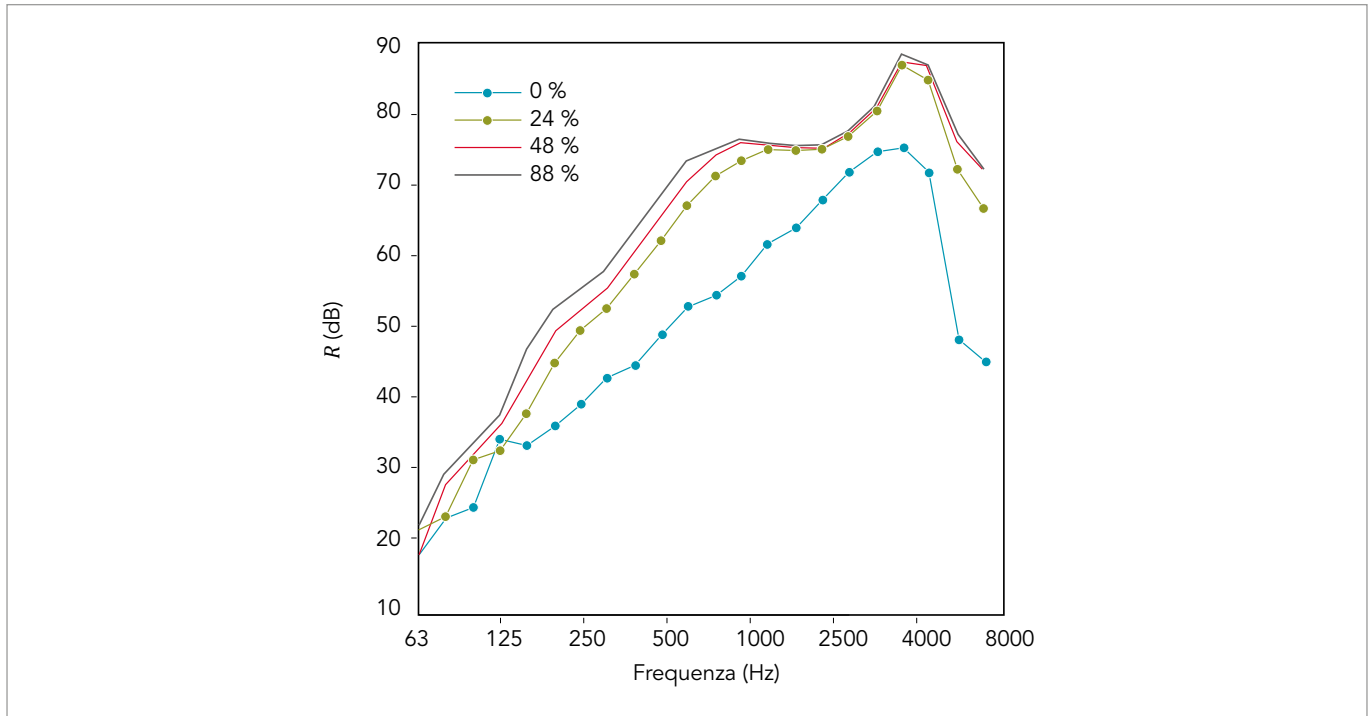


Figura 2.17: Influenza, sul potere fonoisolante, della percentuale di materiale fonoassorbente all'interno della cavità: risultati sperimentali

Nel caso di pareti doppie in latero-cemento l'effetto del materiale fonoassorbente all'interno della cavità è minore rispetto a quello che si verifica con le pareti leggere in cartongesso.

2.5 - Comportamento dei materiali nei confronti dei rumori impattivi

I rumori impattivi negli edifici sono quelli causati dai passi, dalla caduta di oggetti, dallo spostamento di tavoli e sedie, da lavorazioni effettuate su pavimenti e pareti, ecc. La maggior parte di questi rumori interessano il complesso pavimento-solaio. I rumori impattivi o gli urti che si verificano contro i pavimenti, le pareti e le strutture si propagano all'interno degli edifici e vengono poi irradiati negli ambienti, vicini e lontani, purché collegati rigidamente con il punto in cui è stato innescato il rumore. La propagazione e la radiazione del rumore si verificano allo stesso modo con cui si propaga e viene irradiato il rumore aereo: quello che cambia è la modalità e la quantità di energia che viene trasferita dalla sorgente alle strutture. Quando un materiale rigido urta contro un altro materiale rigido la forza di impatto viene trasferita con un picco elevato e in breve tempo. L'urto determina la generazione di rumore e vibrazioni ad ampio spettro. Se invece uno dei due materiali tra i quali avviene l'impatto (o anche entrambi) ha caratteristiche resilienti, la forza impattiva viene trasferita con un picco più basso ma in un tempo più lungo, dovuto alla deformazione del materiale resiliente, come schematizzato in figura 2.18.

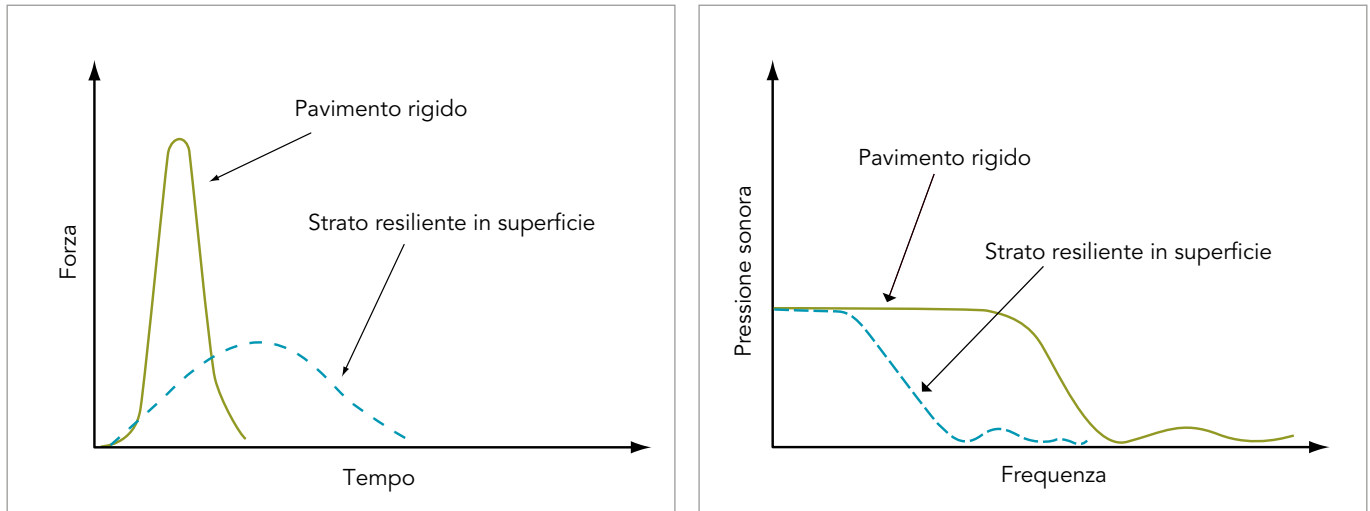


Figura 2.18: Andamento della forza impattiva e del rumore generato dall'urto nel caso di materiali rigidi o resilienti

L'impulso complessivamente fornito alla struttura è lo stesso del caso precedente ma il rumore e le vibrazioni che si generano hanno uno spettro maggiormente spostato verso le basse frequenze. Il rumore irradiato avrà quindi un livello complessivo in dB(A) inferiore. Lo spettro di rumore irradiato dipenderà anche dalla capacità di smorzamento delle vibrazioni posseduta dalla struttura. Lo smorzamento dipende dalle caratteristiche intrinseche del materiale (smorzamento interno), dalle caratteristiche di radiazione della struttura (smorzamento per radiazione acustica) e dalle caratteristiche di vincolo strutturale (smorzamento per accoppiamento ai bordi).

2.6 - Proprietà fisiche dei materiali correlate con le prestazioni acustiche

2.6.1 - Resistenza al flusso

La resistenza al flusso d'aria di materiali porosi è una proprietà che permette di valutare indirettamente alcune proprietà acustiche come l'assorbimento e l'attenuazione.

La resistenza al flusso si definisce nel seguente modo:

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3]$$

dove Δp è il gradiente di pressione [Pa] misurato prima e dopo il passaggio di un flusso di aria Q_v (m^3/s) attraverso il provino.

La resistenza al flusso specifica si ottiene moltiplicando la resistenza al flusso per la superficie del campione:

$$R_s = RA = \frac{\Delta p}{v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$$

La resistività al flusso si ottiene dividendo la resistenza al flusso specifica per lo spessore d del campione:

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{dv} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$$

La resistività è una proprietà intrinseca del materiale (figura 2.19) e non dipende dalle sue dimensioni e dal suo spessore.

La misura della resistenza al flusso può essere effettuata mediante un flusso continuo o un flusso alternato di aria. Il metodo con flusso d'aria continuo, descritto dalla norma UNI EN ISO 9053-1 [16], prevede la misura della differenza di pressione alle due estremità di un provino su cui viene convogliato un flusso d'aria unidirezionale, attraverso il dispositivo schematizzato in figura 2.20a).

Il metodo con flusso d'aria continuo, descritto dalla norma UNI EN ISO 9053-2 [17], prevede la misura della differenza di pressione alle due estremità di un provino attraversato da un flusso d'aria alternato con una frequenza di 2 Hz, attraverso il dispositivo schematizzato in figura 2.20b).

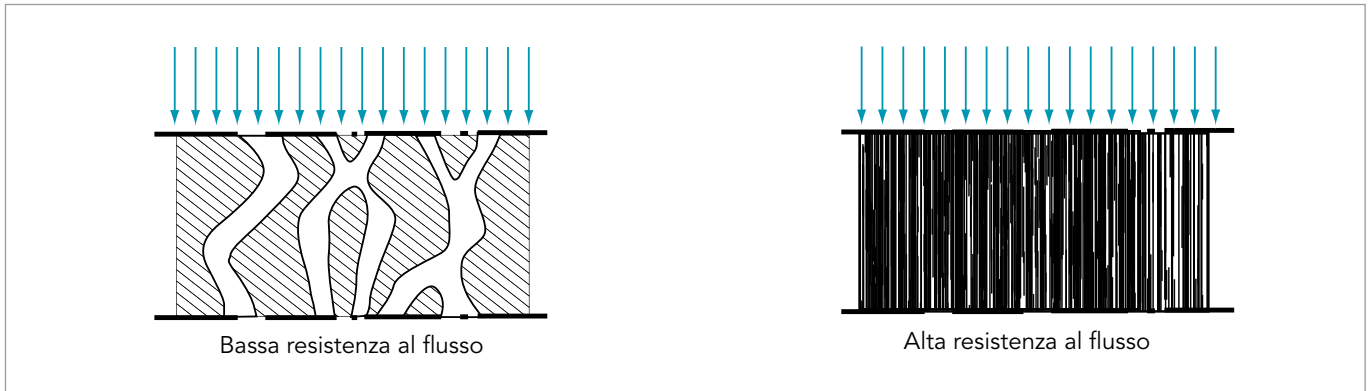


Figura 2.19: Schema di due materiali con diversa resistività al flusso

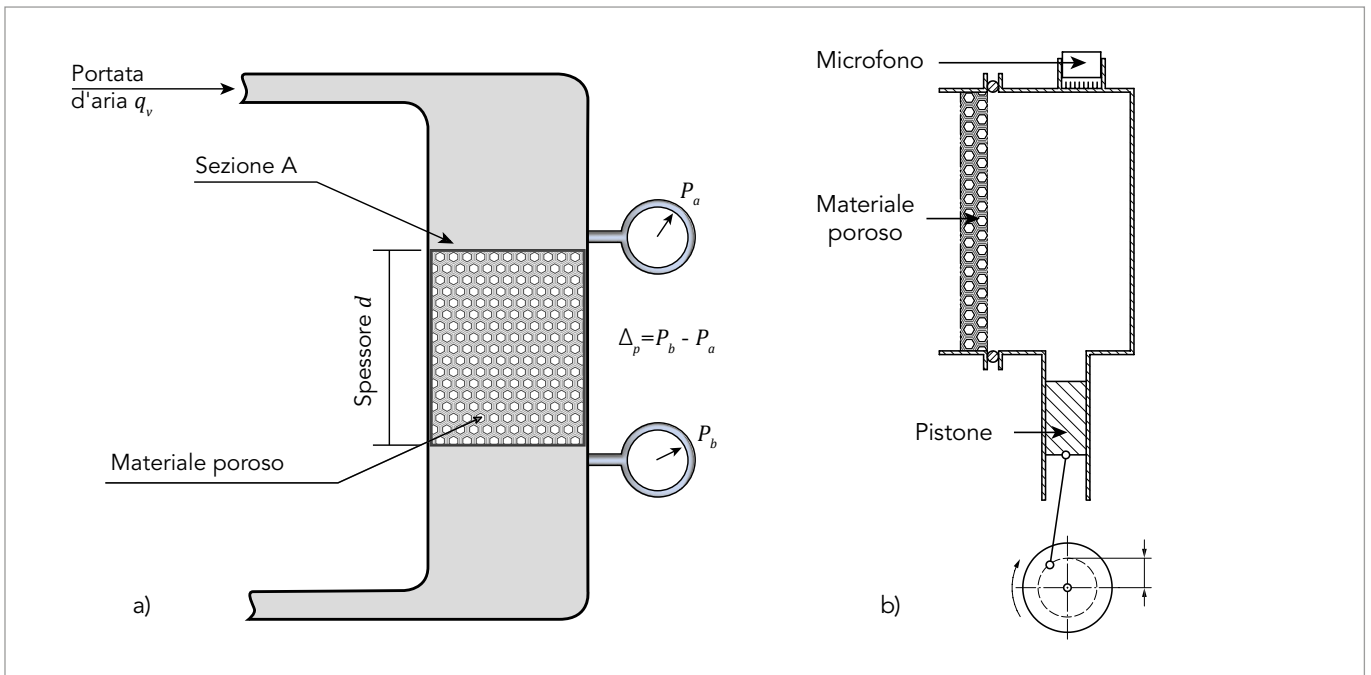


Figura 2.20: (a) Dispositivo a flusso continuo per la misura della resistività al flusso d'aria in accordo alla norma UNI EN ISO 9053-1:2019
(b) Dispositivo a flusso alternato per la misura della resistività al flusso d'aria in accordo alla norma UNI EN ISO 9053-2.

La lana minerale è trasversalmente isotropa, come schematizzato in figura 2.21, poiché le fibre tendono a trovarsi su piani paralleli al piano del pannello ma l'orientamento delle fibre all'interno di ciascun piano è casuale. Pertanto, la resistività del flusso d'aria nella direzione laterale è inferiore rispetto alla direzione longitudinale.

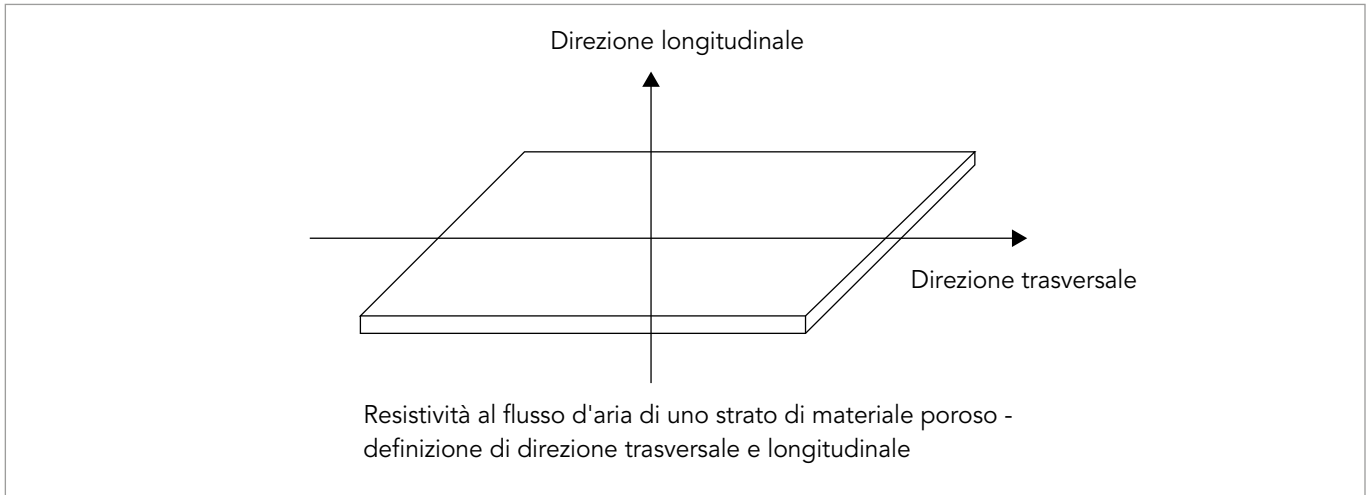


Figura 2.21: Assi ortogonali, paralleli e perpendicolari alla direzione delle fibre della lana minerale

2.6.2 - Rigidity dinamica

La rigidità dinamica di un materiale resiliente è il rapporto tra la forza dinamica applicata al materiale e lo spostamento dinamico risultante. Nel caso dei pavimenti galleggianti si usa la rigidità dinamica per unità di superficie:

$$s' = \frac{F/A}{\Delta L} \quad [\text{N/m}^3]$$

con F forza dinamica applicata sul campione, A area del campione e ΔL variazione di lunghezza dovuta alla forza applicata, secondo lo schema riportato in figura 2.22.

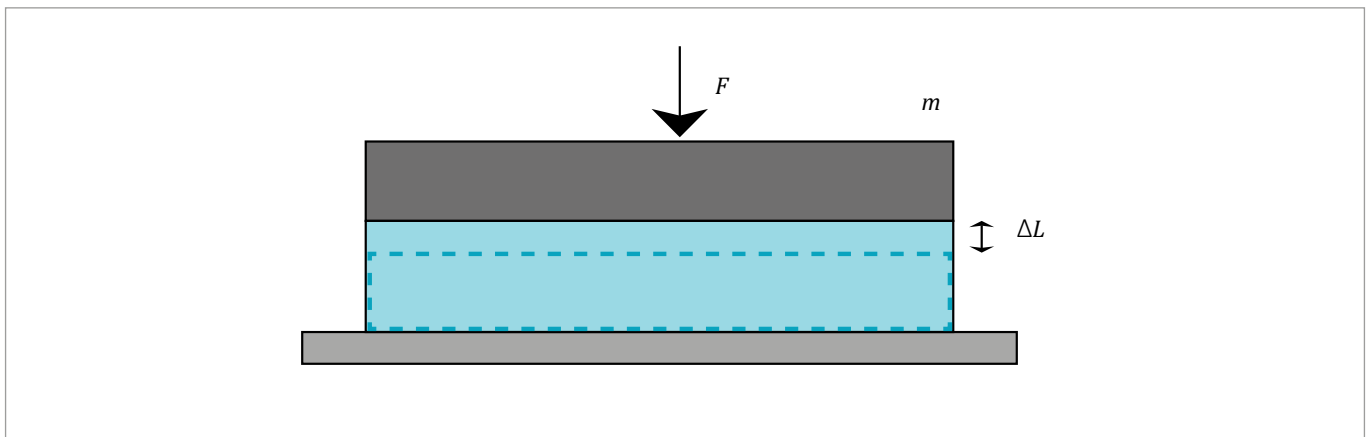


Figura 2.22: Spostamento dovuto all'applicazione di una forza dinamica

La rigidità dinamica non è una proprietà intrinseca del materiale ma è correlata con il modulo di elasticità E (o modulo di Young) e lo spessore iniziale secondo la seguente formula:

$$s' = \frac{E}{L_0} \quad [\text{N/m}^3]$$

essendo E definito come il rapporto tra la tensione normale e la deformazione nella stessa direzione di applicazione del carico:

$$E = \frac{F L_0}{A \Delta L} \quad [\text{Pa} = \text{N/m}^2]$$

Tale espressione è valida per materiali in cui l'effetto del coefficiente di Poisson è nullo, come dimostrato valere per materiali fibrosi da studi di letteratura. La misura della rigidità dinamica di materiali utilizzati per i pavimenti galleggianti si effettua secondo la normativa UNI EN 29052-1 [15]. Il metodo si basa sulla misura della frequenza di risonanza del sistema "carico-materiale resiliente". La procedura può essere eseguita utilizzando un rumore bianco, un segnale sinusoidale o un impulso (eccitazione ad impatto) [28]. L'eccitazione deve essere applicata simmetricamente in modo di non generare nessuna rotazione nel campione e la risposta in accelerazione (figura 2.23) deve essere misurata in una posizione centrale della piastra di carico.

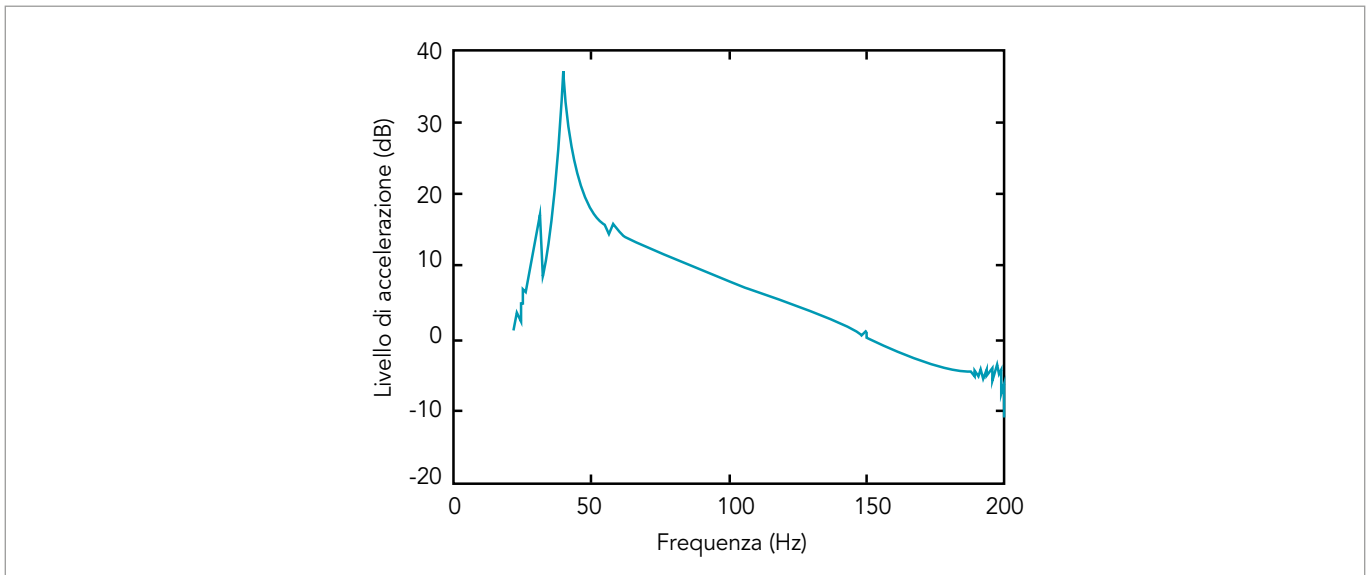


Figura 2.23: Esempio di curva di accelerazione per la determinazione della frequenza di risonanza

La frequenza di risonanza è legata alla rigidità dinamica dalla seguente formula:

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

dove f_r è la frequenza di risonanza, s'_t è la rigidità dinamica apparente per unità di superficie del provino, m'_t è la massa totale per unità di superficie utilizzata durante la prova in kg/m^2 includendo la massa per unità di superficie degli strumenti usati (shaker, accelerometri, ecc.). Invertendo questa formula si ottiene la rigidità dinamica:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t (f_r)^2 \quad [\text{N/m}^3]$$

Un carico appoggiato per lungo tempo sul materiale resiliente può modificarne le proprietà fisiche, determinando un irrigidimento per la compressione sotto carico costante. Una variazione permanente di spessore del prodotto (deformazione plastica) aumenta la densità del materiale con il conseguente aumento della rigidità dinamica (e della frequenza di risonanza del sistema massetto/strato resiliente) e la diminuzione di ΔL_w . La rigidità dinamica cambia poiché la variazione permanente di spessore del materiale dovuta al carico statico fa variare la frequenza di risonanza secondo la seguente equazione:

$$\Delta f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad [\text{Hz}]$$

dove g è l'accelerazione di gravità e δ_{st} è la variazione permanente di spessore dovuta al carico statico.

L'influenza del carico statico viene valutata attraverso la misura dello scorrimento viscoso a compressione (creep) del materiale resiliente e della comprimibilità, descritte nei successivi paragrafi. Per la determinazione della rigidità dinamica per unità di superficie la norma prescrive una correzione, funzione della resistenza al flusso d'aria, che tiene conto della rigidità dinamica s'_a per unità di superficie del gas (in questo caso aria) contenuto all'interno del materiale. Nella pratica si preferisce esprimere l'unità di misura della rigidità dinamica con il multiplo $[\text{MN}/\text{m}^3]$. Nella Tabella 2.2 sono riportati i valori della rigidità dinamica per unità di superficie in funzione della resistività al flusso di aria r .

| r [$\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] | s' [MN/m^3] |
|--|---------------------------------|
| $r \geq 100$ | s'_t |
| $10 \leq r \leq 100$ | $s'_t + s'_a$ |
| $r \leq 10$ | s'_t |

Tabella 2.2: Valori della rigidità dinamica per unità di superficie

La resistività al flusso di aria deve essere determinata conformemente alla norme UNI EN ISO 9053-1/2 [16][17] in direzione trasversale a quella di applicazione del carico. Nel caso in cui sia necessario correggere il valore di s'_t con la rigidità dinamica dell'aria, il termine s'_a viene calcolato come:

$$s'_a = \frac{p_0}{d \cdot \varepsilon} \quad [\text{MN}/\text{m}^3]$$

dove p_0 è la pressione atmosferica, d lo spessore sotto carico ed ε la porosità del materiale.

È pratica comune stimare la rigidità dinamica dell'aria con la formula seguente, utilizzando l'unità di misura $[\text{MN}/\text{m}^3]$, assumendo un valore di porosità pari a circa 0.9 ed indicando lo spessore d del provino in metri.

$$s'_a \cong \frac{0.111}{d} \quad [\text{MN}/\text{m}^3]$$

La porosità a cella aperta è la misura della frazione d'aria contenuta all'interno del materiale. Nel calcolo della porosità non vengono considerati il volume d'aria intrappolata all'interno del materiale in celle chiuse non collegate con l'esterno del campione, poiché tale aria non è interessata alla propagazione del campo acustico. Il metodo utilizzato è basato sulla legge di Boyle per i gas perfetti, considerando una compressione isoterma dell'aria all'interno del materiale; la porosità viene determinata misurando la variazione di pressione all'interno di una camera isolata contenente il materiale, dovuta ad una variazione di volume nota imposta da un sistema meccanico azionato manualmente [29].

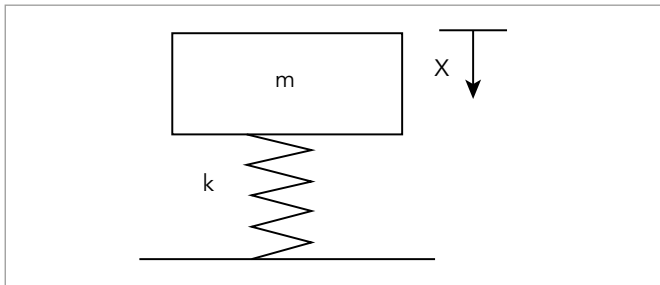
In Tabella 2.3 vengono riportati i valori tipici di porosità per materiali fibrosi e porosi tradizionali.

| Materiale | ε [-] |
|--|-------------------|
| Lana di roccia (densità 90-180 kg/m ³) | 0.94-0.98 |
| Lana di vetro (densità 50-100 kg/m ³) | 0.95-0.99 |
| Poliestere | 0.9-0.96 |
| Poliuretani a cella aperta | 0.9-0.98 |

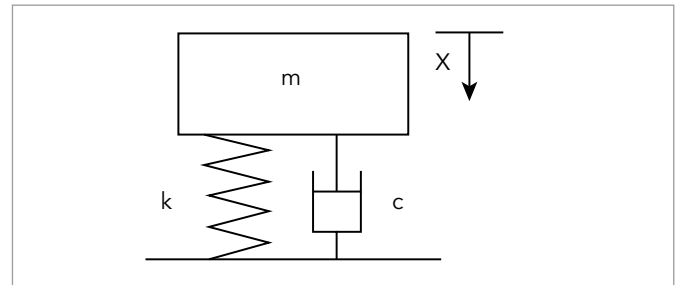
Tabella 2.3: Valori della porosità per materiali fibrosi e porosi tradizionali

2.6.3 - Loss factor

Da un punto di vista meccanico un pavimento galleggiante viene spesso modellato come un oscillatore armonico smorzato (figura 2.24). In particolare, la risposta dinamica e le caratteristiche di trasmissione di un tale sistema vibrante sono determinate dalle proprietà di massa, rigidità e smorzamento. Massa e rigidità determinano la quantità di energia immagazzinata dal sistema mentre lo smorzamento governa la perdita di energia del sistema attraverso la conversione in calore.



Sistema massa-molla ad un grado di libertà



Sistema massa-molla/smorzatore ad un grado di libertà

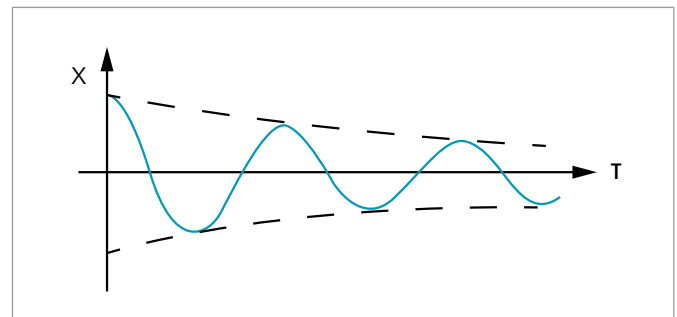
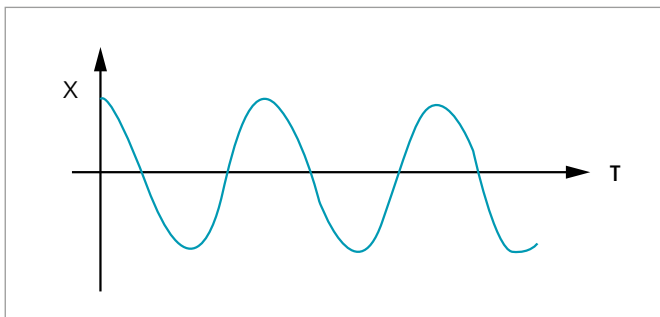


Figura 2.24: Esempio oscillatore armonico non smorzato e smorzato

Le perdite interne in un materiale o in una struttura sono comunemente rappresentate dal loss factor (fattore di perdita) η , che è rappresentativo di quanta energia vibrazionale viene convertita in calore. Il ruolo dello smorzatore è fondamentale nella riduzione della trasmissione nel campo di risonanza, come mostrato nella precedente figura, dove vengono confrontati due sistemi oscillanti ad un grado di libertà con e senza smorzamento. In particolare, nel sistema non smorzato si osserva un comportamento della massa oscillante che persiste nel tempo con un'ampiezza pressoché costante. Al contrario, l'utilizzo di uno smorzatore permette di ridurre progressivamente l'ampiezza dell'oscillazione fino ad un valore praticamente nullo. Maggiore sarà lo smorzamento, minore sarà il tempo di decadimento della massa oscillante.

Il set-up di misura utilizzato per la misura della rigidità dinamica consente anche la determinazione del loss factor, a partire dalla curva di accelerazione e utilizzando il metodo della mezza potenza, mediante la seguente espressione:

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad [-]$$

dove f_1 e f_2 corrispondono alle frequenze, inferiore e superiore, caratterizzate da un livello di accelerazione inferiore di 3 dB rispetto a quello misurato alla frequenza di risonanza (figura 2.25).

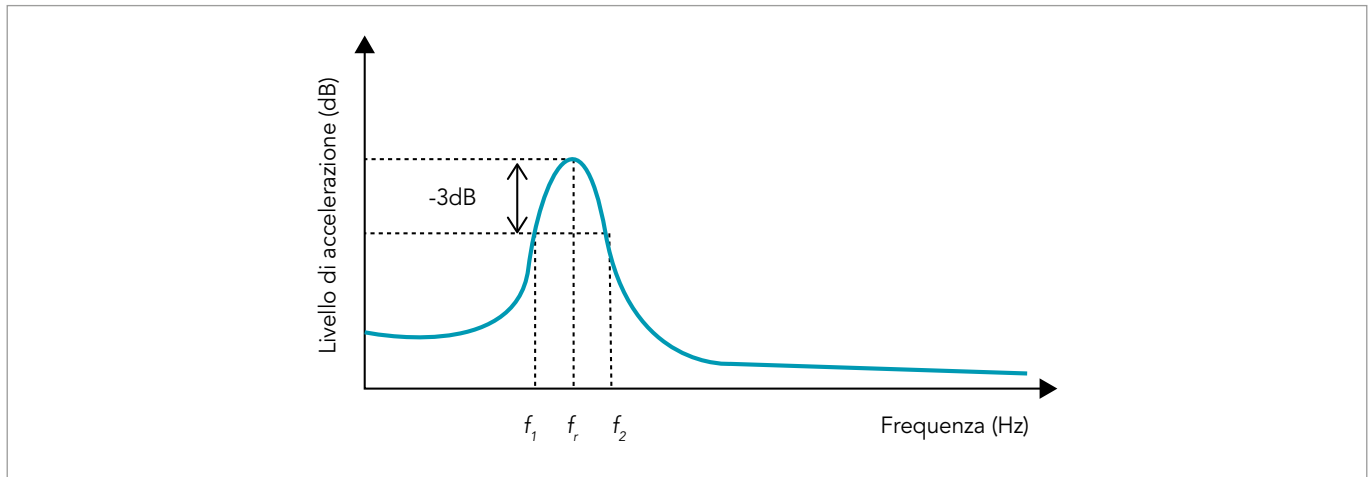


Figura 2.25: Esempio di curva di accelerazione per la determinazione del loss factor

2.6.4 - Scorrimento viscoso a compressione (creep)

Lo scorrimento viscoso a compressione o creep X_{ct} (tratto azzurro in figura 2.26) è definito nella norma UNI EN 1606 [20] come l'aumento nel tempo della deformazione del provino sotto carico costante, in condizioni specificate di temperatura e umidità, ovvero come la differenza tra la deformazione del provino misurata al tempo t e la deformazione iniziale misurata dopo 60 secondi.

$$X_{ct} = X_t - X_0$$

dove:

X_t è la deformazione al tempo t ;

X_0 è la deformazione iniziale (60 s dopo l'applicazione del carico).

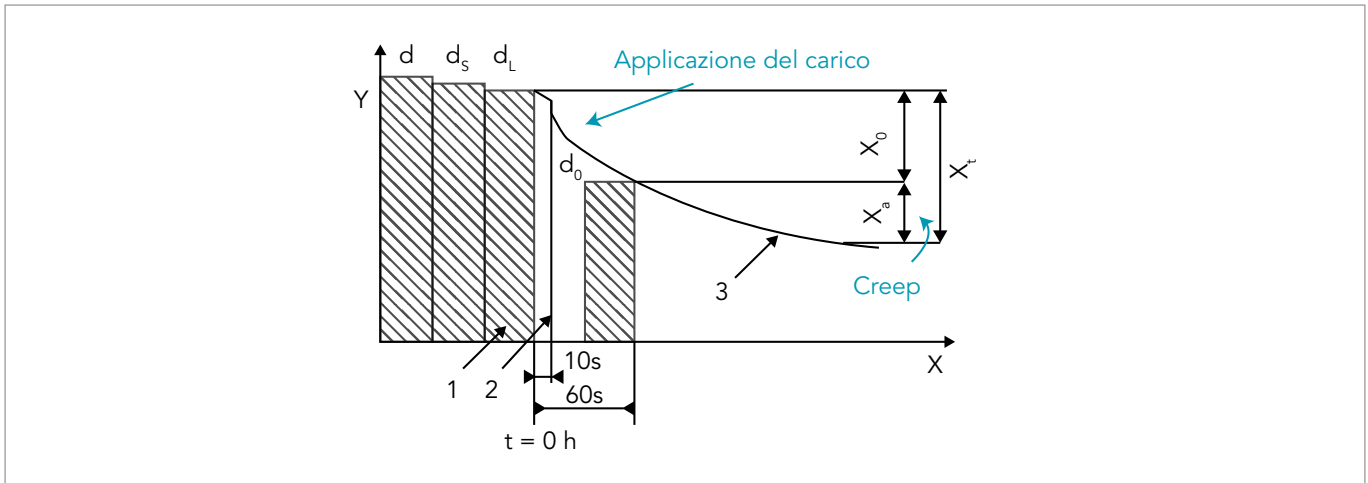


Figura 2.26: Diagramma per la determinazione dello scorrimento viscoso a compressione o creep in accordo alla norma UNI EN 1606 [20]

Tale norma descrive le procedure per stabilire le variazioni di spessore a lungo termine e di conseguenza valutare la capacità di un materiale resiliente di conservare le sue proprietà nel tempo quando si trova sotto carico. Le rilevazioni delle deformazioni del materiale devono essere effettuate ad intervalli temporali definiti dalla norma per un periodo di almeno 90 giorni. Il metodo di calcolo è basato su una funzione matematica, detta equazione di Findley, che permette la descrizione a lungo termine del comportamento allo scorrimento viscoso purché l'analisi di regressione lineare secondo l'equazione sia in accordo con un coefficiente di determinazione $r^2 \geq 0,9$. L'estrapolazione dei dati sperimentali è ammessa fino a 30 volte il tempo di durata della prova; ad esempio, una prova di 120 giorni permette l'estrapolazione fino a circa 10 anni. Per l'estrapolazione si utilizza la seguente espressione:

$$X_t = X_0 - m \cdot t^b$$

che può essere riscritta in forma logaritmica come segue:

$$\log(X_t - X_0) = \log m + b \cdot \log t$$

dove:

X_t deformazione al tempo t ;

X_0 deformazione iniziale dopo 60 secondi dall'applicazione del carico;

m e b sono costanti del materiale derivate dall'analisi di regressione lineare.

Essendo d_s lo spessore del provino, la deformazione relativa, ε_t , come percentuale, può essere espressa come:

$$\varepsilon_t = \frac{X_t}{d_s} \cdot 100$$

A titolo di esempio, in Figura 2.27 viene riportato l'andamento della deformazione in funzione del tempo per il materiale in lana di roccia Floorrock SE 50mm caricato a 7 kPa e l'estrapolazione dei valori di creep a lungo periodo (fino a 100000 ore ovvero circa 11.4 anni). Dall'andamento riportato nella figura è evidente come lo schiacciamento avvenga quasi completamente al

momento della applicazione del carico; nella pratica cantieristica ciò coincide con la posa del massetto (1 kPa). Al trascorrere del tempo si osserva come l'isolante non subisca ulteriori sensibili variazioni di spessore: il creep aumenta solo del 2-4% dello spessore in 10 anni rispetto alla perdita avuta all'applicazione del carico.

Come detto precedentemente, le eventuali perdite di prestazioni dovute ad uno schiacciamento del materiale sotto carico costante per un tempo paragonabile alla vita utile dell'edificio possono determinare una riduzione nel tempo delle prestazioni acustiche del pavimento galleggiante. La stessa figura mostra come, al tempo di misurazione del ΔL_w in laboratorio dopo 28 giorni attesi per l'asciugatura del massetto, il grafico del creep sia asintotico all'orizzontale. Si può quindi ritenere che il materiale non produrrà, sotto carico, ulteriori significative deformazioni da schiacciamento, garantendo nel tempo la prestazione acustica.

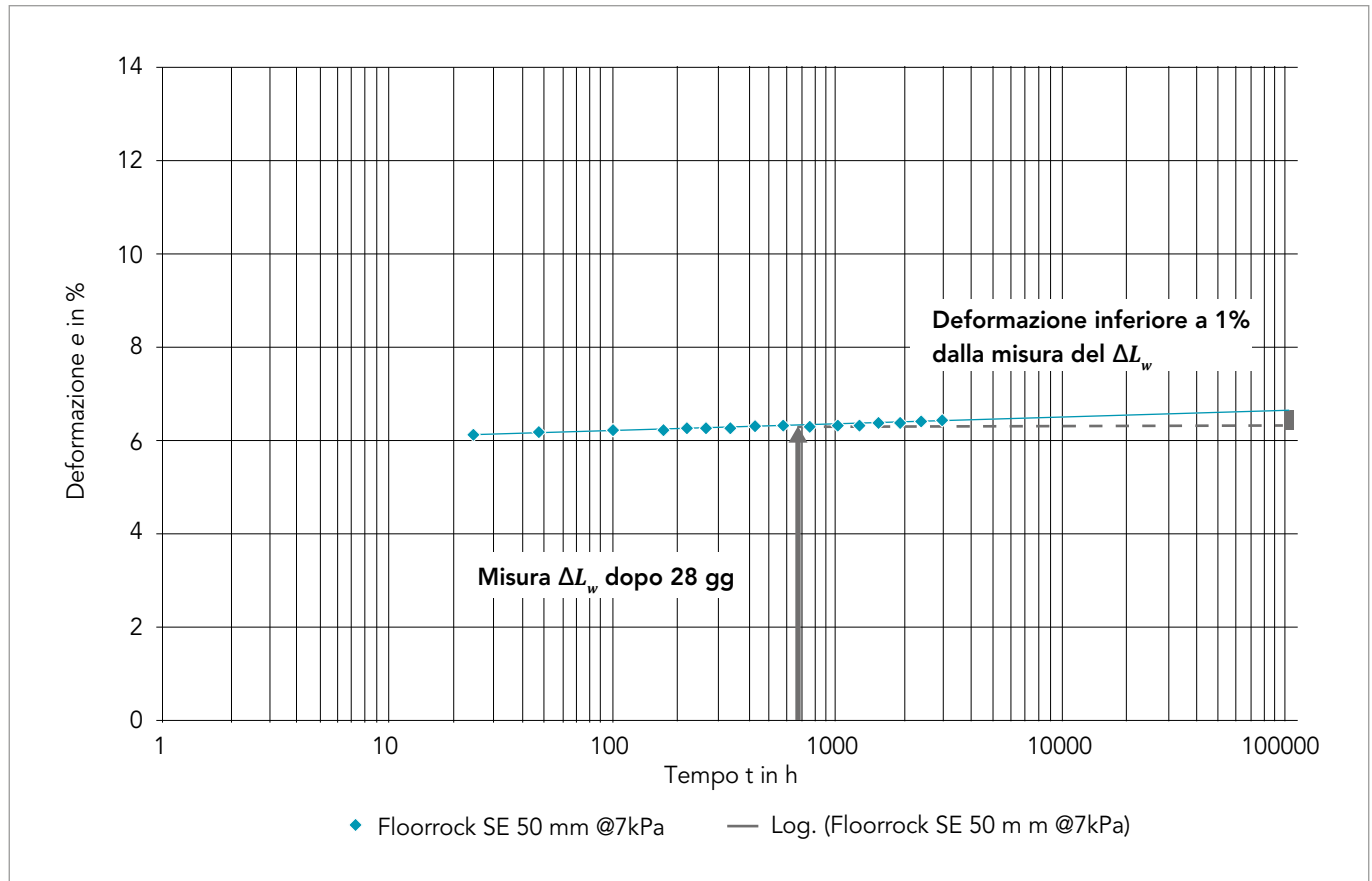


Figura 2.27: Esempio di estrapolazione a lungo periodo del creep di un materiale in lana di roccia Floorrock SE 50 mm

2.6.5 - Comprimibilità (c) e classe di comprimibilità

La comprimibilità ci fornisce indicazioni sulla capacità del materiale di resistere a determinati sovraccarichi e quindi di mantenere inalterate, nel tempo, le proprie proprietà resilienti. La comprimibilità c , misurata secondo la norma UNI EN 12431 [17], è la differenza di spessore

$$c = d_L - d_B$$

misurata in millimetri prima e dopo un ciclo di carico e scarico (0,25 kPa - 2 kPa- 50 kPa - 2 kPa) nell'arco di un breve periodo di tempo ($t = 480$ s) come mostrato in figura 2.28.

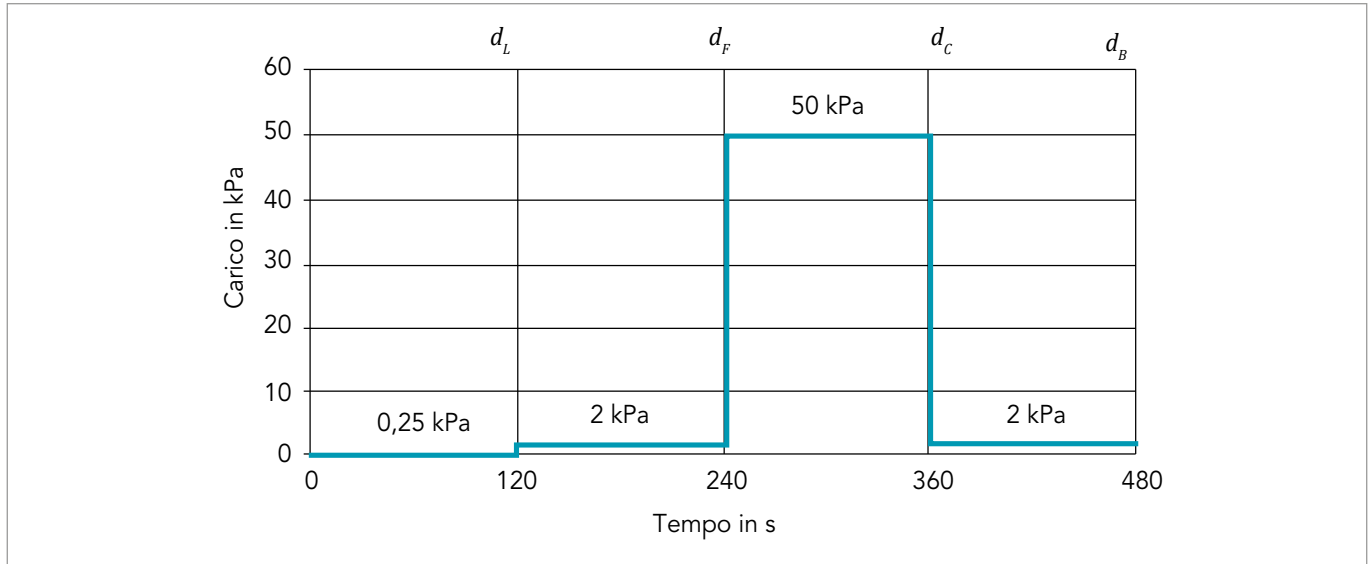


Figura 2.28: Diagramma per la determinazione della comprimibilità in accordo alla norma UNI EN 12431 [17]

Le norme di prodotto per la marcatura CE danno ulteriori indicazioni sulle procedure e sui tempi di applicazioni dei carichi. Nel caso delle lane minerali UNI EN 13162 [18] la durata prova è pari a 480 s. In particolare, le norme specifiche per la marcatura CE di prodotto definiscono dopo quanti secondi dalla rimozione del carico di 48 kPa misurare lo spessore dB. Con le tecniche di misura descritte nella norma UNI EN 12431 [17] e tempi stabiliti dalle norme per la marcatura CE (UNI EN 13162 [18] per i prodotti in lana di roccia) è possibile misurare e poi calcolare la comprimibilità c in funzione della variazione di spessore da 50 kPa a 2 kPa $\Delta = d_B - d_C$.

Essendo:

d_L : spessore sotto piccolo carico 0,25 kPa;

d_F : spessore sotto il carico 2 kPa;

d_B : spessore sotto il carico di 2 kPa dopo l'applicazione per un breve periodo di tempo del carico aggiuntivo (48 kPa).

Il valore $\Delta = d_B - d_C$ è relativo alla variazione di spessore da 50 kPa a 2 kPa e fornisce utili indicazioni sulla capacità di ritornare allo spessore iniziale dopo un ciclo di carico fino a 50 kPa. La classe di comprimibilità indicata con CPi con i variabile da 2 a 5, indica il valore massimo di comprimibilità c espresso in millimetri che il prodotto può raggiungere. Ad esempio, CP2 indica che il materiale ha una comprimibilità $c \leq 2$ mm. Pertanto, un materiale indicato con CP2 si comprime meno di un prodotto CP5

con comprimibilità $c \leq 5$ mm. La classe di comprimibilità CPi associa i valori di comprimibilità a specifici sovraccarichi imposti sul massetto in accordo con la UNI EN 1991-1-1 [19].

| Livello di comprimibilità | Carico sul massetto kPa | Comprimibilità c misurata secondo UNI EN12431 | |
|---------------------------|-------------------------|---|---------------|
| | | Comprimibilità nominale mm | Tolleranza mm |
| CP5 | $\leq 2,0$ | ≤ 5 | |
| CP4 | $\leq 3,0$ | ≤ 4 | + 2 |
| CP3 | $\leq 4,0$ | ≤ 3 | |
| CP2 | $\leq 5,0$ | ≤ 2 | + 1 |

Tabella 2.4: Valori di comprimibilità in funzione del sovraccarico applicato sul massetto

Se il sovraccarico imposto sul massetto eccede i 5 kPa possono essere usati solo prodotti con classe di comprimibilità dichiarata CP2 e la riduzione di spessore a lungo termine determinata secondo la UNI EN 1606 [20] non deve superare il valore di comprimibilità dichiarato. Nello specifico la riduzione totale di spessore $X_t = X_0 - X_{ct}$ deve essere determinata dopo 120 giorni di prova (secondo la UNI EN 1606 [20]) esercitando sul provino una pressione pari al sovraccarico imposto sul pavimento più il peso proprio del massetto. I valori di deformazione viscosa a compressione calcolati a dieci anni non devono eccedere il valore dichiarato di comprimibilità. La scelta del prodotto resiliente anticallpestio deve essere effettuata tenendo in considerazione la condizione di carico a cui verrà sottoposto il massetto nel corso della sua vita utile in funzione delle destinazioni d'uso dei locali.

2.7 - La misura sperimentale dell'isolamento acustico (potere fonoisolante, potere fonoisolante apparente e isolamento di facciata) e del rumore di calpestio

2.7.1 - Misura sperimentale del potere fonoisolante

La determinazione sperimentale del potere fonoisolante R di una parete viene effettuata in laboratorio secondo la normativa UNI EN ISO 10140-1 [4]. Come schematizzato in Figura 2.29, i due ambienti sono separati da giunti elastici e poggiano su fondazioni distinte, in modo da minimizzare le trasmissioni laterali di energia sonora. Per ciascuna frequenza si misurano i livelli di pressione sonora nell'ambiente disturbante L_1 e nell'ambiente ricevente L_2 , e il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente. Il potere fonoisolante R si ottiene dalla seguente espressione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

in cui S è la superficie del divisorio ed A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente [m^2].

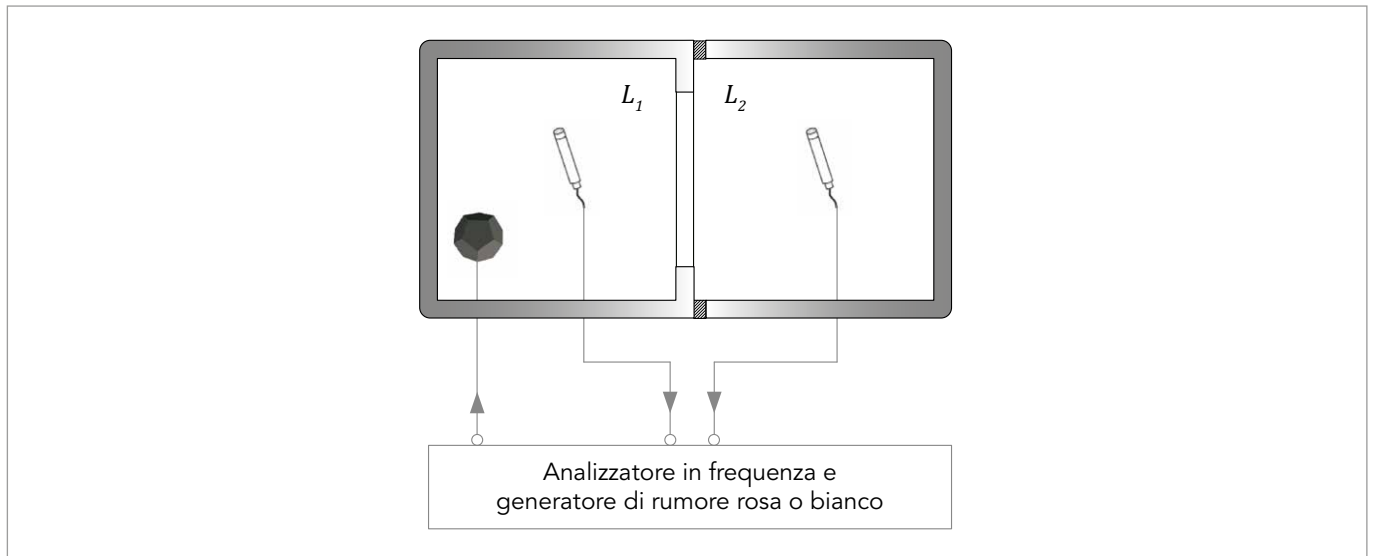


Figura 2.29: Schema di misura del potere fonoisolante in laboratorio

2.7.2 - Misura sperimentale del potere fonoisolante apparente

La misura del potere fonoisolante apparente R' in opera si effettua secondo la norma UNI EN ISO 16283-1 [8]. Il potere fonoisolante apparente si esprime con la seguente espressione, del tutto simile a quella del potere fonoisolante di laboratorio:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

Dove L_1 e L_2 sono rispettivamente i livelli di pressione sonora nell'ambiente disturbante e nell'ambiente ricevente. In questo caso la misurazione tiene conto, oltre che della trasmissione diretta, anche della trasmissione laterale, figura 2.30.

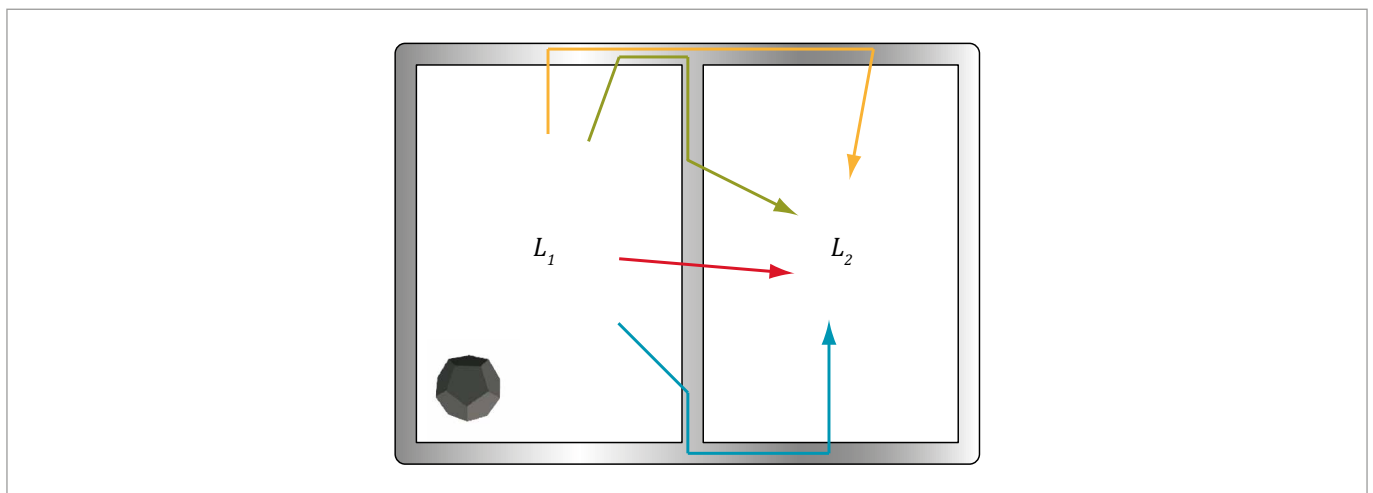


Figura 2.30: Schema di misura del potere fonoisolante in opera

La valutazione dell'isolamento acustico di un divisorio in opera si può effettuare anche attraverso la determinazione dell'isolamento acustico normalizzato D_n (non più utilizzato nella attuale versione della UNI EN ISO 16283-1 [8] ma presente nella UNI EN ISO 12354-1 [17]) o dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione D_{nT} :

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad [\text{dB}] \quad D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente, A_0 l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento pari a 10 m^2 per le abitazioni, T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento che vale 0.5 s per le abitazioni.

2.7.3 - Misura sperimentale dell'isolamento acustico di facciata

La determinazione sperimentale dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate viene eseguita secondo il procedimento prescritto dalla norma UNI EN ISO 16283-3 [10]. La norma descrive diverse procedure di misura dell'isolamento acustico di facciata, basate sia sull'utilizzo di un altoparlante come sorgente sonora esterna, che sull'uso del rumore da traffico. Vengono inoltre definiti diversi parametri acustici. Il D.P.C.M. 5/12/1997 [2] sui requisiti acustici passivi degli edifici richiede la verifica dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT}$. Il parametro è misurabile sia con un altoparlante ($D_{2m,nT}$) che con il rumore da traffico ($D_{tr,2m,nT}$), e viene calcolato con la seguente espressione:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora all'esterno 2 m davanti alla facciata, L_2 e T sono rispettivamente il livello medio di pressione sonora e il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento che, per le abitazioni, vale 0.5 s . Se la misura di $D_{2m,nT}$ viene effettuata con un altoparlante, questo va posizionato preferibilmente su terreno, rivolto verso la facciata in prova, con un angolo di $45^\circ \pm 5^\circ$ rispetto la normale alla facciata, ad una distanza minima in orizzontale di 5 m dal piano più esterno che individua l'elemento di prova, come illustrato dallo schema in figura 2.31. Il microfono esterno va posizionato a 2 m di distanza dal piano più esterno della facciata, in linea con il baricentro dell'elemento di prova, ad una altezza di 1.5 m dal piano del pavimento.

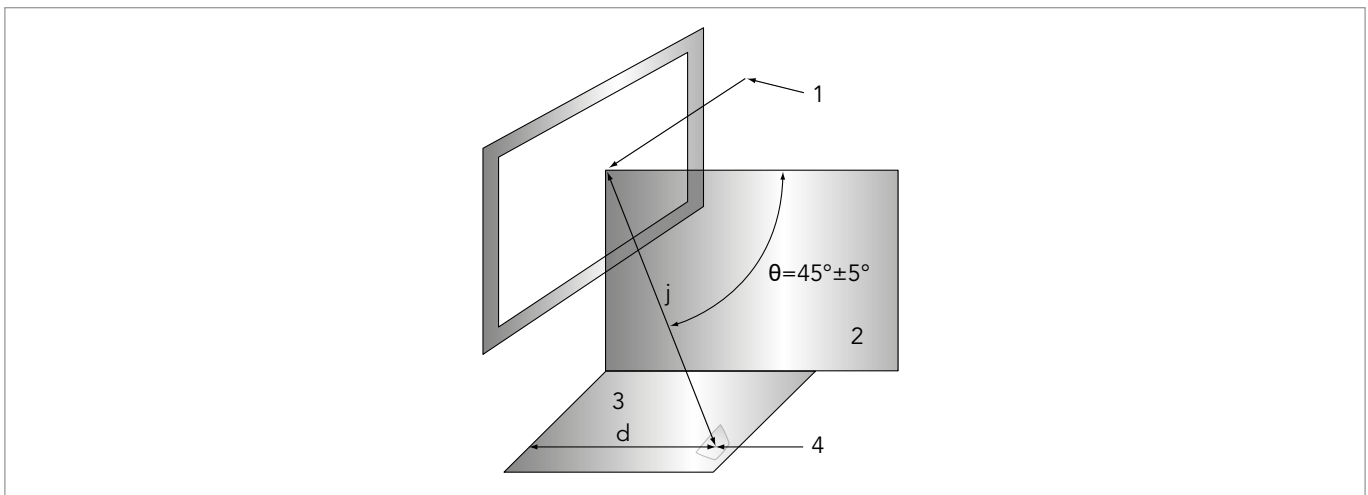


Figura 2.31: Schema del posizionamento della sorgente sonora nella misura di isolamento di facciata

2.7.4 - Misura sperimentale del rumore di calpestio

Il requisito acustico che caratterizza il comportamento dei pavimenti e dei solai nei confronti dei rumori impattivi è il livello di rumore di calpestio. La prestazione viene valutata attraverso la misura del livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente (generalmente sottostante o adiacente) quando sul pavimento dell'ambiente sorgente agisce una macchina normalizzata generatrice di rumori impattivi. La misura in opera del rumore di calpestio è descritta nella norma UNI EN ISO 16283-2 [9], mentre per la misura in laboratorio si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 10140-3 [6]. Tale norma descrive anche la misura in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato. Le misure in opera vengono eseguite in edifici finiti e riguardano l'intero solaio. Dalle misure di livello sonoro e tempo di riverberazione per ciascuna frequenza si calcolano i livelli di rumore di calpestio normalizzato L'_n (a cui fa riferimento il D.P.C.M. 5/12/1997 [2]) o normalizzato secondo il tempo di riverberazione L'_{nT} :

$$L'_n = L + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad [\text{dB}]$$

$$L'_{nT} = L - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}]$$

dove L è il valore medio della pressione sonora misurato nell'ambiente ricevente quando sul pavimento in prova è in funzione il generatore; A è l'area equivalente di assorbimento acustico dello stesso ambiente; A_0 è l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento che per le abitazioni è pari a 10 m^2 ; T è il tempo di riverberazione della camera ricevente; T_0 il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0.5 s per le abitazioni.

2.7.5 - Incremento delle prestazioni acustiche mediante rivestimenti di pareti e pavimenti

L'uso di rivestimenti su pareti e su solai può essere utilizzato per migliorare il potere fonoisolante di pareti e solai e ridurre il rumore di calpestio dei solai. Per quanto riguarda il miglioramento del potere fonoisolante delle pareti si possono utilizzare due modalità: la controparete e il placcaggio. Dal punto di vista previsionale, il comportamento relativo a queste due modalità di intervento è diverso e verrà trattato nel prossimo capitolo. Dal punto di vista sperimentale, invece, la caratterizzazione in laboratorio è analoga e viene definita nel seguente modo:

$$\Delta R = R_{\text{with}} - R_{\text{without}} \quad [\text{dB}]$$

Questo stesso calcolo viene eseguito per la determinazione del miglioramento del potere fonoisolante dei solai attraverso i rivestimenti e i pavimenti galleggianti. La valutazione sperimentale viene effettuata in bande di terzi di ottava ma l'incremento può essere espresso anche in bande di ottava, ricalcolando i valori dai risultati in terzi di ottava. La misurazione dell'incremento del potere fonoisolante viene eseguita in accordo con la norma UNI EN ISO 10140-1 [4], utilizzando il rivestimento supplementare da analizzare e una struttura base così come viene definita nella norma UNI EN ISO 10140-5 [7]. La *caratterizzazione individuale* del rivestimento supplementare è possibile solo se questa è indipendente dalla struttura base e pertanto quest'ultima deve avere una massa superficiale molto maggiore del rivestimento investigato. Inoltre, è possibile anche misurare il comportamento univoco del rivestimento aggiuntivo su una parete utilizzando una struttura di base (leggera) con caratteristiche predefinite. Per quanto riguarda l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio ΔL dovuto ai rivestimenti del solaio di base (pavimentazioni o sistema anticalpestio), questa deve essere misurata in accordo con la norma UNI EN ISO 10140-1 [4] ed è definita come la riduzione del livello di pressione sonora di calpestio, normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, risultante dall'installazione del rivestimento.

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad [\text{dB}]$$

dove L_{n0} è il livello di pressione sonora di calpestio del solaio di riferimento, normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, e L_n è il livello di pressione sonora di calpestio del solaio di riferimento con rivestimento, normalizzato rispetto all'assorbimento

acustico. La misurazione va eseguita in bande di terzi di ottava. I solai di riferimento, tre per strutture leggere e uno per strutture pesanti, sono forniti all'appendice C della norma UNI EN ISO 10140-5 [7].

2.7.6 - Misura sperimentale del rumore da pioggia

L'impatto della pioggia battente su coperture leggere metalliche o lignee, lucernai, o tensostrutture può rappresentare una sorgente di rumore significativa e fonte di disturbo negli ambienti sottostanti. Le gocce d'acqua impattanti su una superficie rappresentano una complessa sorgente sonora strutturale. Il numero di variabili che caratterizzano questa particolare sorgente sonora rendono estremamente complessa sia la descrizione analitica che la ripetibilità e la riproducibilità della misura sperimentale della potenza acustica generata da tale fenomeno. La valutazione sperimentale del rumore generato dall'impatto della pioggia su un determinato elemento edilizio è descritta nell'Appendice K della norma UNI EN ISO 10140-1 [4]. L'eccitazione è generata da gocce di pioggia artificiali ottenute in condizioni controllate, la pioggia reale, non avendo intensità costante, ma gocce di diametro variabile in funzione di diversi fattori, non permette la ripetibilità e la riproducibilità del test. La sorgente di pioggia artificiale è descritta nell'appendice H della norma UNI EN ISO 10140-5 [7], che distingue due tipologie di pioggia: pioggia di tipo *pesante* (tipologia di riferimento da utilizzare nel confronto tra prodotti) e pioggia di tipo *intenso* (necessaria se si vogliono investigare piovosità minori). La metodologia prevede la valutazione del livello di intensità irradiato per unità di superficie L_i ; quest'ultimo può essere determinato sia con il metodo indiretto, in funzione del livello medio di pressione sonora e del tempo di riverberazione misurati nell'ambiente ricevente, che direttamente, effettuando le misurazioni con una sonda intensimetrica in accordo con la norma UNI EN ISO 15186-1 [14]. È possibile calcolare il livello di intensità ponderato A , L_{IA} , dal livello di intensità misurato in bande di terzi di ottava L_i :

$$L_{IA} = 10 \log \sum_{j=1}^{j_{max}} 10^{0.1(L_{i,j} + C_j)} \quad [\text{dB}]$$

dove $L_{i,j}$ è il livello di intensità misurato per la banda j -esima e C_j è il coefficiente di ponderazione A , fornito per bande di terzi di ottava da 100 Hz a 5000 Hz nel prospetto K.2 della norma UNI EN ISO 10140-1 [4]. Ai fini della corretta progettazione acustica delle coperture potrebbe essere utile poter calcolare, dal livello di intensità misurato L_i , i livelli di pressione sonora generati dalla pioggia battente su una copertura nell'ambiente sottostante. Al momento non è disponibile un metodo standardizzato o consolidato, tuttavia, sono stati effettuati studi a tal proposito. Per esempio, Hopkins ha sviluppato un metodo di calcolo approssimato, ipotizzando che la copertura irradi energia sonora in campo perfettamente diffuso, per calcolare il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente dal livello di intensità per unità di superficie [32].

2.8 - Indici di valutazione

Le misurazioni dei requisiti acustici passivi degli edifici in opera e quelle delle proprietà dei materiali in laboratorio vengono eseguite in funzione della frequenza in bande di 1/3 di ottava, nel campo compreso tra 100 e 3150 Hz per le misure in opera e tra 100 e 5000 Hz in laboratorio. La rappresentazione in frequenza è molto utile per la valutazione qualitativa del comportamento del campione in prova. Per la valutazione complessiva di tale comportamento e anche per la necessità di esprimere in maniera sintetica i valori limite dei requisiti acustici, si utilizza generalmente un unico parametro denominato indice di valutazione. Tale indice viene impiegato per classificare le curve del potere fonoisolante (R_w), del potere fonoisolante apparente (R'_w), dell'isolamento acustico di facciata ($D_{2m,nT,w}$) e del livello di rumore di calpestio normalizzato ($L_{n,w}$ e $L_{nT,w}$). I metodi di calcolo utilizzati per determinare i valori degli indici di valutazione sono riportati nelle normative UNI EN ISO 717 parti 1 e 2 [11][12]. Le normative riportano le curve di riferimento per il calcolo degli indici di valutazione in bande di terzi di ottava e in ottave; tuttavia, nei capitolati e nella legislazione si fa riferimento, solitamente, ai terzi di ottava.

2.8.1 - Indice di valutazione dell'isolamento acustico

Il valore dell'indice di valutazione è ottenuto facendo scorrere la curva di riferimento, per passi di 1 dB, in alto e in basso rispetto alla curva sperimentale del descrittore acustico analizzato (di R , R' , $D_{2m,nT}$ ecc.), in modo tale che la somma algebrica degli scostamenti sfavorevoli (tratti in cui la curva sperimentale si trova al di sotto della curva di riferimento), diviso il numero totale di bande di frequenza considerate (16 per i terzi di ottava, 5 per le ottave), sia inferiore o uguale, ma il più possibile vicino, a 2 dB. La somma degli scarti sfavorevoli deve pertanto essere la maggiore possibile ma non superiore a 32 dB (≤ 32 dB) per dati espressi in bande di terzi di ottava e non superiore a 10 dB (≤ 10 dB) per dati espressi in bande di ottava. Quando questa condizione è verificata, si ottiene il valore dell'indice di valutazione che è uguale al valore della curva di riferimento alla frequenza di 500 Hz, come mostrato in figura 2.32.

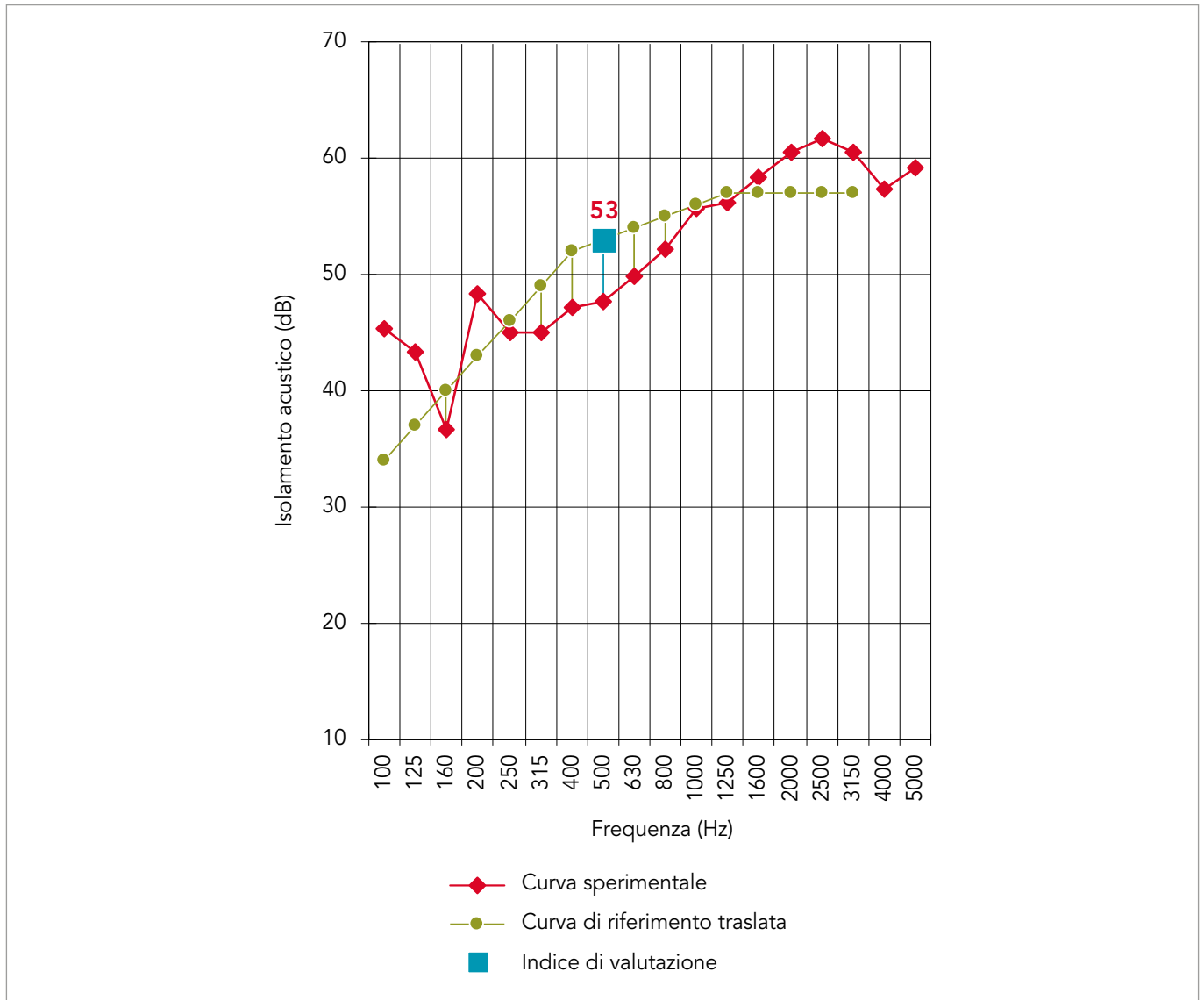


Figura 2.32: Determinazione dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico

2.8.2 - Indice di valutazione del livello di rumore di calpestio

Il valore dell'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio normalizzato ($L_{n,w}$, $L_{nT,w}$) si ottiene sovrapponendo la curva di riferimento riportata nella normativa UNI EN ISO 717-2 [12] alla curva sperimentale, traslando la curva di riferimento per passi di 1 dB in modo che la somma degli scostamenti sfavorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento (il valore della curva sperimentale è maggiore di quello della curva di riferimento) diviso il numero totale di bande sia inferiore o uguale, ma comunque più vicino possibile, al valore di 2 dB. Il valore della curva di riferimento a 500 Hz rappresenta l'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio, figura 2.33.

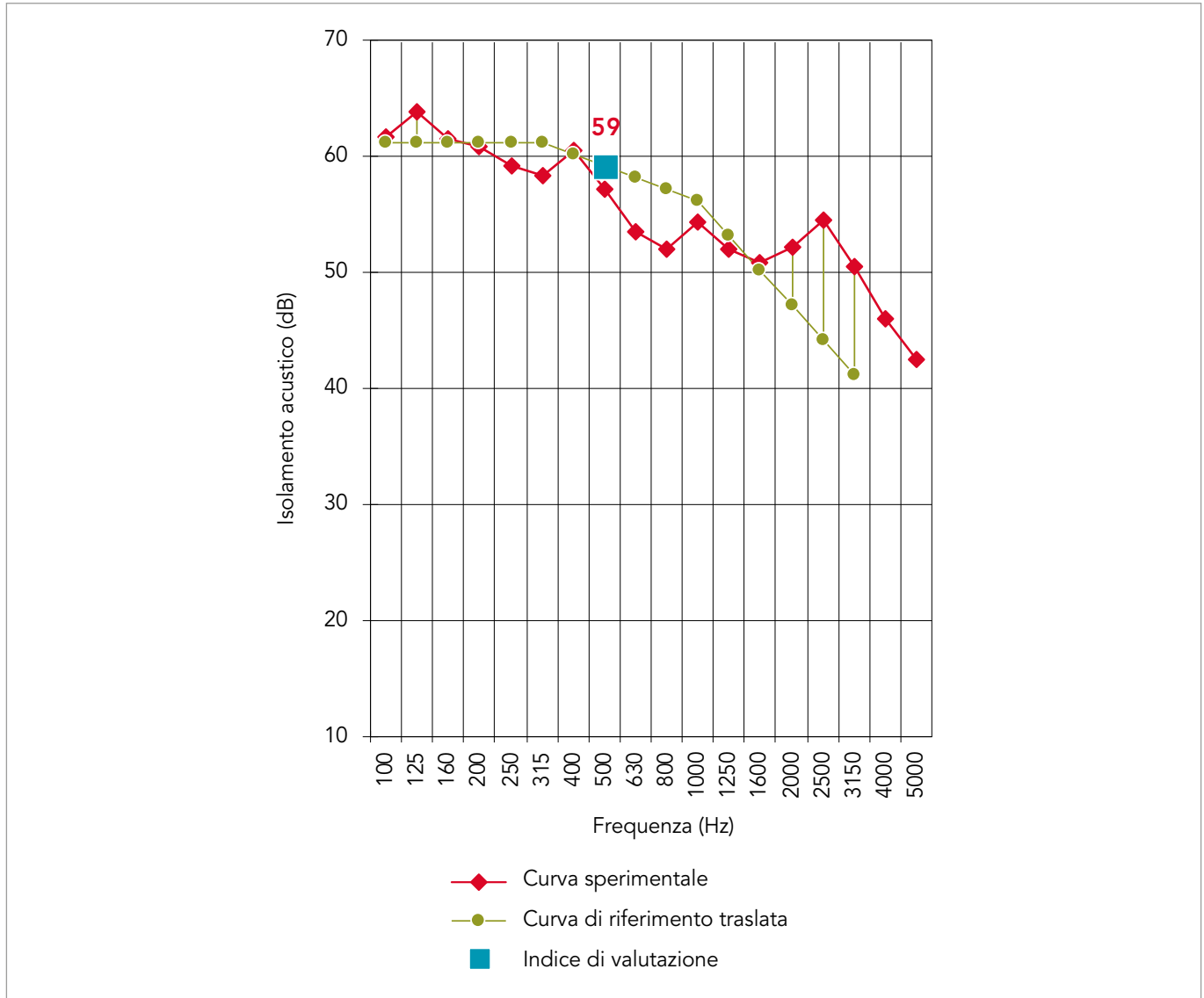


Figura 2.33: Determinazione dell'indice di valutazione del rumore di calpestio

2.8.3 - Indice di valutazione dell'incremento di potere fonoisolante e riduzione del rumore di calpestio

Nei recenti aggiornamenti della norma UNI EN ISO 717-1 [11] è stato introdotto il calcolo dell'indice di valutazione dell'incremento dell'isolamento acustico ΔR_w , considerando due diversi approcci.

■ ΔR_w : calcolato dall'incremento di isolamento acustico ΔR , misurato in accordo con quanto riportato all'appendice G della norma UNI EN ISO 10140-1 [4]. Un ulteriore pedice deve indicare se si tratta di parete o solaio pesanti (*heavy*) o di parete leggera (*light*) così come indicato nella norma UNI EN ISO 10140-5 [7].

$$\Delta R_w = R_{w,ref,with} - R_{w,ref,without} \text{ [dB]}$$

Il potere fonoisolante dell'elemento di base considerato $R_{ref,without}$ è fornito al prospetto B.1 della norma UNI EN ISO 10140-5 [7]. Considerando l'incremento del potere fonoisolante misurato ΔR , il potere fonoisolante dell'elemento con trattamento acustico $R_{ref,with}$ può essere determinato come:

$$R_{ref,with} = R_{ref,without} + \Delta R \text{ [dB]}$$

■ $\Delta R_{w,direct}$: calcolato come differenza tra l'indice di valutazione di un data partizione con e senza il trattamento acustico.

$$\Delta R_{w,direct} = R_{w,with} - R_{w,without} \text{ [dB]}$$

L'indice di valutazione calcolato in modo diretto, senza generalizzazione attraverso una curva di riferimento per il potere fonoisolante dell'elemento di base, dovrebbe essere utilizzato a fini comparativi, su elementi analoghi, per tecnologia costruttiva e materiali, all'elemento di base.

L'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio dei solai, in accordo alla norma UNI EN ISO 717-2 [12], viene calcolato considerando gli spettri normalizzati del livello di rumore impattivo sui solai di riferimento, definiti all'appendice C della norma UNI EN ISO 10140-5 [7], e ripresi dalla norma UNI EN ISO 717-2 [12]. Nel caso la struttura di base sia un solaio pesante predefinito, costituito da una soletta omogenea in calcestruzzo, l'indice di valutazione risulta $L_{n,r,0,w} = 78$ dB ($C_{l,r,0} = -11$ dB). L'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio è calcolato come:

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,w} = 78 - L_{n,w} \text{ [dB]}$$

dove gli indici di valutazione $L_{n,r,0,w}$ e $L_{n,w}$ sono calcolati rispettivamente dal livello di pressione sonora di calpestio del solaio di riferimento $L_{n,r,0}$ e dal livello di pressione sonora di calpestio del solaio di riferimento con rivestimento $L_{n,w}$, entrambi normalizzati rispetto all'assorbimento acustico dell'ambiente ricevente. Nel caso di solaio di base leggero, l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di riferimento è pari a $L_{n,t,r,0,w} = 72$ dB ($C_{l,r,0} = 0$ dB), per le tipologie C1 e C2 e $L_{n,t,r,0,w} = 75$ dB ($C_{l,r,0} = -3$ dB) per la tipologia C3 (la lettera t nel pedice indica la struttura leggera e deriva dall'inglese timber "legno"). L'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio è calcolato in modo analogo a quanto visto per solaio massivi:

$$\Delta L_{t,w} = L_{n,t,r,0,w} - L_{n,w} \text{ [dB]}$$

Per potere ottenere dei valori di attenuazione del livello di calpestio su solai leggeri confrontabili tra diversi laboratori e utili per il calcolo previsionale del livello di rumore impattivo normalizzato, è necessario riportare nel pedice l'indicazione sulla struttura di riferimento utilizzata per la misurazione: $\Delta L_{t,1,w}$ se calcolato con solaio di base C1, $\Delta L_{t,2,w}$ se calcolato con solaio di base C2 e $\Delta L_{t,3,w}$ se calcolato con solaio di base C3.

2.8.4 - Termini di adattamento spettrale per l'isolamento al rumore aereo

L'utilizzo degli indici di valutazione (singolo numero) determina una perdita di informazione rispetto ai dati in frequenza. Il metodo utilizzato, inoltre, fa sì che il risultato finale sia particolarmente influenzato da quelle bande in cui si ha una grossa differenza tra curva sperimentale e curva di riferimento e soltanto nel caso sfavorevole. Valori molto alti di isolamento in alcune bande di frequenza possono essere del tutto ininfluenti ai fini del calcolo dell'indice di valutazione. Valori molto bassi su una singola banda, invece, possono influenzare fortemente l'indice di valutazione. L'utilizzo dei termini di adattamento spettrale, previsto dalla normativa UNI EN ISO 717-1 [11] all'appendice A, tende a compensare parzialmente questa perdita di informazione e permette di confrontare meglio i risultati di misurazione senza utilizzare i dati di frequenza. L'uso dei termini di adattamento dello spettro (C , C_{tr}) è stato introdotto per correggere il valore dell'indice di valutazione quando il divisorio si riferisce a situazioni pratiche in cui è prevista una sorgente di rumore riconducibile al rumore rosa (C) o al rumore da traffico (C_{tr}). Il termine di adattamento allo spettro C è calcolato nel modo seguente:

$$C = X_{A,1} - X_w \text{ [dB]}$$

dove $X_{A,1}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore rosa, X_w è l'indice di valutazione tradizionale.

Il termine di adattamento allo spettro C_{tr} è calcolato nel modo seguente:

$$C_{tr} = X_{A,2} - X_w \text{ [dB]}$$

dove $X_{A,2}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore da traffico, X_w è l'indice di valutazione tradizionale. Gli spettri del rumore rosa e del rumore da traffico, con cui calcolare i coefficienti di adattamento spettrale, sono forniti dalla norma in bande di terzi di ottava e di ottava. Gli spettri sono pesati A e il livello globale è normalizzato a 0 dB.

Nell'appendice A al punto 3 vengono indicate le applicazioni dei termini di adattamento spettrale per altri tipi di rumore. Il termine C , calcolato con lo spettro del rumore rosa, può essere utilizzato per attività umane, traffico ferroviario e autostradale a velocità medie o alte e per altre sorgenti che emettono rumore principalmente a frequenze medie e alte. Il termine C_{tr} , calcolato con lo spettro del rumore da traffico, può essere utilizzato per traffico stradale urbano, traffico ferroviario a bassa velocità e altre sorgenti che emettono rumore principalmente a frequenze basse e medie.

Quando le misurazioni sono eseguite in un intervallo di frequenze più esteso (es. 50 Hz-5000 Hz) è possibile calcolare i coefficienti di adattamento spettrale considerando l'intero range di misura e indicandolo nel pedice del coefficiente. In particolare, l'appendice B della norma UNI EN ISO 717-1 [11] riporta i coefficienti di adattamento spettrale per l'isolamento acustico per via aerea $C_{50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{100-5000}$ e $C_{tr,50-3150}$, $C_{tr,50-5000}$, $C_{tr,100-5000}$, con i relativi spettri di rumore pesati A , in banda di terzi di ottava e di ottava, con cui è possibile calcolarli come descritto nei paragrafi precedenti. Anche in questo caso, il livello globale degli spettri è normalizzato a 0 dB.

2.8.5 - Termini di adattamento spettrale per il livello di rumore di calpestio

Anche per il livello di rumore di calpestio, l'utilizzo degli indici di valutazione (singolo numero) determina una perdita di informazione rispetto ai dati in frequenza. L'utilizzo dell'indice di valutazione del rumore di calpestio $L_{n,w}$ si è dimostrato molto appropriato per i solai dotati di rivestimento resiliente o pavimento galleggiante. Tuttavia, non penalizza adeguatamente quei solai con forti componenti alle basse frequenze, come quelli con struttura in legno o quelli per i quali la risonanza del pavimento galleggiante determina un incremento del livello sonoro a bassa frequenza. Nel calcolo dell'indice di valutazione sono determinanti gli scostamenti sfavorevoli, tra lo spettro misurato e la curva di riferimento, alle alte frequenze, dal momento che in questo range di frequenza lo spettro di riferimento assume valori molto bassi.

In questi casi, con strutture come per esempio i solai grezzi, la curva di riferimento penalizza fortemente il risultato prestazionale in termini di indice di valutazione. Per dare la possibilità di tenere conto di tali effetti è stato introdotto un termine di adattamento dello spettro per il rumore di calpestio che fornisce valori penalizzanti (positivi) per elevate componenti a bassa frequenza mentre fornisce correzioni favorevoli (valori negativi) nel caso di elevate componenti ad alta frequenza. La definizione e le modalità d'uso del termine di adattamento C_f per il livello di rumore di calpestio sono riportate nell'appendice A della norma UNI EN ISO 717-2 [12].

Il termine di adattamento allo spettro C_f con riferimento ad esempio al livello normalizzato di rumore di calpestio, è calcolato nel modo seguente:

$$C_f = L_{n,sum} - L_{n,w} \text{ [dB]}$$

dove $L_{n,sum}$ è la somma su base energetica dei valori misurati del livello normalizzato di rumore di calpestio L_i nelle k bande di frequenza nell'intervallo tra 100 e 2500 Hz: $L_{n,sum} = 10 \log \sum_{i=1}^k 10^{L_i/10}$. Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente per l'isolamento aereo, è possibile calcolare il coefficiente di adattamento spettrale per il rumore da calpestio in un intervallo di frequenze più esteso, da 50 Hz a 2500 Hz, riportando tale indicazione nel pedice: $C_{f,50-2500}$ (o $C_{f,63-2000}$ nel caso in cui il calcolo sia eseguito in bande di ottava).

2.9 - Bibliografia

2.9.1 - Riferimenti legislativi

- [1] Legge quadro sull'inquinamento acustico n° 447 del 26 ottobre 1995, pubblicata sulla G.U. n°254 del 30-10-95.
- [2] D.P.C.M. del 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" pubblicato sulla G.U. n°297 del 22-12-97.
- [3] D.P.C.M. del 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" pubblicato sulla G.U. n°280 del 1-12-97.

2.9.2 - Riferimenti normativi

- [4] UNI EN ISO 10140-1:2021; Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Regole di applicazione per prodotti particolari.
- [5] UNI EN ISO 10140-2:2021; Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Misurazione dell'isolamento acustico per via aerea.
- [6] UNI EN ISO 10140-3:2021; Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Misurazione dell'isolamento del rumore da calpestio.
- [7] UNI EN ISO 10140-5:2021; Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 5: Requisiti per le apparecchiature e le strutture di prova.
- [8] UNI EN ISO 16283-1:2018; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.
- [9] UNI EN ISO 16283-2:2020; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore da calpestio.
- [10] UNI EN ISO 16283-3:2016; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Isolamento acustico di facciata.
- [11] UNI EN ISO 717-1:2021; Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.
- [12] UNI EN ISO 717-2:2021; Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio.
- [13] UNI EN ISO 12354-1:2017; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.
- [14] UNI EN ISO 15186-1:2003; Acustica - Misurazione mediante intensità sonora dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazione in laboratorio.
- [15] UNI EN 29052-1:1993; Determinazione della rigidità dinamica; materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.
- [16] UNI EN ISO 9053-1:2019; Acustica - Determinazione della resistenza del flusso d'aria - Parte 1: Metodo del flusso d'aria statico.

- [17] UNI EN ISO 9053-2:2020; Acustica - Determinazione della resistenza del flusso d'aria - Parte 2: Metodo del flusso d'aria alternato.
- [18] UNI EN 12431:2013; Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore degli isolanti per pavimenti galleggianti.
- [19] UNI EN 13162:2015; Isolanti termici per edilizia - Prodotti di lana minerale (MW) ottenuti in fabbrica – Specificazione.
- [20] UNI EN 1991-1-1:2004; Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-1: Azioni in generale - Pesì per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici.
- [21] UNI EN 1606:2013; Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione.

2.9.3 - Riferimenti scientifici

- [21] L.L.Beranek, Noise and vibration control, Mac Graw Hill-New York (1971).
- [22] L. Cremer, M. Heckl, E. Ungar, Structure-Borne Sound. Springer-Verlag-Berlin- Heidelberg New York (1973).
- [23] F. Fahy, Foundation of Engineering Acoustics, Academic Press (2001).
- [24] R. Spagnolo, a cura di, Manuale di Acustica, UTET (2001).
- [25] C. Hopkins, Sound Insulation, Elsevier, 2007.
- [26] T. E. Vigran, Building acoustics, CRC Press, 2014.
- [27] J.H. Rindel, Sound Insulation in Buildings, CRC Press, 2017.
- [28] P. Fausti, N. Baron, P. Bonfiglio, "La rigidità dinamica dei materiali usati per l'isolamento del rumore da calpestio: confronto tra differenti metodiche di misura", Rivista Italiana di Acustica, Volume 28, n, 3-4, pp. 89-94, 2004.
- [29] F. Pompoli, P. Bonfiglio, Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta, Atti del 34° Convegno AIA, Firenze 13-15 Giugno 2007.
- [30] S. Ljunggren, "Airborne Sound insulation of thick walls." J. Acoustical Soc. Am. 89, (1991).
- [31] B.H. Sharp, "Prediction methods for Sound Transmissions Loss of Masonry Constructions." Noise Control Eng. 11 (1978).
- [32] C. Hopkins, "Rain noise from glazed and lightweight roofing." IP 2/06 BRE (Building Research Establishment) Information Paper, (2006).



A person wearing a light blue and white striped shirt is looking at a document on a desk. The document contains various charts and graphs, including a bar chart at the top left, a pie chart in the middle left, and a line graph at the bottom right. The person's hands are visible, resting on the document. A white rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing the title and authors' names. A solid red square is positioned above the title text.

Modelli di calcolo elementi edilizi

A cura di Patrizio Fausti, Paolo Bonfiglio,
Andrea Santoni e Riccardo Gandolfi

3. Modelli di calcolo elementi edilizi

3.1 - Premessa

Il D.P.C.M. 5/12/1997 stabilisce che i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti siano garantiti in opera. Le prestazioni acustiche in opera sono influenzate, oltre che dalle proprietà dei divisori e dei materiali, anche dalle condizioni al contorno in cui la struttura viene installata e dalle modalità di posa. La valutazione previsionale in opera delle prestazioni acustiche degli edifici può essere eseguita in accordo ai modelli descritti nella serie di norme UNI EN ISO 12354, composta di 4 parti: Parte 1 - isolamento acustico aereo tra ambienti [2]; Parte 2 – isolamento acustico del rumore di calpestio [3]; Parte 3 - isolamento acustico delle facciate [4]; Parte 4 – trasmissione del rumore dall'interno all'esterno dell'edificio [5]. Queste quattro parti della serie UNI EN ISO 12354, insieme alla norma UNI EN 12354-5 [6], relativa alla valutazione previsionale del rumore generato dagli impianti e attualmente in fase di revisione, forniscono modelli di calcolo delle prestazioni acustiche degli edifici, in funzione delle caratteristiche prestazionali dei singoli elementi. I modelli UNI EN ISO 12354 permettono il calcolo dei descrittori acustici in opera in banda di terzi di ottava, partendo dalle proprietà dei singoli componenti edilizi e tecnologici. Dai risultati dei calcoli in frequenza è poi possibile determinare gli indici di valutazione. L'applicazione dei modelli UNI EN ISO 12354 necessita come dati di input dei valori di numerosi descrittori vibro-acustici, relativi alle prestazioni dei componenti edilizi, ottenuti da misurazioni di laboratorio o, in alternativa, determinati per mezzo di modelli di calcolo teorici di propagazione e trasmissione sonora. È possibile calcolare accuratamente le prestazioni acustiche di tali strutture utilizzando, per esempio, metodi di calcolo semi-analitici o numerici. L'applicazione di questi metodi richiede la conoscenza di dati di input affidabili, relativi alla caratterizzazione delle proprietà elastiche e acustiche dei materiali considerati. Una trattazione specifica sull'utilizzo di questi metodi di calcolo esula dagli obiettivi di questo manuale, ma, quando possibile, nel capitolo sono introdotte formulazioni semplificate per il calcolo degli indici di valutazione di specifiche partizioni. Tuttavia, tali formulazioni semplificate, spesso derivate da correlazioni semi-empiriche, hanno validità e affidabilità limitata poiché considerano come unico parametro la massa superficiale dell'elemento; pertanto, questi modelli empirici vanno utilizzati solo per stime approssimate consci delle loro limitazioni. Per quanto riguarda, invece, il software e i codici di calcolo appositamente implementati, l'affidabilità e l'accuratezza è certamente maggiore ma, per essere utilizzati in maniera efficace, richiedono comunque esperienza e conoscenza di dati non sempre facilmente reperibili. Per quest'ultimo ambito, i principali modelli applicabili al calcolo delle prestazioni di isolamento acustico dei componenti edilizi sono raccolti in un articolo di review recentemente pubblicato [18]. Negli ultimi paragrafi di questo capitolo sarà poi analizzato il contributo delle trasmissioni laterali, che influenzano significativamente il livello prestazionale in opera, così come descritto nelle serie di norme UNI EN ISO 12354.

3.2 - Comportamento dei diversi tipi di pareti nei confronti dell'isolamento acustico

3.2.1 - Pareti pesanti monostrato

Le pareti massive o pesanti monostrato sono realizzate generalmente con blocchi di laterizio, blocchi di calcestruzzo o di argilla espansa. I blocchi possono essere di diverso spessore e diversa geometria, con una diversa percentuale di foratura che può essere verticale o orizzontale. I blocchi sono generalmente fissati sia in orizzontale che in verticale mediante uno strato di malta. I giunti verticali possono a volte essere realizzati mediante incastro senza l'utilizzo della malta. Le pareti sono generalmente intonacate da entrambi i lati. In alcuni casi vengono utilizzati blocchi faccia a vista per pareti esterne. Alcune tipologie presentano grosse forature riempite di malta. Le strutture realizzate con blocchi di laterizio o argilla espansa possono essere portanti o utilizzate solo come tamponamento. Esempi di queste tipologie di pareti sono riportati in figura 3.1 e figura 3.2.

Per i divisori in muratura comunemente utilizzati in edilizia, date le masse e gli spessori in gioco, i valori tipici della frequenza critica sono nell'ordine di 150-250 Hz. Per questi materiali la previsione delle prestazioni acustiche al variare della frequenza è molto incerta poiché non si riesce a tenere conto in maniera affidabile delle diverse proprietà dei materiali, della geometria e tipologie e delle tecniche costruttive. Anche in questo caso le verifiche previsionali vengono effettuate sulla base di dati sperimentali ottenuti in laboratorio. Dall'elaborazione di questi dati sono state proposte diverse leggi empiriche per la previsione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante. Queste formulazioni, che considerano come unico parametro la massa superficiale della partizione (m' , espressa in kg/m^2), sono di immediato utilizzo, ma forniscono risultati affetti da un'incertezza significativa e devono pertanto essere utilizzate con cautela. Si riportano a titolo esemplificativo le formulazioni riportate nella norma UNI EN ISO 12354-1, in riferimento alle partizioni massive omogenee tipiche di alcuni paesi europei:

| | | |
|------------------------------|--|----|
| $m' \geq 150 \text{ kg/m}^2$ | $R_w = 37.5 \log \cdot m' - 42 \text{ [dB]}$ | |
| $m' \geq 80 \text{ kg/m}^2$ | $R_w = 20.0 \log \cdot m' \text{ [dB]}$ | I |
| $m' \geq 100 \text{ kg/m}^2$ | $R_w = 32.4 \log \cdot m' - 26 \text{ [dB]}$ | A |
| $m' \geq 150 \text{ kg/m}^2$ | $R_w = 40 \log \cdot m' - 45 \text{ [dB]}$ | F |
| $m' \geq 50 \text{ kg/m}^2$ | $R_w = 21.65 \log \cdot m' - 2.3 \pm 1 \text{ [dB]}$ | GB |

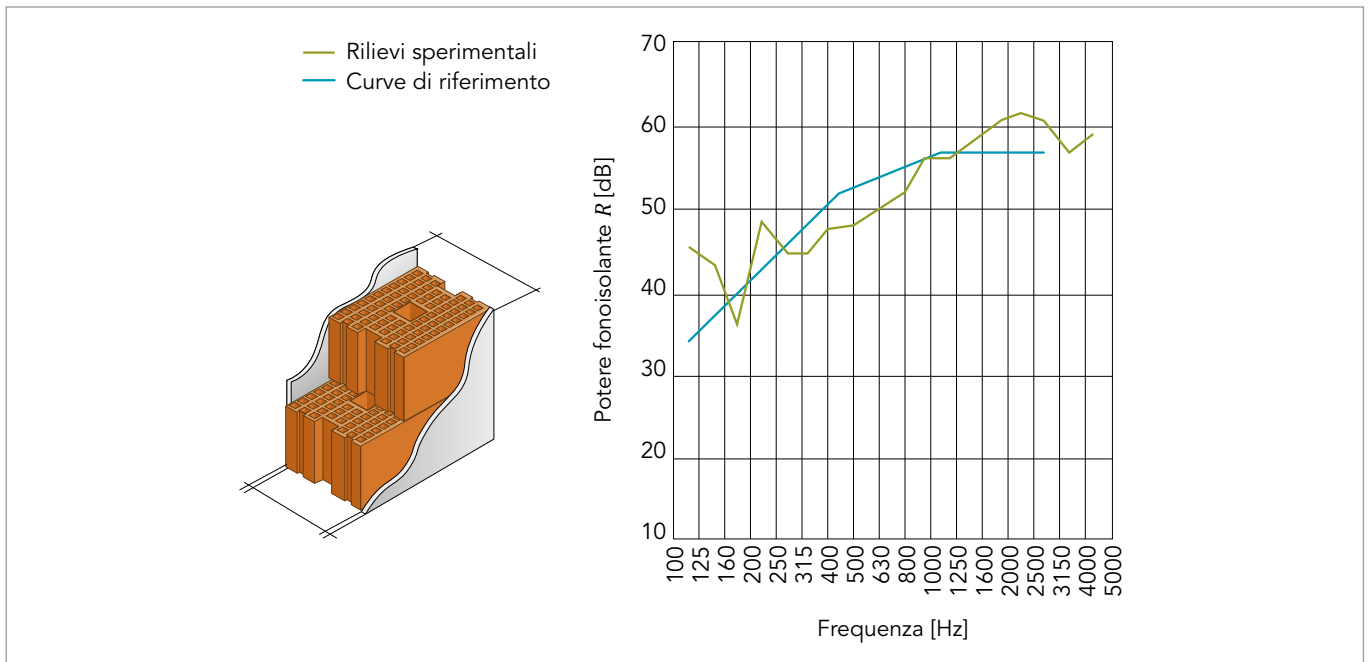


Figura 3.1: Parete realizzata con blocchi in laterizio ad H, alleggeriti in pasta, con fori riempiti di malta (25x30x19 cm); intonacata su entrambi i lati (spessore intonaco 1.5 cm); spessore complessivo 28 cm; massa superficiale circa 350 kg/m^2 ($R_w = 53-54 \text{ dB}$; $C=0, -2$; $C_v = -3, -5$).

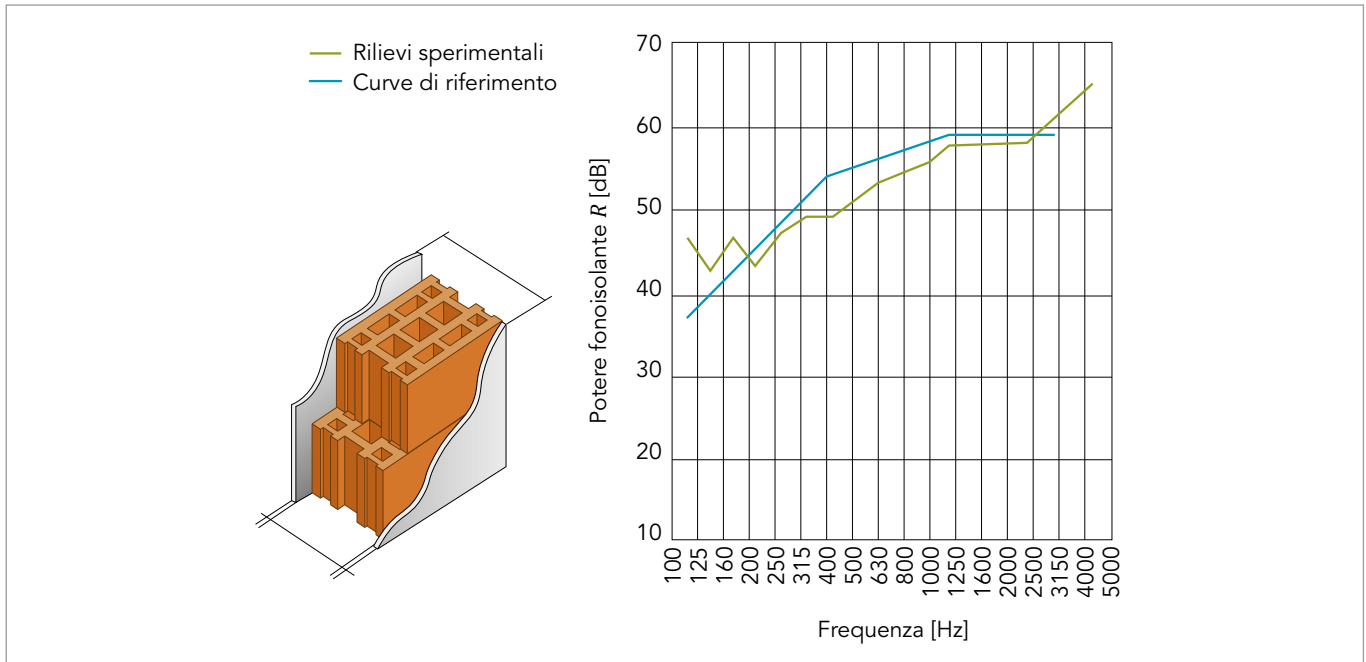


Figura 3.2: Parete realizzata con blocchi di calcestruzzo e argilla espansa (25x25x20 cm), massa volumica dell'impasto pari a 400 kg/m³; intonaco tradizionale spessore circa 1.5 cm da entrambi i lati; massa superficiale circa 350 kg/m²; ($R_w=55-56$ dB; $C=0$, -2; $C_{tr}=-3$, -5)

3.2.2 - Pareti leggere in lastre di gesso rivestite

Le pareti divisorie interne sono spesso realizzate con lastre di gesso rivestito, o cartongesso, installate su una struttura portante di montanti metallici. All'interno della cavità, delimitata dalle lastre montate sui due lati del telaio, è inserito solitamente un pannello di materiale fonoassorbente, di natura fibrosa o porosa. Nei casi pratici i valori del potere fonoisolante sono influenzati dal tipo e forma dei telai utilizzati, dallo spessore e dal grado di riempimento della cavità, dal tipo di materiale fonoassorbente impegnato e dalle modalità di posa in opera. In figura 3.3 sono illustrate alcune tipiche tipologie di pareti leggere realizzate con singola o doppia lastra di cartongesso per ciascun lato della struttura metallica, con unica struttura o due strutture indipendenti. Le tipologie di pareti leggere possono essere anche molto più complesse e articolate, con più ossature portanti e lastre anche all'interno. Con queste tipologie di pareti interne è possibile ottenere dei valori dell'indice di valutazione elevati con delle masse relativamente piccole. La massa non supera solitamente il valore di 70-80 kg/m². La frequenza di risonanza del sistema, funzione della massa superficiale delle due facce dalla partizione e dello spessore della cavità, viene generalmente definita frequenza massa-molla-massa e può essere calcolata come:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0.111}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ [Hz]}$$

Per frequenze inferiori alla risonanza massa-molla-massa i valori del potere fonoisolante risultano solitamente piuttosto contenuti. La frequenza di risonanza massa-molla-massa determina un diverso comportamento del sistema, come spiegato nel capitolo precedente. Al di sopra di tale risonanza, infatti, al variare della frequenza, il potere fonoisolante di questa tipologia di pareti cresce con una pendenza molto ripida rispetto a quello che avrebbe una parete omogenea con la stessa massa superficiale. La riduzione del potere fonoisolante tra le bande di frequenza centrate su 2000 Hz e 4000 Hz, riportata nei grafici in figura 3.4, è causata dal fenomeno di coincidenza: in questo intervallo di frequenze infatti si manifesta un incremento di trasmissione sonora dal momento che le onde flessionali si propagano nella partizione con una velocità circa uguale a, o maggiore di quella delle onde acustiche nell'aria. Per un pannello omogeneo e isotropo con massa superficiale m' , il cui

spessore h è molto maggiore della lunghezza dell'onda flessionale, è possibile stimare la frequenza critica come:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12m'(1-\nu^2)}{Eh^3}} \text{ [Hz]}$$

dove E e ν sono rispettivamente il modulo elastico e il coefficiente di Poisson del pannello. A differenza delle partizioni massive, i pannelli in cartongesso hanno valori della frequenza critica nell'ordine di 2500-3150 Hz.

Le caratteristiche costruttive delle pareti leggere rendono i risultati acustici particolarmente sensibili a fattori geometrici e costruttivi, come ad esempio il montaggio, le caratteristiche del provino, le dimensioni e la forma dei laboratori e dell'apertura di prova, etc. Esistono modelli previsionali, di facile implementazione, sviluppati verso la fine degli anni '70 da Sharp [16] e successivamente estesi e implementati da altri autori [17], che permettono di stimare l'isolamento acustico di partizioni doppie in diversi range di frequenza. Esistono anche formule empiriche e semi-empiriche sviluppate per valutare l'indice di valutazione del potere fonoisolante di partizioni doppie. Tuttavia, tali formulazioni non sono state incluse nella serie di norme UNI EN ISO 12354. Di seguito si riportano quelle proposte dall'IEN ex-Galileo Ferraris e dalla Norma DIN 4109:

| | | |
|--|--|-------------|
| Singola struttura - Figura 3 a) | $R_w = 20 \log \cdot m' + 20 \log \cdot d + e - 6$ [dB] | Fonte (IEN) |
| Singola struttura - Figura 3 a) | $R_w = 20 \log \cdot m' + 10 \log \cdot d + e - 6$ [dB] | Fonte (IEN) |
| Doppia struttura - Figura 3 b) | $R_w = 20 \log \cdot m' + 10 \log \cdot d + e - 12$ [dB] | Fonte (DIN) |

Queste formulazioni empiriche sono valide per pareti con massa superficiale totale $m' < 70-80 \text{ kg/m}^2$, con spessore dell'intercapedine $d < 25-30 \text{ cm}$. Il parametro e rappresenta lo spessore del materiale fonoassorbente, espresso in cm. Infine, si evidenzia che i sistemi costituiti da un unico telaio sui cui lati sono installati pannelli della parete, oltre alla trasmissione sonora per via aerea, direttamente attraverso i diversi strati della partizione, c'è un contributo di trasmissione per via strutturale a causa del collegamento meccanico tra le due facce del divisorio. È importante considerare il contributo di trasmissione attraverso le connessioni strutturali, in quanto comporta una riduzione significativa del potere fonoisolante del divisorio [22].

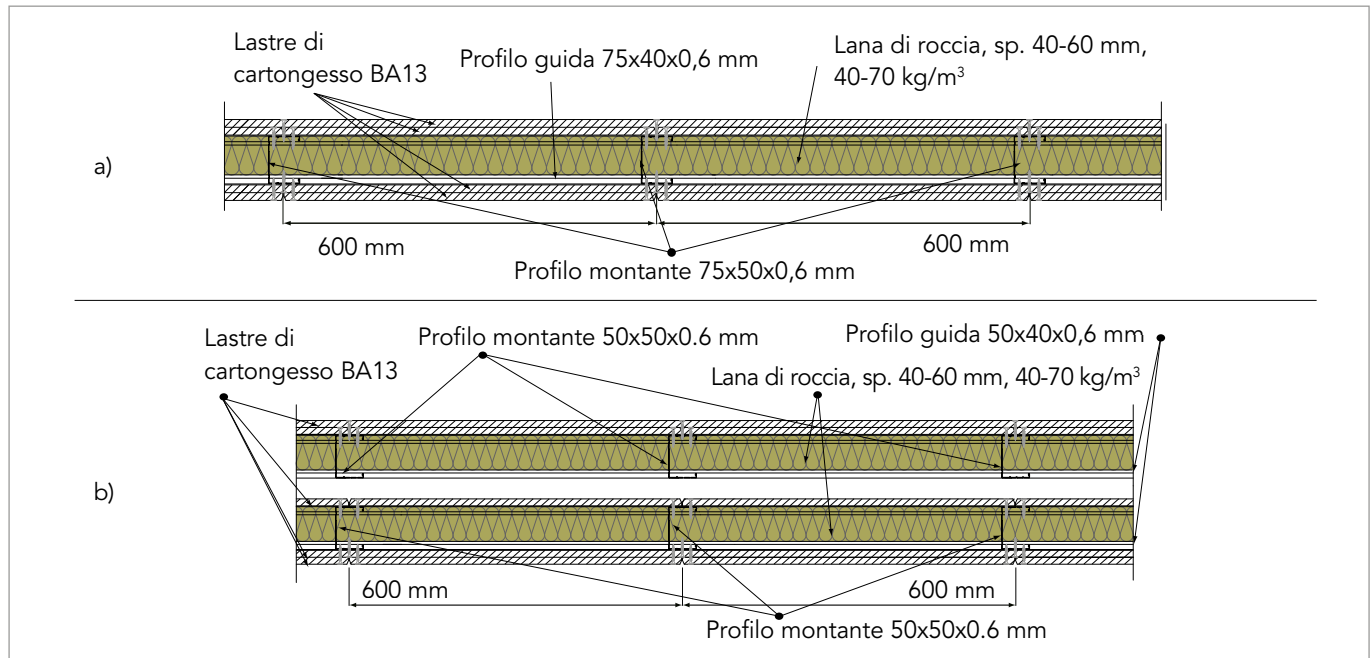


Figura 3.3: Schema di una parete leggera in cartongesso su telaio metallico: a) singola struttura, doppia lastra per ogni lato e pannelli in lana di roccia; b) struttura a doppio, doppia lastra per ogni lato e pannelli in lana di roccia.

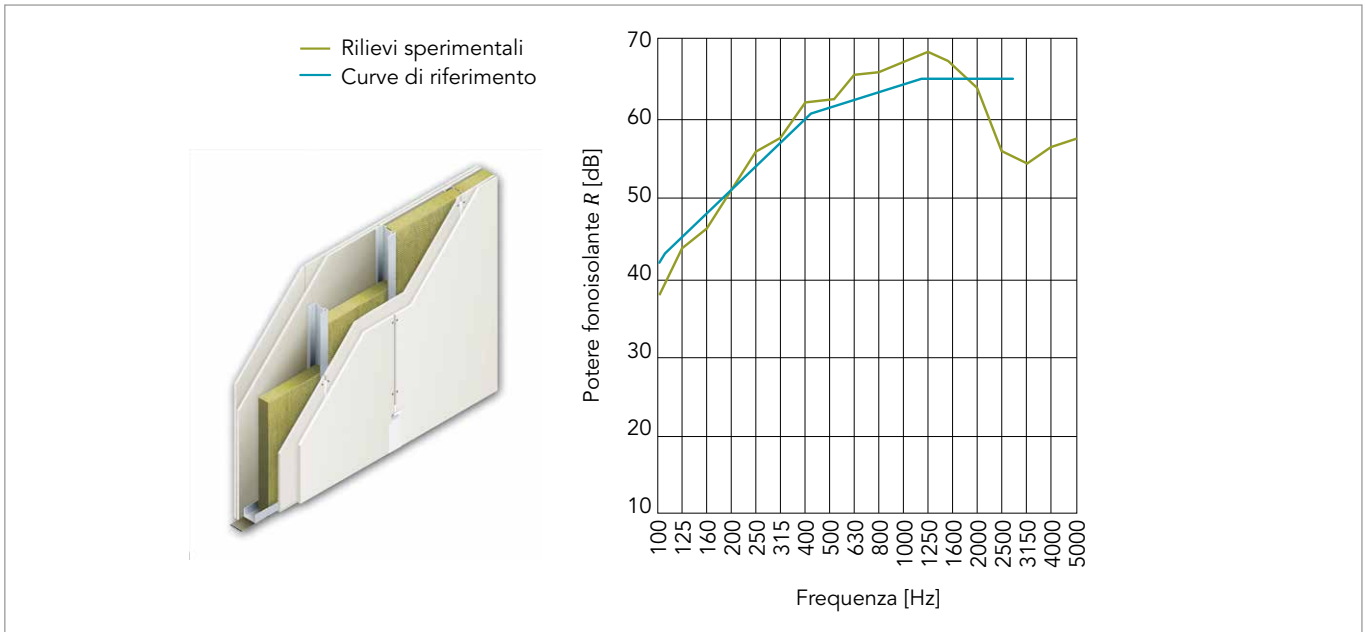


Figura 3.4a: Andamento del potere fonoisolante di una parete leggera in cartongesso: a) a destra, singolo telaio, due lastre per ciascun lato e pannelli in lana di roccia ($R_w = 52-55$ dB; $C = -2, -4$; $C_{tr} = -6, -8$); b) a sinistra, struttura a doppio telaio, doppia lastra per ogni lato e pannelli in lana di roccia ($R_w = 58-61$ dB; $C = -2, -4$; $C_{tr} = -6, -8$).

In figura 3.4a e 3.4b viene riportato a titolo esemplificativo il potere fonoisolante misurato in laboratorio su due partizioni analoghe a quelle schematizzate in figura 3.3.

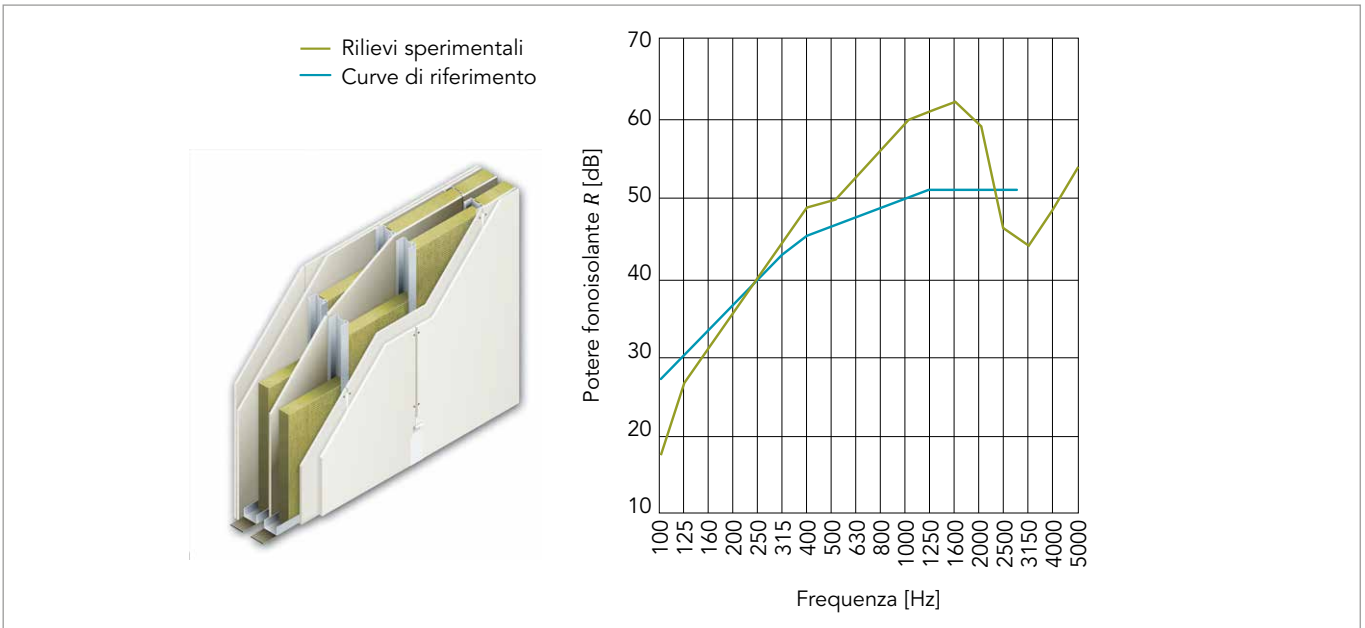


Figura 3.4b: Schema di una parete leggera in cartongesso su telaio metallico: a) singola struttura, doppia lastra per ogni lato e pannelli in lana di roccia; b) struttura a doppio, doppia lastra per ogni lato e pannelli in lana di roccia.

3.2.3 - Pareti pesanti multistrato

Le pareti pesanti multistrato vengono realizzate generalmente in laterizio ed in piccola parte in calcestruzzo e argilla espansa. Dal punto di vista delle prestazioni acustiche si ha il vantaggio di avere buoni risultati con delle masse relativamente contenute. L'ottimizzazione delle prestazioni acustiche ottenibile con una intercapedine di elevate dimensioni contrasta con l'esigenza di contenere al minimo lo spessore complessivo delle pareti.

Le tipologie di pareti doppie tradizionalmente utilizzate nell'edilizia italiana sono le seguenti:

- parete doppia realizzata con uno strato in tramezze normali 25x25x8, intonacato con 1.5 cm di malta tradizionale sul lato esterno, intercapedine di 8-12 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60 kg/m³, secondo strato in tramezze normali 25x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in tramezze normali 25x25x12, intonacato con 1.5 cm di malta tradizionale sul lato esterno, intercapedine di 4-6 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60 kg/m³, secondo strato in tramezze normali 25x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in bimattoni semipieni 12x25x12 intonacato con 1.5 cm di malta sul lato esterno; intercapedine di 6 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60 kg/m³, secondo strato in bimattoni semipieni 12x25x12 con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno;
- parete doppia realizzata con uno strato in laterizio alleggerito in pasta semipieno, spessore da 8 a 20 cm, intonacato con 1.5 cm di malta sul lato esterno; intercapedine con spessore da 2 a 8 cm, con o senza riempimento di 4-6 cm di lana minerale di densità 40-60 kg/m³; secondo strato in tramezze semipiene in laterizio alleggerito in pasta 45x25x8, con 1.5 cm di intonacato sul lato esterno. Un esempio di tale tipologia di partizione è riportato in figura 3.5.

Nei primi anni duemila, l'esigenza di garantire in opera adeguati valori del potere fonoisolante tra unità immobiliari distinte, ha spinto diversi produttori a effettuare sperimentazione alla ricerca delle migliori soluzioni che garantiscono adeguate prestazioni acustiche mantenendo contenuti il costo e lo spessore. Nonostante negli anni successivi la ricerca in questo ambito si sia arrestata, anche a causa della crisi economica, è stato possibile ridefinire alcune regole del buon costruire: come l'idoneo riempimento con malta sia dei giunti orizzontali che verticali, l'introduzione dell'intonaco anche sul lato interno della prima parete, l'ottimizzazione della geometria e degli impasti dei blocchi e la scelta dei materiali da inserire nell'intercapedine con adeguate proprietà acustiche. Questi accorgimenti permettono di ottenere un miglioramento di diversi decibel sul valore dell'indice di valutazione, rispetto a soluzioni simili in cui tali dettagli vengono trascurati.

Anche per le pareti doppie si è visto che miglioramenti si possono ottenere aumentando la massa dei singoli strati piuttosto che il loro spessore. L'aumento di spessore favorisce infatti la trasmissione dell'energia agli elementi strutturali laterali. Se per le pareti monostrato e le pareti doppie leggere le formule empiriche per la stima dell'indice di valutazione del potere fonoisolante forniscono stime approssimate con incertezza significativa, le formulazioni sviluppate per le pareti doppie pesanti hanno validità ancora più limitata e un grado di incertezza maggiore. I fattori che possono influenzare il valore della prestazione acustica, come visto precedentemente, dipendono dalle caratteristiche delle singole pareti, dalla presenza dell'intonaco anche su un lato interno, dalla loro distanza, dalla presenza di materiale fonoassorbente all'interno della cavità. Quando la dimensione della cavità è inferiore a 5 cm ed in assenza di materiale fonoassorbente e di intonaco su una delle pareti interne, le due pareti risultano praticamente accoppiate nell'intero intervallo di frequenze. Ne consegue che il potere fonoisolante presenta un andamento che nella maggior parte dei casi è simile a quello di una parete semplice di massa superficiale pari alla somma delle singole masse superficiali delle due pareti. Per determinare l'indice di valutazione del potere fonoisolante di questa tipologia di pareti non sono previste formulazioni semplificate nella norma UNI EN ISO 12354-1. È possibile trovare in diversi riferimenti bibliografici formulazioni empiriche di facile utilizzo per la stima dell'indice di valutazione [23][24]:

$$R_w = 20 \log m' \text{ [dB]}$$

Questa espressione può essere considerata quella più cautelativa utilizzabile per le pareti doppie, almeno in assenza di particolari difetti di costruzione. Altre relazioni semplificate permettono di considerare l'effetto della dimensione della cavità d , espressa in cm, nella stima dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w , come ad esempio la seguente:

$$R_w = 20 \log m' + 20 \log d - 10 \text{ [dB]}$$

Ancora una volta, si evidenzia l'estrema cautela con cui devono essere utilizzate queste formulazioni, ottenute tramite correlazione di misurazioni sperimentali. I risultati ottenuti da queste ed altre formulazioni empiriche presentate in questo manuale, possono essere affetti da una significativa incertezza e dovrebbero pertanto essere impiegate solo per la stima approssimata della prestazione acustica fornita dalla partizione.

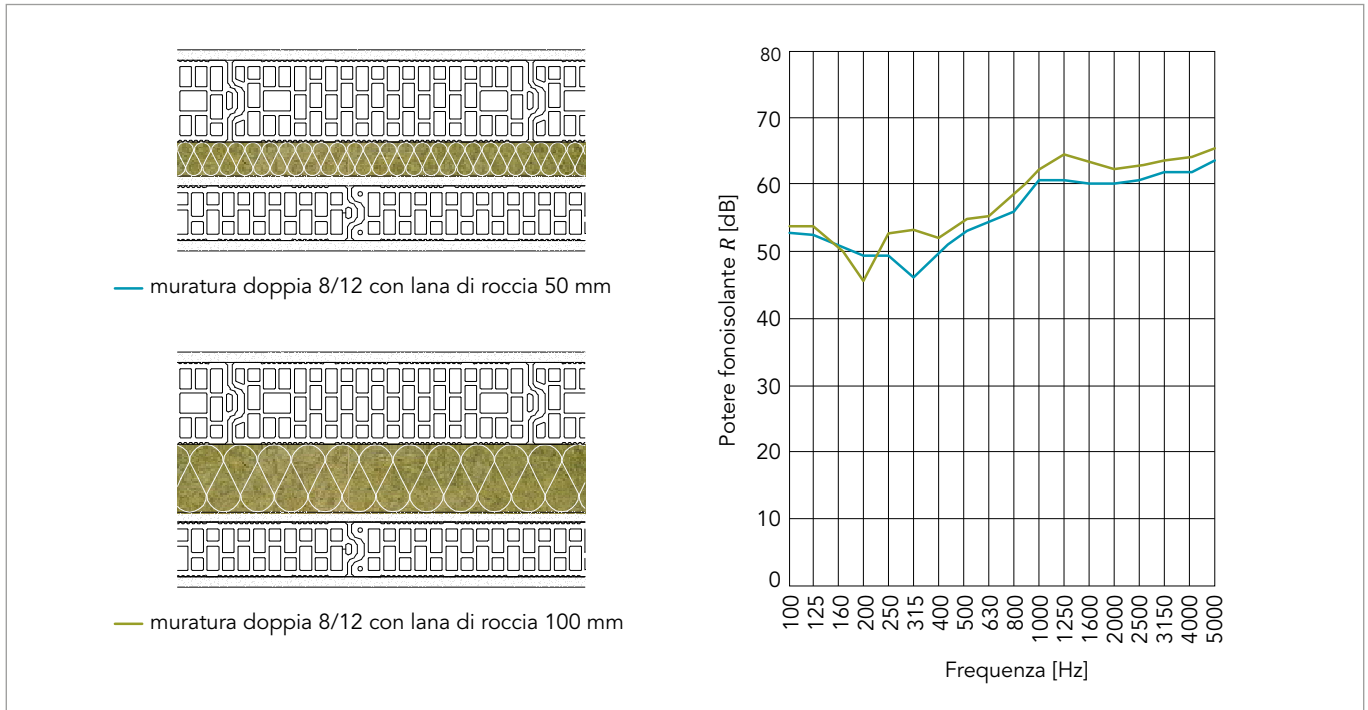


Figura 3.5: Potere fonoisolante sperimentale di una parete doppia realizzata con due tramezze di spessore 8 e 12 cm in laterizio alleggerito in pasta a fori verticali di cui una intonacata da entrambi i lati e l'altra intonacata solo sul lato esterno (intonaco tradizionale a base di malta cementizia spessore 15 mm); intercapedine di 5-10 cm; strato di lana di roccia spessore 50-100 mm, densità 70 kg/m³; ($R_w=57-59$ dB; $C=-1, -2$; $C_w=-3$).

3.2.4 - Strati aggiuntivi sulla parete di base

L'applicazione di uno o più strati aggiuntivi su una parete viene effettuato per aumentare le prestazioni acustiche di divisori esistenti e di pareti in nuove costruzioni. La variazione della prestazione di isolamento acustico determinata dall'applicazione di rivestimenti, analizzata nell'appendice D della norma UNI EN ISO 12354-1 [2], è quantificata con il parametro ΔR , che indica l'incremento (o riduzione) del potere fonoisolante in riferimento alla prestazione acustica dell'elemento di base. L'entità del miglioramento dipende essenzialmente dal potere fonoisolante della struttura di base, dalla frequenza di risonanza del sistema e dalle caratteristiche del supporto elastico del placcaggio. Pertanto, lo stesso placcaggio realizzato su strutture di base differenti potrebbe comportare un incremento del potere fonoisolante significativamente diverso. L'incremento del potere fonoisolante del divisorio su cui viene eseguito il placcaggio diminuisce all'aumentare della massa superficiale della struttura di base.

L'incremento del potere fonoisolante fornito dall'applicazione di strati aggiuntivi può essere misurato in laboratorio, come descritto nell'appendice G della norma UNI EN ISO 10140-1 [7] e i risultati sono espressi in funzione della struttura di base di riferimento: parete o solaio massivo (heavy); parete o solaio leggero (light); parete o solaio arbitrario. I risultati per partizioni di base massive possono essere utilizzati nel calcolo previsionale, per la trasmissione diretta di rumore per via area, per parete o solaio con massa superficiale pari almeno a 200 kg/m². Nel caso si voglia valutare l'incremento del potere fonoisolante di partizioni con caratteristiche diverse, si devono considerare pareti di base idonee. Attualmente non esistono metodi sperimentali standardizzati, o modelli affidabili e accurati in funzione dei risultati per la trasmissione diretta, per determinare l'incremento del potere fonoisolante per la trasmissione laterale, fornito da strati aggiuntivi. Per elementi massivi questo può essere in prima approssimazione considerato uguale all'incremento del potere fonoisolante per trasmissione diretta, nonostante ci possano essere differenze alle basse frequenze (inferiori alla frequenza critica del placcaggio), a causa della diversa eccitazione. In alternativa, l'incremento del potere fonoisolante riferito alla trasmissione laterale può essere determinato sperimentalmente nelle apposite camere di prova, in accordo con i metodi forniti dalla UNI EN ISO 10848 [8][9][10][11]. In questo caso l'incremento del potere fonoisolante per l'elemento coinvolto nella trasmissione laterale può essere determinato misurando la partizione con e senza il placcaggio. Perché i risultati siano comparabili con l'incremento del potere fonoisolante relativo alla trasmissione diretta, la norma raccomanda l'utilizzo di una struttura massiva omogenea come elemento di base, descritta nell'appendice G della norma UNI EN ISO 10140-1.

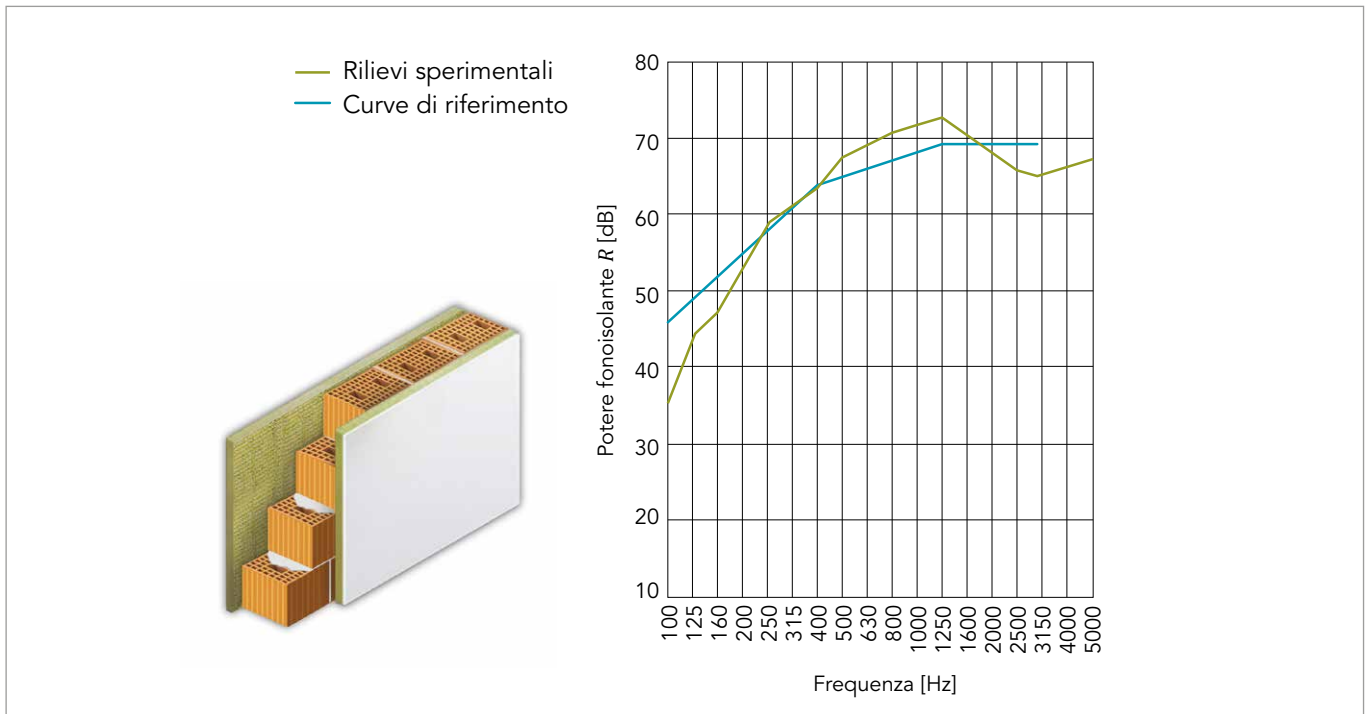


Figura 3.6: Potere fonoisolante sperimentale di una parete monostrato con placcaggio realizzata con blocchi semipieni di laterizio alleggerito in pasta, placcaggio da entrambi i lati con lana di roccia spessore 4-5 cm densità 70-90 kg/m³ preaccoppiata con lastre di cartongesso spessore 13 mm, fissaggio con malta adesiva ($R_w=64-66$ dB; $C=-3, -5$; $C_w=-9, -11$)

3.2.4.1 - Placcaggi

Il meccanismo che caratterizza l'isolamento delle pareti con placcaggio, rappresentato dall'applicazione di uno strato addizionale alla partizione di base mediante un supporto elastico, è diverso da quello delle pareti massive mono, o multistrato, in cui si osserva una proporzionalità diretta tra proprietà fonoisolanti e massa superficiale della parete stessa. Il miglioramento del potere fonoisolante complessivo di una parete con placcaggio è dovuto all'instaurarsi di meccanismi di risonanza nel sistema. Condizione essenziale per la sua efficacia è che il collegamento fra le due strutture avvenga con il minor numero possibile di punti rigidi. I sistemi placcanti vengono generalmente realizzati con lastre di cartongesso da 13 mm preincollate ad uno strato di materiale fibroso di spessore 4-8 cm, densità 70-90 kg/m³.

Esistono anche altre soluzioni, sviluppate appositamente per garantire migliori prestazioni acustiche, che impiegano lastre in gesso rivestito ad alta densità, o pannelli in cartongesso accoppiati a materiali viscoelastici ad elevata densità. L'utilizzo di una doppia lastra è sconsigliato nel caso dei placcaggi, in quanto richiederebbe necessariamente l'utilizzo di ancoraggi meccanici, irrigidendo il sistema e compromettendone l'efficacia. Risultati sperimentali hanno mostrato che, attraverso l'utilizzo di lastre speciali con densità maggiore, l'incremento del potere fonoisolante determinato dal solo aumento della massa superficiale comporta miglioramenti dell'ordine di 1-2 dB rispetto all'incremento ottenuto con un placcaggio a singola lastra. Viceversa, nel passaggio da un singolo placcaggio a un placcaggio su entrambi i lati della parete di base (doppio placcaggio, con singola lastra per lato) si può avere un incremento di R_w superiore a 10 dB.

L'applicazione di un placcaggio alla parete di base avviene generalmente per incollaggio mediante punti di malta adesiva. I giunti tra le varie lastre vengono stuccati con gesso. L'incremento di potere fonoisolante ottenibile con un sistema placcante realizzato con lastre di cartongesso può variare da 10 a 20 dB, anche in funzione della struttura di base su cui viene applicato. L'incremento ottenibile con un placcaggio è, infatti, tanto minore quanto maggiore è il potere fonoisolante della parete di base. L'incremento del potere fonoisolante ottenibile con la realizzazione di un placcaggio fissato direttamente sulla parete di base, senza l'utilizzo di telai o altre strutture, può essere stimato in funzione della frequenza di risonanza del sistema:

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

dove s' [MN/m³] è la rigidità dinamica dello strato intermedio isolante (determinata in accordo alla norma UNI EN 29052), m'_1 e m'_2 [kg/m²] corrispondono alla massa superficiale della parete di base e del rivestimento esterno. L'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di una parete con placcaggio può essere valutato in accordo al prospetto D.1 della norma UNI EN ISO 12354-1 [2]:

$$\Delta R_w = 74.4 - \frac{R_w}{2} - 20 \log f_0 \quad [\text{dB}]$$

ove R_w è l'indice di valutazione del potere fonoisolante della parete di base e f_0 è la frequenza di risonanza del sistema placcante. Questa relazione per la valutazione dell'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante è valida per valori della frequenza di risonanza, arrotondati alla frequenza di centro banda di terzi di ottava più prossima, compresi tra i 30 Hz e 160 Hz. Se la frequenza di risonanza f_0 ricade in una banda superiore a 160 Hz, il prospetto D.1 della norma indica un incremento del potere fonoisolante negativo, comportando quindi un peggioramento delle prestazioni acustiche della partizione conseguente all'applicazione di tale strato aggiuntivo.

3.2.4.2 - Contropareti leggere

Negli ultimi anni sono stati sperimentati anche altri tipi di contropareti che utilizzano meccanismi e materiali diversi. Ad esempio, si possono utilizzare sistemi autoportanti in orditura metallica realizzabili in totale disaccoppiamento dal divisorio di base, evitando il contributo della trasmissione sonora attraverso le connessioni meccaniche di ancoraggio. Una tipologia molto comune è quella di realizzare una controparte in lastre di cartongesso fissate ad un telaio portante con profili metallici o in legno. La cavità tra la struttura portante e la controparete viene riempita con materiale fonoassorbente, come per esempio pannelli in lana minerale. La struttura portante in lamiera piegata viene a volte realizzata con forme specifiche in grado di ottimizzare, in accoppiamento con il materiale fonoassorbente, lo smorzamento della struttura.

L'incremento del potere fonoisolante determinato da questo tipo di intervento è funzione della frequenza di risonanza del sistema, spesso definita frequenza *massa-molla-massa*. Nel caso di una controparete realizzata con un telaio metallico o ligneo, svincolato dalla parete di base, con intercapedine vuota o riempita con un materiale fonoassorbente con resistività al flusso $r \geq 5$ [kPa s/m²], elasticità uguale o inferiore a quella dell'aria, la frequenza di risonanza può essere calcolata come:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0.111}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} = 50 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [\text{Hz}]$$

dove m'_1 è la massa superficiale della parete di base, in kg/m²; m'_2 è la massa superficiale dello strato esterno della controparete, in kg/m² e d è lo spessore della cavità, espresso in m. Va evidenziato che questa equazione non è applicabile nel caso siano utilizzati materiali plastici a cella chiusa. Analogamente a quanto illustrato per i placcaggi, l'indice di valutazione dell'incremento del potere fonoisolante di una controparete può essere valutato in accordo al prospetto D.1 della norma UNI EN ISO 12354-1 [2]:

$$\Delta R_w = 74.4 - \frac{R_w}{2} - 20 \log f_0 \quad [\text{dB}]$$

Le condizioni di validità di tale relazione sono le medesime già illustrate nel precedente paragrafo. Il grafico riportato in figura 3.7 mostra l'andamento dell'indice di valutazione dell'incremento del potere fonoisolante di una controparete o di un placcaggio, al variare della prestazione acustica dell'elemento di base R_w , e della frequenza di risonanza del sistema f_0 , calcolato in accordo a quanto riportato nell'Appendice D della norma UNI EN ISO 12354-1 [2].

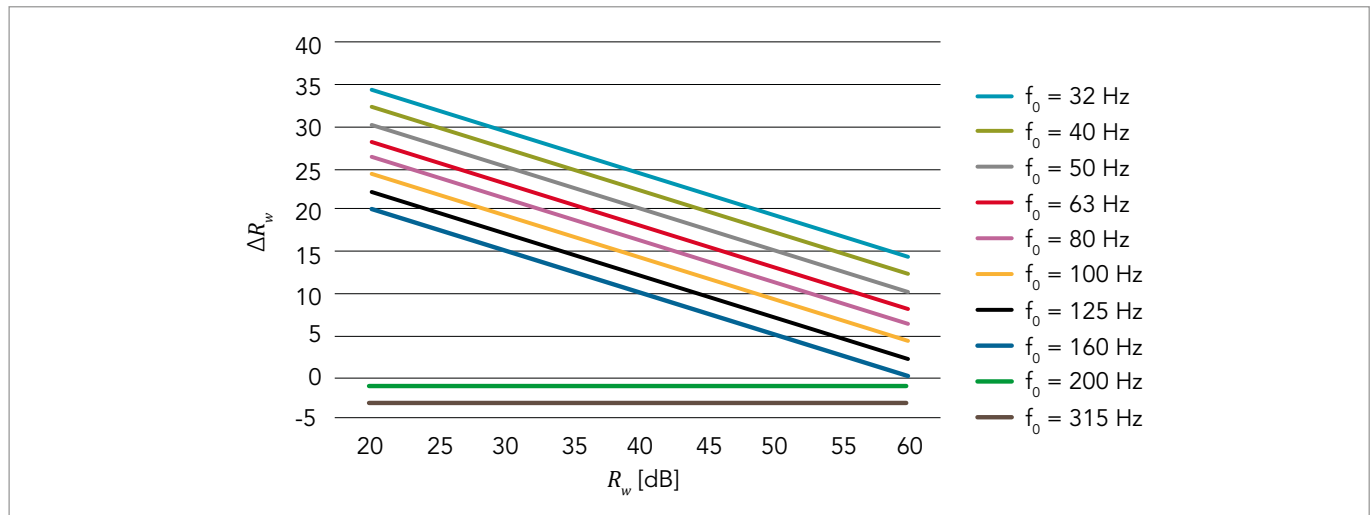


Figura 3.7: Indice di valutazione dell'incremento del potere fonoisolante di una partizione sui cui è stato applicato un placcaggio o una controparete, calcolato in accordo all'Appendice D.1 della norma UNI EN ISO 12354-1

3.2.5 - Pareti in legno: CLT e timber frame

Negli ultimi anni, anche in Italia come in molti altri paesi europei e del nord America, si è verificato un graduale aumento dell'utilizzo di soluzioni tecniche definite "leggere", in contrapposizione con i sistemi costruttivi massivi tradizionali dell'edilizia italiana. I sistemi costruttivi in legno, che utilizzano sia soluzioni tradizionali, come per esempio partizioni con struttura a telaio, che soluzioni più innovative, impiegando pannelli portanti in legno massiccio a strati incrociati, spesso abbreviato in CLT (cross-laminated-timber), presentano generalmente vantaggi in termini economici, rapidità di esecuzione e sostenibilità dei materiali. La progettazione acustica di pareti divisorie o contropareti in legno non presenta differenze sostanziali rispetto alla progettazione di partizioni doppie realizzate con pannelli di gesso rivestito su strutture intelaiate metalliche. In entrambi i casi, infatti, non potendo fare affidamento sul comportamento massivo della partizione, sarà necessario dimensionare correttamente la cavità, individuare un materiale fonoassorbente adeguato a riempire la cavità, definire il numero e la densità dei pannelli di rivestimento e disaccoppiare le strutture per ridurre la trasmissione sonora strutturale. Va evidenziato tuttavia, che mentre pannelli tradizionali in cartongesso sono elementi omogenei e isotropi, pannellature in legno possono esibire un comportamento ortotropo, causato sia dalle caratteristiche del materiale ligneo che dalla struttura stratificata di certi pannelli. A causa del comportamento debolmente ortotropo, la riduzione del potere fonoisolante, in corrispondenza della zona delle coincidenze, si manifesta in un intervallo più ampio di frequenze. In figura 3.8 sono riportati i grafici del potere fonoisolante misurato sperimentalmente su due partizioni doppie lignee. Le due pareti hanno la stessa struttura, costituita da pannelli in OSB, installati sui due lati di un telaio realizzato con montanti in legno di abete con sezione nominale 160 mm x 80 mm, con l'intercapedine di 160 mm di spessore stata riempita totalmente con pannelli di lana minerale di densità pari a 70 kg/m³. La partizione denominata Parete a) è stata realizzata con pannelli in OSB di 18 mm di spessore, mentre per la partizione denominata Parete b) sono stati utilizzati pannelli di spessore pari a 12 mm.

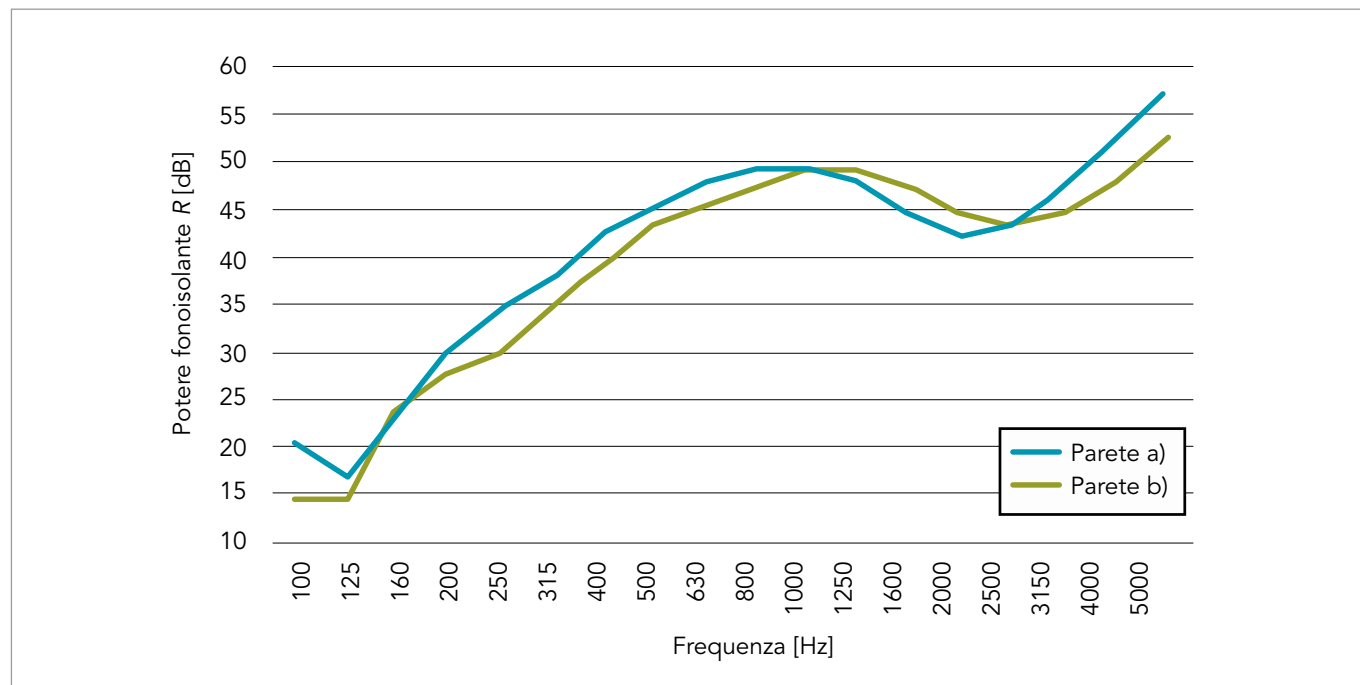


Figura 3.8: Potere fonoisolante sperimentale di parete leggera in legno realizzata con pannellature in OSB, installate su montanti in legno di abete con sezione 160 mm x 80 mm. L'intercapedine di 160 mm è stata completamente riempita con pannelli in lana minerale, spessore 80 mm + 80 mm e densità 70 kg/m³.

Parete a) realizzata con pannellature in OSB (su entrambi i lati) di 18 mm di spessore ($R_w=42$ dB; $C=-3$; $C_{tr}=-8$);

Parete b) realizzata con pannellature in OSB (su entrambi i lati) di 12 mm di spessore ($R_w=40$ dB; $C=-3$; $C_{tr}=-9$).

Le pareti in CLT sono realizzate per mezzo di pannelli in legno portanti, costituiti generalmente da un numero dispari di strati in cui si alterna la direzione delle fibre. Questa particolare struttura conferisce ai pannelli in CLT un comportamento ortotropo, più o meno marcato in base a diversi fattori quali il numero degli strati e il rapporto tra i loro spessori [25]. I pannelli in CLT, a causa della densità ridotta e rigidità relativamente elevata, non offrono un isolamento acustico adeguato al rispetto dei limiti fissati dalla legge. Pertanto, è necessario prevedere strati aggiuntivi per la partizione di base in CLT, tramite contropareti leggere, o sistemi a cappotto in fibra minerale per le facciate [27]. A titolo esemplificativo si riporta in figura 3.9 il potere fonoisolante sperimentale di un pannello CLT a 5 strati con spessore totale pari a 100 mm. L'intervallo di frequenze tra le bande di terzi di ottava centrate tra 315 Hz e 500 Hz, in cui il potere fonoisolante risulta pressoché costante al variare della frequenza, è delimitato dalle frequenze di coincidenza associate alle due direzioni principali di ortotropia del pannello. L'estensione di tale regione dipende dal grado di ortotropia della partizione. Si possono manifestare decrementi del potere fonoisolante, causati da un maggiore trasmissibilità sonora in prossimità della coincidenza, in base allo smorzamento totale della struttura. Il National Research Council Canadese ha condotto un'ampia campagna sperimentale su queste strutture, analizzando le prestazioni acustiche del singolo pannello CLT, le trasmissioni laterali e l'incremento del potere fonoisolante fornito da placcaggi e contropareti. Il report in cui sono presentati i risultati [30] contiene anche il calcolo delle prestazioni di isolamento acustico di alcune strutture in CLT, utilizzando sia il metodo dettagliato che l'approccio semplificato della precedente versione della norma UNI EN 12354-1:2002 (ISO 15712-1:2005). Al momento non esistono formule previsionali standardizzate per stimare il potere fonoisolante di un pannello in CLT, anche se sono stati pubblicati diversi studi in cui vengono utilizzati approcci differenti [31][33].

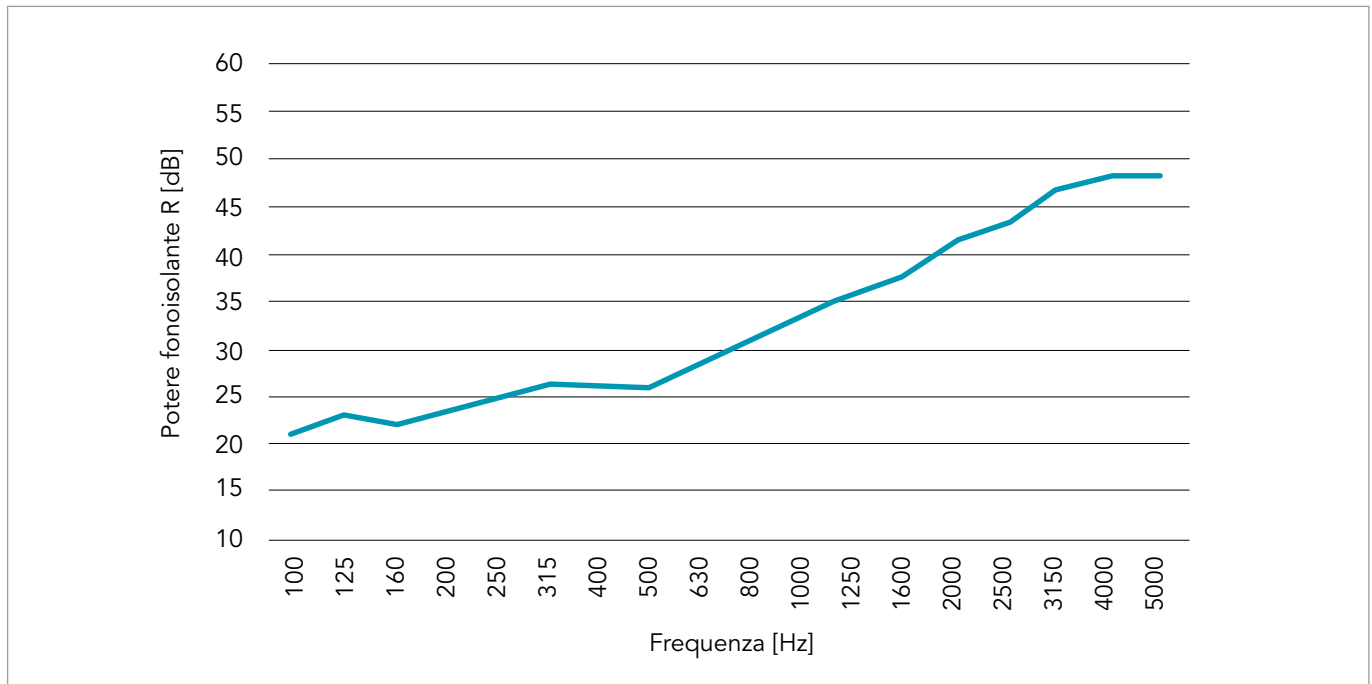


Figura 3.9: Potere fonoisolante sperimentale di un pannello in CLT a 5 strati con spessore pari a 100 mm ($R_w = 33$ dB; $C = -1$; $C_{tr} = -4$).

3.3 - Comportamento acustico delle facciate

L'isolamento acustico di una facciata dipende dalle proprietà acustiche di tutti gli elementi che la costituiscono ma il risultato finale è influenzato dagli elementi più deboli e cioè dalle finestre, porte, cassonetti ed eventuali prese d'aria. La muratura opaca, infatti, essendo normalmente a doppio strato o di elevato spessore, ha proprietà acustiche adeguate.

L'isolamento acustico di facciata si misura normalmente utilizzando un altoparlante collocato all'esterno con un certo angolo rispetto alla parete principale. Poiché il campo acustico risultante non è diffuso ma diretto, viene particolarmente evidenziato il fenomeno della coincidenza, sia delle vetrate che delle pareti opache. L'isolamento acustico al variare della frequenza risulta generalmente molto variabile con valori minimi e massimi spesso ravvicinati. In figura 3.10 è illustrato il confronto tra tre diverse configurazioni di facciata di un edificio sperimentale, la prima costituita da sola muratura opaca, la seconda costituita da muratura e da una finestra e la terza costituita da muratura e da quattro finestre. Si può osservare il fenomeno della coincidenza della muratura opaca alla frequenza di circa 200 Hz presente in tutte le prove sperimentali e il fenomeno della coincidenza delle vetrate alle alte frequenze presente soltanto nelle pareti con finestre.

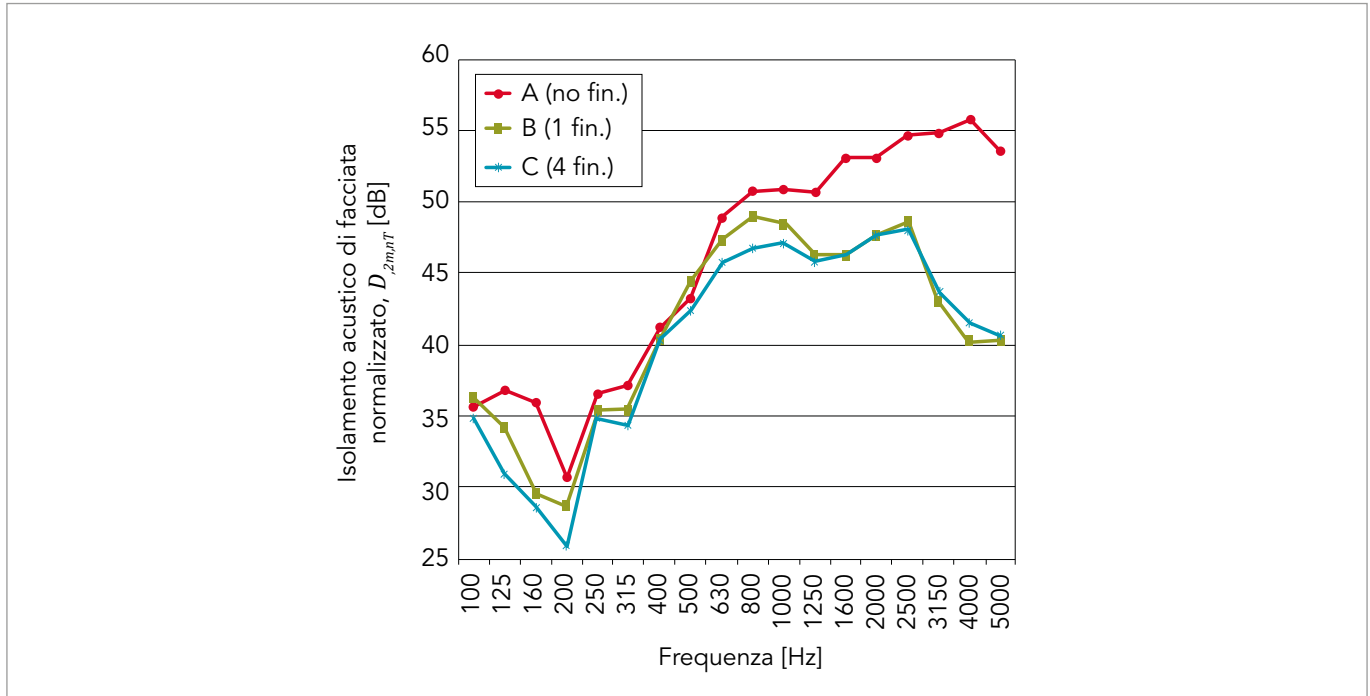


Figura 3.10: Andamento dell'isolamento acustico di facciata di un edificio sperimentale ottenuto con tre diverse configurazioni: A – senza finestre; B – con una finestra; C – con quattro finestre.

Per la stima dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, si può fare riferimento al metodo descritto nella normativa UNI EN ISO 12354-3 [4]. L'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT}$ può essere calcolato a partire dal potere fonoisolante apparente di facciata R' , in base alla seguente relazione:

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \log 0.32 \frac{V}{S_s} \text{ [dB]}$$

Dove ΔL_{fs} è la differenza di livello sonoro in facciata [dB], V è il volume dell'ambiente ricevente [m^3], S è la superficie della facciata, vista dall'interno [m^2]. Il termine ΔL_{fs} (differenza di livello per forma della facciata), dipende dalla forma della facciata, dall'assorbimento acustico delle superfici aggettanti (balconi) e dalla direzione del campo sonoro. L'isolamento acustico della facciata può infatti aumentare per l'effetto schermante determinato dai balconi e altre parti aggettanti o diminuire per effetto dell'aumento di livello sonoro esterno causato da riflessioni multiple tra superfici riflettenti di facciata o dalla riverberazione nelle logge. L'effetto delle riflessioni causato dai corpi aggettanti può essere mitigato applicando materiali fonoassorbenti sulle superficie coinvolte, come illustrato per esempio in figura 3.11.

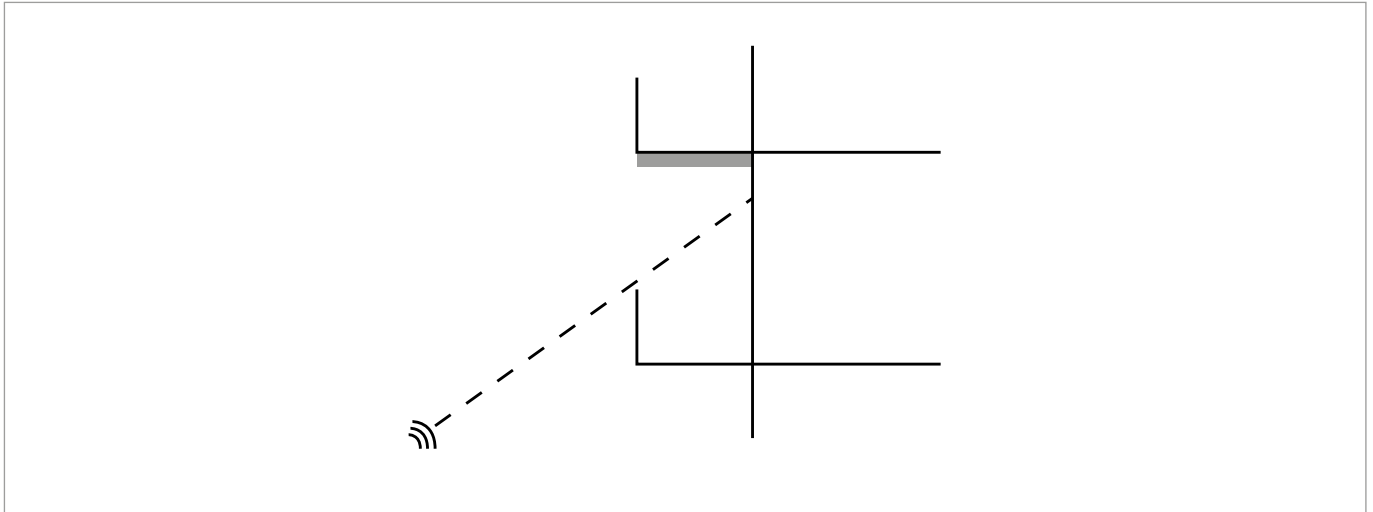


Figura 3.11: Inserimento di materiale fonoassorbente nell'intradosso del balcone aggettante.

Nella normativa UNI EN ISO 12354-3 [2] sono riportati gli schemi per il calcolo di ΔL_{fs} in funzione della forma della facciata, dell'assorbimento di parapetti e balconi e dell'altezza tra il piano del pavimento e la congiungente della linea di vista della sorgente sonora sul piano di facciata. Il potere fonoisolante apparente della facciata è determinato in funzione dei coefficienti di trasmissione diretta τ_e e laterale τ_f

$$R' = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{j=1}^m \tau_{f,j} \right) \text{ [dB]}$$

Il coefficiente di trasmissione diretta dipende dalle prestazioni dei singoli componenti; come descritto nell'Appendice B può essere calcolato considerando la superficie di ogni elemento j , che compone la facciata, e le giunzioni k :

$$\tau_e = \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{S} 10^{R_j/10} + \frac{l_0}{S} \sum_{k=1}^m l_{s,k} 10^{R_{s,k}/10}$$

dove R_j è il potere fonoisolante dell'elemento j della facciata [dB], S_j è la superficie dell'elemento j della facciata [m²], $R_{s,k}$ il potere fonoisolante per unità di lunghezza della giunzione k [dB], $l_{s,k}$ è la lunghezza del giunto k in metri ($l_0 = 1$ m è la lunghezza di riferimento) e S è la superficie complessiva della facciata [m²], vista dall'interno (corrispondente alla somma della superficie di tutti gli elementi che compongono la facciata).

Le trasmissioni laterali $\tau_{f,j}$ sono calcolate in accordo con la norma UNI EN ISO 12354-1 [2], come descritto nei paragrafi successivi. Per il calcolo di R' è necessario quindi conoscere i valori dei poteri fonoisolanti R degli elementi normali di facciata (pareti opache, finestre, cassonetti, porte, etc.) e degli eventuali valori di isolamento acustico D_n dei piccoli elementi di facciata. Per alcuni di questi valori, in assenza di dati specifici, si può fare riferimento alle indicazioni riportate nella normativa UNI EN ISO 12354-3 [4].

Non esistono metodologie di calcolo specifiche per le facciate ventilate. In generale, possono essere investigate con strumenti che permettano di considerare vari strati di materiali diversi per modellare correttamente i pannelli di finitura, l'intercapedine d'aria, il materiale di coibentazione e la parete di base. Sarà inoltre necessario tenere in considerazione il percorso di trasmissione per via strutturale, attraverso gli ancoraggi meccanici tra l'involucro esterno e la struttura di base (come già visto per le pareti doppie e le contropareti). Inoltre, sarà necessario verificare la presenza di perdite acustiche, che possono influenzare la trasmissione di rumore dall'esterno all'interno, tra i giunti dei diversi moduli che compongono l'involucro esterno.

3.3.1 - Progettazione della facciata in funzione di livello ammissibile

Come visto nel paragrafo precedente l'isolamento acustico di facciata dipende dal potere fonoisolante degli elementi di cui è composta. Inoltre, deve essere evidenziato come una corretta posa in opera e montaggio dei serramenti, dispositivi per il passaggio di aria e altri componenti della facciata, in accordo ai criteri forniti dalla norma UNI 11296 [13], sia di fondamentale importanza per il raggiungimento dei livelli prestazionali di progetto. Inoltre, la norma riporta, nell'Appendice A, un metodo di calcolo dell'isolamento acustico di facciata in funzione del massimo livello di pressione sonora consentito nell'ambiente interno. Dal livello medio di pressione sonora ponderato A ammesso nell'ambiente interno $L_{2,A}$ si calcola il livello di pressione sonora normalizzato rispetto al tempo di riverberazione T nella banda di frequenza centrata su 500 Hz:

$$L_{2,nT,A} = L_{2,A} - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ [dB]}$$

L'isolamento acustico di facciata ponderato A normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT,A}$ che corrisponde alla somma dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT,w}$ e dal termine di adattamento spettrale idoneo al caso specifico C_j , è calcolato in funzione del livello di pressione sonora ponderato A a 2 metri dalla facciata $L_{1,2m,A}$ e del livello di pressione sonora ammesso nell'ambiente interno normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $L_{2,nT,A}$:

$$D_{2m,nT,A} = D_{2m,nT,w} + C_j = L_{1,2m,A} - L_{2,nT,A} \text{ [dB]}$$

Il coefficiente di adattamento spettrale C_j , descritto nella norma UNI EN ISO 717-1, deve essere riferito alle sorgenti sonore esterne: il coefficiente C si utilizza, per esempio, per le sorgenti come il traffico ferroviario delle linee ad alta e media velocità e autostradale, aerei a reazione a breve distanza, attività industriale a media e alta frequenza, attività umana; il coefficiente C_{tr} invece, viene utilizzato per traffico stradale urbano, rumore ferroviario a bassa velocità, velivoli a elica, aerei a reazione a lunga distanza, attività industriali con emissioni a bassa frequenza, discoteche. Tale approccio può anche essere utilizzato per stimare il livello di pressione sonora all'interno di un ambiente, conoscendo $D_{2m,nT,w}$ e C , in funzione del rumore ambientale (es. variando la sorgente principale da strada urbana a autostrada) o in funzione della zonizzazione acustica.

3.4 - Sistemi di isolamento a cappotto (ETICS)

3.4.1 - Comportamento acustico degli ETICS

I sistemi di isolamento a cappotto (ETICS - External Thermal Insulation Composite System) vengono sempre più utilizzati per l'adeguamento termico di edifici esistenti, nonché per l'isolamento di edifici di nuova costruzione. La parete è isolata mediante pannelli (in genere lana di roccia o polistirene espanso o estruso) applicati sul lato esterno del paramento murario e fissati ad esso tramite incollaggio e ancoraggio meccanico (con appositi tasselli), come illustrato in figura 3.12. I pannelli isolanti sono protetti sul lato esterno da uno strato di intonaco armato con rete di distribuzione dei carichi ed infine da un trattamento superficiale di finitura.

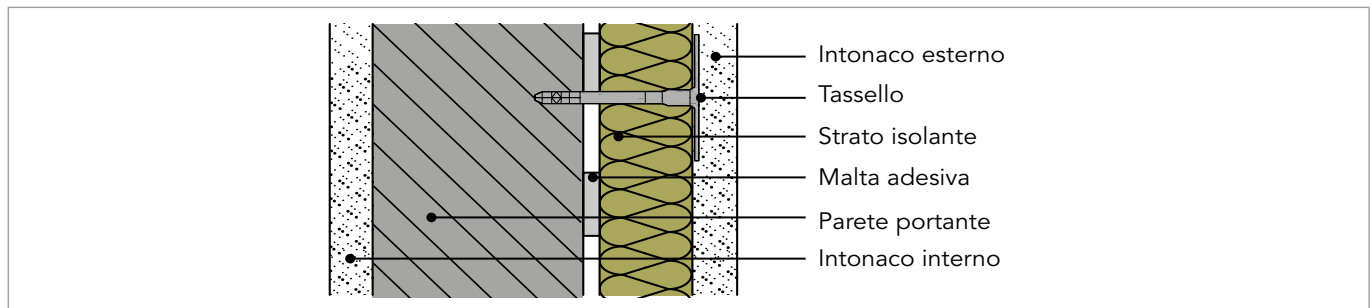


Figura 3.12: Sistema di isolamento a cappotto.

I benefici dell'isolamento a cappotto dal punto di vista del risparmio energetico, del benessere termo-igrometrico e della salubrità dell'edificio sono ben noti e per questi motivi sono utilizzati sempre di più nella riqualificazione energetica degli edifici esistenti.

Da un punto di vista acustico un sistema di isolamento a cappotto può essere schematizzato come un sistema meccanico "massa-molla-massa", illustrato in figura 3.13 (a), la cui curva di potere fonoisolante in funzione della frequenza ha un andamento simile a quello riportato in figura 3.13 (b). In tale grafico si può osservare una zona, quella della frequenza di risonanza f_0 , in cui le due masse (parete portante e intonaco esterno) oscillano in controfase con un conseguente diminuzione dell'isolamento acustico rispetto alla sola parete portante. A frequenze inferiori le due masse oscillano in fase e il sistema si comporta come una parete omogenea equivalente con massa totale pari alla somma delle due masse, mentre a frequenze maggiori si ha un incremento notevole (se confrontato con la legge di massa) dovuto al disaccoppiamento delle due masse mediante il materiale isolante interposto. Ne consegue che, ai fini della progettazione ottimale delle prestazioni acustiche di un sistema di isolamento a cappotto, è importante determinare la sua frequenza di risonanza e verificare che tale frequenza non sia critica se confrontata con lo spettro di emissione di una qualunque sorgente disturbante (ad esempio quello del traffico stradale o ferroviario).

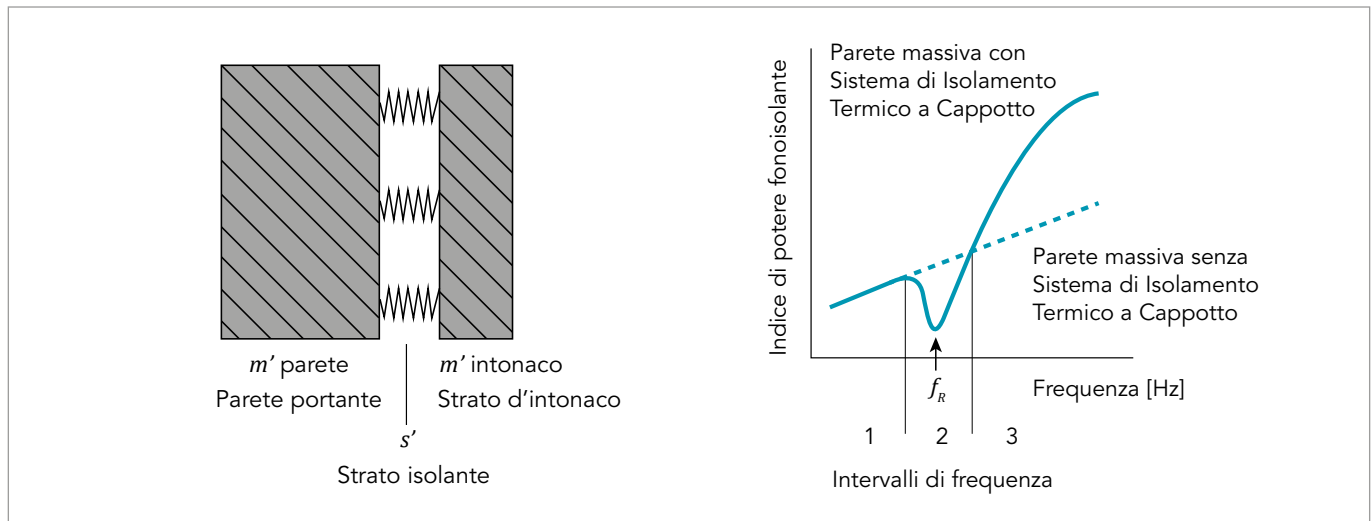


Figura 3.13: (a) Schematizzazione monodimensionale di un sistema "massa-molla-massa";
(b) andamento teorico del potere fonoisolante di una parete con e senza sistema di isolamento a cappotto.

Il metodo sperimentale per la determinazione delle prestazioni acustiche di un sistema di isolamento a cappotto è definito nella norma ISO 10140-1 appendice G. L'incremento del potere fonoisolante, ottenuto dall'applicazione di un ETICS, dipende dal tipo di struttura di base alla quale lo strato aggiuntivo è applicato. In funzione del campo di applicazione dei sistemi a cappotto, le loro prestazioni acustiche devono essere misurate utilizzando una parete di base molto pesante (con una massa superficiale di $350 \pm 50 \text{ kg/m}^2$) con una frequenza critica corrispondente alla banda dei 125 Hz. Inoltre, per la parete di base non deve essere presente nessuna risonanza dovuta allo spessore per frequenze inferiori a 3150 Hz. Infine, se il sistema di isolamento a cappotto viene utilizzato su pareti leggere, la valutazione sperimentale delle prestazioni acustiche deve essere integrata con una misura effettuata utilizzando una parete leggera (con massa superficiale di circa 70 kg/m^2), caratterizzata da una frequenza critica nella banda dei 500 Hz. Si possono fornire risultati per una parete o un solaio di base pesante ($\Delta R_{w,heavy}$), per uno leggero ($\Delta R_{w,light}$) o per una parete o un solaio di base di tipo arbitrario ($\Delta R_{w,direct}$).

Il potere fonoisolante della parete di base, con e senza il sistema di isolamento a cappotto, viene misurato in accordo alla norma ISO 10140-2; dai valori delle curve di potere fonoisolante e dai relativi indici di valutazione dell'isolamento acustico (determinati in accordo alla norma ISO 717-1) è possibile determinare il miglioramento del potere fonoisolante sia in funzione della frequenza che come singolo indice:

$$\Delta R(f) = \Delta R_{con}(f) - \Delta R_{senza}(f) \text{ [dB]} \quad \text{e} \quad \Delta R_w = \Delta R_{w,con} - \Delta R_{w,senza} \text{ [dB]}$$

Pertanto, un valore di $\Delta R(f)$ o ΔR_w positivo rappresenta un miglioramento rispetto alla parete portante in seguito all'applicazione del sistema di isolamento a cappotto, mentre un valore negativo rappresenta un peggioramento delle prestazioni complessive. Se il sistema di isolamento a cappotto è applicato sulla parete di base senza l'utilizzo di montanti o connessioni strutturali, la frequenza di risonanza può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [\text{Hz}]$$

dove s' [MN/m^3] è la rigidità dinamica dello strato intermedio isolante (determinata in accordo alla norma UNI EN 29052), m_1 e m_2 [kg/m^2] corrispondono alla massa superficiale della parete di base e del rivestimento protettivo esterno.

Dalla formula per la determinazione della frequenza di risonanza è subito evidente che, a parità di parete di base e di rivestimento protettivo esterno, all'aumentare della rigidità dinamica del materiale isolante la frequenza di risonanza assumerà valori sempre maggiori fino a poter compromettere le prestazioni del sistema di isolamento a cappotto. In figura 3.14 viene riportato il confronto in termini di curve di $\Delta R(f)$ per due sistemi di isolamento a cappotto aventi la stessa parete di base (blocchi in laterizio da 25 cm e densità $830 \text{ kg}/\text{m}^3$, intonacati da entrambi i lati) e medesimo rivestimento esterno (uno strato di intonaco armato con rete in fibra minerale e finitura superficiale di spessore 5-7 mm). Sono stati utilizzati due materiali isolanti differenti: (lana di roccia con densità equivalente di circa $110 \text{ kg}/\text{m}^3$ e polistirene espanso (EPS) con densità di $18 \text{ kg}/\text{m}^3$, aventi pari spessore uguale a 80 mm). Dalle curve in figura si osserva chiaramente che il sistema che utilizza l'EPS è caratterizzato da una frequenza di risonanza intorno a 400 Hz, mentre per il sistema realizzato con i pannelli in lana di roccia la frequenza di risonanza è inferiore. Calcolando dai dati sperimentali il miglioramento del potere fonoisolante ΔR_w , si ottiene un valore pari a 10 dB per il sistema in lana di roccia e di -3 dB (quindi un peggioramento) per il sistema in EPS.

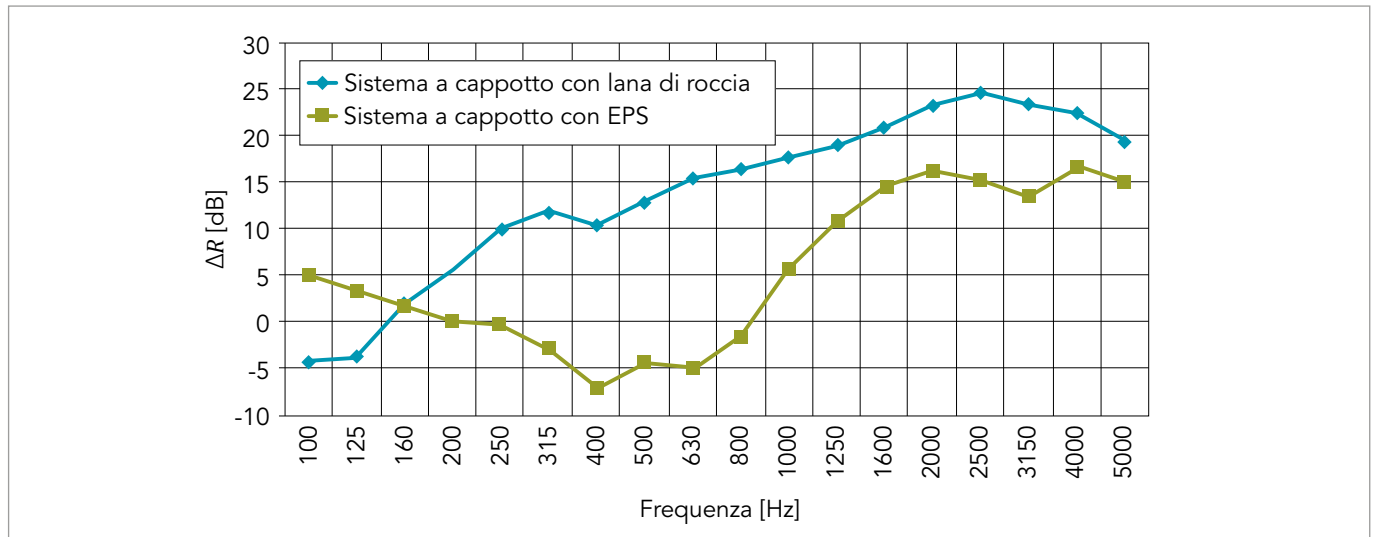


Figura 3.14: Curve sperimentali di potere fonoisolante di due sistemi di isolamento a cappotto realizzati con differenti materiali isolanti.

La rigidità dinamica del materiale isolante e le prestazioni acustiche della parete di base non sono le uniche caratteristiche che determinano in modo completo le prestazioni di un sistema di isolamento a cappotto. Infatti, diversi studi sono stati effettuati al fine di poter determinare ΔR_w in funzione della percentuale di colla tra la parete di base e il materiale isolante, la presenza di connessioni strutturali, delle pareti di base e delle caratteristiche acustiche e meccaniche dei materiali isolanti [34][35][36][37][38]. In particolare, tutti questi fattori possono essere introdotti come termini correttivi del miglioramento del potere fonoisolante:

$$\Delta R_{w,def} = \Delta R_w + K_{connessioni} + K_{\%colla} + K_{parete\ di\ base} + K_{materiale} \quad [\text{dB}]$$

Come mostrato in figura 3.15 a titolo di esempio, dall'analisi in frequenza è possibile notare come le connessioni strutturali influenzino il potere fonoisolante alle medie ed alte frequenze. All'aumentare del numero di connessioni non corrisponde una proporzionale diminuzione del potere fonoisolante; di fatto è sufficiente la presenza di un numero esiguo di tasselli per avere un decremento sensibile del potere fonoisolante. In particolare, dagli studi sopra citati è emerso che il termine correttivo $K_{connessioni}$, legato alla presenza di connessione strutturali, decresce all'aumentare del valore di ΔR_w ottenuto in assenza di tali connessioni.

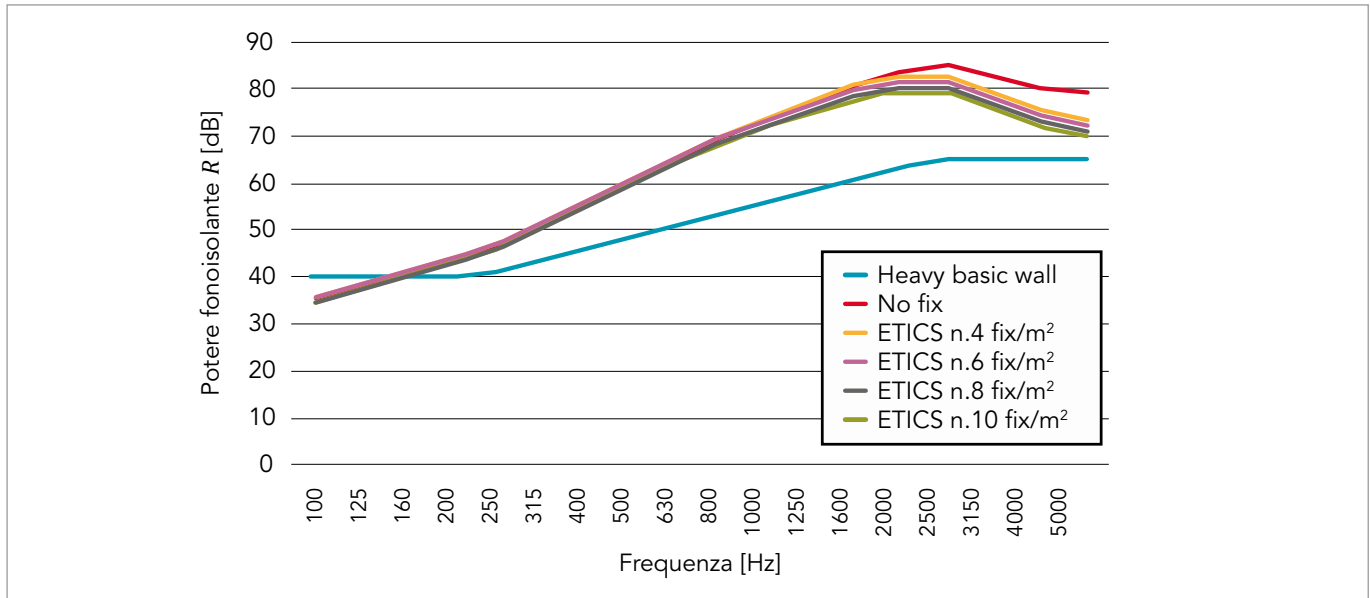


Figura 3.15: Simulazione, mediante software basato sul metodo delle matrici di trasferimento, dell'influenza delle connessioni strutturali tramite un modello di calcolo basato sul metodo delle matrici di trasferimento. Per le simulazioni è stata utilizzata una parete di riferimento ISO 10140 Annex G.

Inoltre, per quanto riguarda la presenza di colla, questi studi suggeriscono che, per una percentuale di incollaggio compresa tra 10 e 40%, il fattore correttivo $K_{%colla}$ è trascurabile (tra 0 e 1.5 dB) mentre nei casi di incollaggio totale del materiale isolante alla parete di base il termine correttivo può assumere valori fino a -3 dB. Per quanto concerne l'effetto della parete di base sull'indice d'isolamento acustico valutato sull'intera struttura, sempre da questi studi è emerso che tale effetto risulta scarso in presenza di sistemi di isolamento a cappotto con frequenza di risonanza elevata; al contrario, in presenza di sistemi di isolamento a cappotto con frequenza di risonanza bassa, il miglioramento del potere fonoisolante dell'intera struttura diminuisce man mano che l'isolamento della parete portante aumenta. Infine, non è ancora del tutto chiaro l'effetto delle proprietà acustiche e meccaniche del materiale isolante dato che è stato sperimentalmente osservato che il reale effetto sulle prestazioni dei sistemi di isolamento a cappotto non si limita solo agli effetti legati alla rigidità dinamica del sistema. Infatti, soprattutto per i materiali in lana di roccia, caratterizzati da una porosità aperta, anche la propagazione acustica al suo interno e i relativi fenomeni di dissipazione viscosa e termica hanno un effetto non trascurabile nella stima del miglioramento del potere fonoisolante.

3.4.2 - Calcolo previsionale delle prestazioni acustiche degli ETICS in accordo alla norma 12354-1

Da un punto di vista della previsione numerica, la norma ISO 12354-1 permette di stimare il miglioramento del potere fonoisolante (ΔR_w) a partire dal valore dell'indice di valutazione della parete di base ($R_{w,senza}$) e dalla frequenza di risonanza f_0 del sistema di isolamento a cappotto.

Per sistemi di rivestimenti isolanti esterni (ETICS), la norma 12354-1 introduce novità per la stima dell'incremento dell'indice del potere fonoisolante con e senza la correzione dei termini di adattamento spettrale C e C_{tr} (rispettivamente $\Delta R_A = \Delta(R_w + C)$ e $\Delta R_{Atr} = \Delta(R_w + C_{tr})$). La procedura proposta nell'appendice D è articolata in tre passaggi:

- 1. calcolo degli incrementi dell'indice di valutazione attraverso formulazioni semi-empiriche valide per la situazione di riferimento;
- 2. applicazione delle correzioni dovute alla presenza di ancoraggi e/o ad una percentuale di superficie di incollaggio (del pannello alla parete di base) diversa da quella di riferimento;
- 3. stima dell'incremento degli indici di valutazione per una parete generica con $20\text{dB} \leq R_{w,\text{situ}} \leq 60\text{dB}$ attraverso il trasferimento dei risultati dalla situazione di riferimento a quella generica.

L'incremento degli indici di valutazione nella situazione di riferimento è stimato con formule specifiche valide per la lana minerale (MW) o per schiume come polistirene (PS), polistirene espanso (EPS) o polistirene espanso elasticizzato (E-EPS). Nella situazione di riferimento il materiale isolante è incollato per il 40% della sua area ad una parete di base pesante (350 kg/m^2 come descritta nell'appendice B.2 della ISO 10140-5) con bassa frequenza critica la cui prestazione è pari a $R_w(C;C_{tr})=53(-1;-5)$.

| Lana minerale (MW): | Schiuma (PS, EPS, E-EPS): |
|--|--|
| $\Delta R_{w,\text{ref}} = -36 \log f_0 + 82, 5 \geq -4$ | $\Delta R_{w,\text{ref}} = -33 \log f_0 + 76, 0 \geq -3$ |
| $\Delta R_{A,\text{ref}} = -42 \log f_0 + 92, 0 \geq -4$ | $\Delta R_{A,\text{ref}} = -33 \log f_0 + 74, 0 \geq -3$ |
| $\Delta R_{Atr,\text{ref}} = -39 \log f_0 + 87, 7 \geq -4$ | $\Delta R_{Atr,\text{ref}} = -36 \log f_0 + 77, 0 \geq -3$ |

Nel caso siano presenti tasselli nell'ordine da 4 a 10 per m^2 , ovvero nella maggior parte dei casi delle situazioni applicative di cantiere, il valore di $\Delta R_{w,\text{ref}}$ deve essere corretto con le seguenti relazioni valide sia per lane minerali che per schiume.

$$\Delta R_w = 0,66 \Delta R_{w,\text{ref}} - 1,2$$

$$\Delta R_A = 0,66 \Delta R_{A,\text{ref}} - 1,4$$

$$\Delta R_{Atr} = 0,54 \Delta R_{Atr,\text{ref}} - 1,6$$

Se la superficie di incollaggio dei pannelli differisce dal 40% della situazione di riferimento ($40 < \%S_0 \leq 100$) si applica un'ulteriore correzione:

$$\Delta R_{w,A} = \Delta R_{\text{ref}} - 0,05 \%S_0 + 2 \text{ [dB]}$$

L'influenza di una percentuale di incollaggio superiore al 40% è quantificata in 0,05 dB per ogni punto percentuale e, come mostrato in figura 3.16, può comportare un decremento fino a 3 dB dell'incremento degli indici di valutazione. Nel caso di presenza contemporanea di tasselli e di una superficie di incollaggio superiore al 40% si ha pertanto:

$$\Delta R_w = 0,66 \Delta R_{w,\text{ref}} - 1,2 - 0,05 \%S_0 + 2$$

$$\Delta R_{A,w} = 0,66 \Delta R_{A,\text{ref}} - 1,4 - 0,05 \%S_0 + 2$$

$$\Delta R_{Atr,w} = 0,54 \Delta R_{Atr,\text{ref}} - 1,6 - 0,05 \%S_0 + 2$$

A titolo di esempio, in figura 3.16 è riportato l'andamento dell'incremento dell'indice di valutazione $\Delta R_{w,\text{ref}}$ in funzione della rigidità dinamica del materiale e della massa superficiale dello strato addizionale di rivestimento protettivo esterno. In questo caso è stata utilizzata la parete di riferimento ($m_1 = 350 \text{ kg/m}^2$). Sempre nell'esempio è stato utilizzato un numero di tasselli nell'ordine da 4 a 10 per m^2 e una percentuale di incollaggio del 40%.

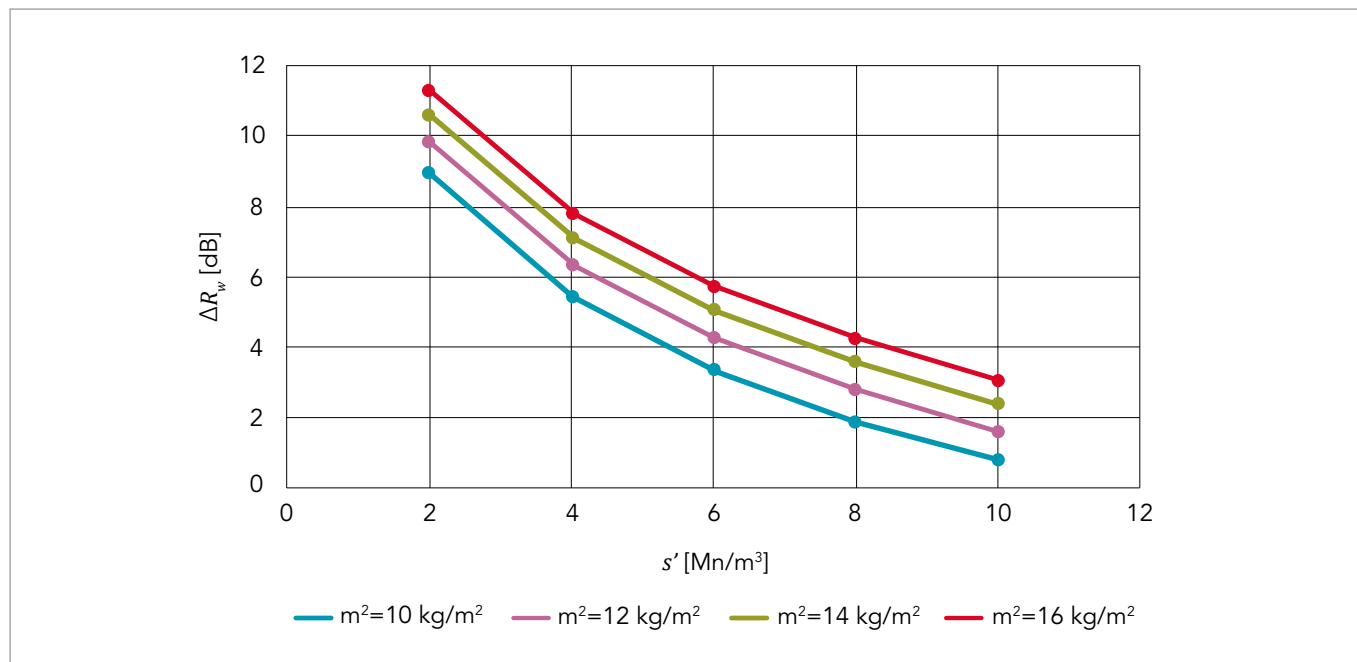


Figura 3.16: Variazione dell'incremento dell'indice di valutazione di un cappotto in lana tassellato e incollato al 40% su parete di riferimento (ΔR_w) al variare della rigidità dinamica del materiale e della massa dello strato del sistema di intonaco di finitura (calcolo secondo ISO 12354-1 allegato D.2.3).

Come mostrato in figura 3.16, a parità di parete di base e rigidità dinamica del materiale isolante, all'aumentare della massa superficiale del sistema di intonaco la frequenza di risonanza diminuisce migliorando la prestazione del sistema di isolamento a cappotto. Infatti, in un sistema ETICS la massa m'_2 è composta dalla rasatura armata, ossia da un intonaco di base in cui è inserita una rete di armatura, dall'eventuale primer e dall'intonaco di finitura con l'eventuale pittura. La norma UNI TR 11715 [14], definisce gli spessori tipici dell'intonaco di base in funzione della tipologia di isolante.

Tabella 3.1: Esecuzione dell'intonaco di base secondo UNI TR 11715 prospetto 10.

| Spessore nominale [mm] | Spessore minimo [mm] | Spessore medio [mm] | Posizionamento della rete | Misure da rispettare per sistemi con pannelli di: |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|---|
| 3 | 2,5 | $\geq 3,0$ | a metà | EPS/PU |
| 5 | 4 | $\geq 4,5$ | nel terzo esterno | EPS/PU e MW |
| 8 | 5 | $\geq 7,0$ | nel terzo esterno | EPS/PU e MW |

Tabella 3.2: Masse superficiali tipiche del sistema intonaco in funzione della tipologia di isolante.

| Intonaco di base | | | Intonaco di finitura | | | Massa superficiale totale | Misure da rispettare per sistemi con pannelli di: |
|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|---|
| Spessore medio [mm] | kg/m ³ | kg/m ² | Spessore [mm] | kg/m ³ | kg/m ² | m'_2 [kg/m ²] | |
| 3,0 | 1600 | 4,8 | 1,5 | 1800 | 2,7 | 7,5 | EPS/PU |
| 4,5 | 1600 | 7,2 | 1,5 | 1800 | 2,7 | 9,9 | EPS/PU e MW |
| 7,0 | 1600 | 11,2 | 1,5 | 1800 | 2,7 | 13,9 | EPS/PU e MW |

Rispetto al EPS e PU, come mostrato nella Tabella 3.2, le lane minerali (MW) hanno un intonaco di base mediamente più spesso a causa della caratteristica goffatura dei pannelli che porta ad avere mediamente una massa superficiale dovuta agli intonaci di finitura pari a circa 10-14 kg/m². Infine, la norma ISO 12354-1 indica che per una parete di base generica con $20\text{dB} \leq R_{w,situ} \leq 60\text{dB}$ è possibile stimare gli indici di incremento del potere fonoisolante ($\Delta R_{w,A,Atr,situ}$) trasferendo i risultati ottenuti nella condizione di riferimento ($\Delta R_{w,A,Atr}$) a quella in-situ come specificato nell'appendice D.2.4.

$$\Delta R_{w,A,Atr,situ} = \Delta R_{w,A,Atr,lab} + aX \text{ [dB]}$$

dove:

$$a = (1.35 \lg f_0 - 3.5) \leq 0$$

$$X = (R_{w,A,Atr,situ} - 53) \text{ con } -10 \leq X \leq +7$$

indicando con $\Delta R_{w,lab}$ l'incremento dell'indice del potere fonoisolante calcolato nella situazione di riferimento, o misurato in laboratorio per una parete di base pesante come specificato nell'appendice G della ISO 10140-1, e con $R_{w,situ}$ l'indice del potere fonoisolante della parete di base considerato nella situazione in opera. $R_{w,situ}$ è l'indice del potere fonoisolante calcolato con la norma ISO 717-1 a partire dai valori di R_{situ} espressi in bande di terzi d'ottava. I valori di R_{situ} sono determinati dai valori di R , misurati in laboratorio come specificato al punto 4.2.2 della norma EN ISO 12354-1. $R_{w,situ}$ rappresenta la componente di rumore trasmessa solo per via diretta (R_w) corretta per tenere in considerazione le diverse condizioni di vincolo e le differenze dimensionali tra l'elemento di prova in laboratorio e l'elemento installato in opera.

La figura 3.17 mostra un incremento dell'indice del potere fonoisolante ($\Delta R_{w,situ}$) costante fino a $R_{w,situ} = 43$ dB e una progressiva diminuzione man mano che l'isolamento della parete di base aumenta.

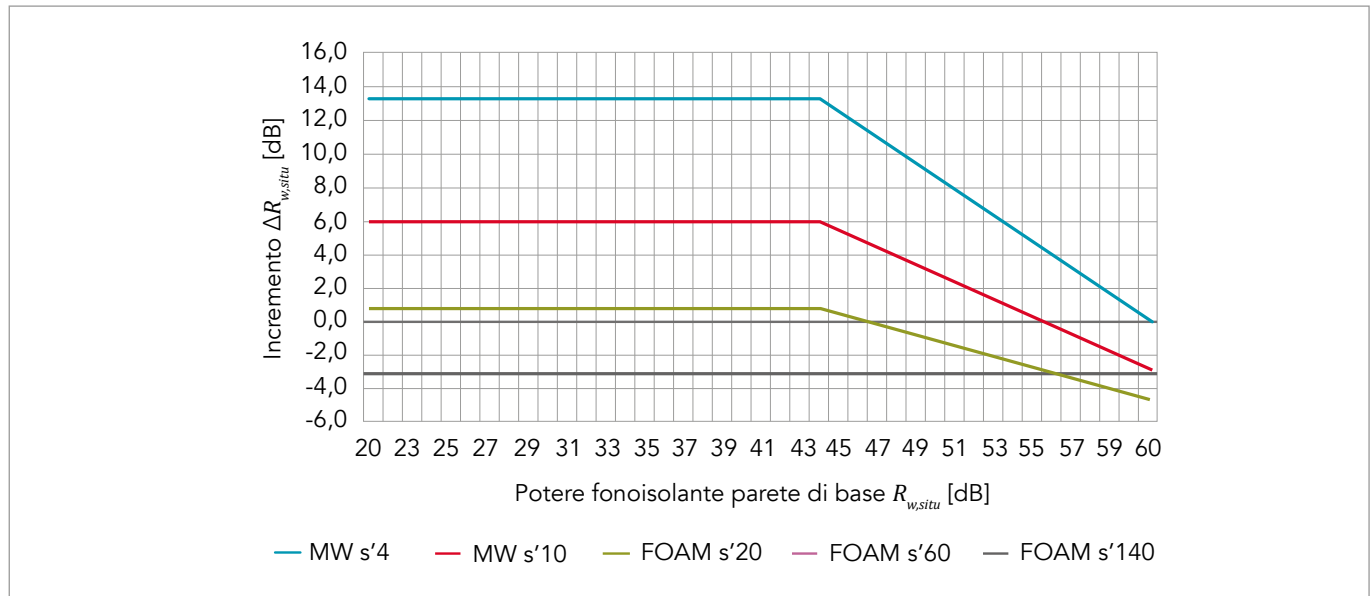


Figura 3.17: Variazione dell'incremento dell'indice del potere fonoisolante ($\Delta R_{w,situ}$) al variare del potere fonoisolante della parete di base per lana di roccia con $s'=4$ MN/m³ e 10 MN/m³ schiume con $s'=10$ MN/m³, 60 MN/m³ e 140 MN/m³ (calcolo secondo ISO 12354-1 annex D.2.4)

3.5 - Comportamento acustico delle coperture

Il D.P.C.M. 5/12/1997 [1] non riporta espressamente i requisiti acustici specifici per le coperture. Tuttavia, per quanto riguarda l'isolamento ai rumori aerei è possibile considerare le coperture, sia a falda che piane, in modo analogo alle facciate, dell'ultimo piano o di un sottotetto abitabile. Infatti, la norma UNI 11367 [12], definisce la facciata come *“chiusura di un ambiente che delimita lo spazio interno da quello esterno; può essere orizzontale, verticale o inclinata e può essere caratterizzata dalla compresenza di elementi opachi e trasparenti, con o senza elementi per impianti e sistemi di oscuramento, ventilazione, sicurezza, controllo o altre attrezzature esterne”*, comprendendo di fatto anche le coperture. Pertanto, come già visto per le facciate, l'isolamento acustico che è possibile raggiungere nell'ambiente delimitato dalla copertura dipende sia dal potere fonoisolante dei componenti opachi che da quello degli elementi trasparenti, come per esempio i lucernai. Raramente vengono eseguiti collaudi acustici delle coperture, per evidenti complessità nella realizzazione della prova. Tuttavia, è bene dimensionare correttamente le stratigrafie in modo da garantire un buon isolamento acustico degli elementi di copertura. Infatti, anche se rispetto alle facciate degli edifici, le coperture risultano generalmente meno esposte ai rumori aerei, quali per esempio il traffico stradale o ferroviario, il rumore generato da unità esterne di trattamento aria o condizionamento, la superficie di sviluppo delle coperture può essere preponderante sul resto dell'involucro, e un isolamento non adeguato può generare situazioni critiche soprattutto in prossimità di aeroporti o eliporti. I solai di copertura tradizionali in laterocemento, opportunamente coibentati con materiali isolanti termoacustici, come per esempio pannelli in fibra minerale, se realizzati a regola d'arte non presentano generalmente particolari criticità e permettono di rispettare i limiti definiti dalla legge per le diverse destinazioni d'uso. Diverse problematiche di isolamento acustico possono invece manifestarsi per le coperture leggere in legno, ampiamente utilizzate in ambito residenziale e scolastico, o metalliche, tipicamente utilizzate in ambito industriale, se non correttamente progettate e realizzate.

L'utilizzo di solai di copertura in legno offre certamente notevoli vantaggi dal punto di vista economico, sismico ed estetico. Tuttavia, è necessaria un'attenta progettazione per garantire il rispetto dei requisiti di isolamento acustico stabiliti dalla legge. Essendo strutture relativamente leggere non è possibile ottenere un buon isolamento acustico grazie al comportamento massivo degli elementi, è perciò necessario utilizzare idonei materiali isolanti termoacustici e dimensionarne correttamente gli spessori. Le tecnologie costruttive più diffuse, quali per esempio tetti ventilati realizzati su un tavolato installato su travi, presentano diverse discontinuità che dovranno essere adeguatamente sigillate posando a regola d'arte barriera al vapore, pannelli isolanti e guaina bituminosa. Al fine di incrementare leggermente la massa della copertura, alcune soluzioni prevedono l'utilizzo di un doppio tavolato installato sopra il telaio portante di travi e travetti, su cui sarà disposta la barriera al vapore. È importante scegliere un adeguato materiale isolante, poiché non tutti gli isolanti termici hanno buone prestazioni in ambito acustico. Sono particolarmente indicati pannelli fonoassorbenti di natura fibrosa con una densità almeno pari a 130-140 kg/m², e spessore di almeno 10-12 cm. In presenza di eventuali intercapedini di ventilazione, dovranno essere previsti tagli acustici per evitare ponti acustici tra unità abitative differenti coperte dallo stesso solaio. Essendo elementi multistrato è difficile determinare formulazioni empiriche per la valutazione semplificata del potere fonoisolante del solo elemento opaco di una copertura, ma è necessario utilizzare metodi di calcoli sofisticati che richiedono la conoscenza di diverse caratteristiche dei materiali impiegati [26]. In figura 3.17 si riporta, a titolo esemplificativo, un confronto tra l'isolamento acustico di un solaio di copertura: a) costituito da un doppio assito su travetti in legno e finitura con tegole; b) con la realizzazione di un controsoffitto; c) con il riempimento dell'intercapedine tra solaio e controsoffitto con un materiale fibroso. Per evidenziare l'influenza dell'incremento dello spessore del materiale isolante all'interno del pacchetto di copertura, si riporta il potere fonoisolante misurato in laboratorio su un solaio di copertura realizzato mediante assito su travetti, strato di isolamento termo-acustico, camera di ventilazione e finitura in lastre ondulate in fibrocemento.

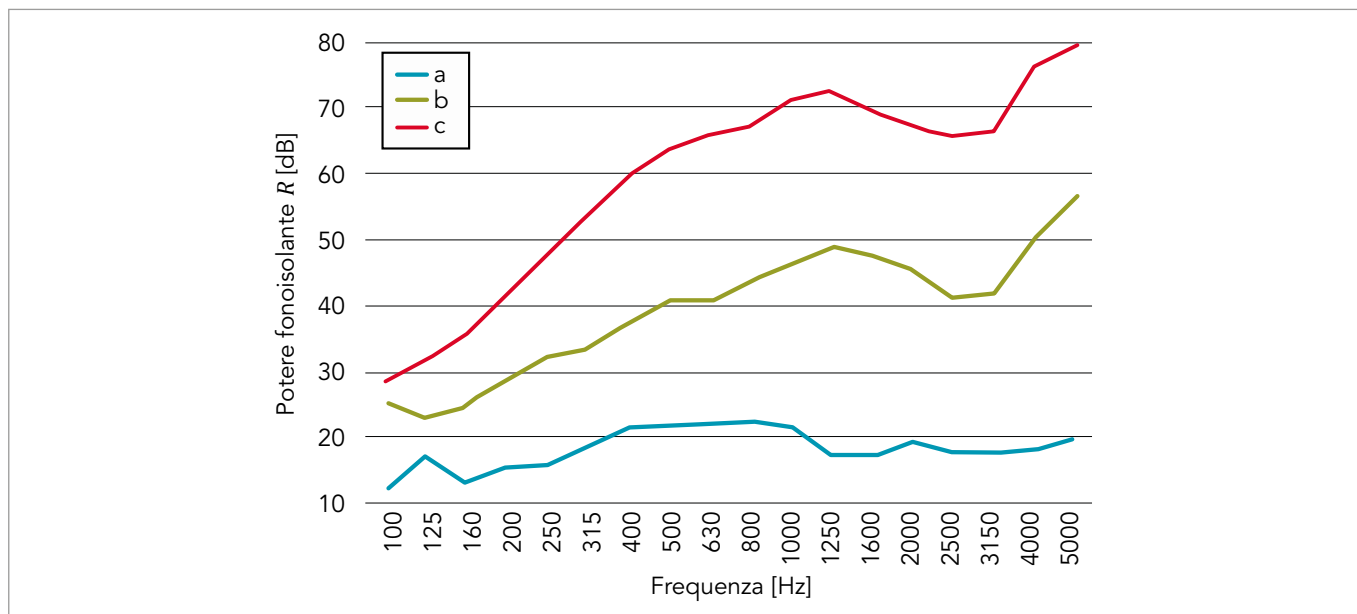


Figura 3.18: Potere fonoisolante misurato in laboratorio di un solaio di copertura in legno costituito da un assito a doppia orditura su travetti in legno e strato di finitura in tegole: a) solai nudo ($R_w=19$ dB; $C=0$; $C_{tr}=0$); b) aggiunta di un controsoffitto ($R_w=41$ dB; $C=-1$; $C_{tr}=-5$); c) riempimento della cavita con pannelli di lana minerale di spessore 200 mm ($R_w=56$ dB; $C=-4$; $C_{tr}=-10$).

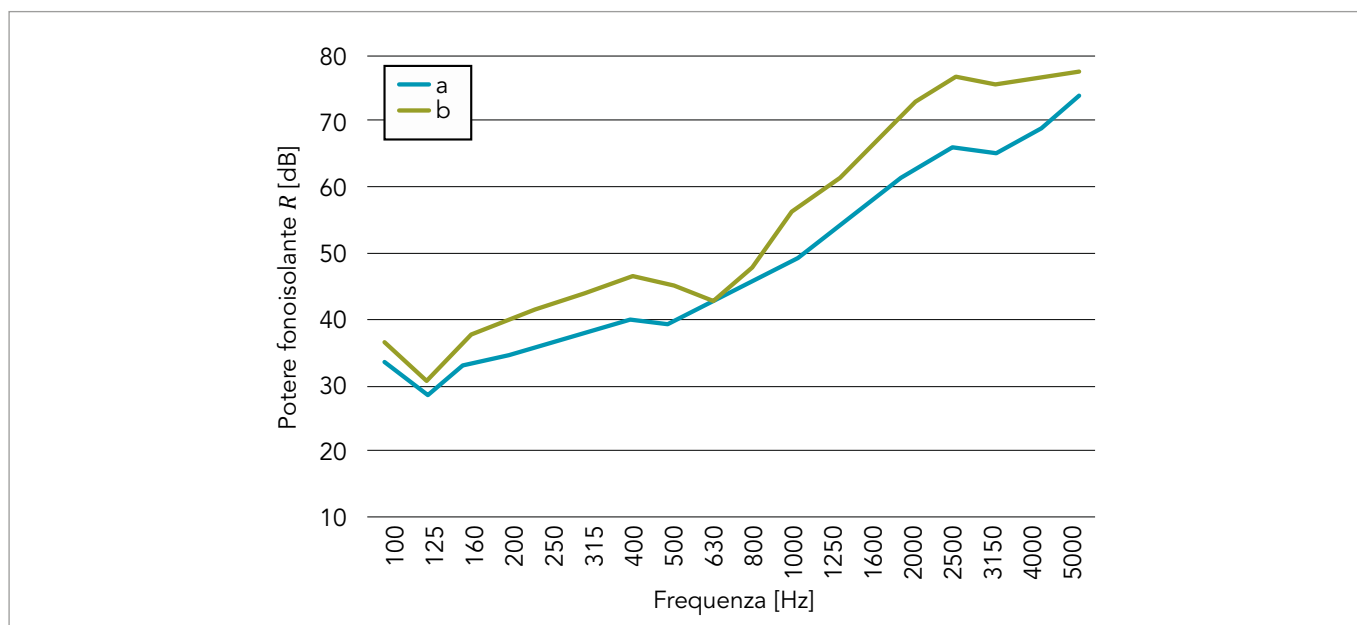


Figura 3.19: Potere fonoisolante misurato in laboratorio di un solaio di copertura in legno costituito da un assito a doppia orditura su travetti in legno, strato di isolamento termo-acustico, camera di ventilazione e strato di finitura in fibrocemento ondulato: a) isolamento costituito da pannelli in fibra minerale con densità pari a 150 kg/m³ e spessore di 130 mm ($R_w=46$ dB; $C=-1$; $C_{tr}=-5$); b) isolamento costituito da pannelli in fibra minerale con densità pari a 110 kg/m³ e spessore di 80 mm e un secondo strato di pannelli in fibra minerale con densità pari a 150 kg/m³ e spessore di 100 mm ($R_w=51$ dB; $C=-2$; $C_{tr}=-2$).

Le coperture leggere metalliche, sia realizzate mediante strutture prefabbricate, come lamiere piegate o pannelli sandwich, oppure tetti interamente metallici, sono elementi edilizi largamente utilizzati, soprattutto in ambito industriale. Sono strutture generalmente molto leggere, che pertanto devono essere accuratamente progettate per garantire un buon isolamento acustico, scegliendo idonei materiali isolanti termoacustici e dimensionandone correttamente gli spessori. L'approccio progettuale da seguire per il dimensionamento di queste strutture per ottimizzarne le prestazioni acustiche risulta analogo a quello già descritto per le pareti doppie. Pertanto, sarà fondamentale dimensionare l'intercapedine e il materiale fonoassorbente utilizzato per il riempimento, in funzione delle pannellature utilizzate per i rivestimenti esterni. Spesso, gli elementi costruttivi utilizzati per la realizzazione di coperture metalliche leggere vengono prefabbricati. In questo caso, si parla comunemente di pannelli sandwich, costituiti da due pannelli di rivestimento esterno, definite lamine, accoppiate a un materiale elastico e/o fonoassorbente, con rigidità molto inferiore a quella delle lamine, definito "core" (nucleo). A partire dagli anni sessanta sono stati sviluppati diversi metodi di previsione delle prestazioni acustiche dei pannelli sandwich [32]. Durante la posa in opera dovrà essere garantita la continuità dei sistemi isolanti per evitare ponti acustici. Un adeguato isolamento delle coperture impiegate in ambito industriale è essenziale per il contenimento dell'emissioni rumorose dei macchinari presenti nello stabilimento in ambiente esterno.

Oltre a problematiche di isolamento aereo, le strutture di copertura non correttamente progettate e dimensionate, sono soggette anche a problematiche di trasmissione del rumore impattivo generato dalla pioggia. Il rumore da pioggia costituisce una potenziale fonte di disturbo per il comfort acustico degli ambienti interni. Il rumore impattivo generato dalla pioggia battente può essere causa di disturbo soprattutto in edifici caratterizzati da soluzioni di copertura leggere che sono più sensibili alle trasmissioni di questa tipologia di rumore. In qualsiasi ambiente, non dovrebbe mai essere superato un certo livello di rumore di fondo, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche esterne. Infatti, l'esposizione ad alti livelli di rumore può portare ad un generale affaticamento e a difficoltà di concentrazione. La legislazione italiana non prevede limiti specifici per la trasmissione del rumore da pioggia attraverso la copertura, né sono previste misurazioni in opera standardizzate per quantificarlo, ma solo prove di laboratorio; l'appendice K della norma UNI EN ISO 10140-1 descrive una metodologia per la misurazione del rumore da pioggia irradiato da un componente edilizio in laboratorio.

3.6 - Comportamento acustico solai

Per incrementare le prestazioni acustiche dei solai, considerando sia i rumori aerei che impattivi, si ricorre all'installazione di controsoffitti e alla realizzazione di massetti galleggianti. La realizzazione di un controsoffitto, che però è vincolata dall'altezza dell'ambiente, può essere una soluzione efficace a migliorare la prestazione acustica di un solaio, soprattutto nei confronti della trasmissione di rumore per via aerea. L'incremento del potere fonoisolante, che può essere valutato in modo analogo a quanto descritto per le contropareti, dipende dalla dimensione della cavità tra il solaio principale e la struttura del controsoffitto, dalle caratteristiche del materiale fonoassorbente utilizzato per il riempimento della cavità e dal tipo di materiale utilizzato per le pannellature di finitura. Inoltre, è di fondamentale importanza che la struttura a telaio del controsoffitto non presenti punti di ancoraggio con il solaio di base rigido, ma che siano invece adottati supporti elastici. Per quanto riguarda l'isolamento ai rumori impattivi, la realizzazione di un controsoffitto risulta efficace, comportando una riduzione del livello di pressione sonora di calpestio $\Delta L_d = 5-10$ dB [40], solo se il contributo delle trasmissioni laterali è trascurabile.

Per quanto riguarda la stima dell'incremento di potere fonoisolante di un solaio su cui è stato realizzato un massetto galleggiante, o implementato con un controsoffitto, è possibile utilizzare l'approccio già visto per le pareti doppie, identificando la frequenza di risonanza del sistema in funzione dell'elasticità e della massa dei diversi strati. L'uso dei pavimenti galleggianti è la soluzione più frequentemente utilizzata per la riduzione del rumore di calpestio. L'efficacia dei pavimenti galleggianti è fortemente correlata con le proprietà meccaniche dei materiali resilienti utilizzati, in particolare con la loro rigidità dinamica che deve essere scelta in base alle caratteristiche del solaio di base. Lo strato elastico, perché sia efficace, deve essere posto in opera in modo accurato. Il piano di posa deve essere livellato e privo di rugosità che potrebbero danneggiare il materiale e creare dei ponti acustici. La soletta deve essere separata dalle pareti laterali e dai pilastri mediante l'interposizione di una striscia elastica perimetrale. Durante il getto del massetto è necessario evitare che l'impasto realizzi dei collegamenti tra il massetto stesso e la soletta sottostante o le pareti del locale e che lo strato isolante venga lesionato. Occorre pertanto proteggere il materiale isolante mediante una pellicola di polietilene o di altro materiale. Gli eventuali impianti tecnologici devono essere rivestiti con

guaine elastiche che impediscano il contatto diretto con la struttura galleggiante, con il solaio, e con le pareti degli ambienti così da non trasmettere vibrazioni agli elementi strutturali. La norma UNI 11516 fornisce indicazioni per la corretta posa in opera dei massetti galleggianti [16].

La norma DIN 18560-2 [15] fornisce utili indicazioni per la determinazione dello spessore minimo del massetto in funzione di:

- comprimibilità del materiale resiliente (c e CPi); in presenza di strati multipli di isolante sotto massetto (tipicamente pannello isolante e pannello porta-tubo per sistema radiante) le comprimibilità dei prodotti devono essere sommate;
- condizioni di carico distribuito q_k carico e carico puntuale Q_k caratteristici per la destinazione d'uso dell'edificio;
- tipo di finitura (per rivestimenti fragili come ceramica o pietra vengono definiti spessori minimi);
- della natura (massetti CAF autolivellanti a base di solfato di calcio, CA base anidrite e CT cementizi) e resistenza a flessione (Fi) del massetto secondo la classificazione EN 13813.

Tabella 3.3: Spessore minimo del massetto in funzione della tipologia, condizioni di carico e comprimibilità del materiale resiliente (secondo norma DIN 18560-2).

| | Comprimibilità $c \leq 5$ mm (CP5, CP4, CP3, CP2) | | Comprimibilità $c \leq 3$ mm (CP3, CP2) | |
|----------|---|---|---|---|
| | $q_k \leq 2$ kN/m ² | $q_k \leq 3$ kN/m ² $Q_k \leq 2$ kN | $q_k \leq 4$ kN/m ² $Q_k \leq 3$ kN | $q_k \leq 5$ kN/m ² $Q_k \leq 4$ kN |
| CAF - F4 | $\geq 35^{**}$ | ≥ 50 | ≥ 60 | ≥ 65 |
| CAF - F5 | $\geq 35^{**}$ | ≥ 45 | ≥ 50 | ≥ 55 |
| CAF - F7 | $\geq 35^{**}$ | $\geq 40^*$ | ≥ 45 | ≥ 50 |
| CA - F4 | ≥ 45 | ≥ 65 | ≥ 70 | ≥ 75 |
| CA - F5 | $\geq 40^*$ | ≥ 55 | ≥ 60 | ≥ 65 |
| CA - F7 | $\geq 35^*$ | ≥ 50 | ≥ 55 | ≥ 60 |
| CT - F4 | ≥ 45 | ≥ 65 | ≥ 70 | ≥ 75 |
| CT - F5 | $\geq 40^*$ | ≥ 55 | ≥ 60 | ≥ 65 |

*per pavimentazioni ceramiche o sasso il massetto deve avere uno spessore minimo di 45 mm

**per pavimentazioni ceramiche o sasso il massetto CAF deve avere uno spessore minimo di 40 mm

3.6.1 - Massetto galleggiante su solaio massivo

Si considerano solai massivi sia i tradizionali solai in latero cemento, che solai omogenei a piastra in calcestruzzo. Si riporta in figura 3.20 il confronto tra il potere fonoisolante misurato in laboratorio su un solaio omogeneo in calcestruzzo di spessore di 100 mm e su un solaio in laterocemento di spessore 160 mm + 40 mm. In figura 3.21 si riporta anche il confronto tra le stesse due strutture in termini di livello di pressione sonora di rumore calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico. Se il pavimento galleggiante viene montato a regola d'arte su un solaio massivo, in calcestruzzo o in latero cemento, per esempio, la riduzione del rumore di calpestio ΔL_w può arrivare anche a 30 dB. In figura 3.22 sono riportati i risultati di misurazioni eseguite in due solai uguali di un edificio sperimentale, aventi la stessa struttura e la stessa finitura superficiale, in uno dei quali è stato realizzato un pavimento galleggiante realizzato a regola d'arte e nell'altro un solaio tradizionale con massetto sabbia cemento. La differenza ottenuta in termini di indice di valutazione è stata di 31 dB. L'andamento in frequenza mostra che l'attenuazione cresce notevolmente all'aumentare della frequenza. Alla frequenza di 80 Hz, invece, la presenza del pavimento galleggiante fa aumentare il rumore di calpestio. Tale frequenza è la frequenza di risonanza del sistema vibrante costituito dal materiale elastico e dal massetto. In corrispondenza della frequenza di risonanza si ha un massimo nella trasmissione di rumore. Al di sopra della frequenza di risonanza l'attenuazione è progressivamente crescente.

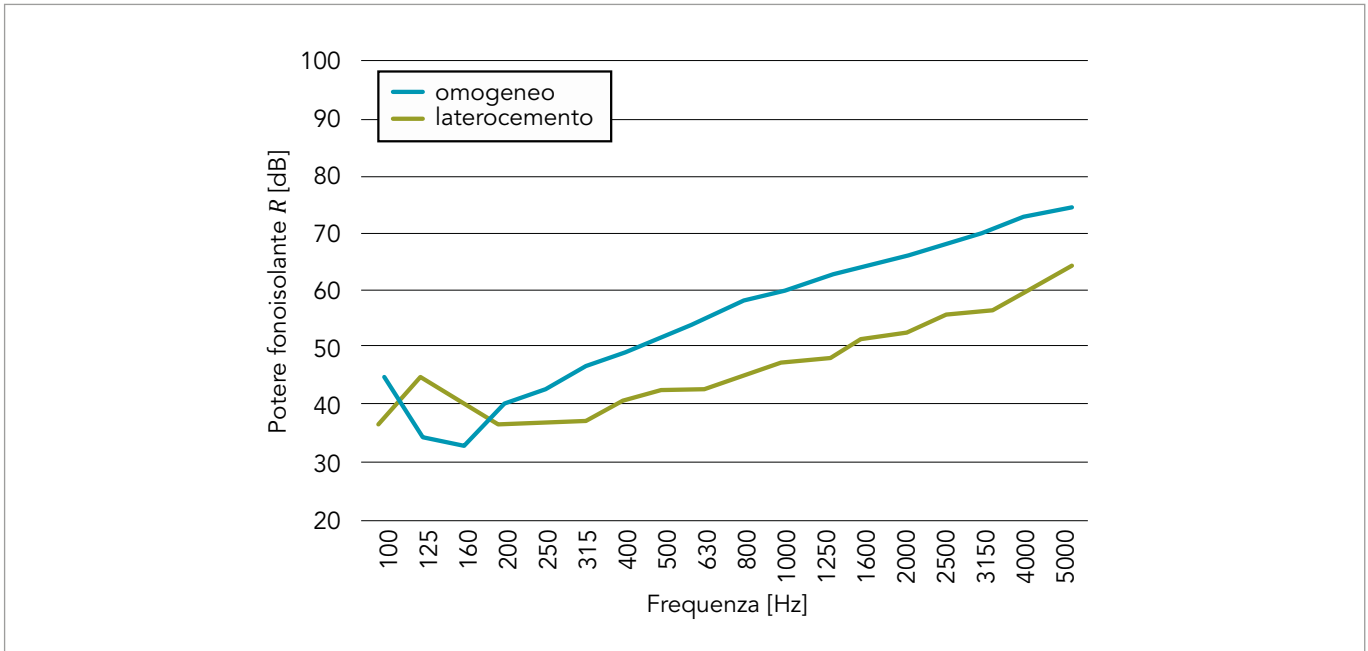


Figura 3.20: Confronto tra il potere fonoisolante misurato in laboratorio su un solaio omogeneo in calcestruzzo, di spessore 100 mm ($R_w=54$ dB; $C=-2$; $C_{tr}=-7$) e su un solaio in laterocemento di spessore totale pari a 200 mm ($R_w=46$ dB; $C=0$; $C_{tr}=-3$).

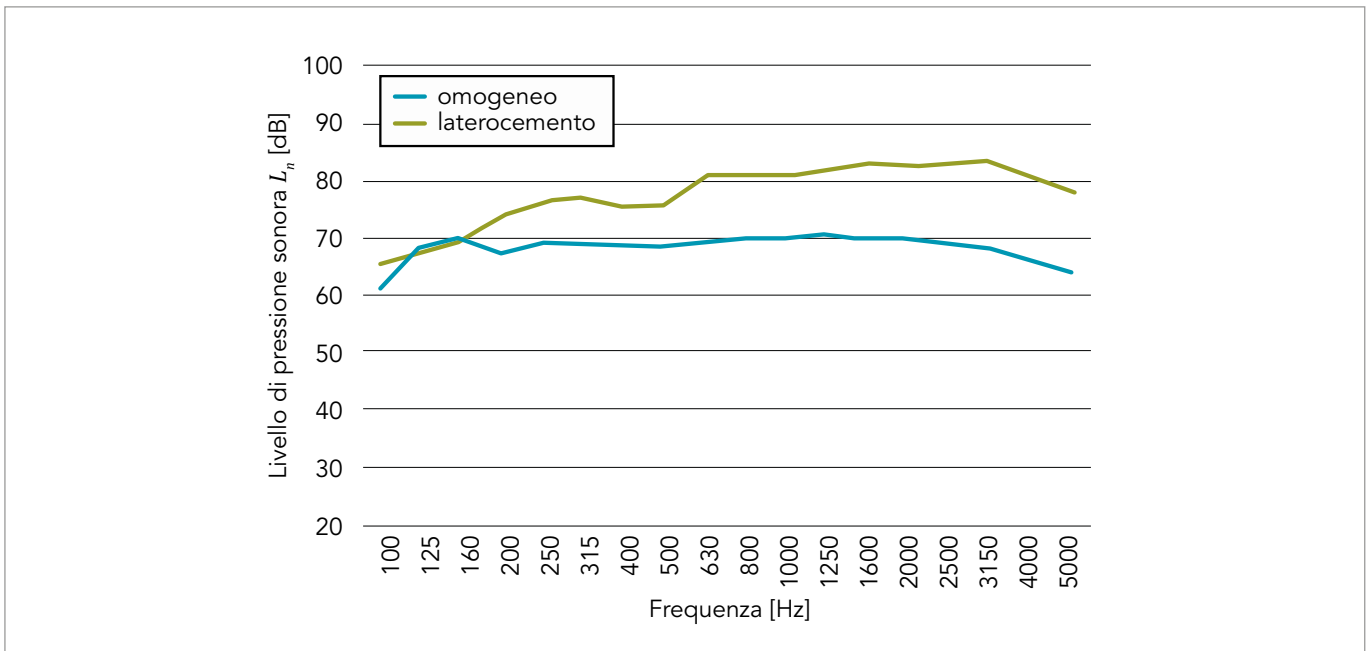


Figura 3.21: Confronto tra il livello di pressione sonora di rumore di calpestio normalizzato misurato in laboratorio su un solaio omogeneo in calcestruzzo, di spessore 100 mm ($L_{nW}=76$ dB; $C=-10$) e su un solaio in laterocemento di spessore totale pari a 200 mm ($L_{nW}=89$ dB; $C=-13$).

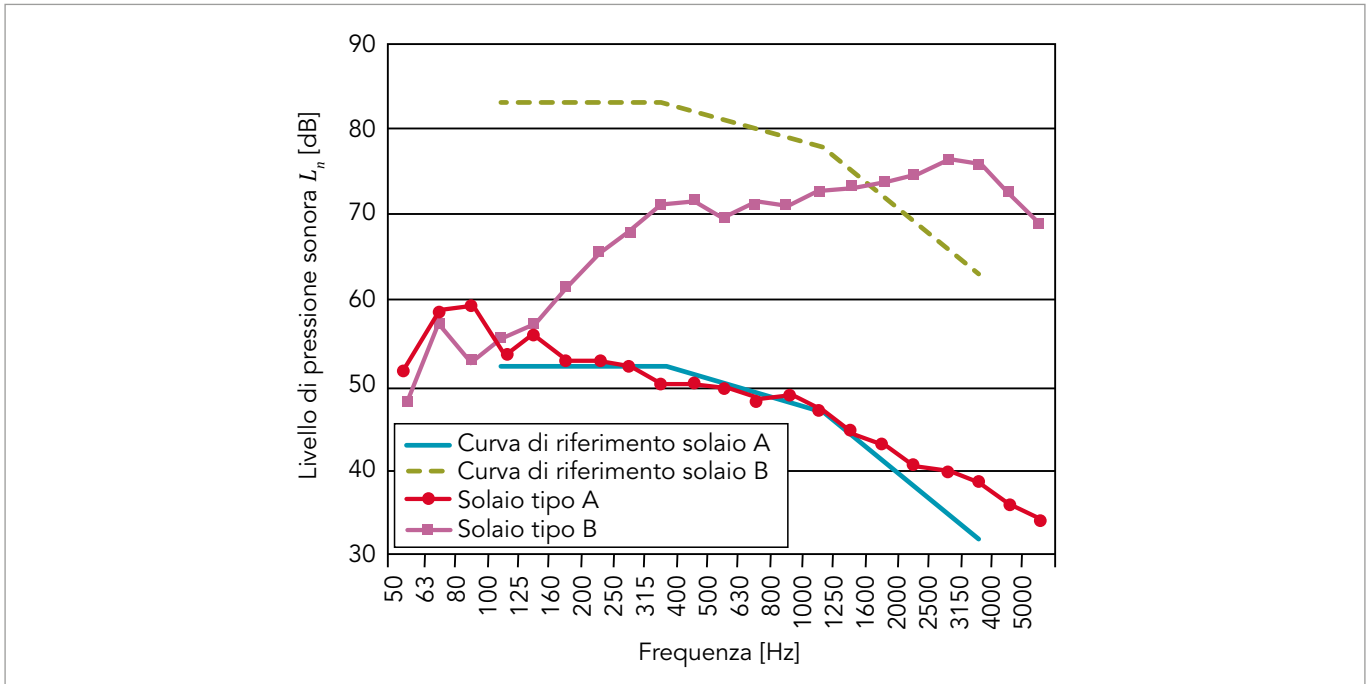


Figura 3.22: Confronto risultati ottenuti da misure in opera con due solai uguali, uno con pavimento galleggiante e uno senza.

Nella figura 3.23 sono riportati i risultati di due misurazioni eseguite nello stesso solaio di un edificio sperimentale, dove la pavimentazione era stata realizzata parte in parquet e parte in ceramica. Si può osservare una sostanziale coincidenza dei risultati alle basse e medie frequenze fino a circa 500 Hz. Alle alte frequenze, invece, si hanno notevoli differenze progressivamente crescenti all'aumentare della frequenza. Ciò è dovuto alla diversa modalità di trasmissione della forza di impatto sulle due superfici. Il pavimento in parquet determina uno smorzamento maggiore della ceramica con un conseguente taglio alle alte frequenze. In termini di indice di valutazione la differenza è risultata di 3 dB.

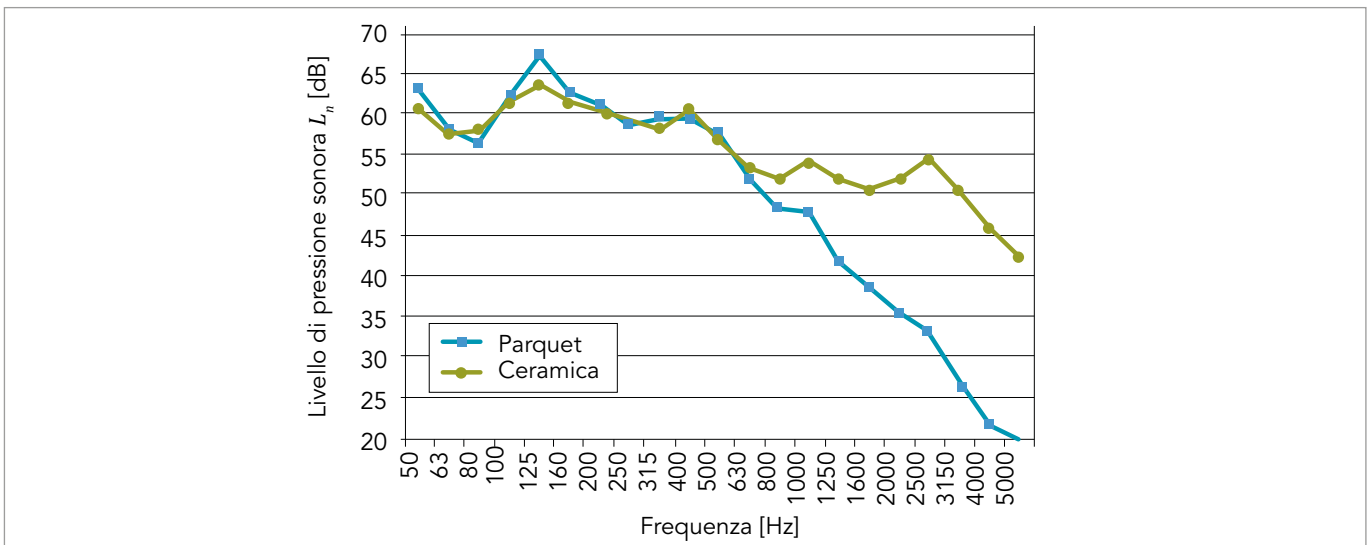


Figura 3.23: Confronto risultati ottenuti da misure in opera sullo stesso solaio ma con diverse finiture superficiali: parquet e ceramica.

La stima teorica del livello di rumore di calpestio può essere effettuata sulla base dei metodi di calcolo riportati nella norma UNI EN ISO 12354-2 [3], come illustrato più nel dettaglio nel prossimo paragrafo. L'appendice B della stessa norma [3], riporta una formula semplificata con la quale è possibile stimare l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio, normalizzato per l'assorbimento acustico, per un solaio omogeneo senza strati addizionali, con massa superficiale m' compresa tra 100 kg/m^2 e 600 kg/m^2 .

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - 35 \log m' \text{ [dB]}$$

Questa formula è cautelativa e valida per solai omogenei in calcestruzzo, calcestruzzo leggero o poroso, sui cui è stato gettato lo strato per il livellamento impianti. La norma UNI EN ISO 12354-2 [3] riporta una diversa formulazione per la stima dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio per solai in latero-cemento:

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - 35 \log m' \text{ [dB]}$$

Tuttavia, evidenze sperimentali hanno mostrato come l'indice di valutazione di un solaio grezzo in latero-cemento risulti generalmente maggiore di quello di un solaio omogeneo in calcestruzzo, a causa di valori di pressione sonora più elevati alle alte frequenze, rispetto allo spettro approssimativamente piatto che si ottiene con solai omogenei in calcestruzzo. Tale effetto, viene parzialmente compensato dalla maggiore efficacia di un pavimento galleggiante su solai in latero-cemento [39].

L'appendice C della norma UNI EN ISO 12354-2 fornisce un metodo di calcolo per la stima dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio, ottenibile mediante pavimenti galleggianti, valido sia per solai massivi omogenei che in laterocemento. In mancanza di risultati sperimentali è possibile calcolare l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio dato da un pavimento galleggiante realizzato con massetto in sabbia e cemento (o solfato di calcio) su sottofondo resiliente, dalla seguente relazione:

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_0} \text{ [dB]}$$

dove f è la frequenza nominale delle varie bande di ottava o terzi di ottava e f_0 è la frequenza di risonanza del sistema. L'indice di valutazione dell'attenuazione ΔL può essere calcolato come:

$$\Delta L_w = 13 \log m' - 14 \log s' + 20.8 \text{ [dB]}$$

La frequenza di risonanza può essere calcolata con la seguente espressione:

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

dove m' è la massa superficiale in kg/m^2 della stratigrafia al di sopra dello strato resiliente e s' è la rigidità dinamica dello strato elastico, espressa in MN/m^3 . Nel caso ci siano più strati resilienti accoppiati, la rigidità dinamica globale è data dall'inverso della somma del reciproco delle rigidità dinamiche di ogni singolo strato.

Per pavimenti galleggianti realizzati in asfalto o a secco, l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio può essere determinata da [28]:

$$\Delta L = 40 \log \frac{f}{f_0} \text{ [dB]}$$

L'indice di valutazione dell'attenuazione ΔL può essere calcolato come:

$$\Delta L_w = (-0.21m' - 5.45) \log s' + 0.46m' + 23.8 \text{ [dB]}$$

Si riporta, rispettivamente in figura 3.24 e in figura 3.25, il confronto delle prestazioni acustiche, in termini di potere fonoisolante e livello di pressione sonora di calpestio normalizzato, misurate su un solaio in latero cemento nudo e con l'installazione di un massetto galleggiante a secco.

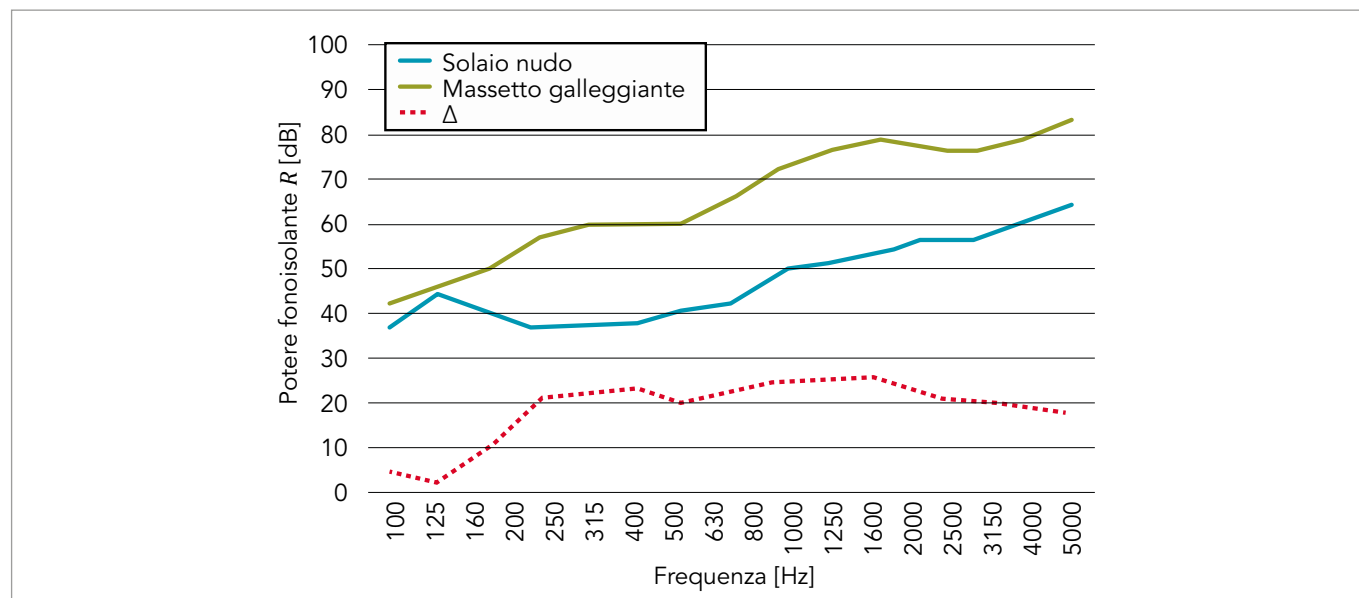


Figura 3.24: Potere fonoisolante misurato su un solaio in latero cemento di spessore 160 mm + 40 mm. Solaio nudo ($R_w=46$ dB; $C=0$; $C_{tr}=-3$) e con massetto galleggiante a secco ($R_w=61$ dB; $C=-6$; $C_{tr}=-2$) realizzato con lana di roccia di spessore 30 mm da 140 kg/m³ e doppia lastra in fibrocemento da 8+8 mm.

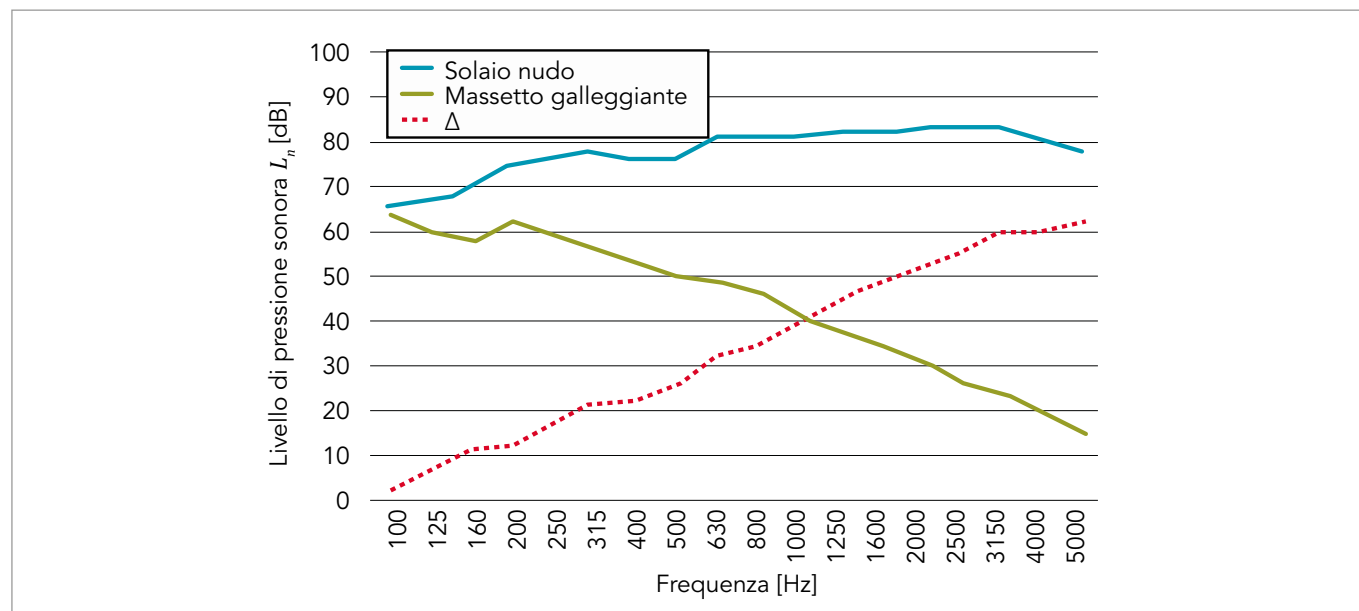


Figura 3.25: Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato misurato su un solaio in latero cemento di spessore 160 mm + 40 mm. Solaio nudo ($L_{nW}=89$ dB; $C=-13$) e con massetto galleggiante a secco ($L_{nW}=53$ dB; $C=-1$) realizzato con lana di roccia di spessore 30 mm da 140 kg/m³ e doppia lastra in fibrocemento da 8+8 mm.

L'attenuazione ΔL cresce quanto più è bassa la frequenza di risonanza del sistema. La frequenza di risonanza è tanto più bassa quanto più è bassa la rigidità dinamica o quanto più è alta la massa superficiale del massetto soprastante. Non potendo aumentare eccessivamente la massa del massetto, sia per problemi di costi oltre che per non aumentare eccessivamente lo spessore della soletta, si deve lavorare con materiali che abbiano rigidità dinamica più bassa possibile. Solitamente si considera che un materiale per pavimenti galleggianti debba avere una rigidità dinamica non superiore a 50 MN/m^3 . La rigidità dinamica di un materiale, solitamente, diminuisce all'aumentare del suo spessore.

3.6.2 - Massetto galleggiante su solaio leggero

I solai leggeri sono ampiamente utilizzati in svariate tipologie di edificio come, per esempio, solai realizzati con profilati metallici, solai in lignei o in CLT. I solai in legno con struttura a travi e travetti sono tra le soluzioni tecnologiche leggere attualmente più diffuse nell'edilizia residenziale italiana. La realizzazione di solai realizzati mediante strutture leggere offre certamente diversi vantaggi, tuttavia è necessaria un'attenta progettazione acustica, dal momento che questi elementi non offrono un isolamento acustico adeguato né alla trasmissione dei rumori aerei né a quelli impattivi. La trasmissione per via aerea non differisce in modo sostanziale da quanto già visto per le diverse tipologie di pareti leggere. Non potendo fare affidamento sul comportamento massivo dell'elemento è necessario progettare una stratigrafia in grado di incrementare adeguatamente il potere fonoisolante della struttura di base. È possibile che, in alcuni casi, sia necessaria l'installazione di un controsoffitto, dimensionato in modo idoneo per essere efficace anche a bassa frequenza, per poter raggiungere una prestazione di isolamento acustico aereo in ottemperanza dei limiti fissati dalla legge.

Il comportamento di un massetto galleggiante installato su un solaio in legno è significativamente diverso da quello che si avrebbe con un solaio omogeneo in calcestruzzo [37]. Derivare relazioni matematiche in grado di descrivere la trasmissione sonora dei rumori di tipo impattivo nei solai leggeri, risulta decisamente più complesso rispetto ai solai massivi. In particolare, nel caso di strutture leggere, è necessario considerare l'interazione tra strutture e sorgente sonora impattiva (generalmente si considera la macchina standardizzata di calpestio definita nella norma UNI EN ISO 10140-5), in quanto tali strutture non possono essere considerate perfettamente rigide come ipotizzato invece per i solai massivi. Anche la frequenza di taglio del sistema risonante, da cui è possibile determinare l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio, dipende dall'elasticità della struttura di base. La frequenza di risonanza f_0 può essere approssimata ipotizzando il solaio e il massetto galleggiante con un sistema massa-molla-massa:

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

Dove m'_1 rappresenta la massa superficiale del solaio di base e degli strati al di sotto del materassino resiliente, m'_2 è la massa superficiale del sistema che carica lo strato resiliente. L'appendice C della norma UNI EN ISO 10140-5 fornisce tre strutture leggere normalizzate di riferimento, e i rispettivi livelli di pressione sonora di calpestio L_n , per valutare sperimentalmente l'incremento delle prestazioni acustiche in seguito all'applicazione di strati aggiuntivi. Tuttavia, tra queste tre tipologie non vengono considerati solai in CLT e pertanto non sono attualmente disponibili valori di riferimento per il livello di pressione sonora di calpestio, nonostante siano state proposte formulazioni empiriche [26]. In figura 3.26 si confronta il potere fonoisolante misurato in laboratorio su un solaio ligneo, costituito da un assito con spessore pari a 18 mm installato su una struttura a travetti con sezione trasversale 225 mm × 75 mm, con quello misurato su un solaio CLT da 5 strati e uno spessore totale pari a 140 mm. In figura 3.27 si riporta il confronto tra livelli di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, misurati in laboratorio sulle stesse strutture lignee.

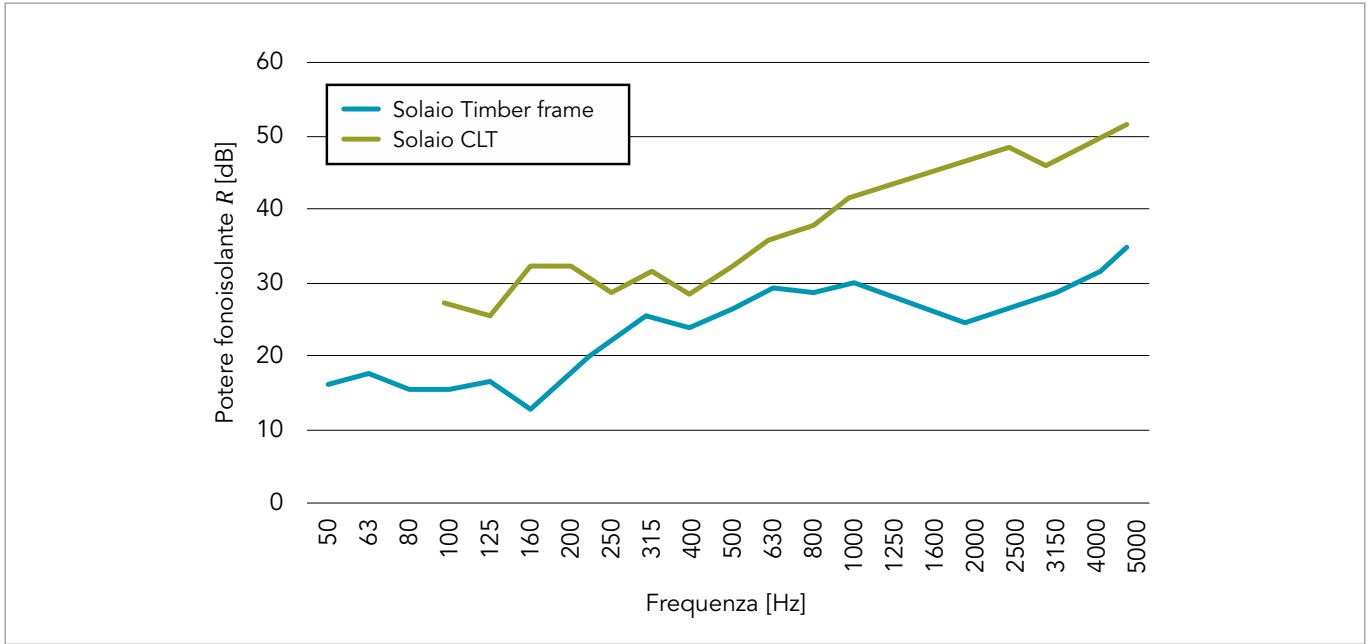


Figura 3.26: Potere fonoisolante misurato in laboratorio, confronto tra un solaio in legno costituito da assito su travetti ($R_w=27$ dB; $C_{50-5000}=0$; $C_{tr,50-5000}=-3$) e un solaio in CLT a 5 strati e spessore pari a 160 mm ($R_w=39$ dB; $C=-1$; $C_{tr}=-4$).

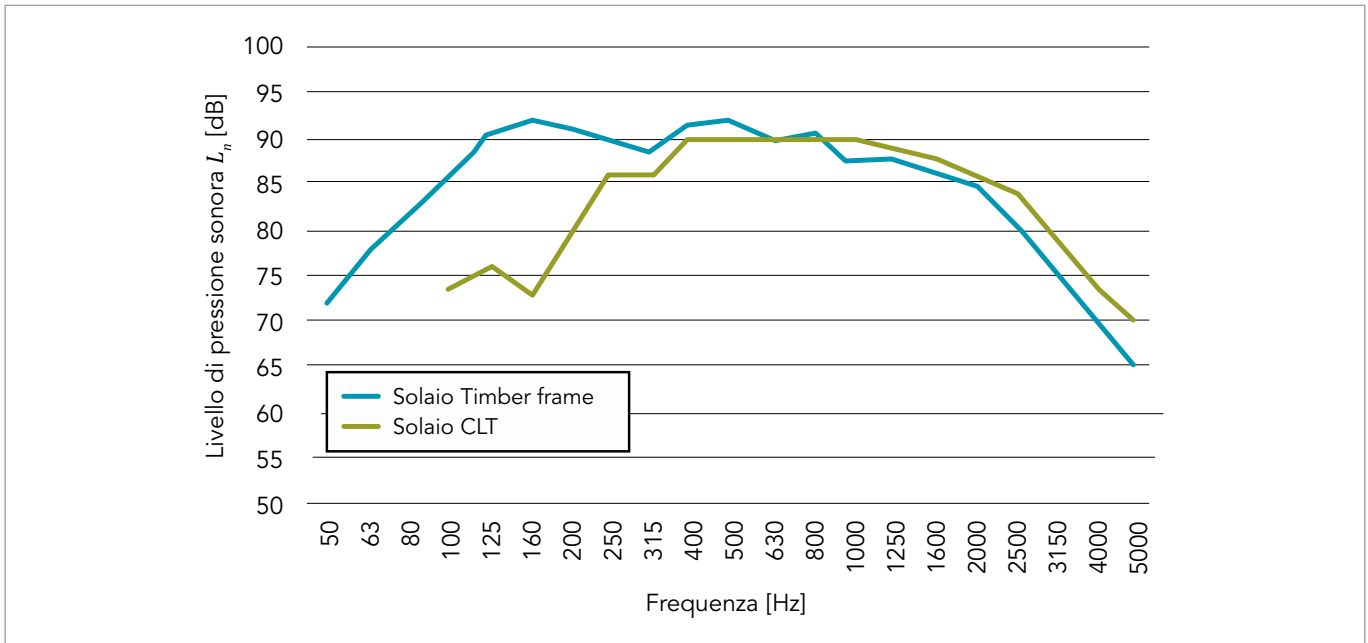


Figura 3.27: Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico misurato in laboratorio, confronto tra un solaio in legno costituito da assito su travetti ($L_{nw}=90$ dB; $C=-4$) e un solaio in CLT a 5 strati e spessore pari a 140 mm ($L_{nw}=92$ dB; $C=-8$) [41].

3.7 - Comportamento acustico in opera delle strutture: la trasmissione laterale

In quest'ultimo paragrafo, viene analizzato il contributo delle trasmissioni laterali nei confronti dell'isolamento acustico per via aerea e del rumore di calpestio, così come considerato nei modelli UNI EN ISO 12354. A tal proposito deve essere introdotta la categorizzazione degli elementi edilizi in funzione del tempo di riverberazione strutturale, ampiamente utilizzata da questi modelli di calcolo. Vengono definiti elementi di **Tipo A** quelli in cui il tempo di riverberazione strutturale è influenzato principalmente dagli elementi a cui sono connessi, anziché dalle dissipazioni caratteristiche del materiale; per esempio, sono classificabili come elementi edilizi di Tipo A setti e solette in calcestruzzo, partizioni in laterizio o solai in latero cemento e anche pannelli CLT. Gli elementi di **Tipo B** sono tutti quelli che non rientrano nella categoria Tipo A, per esempio, pareti leggere in cartongesso su telai in legno o metallici. Va inoltre specificata la possibilità che alcune partizioni rientrino nella categoria Tipo A alle basse e medie frequenze e nella categoria Tipo B alle frequenze più alte.

3.7.1 - UNI EN ISO 12354-1: isolamento acustico per via aerea

Il potere fonoisolante apparente (R') di una partizione esprime la quantità di energia sonora trasmessa nelle condizioni reali di utilizzo prendendo in considerazione, oltre alla trasmissione diretta attraverso la parete di separazione tra i due ambienti, anche i contributi di trasmissione laterale aerea e strutturale dovuti alle partizioni connesse al divisorio, come schematizzato in figura 3.28.

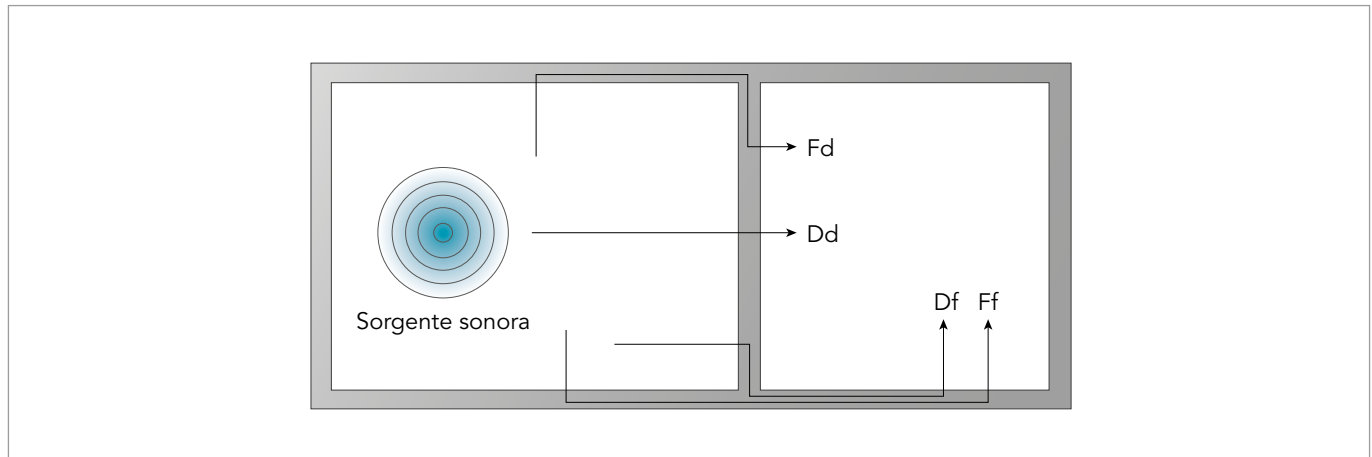


Figura 3.28: Rappresentazione dei percorsi di trasmissione diretti e laterali del rumore aereo.

Il metodo di calcolo del potere fonoisolante apparente è definito nella normativa europea UNI EN ISO 12354-1 [2]. Il metodo si basa sul calcolo del potere fonoisolante apparente R' , definito come:

$$R' = -10 \log \tau' \text{ [dB]}$$

Il coefficiente di trasmissione globale τ' , tiene in considerazione sia la trasmissione diretta, attraverso il divisorio, che il contributo delle trasmissioni laterali. Il potere fonoisolante di un divisorio viene perciò calcolato a partire dai valori del potere fonoisolante della partizione R_{d0} (in condizioni di laboratorio senza trasmissioni laterali) e del potere fonoisolante R_{ij} relativo ai diversi percorsi di trasmissione strutturale laterale indicati in figura 3.28: $ij = Ff, Fd, Df$.

Per il calcolo del potere fonoisolante apparente R' tra due ambienti adiacenti si deve, quindi, determinare il valore del potere fonoisolante per ogni singolo percorso di trasmissione sonora. Il modello definito nelle UNI EN ISO 12354 considera solo le trasmissioni laterali del primo ordine e pertanto si dovranno considerare dodici percorsi di trasmissione laterale per ogni partizione tra due ambienti (tre percorsi per ogni giunto laterale).

Per gli **elementi di Tipo A**, il potere fonoisolante R_{ij} relativo ai diversi percorsi di trasmissione sonora laterale può essere calcolato in funzione del potere fonoisolante delle due strutture interessate R_i e R_j , considerando gli eventuali incrementi dati da strati addizionali ΔR , e dalla differenza media (in base alla direzione) del livello di vibrazione del giunto $D_{v,ij}$:

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

dove S_s è l'area in m² dell'elemento divisorio, S_i e S_j la l'area degli elementi i e j . La differenza del livello di vibrazione del giunto può essere calcolata in funzione dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} :

$$D_{v,ij} = K_{ij} - 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \text{ [dB]}$$

L'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} deve essere determinato sperimentalmente in accordo con la norma UNI EN ISO 10848-1/4 [8][11], o secondo quanto previsto nell'appendice E della norma UNI EN ISO 12354-1 [2]. La lunghezza di assorbimento equivalente della struttura è definita:

$$a_i = \frac{2.2\pi^2 S_i}{c_0 T_{si}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ [dB]}$$

Indicando con T_{si} tempo di riverberazione strutturale dell'elemento e con $f_{ref}=1000$ Hz la frequenza di riferimento.

Per gli **elementi di Tipo B**, è possibile caratterizzare in modo adeguato la trasmissione laterale in funzione della differenza media normalizzata del livello di vibrazione del giunto $D_{v,ij'}$ determinata in accordo all'appendice F della norma [2]. Il potere fonoisolante R_{ij} relativo ai diversi percorsi di trasmissione sonora laterale può essere calcolato come:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{ij}} + \Delta R_{i,situ} + \Delta R_{j,situ} \text{ [dB]}$$

L'area di assorbimento equivalente di riferimento per ambienti residenziali è $A_0=10$ m², l_{ij} rappresenta la lunghezza del giunto e l_{lab} è il suo valore di riferimento per la situazione in laboratorio.

Il pedice _{situ} indica che il parametro è stato corretto per tener in considerazione la differenza di vincolo tra la situazione di laboratorio e quella in opera. Tale correzione è funzione del rapporto tra i tempi di riverberazione strutturale dell'elemento in condizioni di laboratorio e quelle in opera; non è possibile conoscere le ultime a priori. Nell'appendice C della norma [2] viene fornito un metodo per la stima dei tempi di riverberazione strutturale in laboratorio e in opera. Tuttavia, è necessario enfatizzare come tale correzione comporti variazioni spesso inferiori all'incertezza intrinseca dei modelli di calcolo definiti dalle UNI EN ISO 12354.

Questo modello di calcolo presenta diverse limitazioni. Il modello è applicabile solamente a strutture di cui si conosce l'indice di riduzione delle vibrazioni (o la differenza normalizzata del livello di vibrazione); inoltre è applicabile a divisori con caratteristiche di radiazione sonora simili per i due lati. È bene sottolineare come il modello sia approssimato e limitato solamente al calcolo del primo ordine di trasmissioni laterali.

La norma prevede anche un **metodo di calcolo semplificato** per la determinazione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente $R'_{w'}$ determinato come

$$R'_{w'} = -10 \log \left(10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{nj,w}/10} \right) \text{ [dB]}$$

dove $R_{ij,w}$ rappresenta l'indice di valutazione del potere fonoisolante relativo al percorso ij , $D_{n,j,w}$ è la differenza di livello normalizzata per la trasmissione attraverso piccoli elementi tecnici. L'indice di valutazione del potere fonoisolante per trasmissione diretta può essere valutato dalla prestazione della parete divisoria di base $R_{s,w}$ e il relativo incremento dato da strati aggiuntivi:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \text{ [dB]}$$

Nel caso in cui siano realizzati placcaggi o contropareti su entrambi i lati della parete di base, il valore inferiore dell'incremento del potere fonoisolante dovuto allo strati aggiuntivi viene considerato al 50%:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,1,w} + \frac{\Delta R_{Dd,2,w}}{2} \text{ [dB]}$$

Per strutture massive, l'indice di valutazione del potere fonoisolante per trasmissione laterale per ogni percorso ij è determinato come:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_j} \text{ [dB]}$$

Per strutture leggere invece, l'indice di valutazione del potere fonoisolante per trasmissione laterale deve essere calcolato dall'indice di valutazione della differenza di livello normalizzato $D_{n,f,ij,w}$ in accordo all'appendice G, come:

$$R_{ij,w} = D_{n,f,ij,w} + 10 \log \frac{l_{lab} S_s}{A_0 l_{ij}} \text{ [dB]}$$

Il modello semplificato ha un'applicabilità ancor più limitata del modello dettagliato. La norma, infatti, raccomanda di utilizzarlo solo per ambienti e elementi con dimensioni simili a quelle di laboratorio e con elementi con un andamento del potere fonoisolante in frequenza simile.

3.7.2 - UNI EN ISO 12354-2: rumore da calpestio

Il livello di pressione sonora di calpestio in opera, normalizzato rispetto all'assorbimento acustico L'_n , può essere calcolato come somma dell'energia trasmessa da diversi percorsi indipendenti, come schematizzato in figura 3.29. Considerando due ambienti sovrapposti, L'_n può essere calcolato in banda di terzi di ottava, in accordo al metodo dettagliato descritto nella norma UNI EN ISO 12354-2 [3]

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

Il livello di pressione sonora del rumore di calpestio trasmesso attraverso il solaio di separazione è indicato come $L_{n,d}$, determinato a partire dai dati di input come:

$$L_{n,d} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} \text{ [dB]}$$

dove ΔL rappresenta la riduzione del livello di pressione sonora di calpestio ottenuta con la posa della pavimentazione e/o di strati aggiuntivi, ΔL_d rappresenta la riduzione del livello di pressione sonora di calpestio ottenuta con la realizzazione di un controsoffitto.

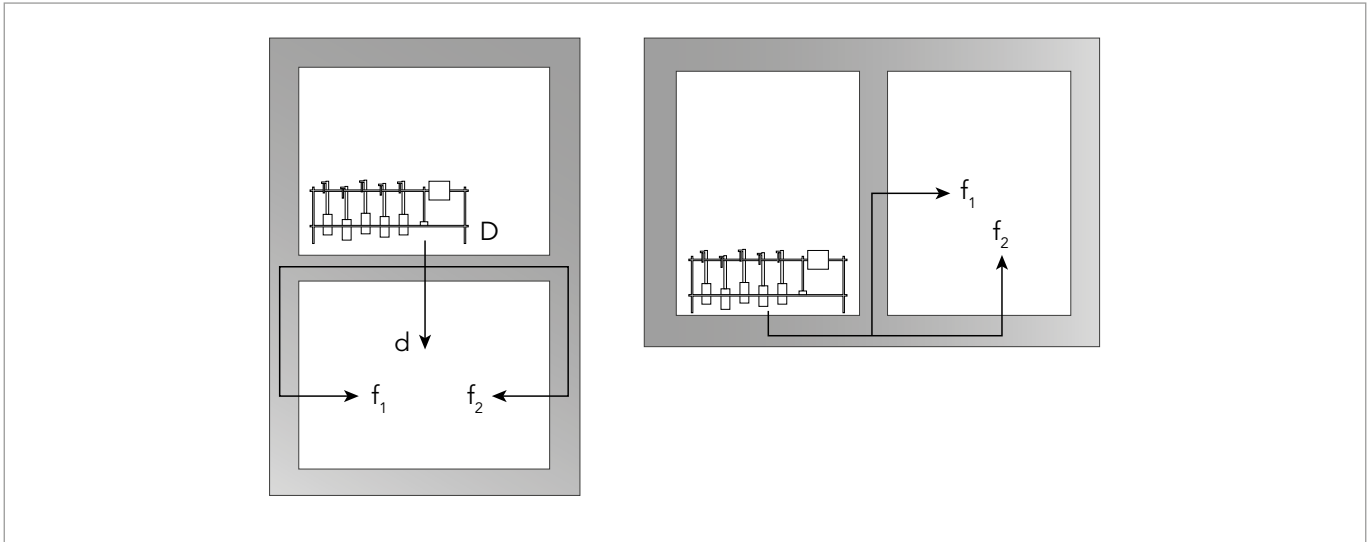


Figura 3.29: Rappresentazione dei percorsi di trasmissione diretti e laterali del rumore impattivo.

Per gli **elementi di Tipo A**, il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per l'assorbimento acustico $L_{n,ij}$, relativo alla trasmissione laterale dall'elemento di separazione eccitato i , dalla sorgente impattiva all'elemento j , può essere calcolato come:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log \frac{\sqrt{S_i}}{\sqrt{S_j}} \text{ [dB]}$$

dove L_n è il livello di pressione sonora normalizzato di calpestio del solaio considerato, S_i e S_j rappresentano le superfici dell'elemento i , eccitato dalla sorgente impattiva e la partizione radiante j , R_i e R_j sono i rispettivi poteri fonoisolanti e $\overline{D_{v,ij}}$ rappresenta la differenza media normalizzata del livello di vibrazione del giunto, già introdotta nel precedente paragrafo.

Per gli **elementi di Tipo B**, è possibile determinare il livello di pressione sonora normalizzato $L_{n,ij}$ relativo alla trasmissione laterale, dall'elemento di separazione eccitato i all'elemento j , in funzione della differenza media normalizzata del livello di vibrazione del giunto $\overline{D_{v,ij}}$, determinata in accordo all'appendice F della norma UNI EN ISO 12354-1 [2].

$$L_{n,ij} = L_{n,ii} - \Delta L_i + \frac{R_i + R_j}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \log \frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \text{ [dB]}$$

Per quanto riguarda la conversione dei valori di laboratorio dei dati di input in valori in opera rimangono valide le considerazioni del paragrafo precedente. Tuttavia, l'incremento prestazionale ottenuto con strati aggiuntivi in opera può essere considerato uguale al valore di laboratorio: $\Delta L_{situ} = \Delta L$, $\Delta L_{d,situ} = \Delta L_d$. Analogamente a quanto detto per il calcolo del potere fonoisolante, anche il modello descritto nella parte 2 della UNI EN ISO 12354 presenta diverse limitazioni. Il modello è applicabile solamente a strutture di cui si conosce l'indice di riduzione delle vibrazioni (o la differenza normalizzata del livello di vibrazione) ed è applicabile a divisori con caratteristiche di radiazione sonora simili per i due lati. Il modello approssimato si limita al calcolo del primo ordine di trasmissioni laterali. Inoltre, l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio ΔL , misurato su solaio omogeneo in conformità alla norma UNI EN ISO 10140-3 [4], non può essere applicato al calcolo previsionale di solai leggeri.

Anche per quanto riguarda il rumore di calpestio è previsto dalla norma un **metodo di calcolo semplificato** per la determinazione dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora normalizzato per l'assorbimento acustico $L'_{n,w}$:

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

L'indice di valutazione del livello di pressione sonora del rumore di calpestio trasmesso direttamente attraverso il solaio di separazione è calcolato come:

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \text{ [dB]}$$

dove $L_{n,eq,0,w}$ è l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio del solo solaio, normalizzato per l'assorbimento acustico, ΔL_w è l'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio data dal rivestimento della pavimentazione e $\Delta L_{d,w}$ è l'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio data da un controsoffitto.

L'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato, per il percorso di trasmissione laterale ij , è determinato come:

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

Se l'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} è dipendente dalla frequenza, si considera un valore mediato sulle bande di terzo di ottava da 250 Hz a 1000 Hz.

Per gli **elementi di Tipo B**, l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato, per il percorso di trasmissione laterale ij , deve essere determinato dall'indice di valutazione del livello di pressione sonora per trasmissione laterale $L_{nf,ij,lab,w}$, misurato in laboratorio come descritto nell'appendice D della norma [3]:

$$L_{n,ij,w} = L_{nf,ij,lab,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - 10 \log \left(\frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \text{ [dB]}$$

Il modello semplificato ha un'applicabilità più limitata del modello dettagliato e i risultati ottenuti sono verosimilmente affetti da maggior incertezza.

3.7.3 - UNI EN ISO 12354-3: isolamento acustico di facciata

La parte 3 della serie di norme UNI EN ISO 12354 [4] specifica i modelli di calcolo per la previsione dell'isolamento di facciata in opera. Le equazioni per determinare l'isolamento di facciata $D_{2m,nr}$ considerando i diversi elementi che compongono la facciata sono state illustrate nel paragrafo 3 e non saranno pertanto ripetute. Il contributo delle trasmissioni laterali può essere calcolato secondo il modello descritto nella UNI EN ISO 12354-1 [2]. Tuttavia, nella norma viene sottolineato come nel caso dell'isolamento di facciata, il contributo delle trasmissioni laterali risulti generalmente trascurabile, eccetto quando sono presenti elementi connessi rigidamente, come, per esempio, pareti in muratura o setti in calcestruzzo collegati rigidamente a solai o pareti divisorie. In questi casi il contributo delle trasmissioni laterali potrebbe influenzare l'isolamento di facciata, soprattutto nel caso siano richieste elevate prestazioni acustiche. Nella maggior parte dei casi in cui sono coinvolti elementi massivi collegati rigidamente, non è comunque necessario il calcolo rigoroso del contributo delle trasmissioni laterali, ma è possibile assumere una riduzione dell'isolamento acustico di facciata di 2 dB.

3.7.4 - Aggiornamento della norma UNI 11175

È stata recentemente pubblicata la norma divisa in 2 parti UNI 11175 – Acustica in edilizia – Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici.

La parte 1 [17], dal titolo “applicazione delle norme tecniche alla tipologia costruttiva nazionale”, descrive i modelli di calcolo semplificati, basati sugli indici di valutazione, per determinare le prestazioni acustiche dell’edificio, relative sia all’isolamento del rumore aereo proveniente dall’esterno, che all’isolamento acustico per via aerea e dei rumori impattivi tra ambienti. Le procedure di calcolo sono riprese dai modelli definiti dalle norme della serie UNI EN ISO 12354, così come viene ripresa anche la distinzione tra strutture di Tipo A e di Tipo B. Tuttavia, rispetto alla serie UNI EN ISO 12354, la norma italiana UNI 11175 introduce alcune novità rilevanti nel contesto nazionale.

La norma fornisce una serie di formulazioni semi-empiriche per la valutazione delle prestazioni acustiche degli elementi edilizi tipici delle tipologie costruttive nazionali. Riprendendo la norma UNI EN ISO 12354-1, riporta un’equazione per la stima dell’indice di valutazione del potere fonoisolante di pareti monostrato, realizzate con elementi in laterizio forati, aventi percentuale di foratura non superiore al 65% e caratterizzati da fori distribuiti pressoché uniformemente sulla faccia dell’elemento, posati con giunti orizzontali e verticali di malta e con massa superficiale compresa nell’intervallo $250 < m' \leq 380 \text{ kg/m}^2$:

$$R_w = 37.5 \log m' - 42 \text{ [dB]}$$

Nel caso di elementi analoghi ma con massa superficiale $m' > 380 \text{ kg/m}^2$ viene consigliata la stima dell’indice di valutazione del potere fonoisolante con l’equazione:

$$R_w = \frac{37.5 \log m' - 42 + 20 \log m'}{2} \text{ [dB]}$$

Mentre nel caso la massa superficiale di questa tipologia di partizione $80 < m' \leq 250 \text{ kg/m}^2$ si ottiene una stima più accurata con l’equazione:

$$R_w = 20 \log m' \text{ [dB]}$$

La norma ritiene questa formulazione valida anche per partizioni orizzontali e verticali di tipo massivo singole, o doppie con intercapedine, vuota e di spessore inferiore a 5 cm, con massa superficiale $m' \geq 80 \text{ kg/m}^2$.

Vengono proposte anche due formulazioni empiriche per la stima del potere fonoisolante dei solai; per strutture in laterocemento con massa superficiale $250 < m' \leq 500 \text{ kg/m}^2$:

$$R_w = 23 \log m' - 8 \text{ [dB]}$$

e per solai lignei a strati incrociati (CLT) con massa superficiale $46.7 < m' \leq 130 \text{ kg/m}^2$:

$$R_w = 20.3 \log m' \text{ [dB]}$$

Per quanto riguarda il calcolo dell’incremento del potere fonoisolante delle strutture di base la norma riprende l’appendice D della UNI EN ISO 12354-1, sia per i rivestimenti interni che per i rivestimenti esterni, come per esempio i sistemi ETICS, per i quali propone il modello di calcolo già descritto nel paragrafo 4.

Sono fornite formule per la stima dell'indice di valutazione del livello normalizzato di calpestio, per le strutture maggiormente utilizzate a livello nazionale, derivate da ricerche svolte presso laboratori e istituti di ricerca italiani. Per i solai in laterocemento con strato di completamento in calcestruzzo alleggerito e massa superficiale $270 < m' \leq 360 \text{ kg/m}^2$, in accordo alla norma UNI EN ISO 12354-2 [3], viene fornita la relazione:

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - 35 \log m' \text{ [dB]}$$

Per solai in laterocemento senza un massetto alleggerito per la posa degli impianti, la norma propone una formula previsionale funzione della massa equivalente superficiale del solaio M_{ep} [kg/m^2]:

$$L_{n,eq,0,w} = 170 - 35 \log M_{ep} \text{ [dB]}$$

calcolata come $M_{ep} = M_R - M_r$; dove M_R è la massa superficiale del solaio e $M_r = 15$ per solai con blocchi di alleggerimento in polistirene, o $M_r = 80 (h/H)$ per solai in laterocemento di altezza totale H e altezza dei blocchi di alleggerimento pari a h .

La norma propone anche una formulazione empirica per la stima dell'indice di valutazione del livello normalizzato di calpestio per solaio in CLT, con massa superficiale $70 < m' \leq 130 \text{ kg/m}^2$:

$$L_{n,eq,0,w} = 128 - 22 \log m' \text{ [dB]}$$

Per la valutazione previsionale dell'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio ΔL_w dato dalla realizzazione di massetti galleggianti posati su solai massivi in calcestruzzo o in laterocemento vengono fornite le equazioni già riportate nel paragrafo 6.1. Non sono fornite formulazioni specifiche per la stima dell'attenuazione del rumore di calpestio di un massetto galleggiante applicato su solai leggeri o in CLT. Tuttavia, negli allegati viene riportata una procedura di correzione dello spettro dell'attenuazione del livello di calpestio di massetti galleggianti in bande di 1/3 di ottava ΔL , ricavata da misure di laboratorio, per poterla applicare a solai in CLT, o più generalmente a solai diversi da quelli in cemento armato o laterocemento, attraverso un termine correttivo $\Delta 0$ funzione della rigidità dinamica dello strato resiliente utilizzato e di un fattore $\Delta \Delta 0$, i cui valori sono riportati nella norma in bande di terzi di ottava.

$$\Delta 0 = \Delta \Delta 0 + 19.5 - 11 \log \sqrt{\frac{s'}{13.5}}$$

Per il calcolo previsionale delle prestazioni acustiche delle strutture in CLT la norma fornisce anche formule per determinare l'indice di riduzione per le vibrazioni K_{ij} per giunti generici, che non si riferiscono cioè all'utilizzo di specifica carpenteria metallica, quale per esempio viti o piastre normalmente impiegata negli ancoraggi.

Tra le novità introdotte dalla norma si sottolinea infine, una procedura di calcolo dell'isolamento di facciata per gli ambienti d'angolo [42], considerando diverse possibili posizioni della sorgente, come illustrato in figura 30. Individuando tre casi specifici di ambiente d'angolo, la norma fornisce diverse formulazioni per il calcolo previsionale dell'isolamento di facciata.

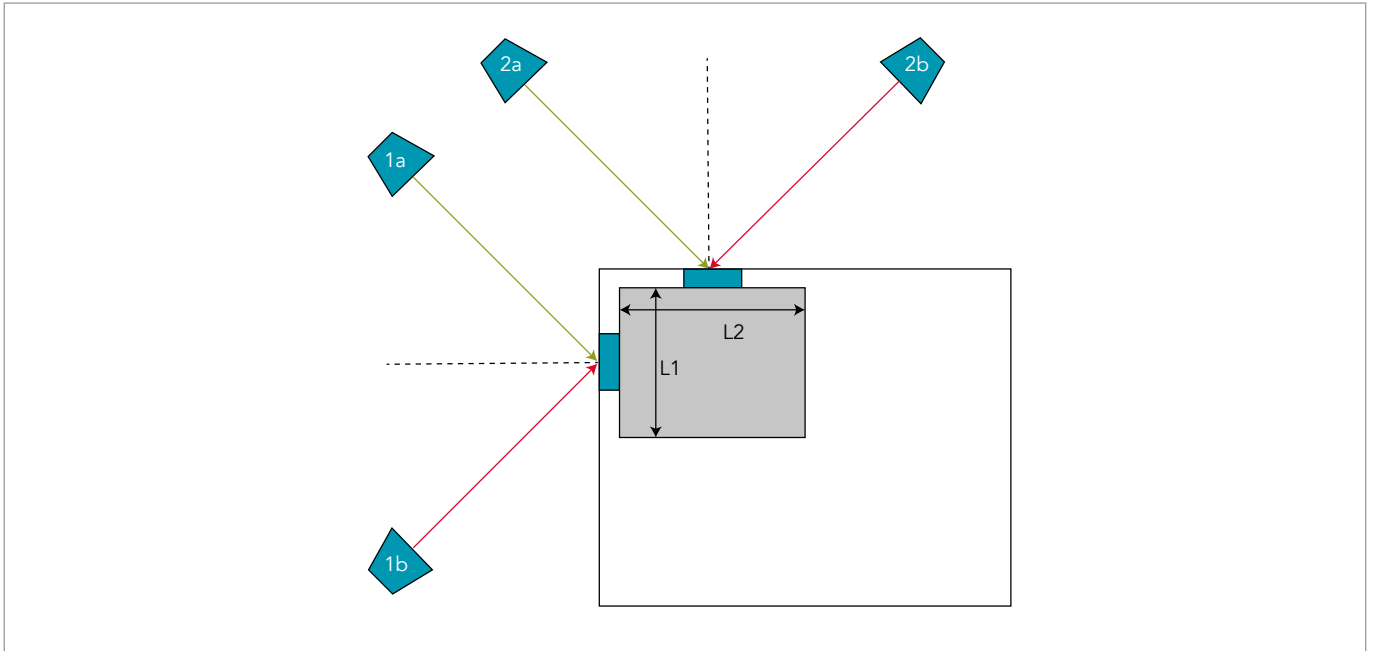


Figura 3.30: Esempio di possibili posizioni della sorgente sonora per un ambiente d'angolo al piano terra.

Nel caso di un ambiente d'angolo con due pareti perimetrali è possibile calcolare l'isolamento acustico di facciata come:

$$D_{2m,nT,w} = -10 \log \left(\frac{10^{-D_{2m,nT,w1}/10} + 10^{-D_{2m,nT,w2}/10}}{2} \right) \text{ [dB]}$$

dove $D_{2m,nT,wi}$ rappresenta l'indice di valutazione dell'isolamento acustico dell'intera facciata calcolato in funzione della posizione della sorgente $i = 1,2$:

$$\begin{cases} D_{2m,nT,w1} = -10 \log \left(10^{-\frac{D_{2m,nT,w11}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w22} + \Delta D_{21}}{10}} \right) \text{ [dB]} \\ D_{2m,nT,w2} = -10 \log \left(10^{-\frac{D_{2m,nT,w22}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w11} + \Delta D_{12}}{10}} \right) \text{ [dB]} \end{cases}$$

L'attenuazione ΔD_{ij} dovuta alla diffrazione dello spigolo dell'edificio, o alla diversa distanza tra la sorgente e la facciata, fornita per le diverse posizioni della sorgente e in funzione del piano a cui si trova l'ambiente di calcolo, è riportata in Tabella 3.4; gli indici di valutazione referiti all'isolamento acustico della facciata 1, con sorgente in posizione 1 e della facciata 2 con sorgente in posizione 2, rispettivamente $D_{2m,nT,w11}$ e $D_{2m,nT,w22}$ sono determinati secondo quanto riportato nei paragrafi 3.3 e 3.7.3.

Nel caso di un ambiente con esposizione esterna tramite una parete perimetrale e la copertura, con solaio a vista, è possibile calcolare l'isolamento di facciata con sorgente sonora posizionata a livello del terreno come:

$$D_{2m,nT,w} = -10 \log \left(10^{-\frac{D_{2m,nT,w11}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w33} + \Delta D_{31}}{10}} \right) \text{ [dB]}$$

L'indice di valutazione dell'isolamento di facciata della copertura $D_{2m,nT,w33}$ è calcolato secondo quanto riportato nei paragrafi 3 e 7.3 e i valori di attenuazione $\Delta D_{31'}$, validi per coperture con inclinazione $\leq 40\%$, sono riportati in Tabella 3.4.

Infine, nel caso di un ambiente d'angolo con due pareti perimetrali e esposizione esterna anche tramite la copertura, con solaio a vista, è possibile calcolare l'indice di valutazione dell'isolamento acustico dell'intera facciata calcolato in funzione della posizione della sorgente, a livello del terreno come:

$$\begin{cases} D_{2m,nT,w1} = -10 \log \left(10^{-\frac{D_{2m,nT,w11}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w22} + \Delta D_{21}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w33} + \Delta D_{31}}{10}} \right) \text{ [dB]} \\ D_{2m,nT,w2} = -10 \log \left(10^{-\frac{D_{2m,nT,w22}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w11} + \Delta D_{12}}{10}} + 10^{-\frac{D_{2m,nT,w33} + \Delta D_{31}}{10}} \right) \text{ [dB]} \end{cases}$$

Tabella 3.4: Valori di attenuazione dovuta alla diffrazione dello spigolo o alla diversa distanza della sorgente dalla facciata.

| Piano | Posizione 1b o 2b | Posizione 1a o 2a | | Posizione 1b o 2b | | Posizione 1a o 2a | |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | $\Delta D_{21b} = \Delta D_{21b}$ | $\Delta D_{21a} = \Delta D_{21a}$ | ΔD_{31} | $\Delta D_{13b'}$ $\Delta D_{31b'}$ | $\Delta D_{23b'}$ $\Delta D_{32b'}$ | $\Delta D_{13a'}$ $\Delta D_{31a'}$ | $\Delta D_{23a'}$ $\Delta D_{32a'}$ |
| Terra | 15 | 0 | 10 | 11 | | 1 | |
| Primo | 12 | 2 | 16 | 17 | | 17 | |
| Secondo | 12 | non prevista | 16 | 18 | | - | |
| Terzo | 10 | non prevista | 15 | 15 | | - | |

Una valutazione accurata delle prestazioni acustiche attese in opera di elementi edilizi, attraverso modelli descritti dalle norme UNI EN ISO 12354 e della UNI 11175, è subordinata alla conoscenza di dati di input affidabili e attendibili. È opportuno prestare particolare attenzione alla fonte e alla tipologia dei dati di ingresso del modello di calcolo. La qualità dei dati di ingresso è importante nella determinazione dell'attendibilità del risultato finale. Quando non sono disponibili dati di ingresso attendibili, il modello può essere usato solo per uno studio parametrico, variando dati di ingresso incerti se ne può verificare l'influenza sul risultato finale. La parte 2 della UNI 11175 [18] fornisce indicazioni in merito al reperimento e utilizzo dei dati di ingresso e specifiche per la creazione di banche dati. La norma evidenzia come i dati di ingresso nei modelli di calcolo debbano essere ricavati preferibilmente da fonti quali:

- rapporti di prova di laboratorio
- dati tabellari da fonte normativa

Per i prodotti con obbligo di marcatura CE, come nel caso delle lane minerali, la norma armonizzata di prodotto prevede che, per le caratteristiche essenziali connesse ad applicazioni in ambito acustico, i dati di ingresso derivanti da "rapporti di prova" o da "dati tabellari" siano contenuti nella Dichiarazione di Prestazione (DoP).

A differenza di un singolo rapporto di prova che è rappresentativo del solo campione testato, la presenza di dati dichiarati in DoP rappresenta la garanzia che il fabbricante abbia una costanza produttiva tale da permettere la permanenza nel tempo delle prestazioni dichiarate per l'intero processo produttivo in serie.

In accordo con il CPR, Regolamento Prodotti da Costruzione (UE) N. 305/2011, ogni prodotto da costruzione immesso sul mercato coperto da norma armonizzata europea (EN) o per il quale è stato rilasciato un ETA (Valutazione Tecnica Europea - European Technical Assessment) deve essere accompagnato da un DoP e deve essere marcato CE. Conformemente alle pertinenti specifiche tecniche armonizzate, la dichiarazione di prestazione (DoP) fornisce informazioni relative alle prestazioni di un prodotto in relazione alle sue caratteristiche essenziali. Per essere in grado di redigere il DoP, il fabbricante deve passare

attraverso un processo che include la documentazione, la verifica da parte di terzi e infine la certificazione delle prestazioni del prodotto. Al fine di preservare nella produzione in serie le caratteristiche essenziali dichiarate, il CPR descrive cinque sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione (AVCP) che assicurano con rigore decrescente (Sistema 1+, 1, 2+, 3, 4) che il fabbricante, in ciascuno dei suoi stabilimenti, abbia una costanza produttiva tale da permettere la permanenza nel tempo delle prestazioni dei campioni testati. Nel redigere la dichiarazione di prestazione, il fabbricante si assume la responsabilità della conformità del prodotto da costruzione a tale prestazione dichiarata. Qualsiasi informazione relativa alle prestazioni del prodotto in relazione alle sue caratteristiche essenziali dovrebbe essere fornita solo in forma di DoP.

3.8 - Bibliografia

3.8.1 - Riferimenti legislativi

[1] D.P.C.M. del 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" pubblicato sulla G.U. n°297 del 22-12-97.

3.8.2 - Riferimenti normativi

[2] UNI EN ISO 12354-1:2017; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.

[3] UNI EN ISO 12354-2:2017; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti.

[4] UNI EN ISO 12354-3:2017; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 3: Isolamento acustico dal rumore proveniente dall'esterno per via aerea.

[5] UNI EN ISO 12354-4:2017; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 4: Trasmissione del rumore interno all'esterno.

[6] UNI ISO 12354-5:2009; Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 5: Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici.

[7] UNI EN ISO 10140-1:2021; Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Regole di applicazione per prodotti particolari.

[8] UNI EN ISO 10848-1:2017; Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Parte 1: Documento quadro.

[9] UNI EN ISO 10848-2:2017; Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Parte 2: Prova su elementi di tipo B nel caso di giunti a debole influenza.

[10] UNI EN ISO 10848-3:2017; Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Parte 3: Applicazione agli elementi di tipo B nel caso di giunti a forte influenza.

[11] UNI EN ISO 10848-4:2017; Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Parte 4: Applicazione ai giunti con almeno un elemento di tipo A.

[12] UNI 11367:2010; Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera.

[13] UNI 11296:2018; Acustica in edilizia - Posa in opera di serramenti e altri componenti di facciata - Criteri finalizzati all'ottimizzazione dell'isolamento acustico di facciata dal rumore esterno.

[14] UNI/TR 11715:2018; Isolanti termici per l'edilizia - Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l'esterno (ETICS).

[15] DIN 18560-2:2009; Floor screeds in building construction - Part 2: Floor screeds and heating floor screeds on insulation layers.

[16] UNI 11516:2013; Indicazioni di posa in opera dei sistemi di pavimentazione galleggiante per l'isolamento acustico.

- [17] UNI 11175-1:2021; Acustica in edilizia – Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici – Parte 1: Applicazione delle norme tecniche alla tipologia costruttiva nazionale.
- [18] UNI 11175-2:2021; Acustica in edilizia – Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici – Parte 2: Dati di ingresso per il modello di calcolo.

3.8.3 - Riferimenti scientifici e tecnici

- [19] B. H. Sharp. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering* 1978; 11(2): 53–63.
- [20] J. L. Davy. Sound transmission of cavity walls due to structure borne transmission via point and line connections. *J Acoust Soc Am* 2012; 132(2): 814–821.
- [21] A. Santoni, J. L. Davy, P. Fausti, P. Bonfiglio, A review of the different approaches to predict the sound transmission loss of building partitions. *Building Acoustics, On line First*, 2020.
- [22] T.E. Vigran. "Sound transmission in multilayered structures—introducing finite structural connections in the transfer matrix method." *Applied Acoustics* 71.1 (2010): 39-44.
- [23] P. Fausti, R. Pompoli. Isolamento acustico di strutture divisorie in laterizio. *Costruire in laterizio* (1996).
- [24] R. Albatici, A. Di Bella, G. Di Cesare, P. Fausti, A. Frattari, R. Pompoli, G. Righetti, S. Secchi, G. Zanarini, R. Zecchin. Isolamento acustico di pareti in laterizio: misure sperimentali e metodi di previsione. *Atti del Convegno Acustica Applicata all'Edilizia*, Verona (2000).
- [25] A. Santoni, Radiazione e trasmissione Sonora nelle strutture edilizie. *Rivista Italiana di Acustica*, 42 (1-2) 29-45, 2018
- [26] A. Santoni, P. Fausti, P. Bonfiglio, and M. Caniato. On the use of the transfer matrix method to evaluate sound insulation in complex building partitions. In *Proceedings of the 16th IBPSA International Conference and Exhibition*, pages 55–62, Rome, Italy, 2019. IBPSA.
- [27] E. Karacabeyli, Douglas. "CLT handbook." US Edition, FPIInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Point-Claire, Quebec (2013).
- [28] T. E. Vigran, *Building acoustics*. CRC Press, 2014.
- [29] A. Di Bella, N. Granzotto, L. Barbaresi. "Analysis of acoustic behavior of bare CLT floors for the evaluation of impact sound insulation improvement." *Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA*. Vol. 28. No. 1. Acoustical Society of America, 2016.
- [30] C. Hoeller, J. Mahn, D. Quirt, S. Schoenwald, B. Zeitler (2017). \Research Report RR-335: Apparent sound insulation in cross-laminated timber buildings. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada.
- [31] A. Santoni, P. Fausti, P. Bonfiglio, M. Caniato. On the use of the transfer matrix method to evaluate sound insulation in complex building partition. *Proceedings of Building Simulation*, Rome, 2019.
- [32] E. Nilsson and A. C. Nilsson. Prediction and measurement of some dynamic properties of sandwich structures with honeycomb and foam cores. *Journal of Sound and Vibration* 2002; 251(3): 409–430.
- [33] F. Ljunggreen. Sound insulation prediction of single and double CLT panels, *Proceedings of International Congress on Acoustics*, Aachen, 2019.
- [34] A. Santoni, Bonfiglio, P., Davy, J. L., Fausti, P., Pompoli, F., L. Pagnoncelli. Sound transmission loss of ETICS cladding systems considering the structure-borne transmission via the mechanical fixings: Numerical prediction model and

experimental evaluation, *Applied acoustics* 122 (2017) 88-97.

- [35] L. Weber, S. Müller. Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen, Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart, Germany, 2014.
- [36] L. Weber; Y. Zhang; D. Brandstetter. Influence of Wall Construction on the Acoustical Behaviour of ETHICS. In Proceedings of the DAGA 2002, Bochum, Germany, 4–8 March 2002.
- [37] L. Weber, A. Buchele. Acoustic Refurbishment of Residential Buildings with Additional Linings and Additional Lining Constructions-Calculation, Design, and Optimization; Abridged Version of Research Report B-BA 2/2008; Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP): Stuttgart, Germany.
- [38] L. Weber. Effect of ETHICS on the flanking transmission of outer walls. In Proceedings of the Fortschritteder Akustik-DAGA, Strasbourg, France, 22–25 March 2004.
- [39] P. Fausti, F. Bettarello, R. Cremonini, Influenza dello spettro sonoro sulla determinazione dell'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio di solai, in atti del 36° Convegno Nazionale AIA, Torino, 10-12 giugno 2009, pp 1-6.
- [40] G. Cellai, D. Secchi. Il Ripristino dei requisiti acustici passivi: metodi di intervento e valutazione dei costi. Atti del 41° Convegno Nazionale dell'Associazione italiana di Acustica, Pisa 17-19 giugno 2014.
- [41] A. Di Bella, N. Granzotto, L. Barbaresi. Analysis of acoustic behavior of bare CLT floors for the evaluation of impact sound insulation improvement. Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA. Vol. 28. No. 1. Acoustical Society of America, 2016.
- [42] N. Granzotto, E. Piana. Evaluation Method for Façade Acoustic Insulation for a Corner Room: Discussion on the Results Obtained as a Function of the Source Position. *Applied Sciences*, 10(21), (2016), 7434.





Assorbimento acustico dei materiali in lana di roccia ROCKWOOL

A cura di Francesco Pompoli e Paolo Bonfiglio

4. Assorbimento acustico dei materiali in lana di roccia ROCKWOOL

4.1 - Premessa

Il comportamento acustico del materiale in lana di roccia ROCKWOOL dipende essenzialmente da alcuni parametri fisici legati alla tipologia di fibre e alla densità apparente del pannello. Tali parametri sono stati esaminati in uno studio teorico-sperimentale condotto presso l'Università di Ferrara finalizzato alla definizione di un modello matematico per la previsione del comportamento acustico del materiale.

Nel seguito del capitolo saranno illustrati i risultati dello studio, ed in particolare il modello matematico per la previsione del comportamento acustico del materiale ROCKWOOL ed alcune considerazioni sui risultati.

4.2 - Parametri che influenzano l'assorbimento acustico

I principali parametri che influenzano l'assorbimento acustico di un pannello di materiale fibroso posto su fondo rigido sono:

- diametro delle fibre;
- orientamento delle fibre (per i materiali di bassa e media densità la distribuzione è essenzialmente parallela alle superfici del pannello, per quelli a densità elevata la distribuzione ha anche una componente ortogonale alle superfici del pannello);
- densità del materiale;
- spessore del pannello di materiale.

Tali parametri influenzano anche la resistività al flusso d'aria del materiale, che, come illustrato nel Capitolo 2, esprime la resistenza che un flusso d'aria incontra nel passaggio attraverso il materiale dovuta ad attrito viscoso sulle superfici delle fibre.

La stretta correlazione tra la resistività al flusso e l'assorbimento acustico è stata studiata da numerosi autori [1-16].

In generale si ha che la resistività al flusso aumenta con la densità del materiale, e con il diminuire del diametro delle fibre.

L'assorbimento acustico, che dipende dalla frequenza, presenta in generale ad ogni frequenza un aumento fino a valori di resistività al flusso ottimali per poi calare per valori di resistenza al flusso troppo elevati. All'aumentare della resistenza al flusso si ha un significativo aumento di assorbimento alle basse frequenze ed una diminuzione alle alte frequenze, come si può vedere dalla figura 4.1.

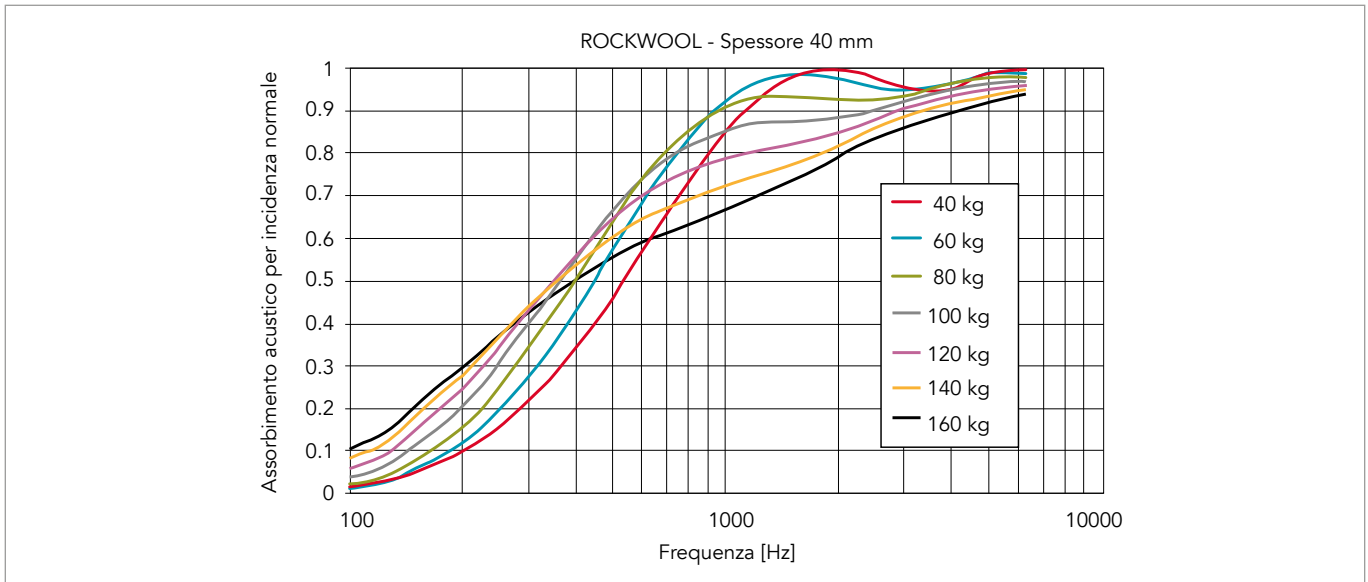


Figura 4.1: influenza della resistività al flusso su pannelli di ROCKWOOL a densità variabile (da 40 a 160 kg/m³) con spessore 40 mm.

Aumentando lo spessore del pannello e mantenendo la densità costante, come si può vedere dalla figura 4.2, l'assorbimento acustico migliora sensibilmente alle basse frequenze mentre risulta praticamente inalterato (vicino a 1) per le alte frequenze.

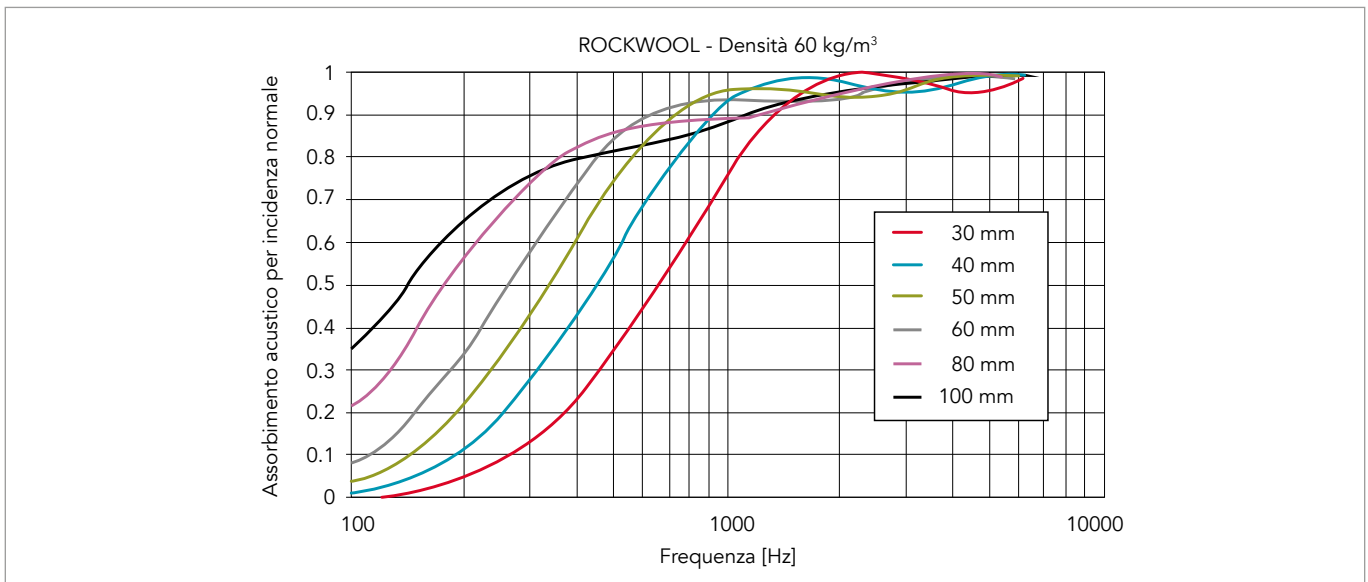


Figura 4.2: influenza dello spessore sull'assorbimento acustico di un pannello di materiale ROCKWOOL con densità pari a 60 kg/m³.

4.3 - Modello teorico-sperimentale per la previsione dell'assorbimento acustico del materiale ROCKWOOL

A partire da modelli matematici sviluppati nello studio teorico-sperimentale svolto presso l'Università di Ferrara [17], è possibile determinare in funzione di densità apparente ρ_m e spessore del materiale l tutte le caratteristiche fisico-acustiche del pannello (resistività al flusso d'aria r , impedenza caratteristica Z , costante di propagazione γ , impedenza superficiale Z_s e coefficiente di assorbimento per incidenza normale α_n). Il sistema di formule semplificate per la previsione dell'assorbimento acustico per incidenza normale, dipendente dai parametri ρ_o (densità dell'aria), c_o (velocità del suono nell'aria) ed f (frequenza) è il seguente:

$$r = 95.35 \cdot \rho_m^{1.37} \quad [\text{Ns/m}^4]$$

$$Z_R = \left[1 + 0.064 \cdot \left(\frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0.703} \right] \quad [-]$$

$$Z_I = - \left[0.085 \cdot \left(\frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0.659} \right] \quad [-]$$

$$\alpha^l = \left(\frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[0.213 \cdot \left(\frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0.577} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[1 + 0.114 \cdot \left(\frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0.683} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$Z_S = (Z_R + jZ_I) \cdot [\coth (\alpha^l + j\beta) \cdot l] \quad [-]$$

$$\alpha_n = \frac{4Z_{SR}}{|Z_S|^2 + 2Z_{SR} + 1} \quad [-]$$

4.3.1 - Applicazione del modello teorico-sperimentale per la previsione dell'assorbimento acustico per incidenza normale dei materiali ROCKWOOL monodensità

La precisione del modello (che non richiede in ingresso alcun dato sperimentale se non la densità e lo spessore del materiale) risulta molto elevata, ed in particolare sulla previsione dell'assorbimento acustico per incidenza normale si trova uno scarto medio pari a 0.028. Sono inoltre forniti i valori complessi di impedenza superficiale, impedenza caratteristica e costante di propagazione, a volte richiesti da programmi di simulazione acustica.

Nei grafici in figura 4.3 si riporta un confronto tra i dati sperimentali e quelli calcolati con il modello matematico per un pannello di materiale ROCKWOOL.

Dal modello presentato si può anche ricavare la "costante di attenuazione" del materiale, espressa in dB/m, corrisponde all'attenuazione in dB per ogni metro che un'onda acustica piana subisce nel passaggio in un mezzo omogeneo dissipativo.

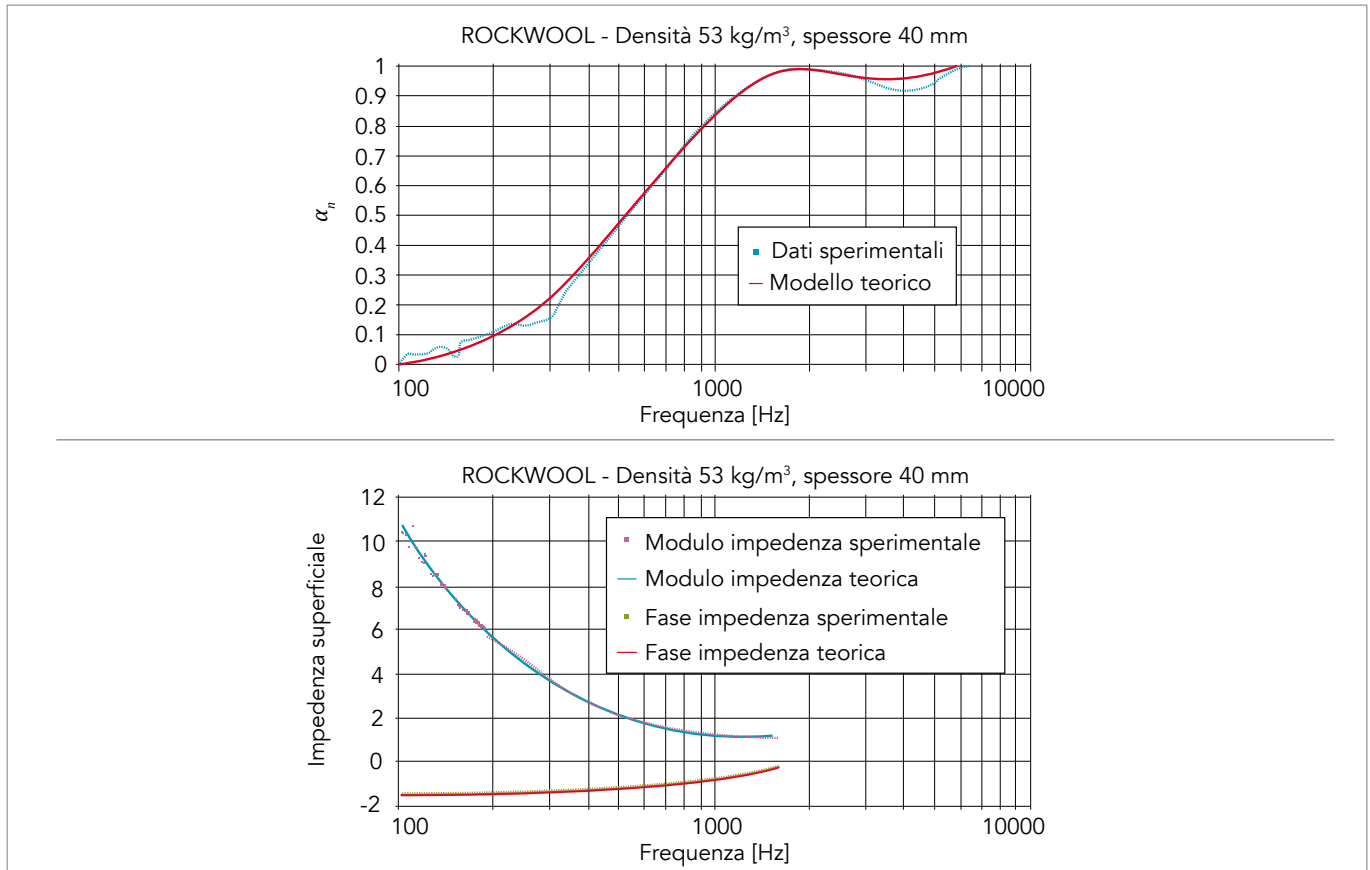


Figura 4.3: Confronto tra misure sperimentali e modello.

Tale costante è ricavabile dalla espressione:

$$ATT = 20 \log \left(\frac{p(l)}{p(0)} \right)_{t=1m} = 20 \log \left(\frac{P_0 \cdot e^{-\alpha l}}{P_0} \right)_{t=1m} = 20 \log(e^{-\alpha l}) \text{ [dB/m]}$$

dove con α' si indica la parte reale della costante di propagazione acustica in un materiale omogeneo dissipativo.

A titolo di esempio per il materiale Rockwool con la densità pari a 50 Kg/m³ si trova un valore di 120 dB/m a 500 Hz.

4.3.2 Applicazione del modello teorico-sperimentale per la previsione dell'assorbimento acustico dei materiali ROCKWOOL a doppia densità

Il modello teorico sperimentale presentato al paragrafo precedente può essere utilizzato per la previsione del comportamento acustico di materiali ROCKWOOL a doppia densità o più in generale di sistemi multistrato. I materiali ROCKWOOL a doppia densità, utilizzati soprattutto per i sistemi di copertura e i sistemi di isolamento a cappotto, sono materiali caratterizzati da uno strato di materiale, definito corpo (avente densità compresa tra 45 e 160 kg/m³ e spessore variabile) e da una crosta superficiale (avente densità compresa tra 105 e 220 kg/m³ e spessori variabili) che garantisce una maggiore durabilità e resistenza meccanica al sistema.

Dal punto di vista di previsione numerica del comportamento acustico dei materiali a doppia densità, la crosta e il corpo vengono in prima analisi considerati materiali a singola densità per i quali si può applicare il modello teorico-sperimentale descritto nel paragrafo precedente per il calcolo delle proprietà superficiali, in particolare l'impedenza caratteristica Z , costante di propagazione γ .

Successivamente si applica il metodo delle impedenze in serie per calcolare l'impedenza superficiale e il coefficiente di assorbimento acustico del materiale a doppia densità. Il metodo delle impedenze in serie è un metodo generale e consente di prevedere il comportamento acustico di sistemi multistrato.

A titolo di esempio nelle figure 4.4 e 4.5 vengono riportati i confronti tra misure sperimentali e modello per un materiale a doppia densità con la crosta e il corpo esposti al campo acustico.

Le differenze, evidenti soprattutto nella configurazione in cui la crosta è esposta al campo acustico, sono da imputare principalmente alla non omogeneità dei materiali testati e alla natura elastica degli stessi. Infatti, quando vincolata all'interno del tubo di misura, la parte solida di tali materiali può dare origine a fenomeni di risonanza strutturale che altera la propagazione del campo acustico all'interno degli stessi. Tali effetti non sono facilmente introducibili nel modello delle impedenze in serie che presuppone la modellazione di ciascuno strato come materiale a struttura perfettamente rigida.

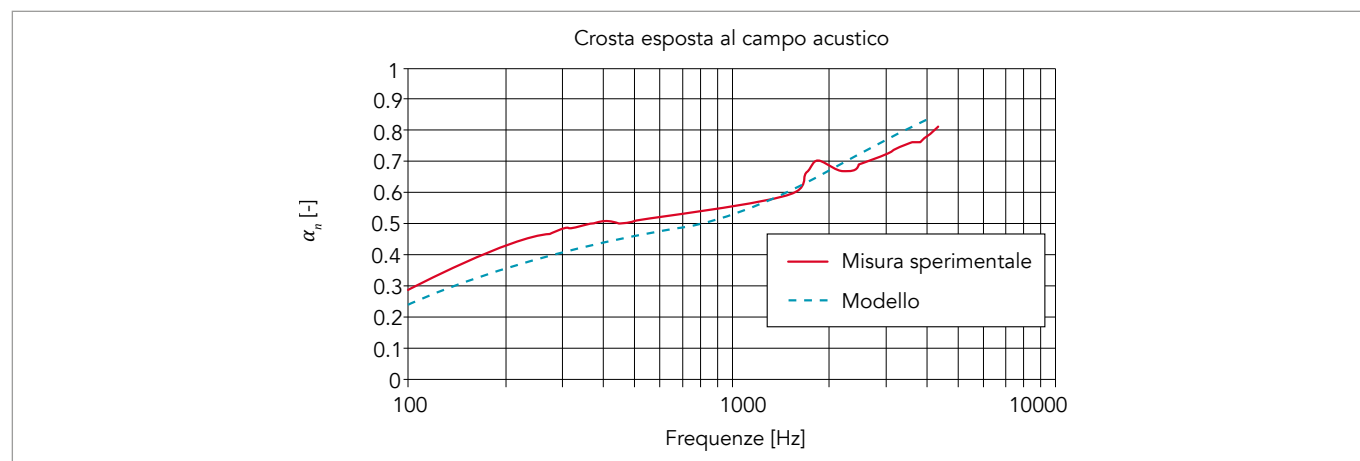


Figura 4.4: Confronto tra misure sperimentali e modello per un materiale a doppia densità con la crosta esposta al campo acustico.

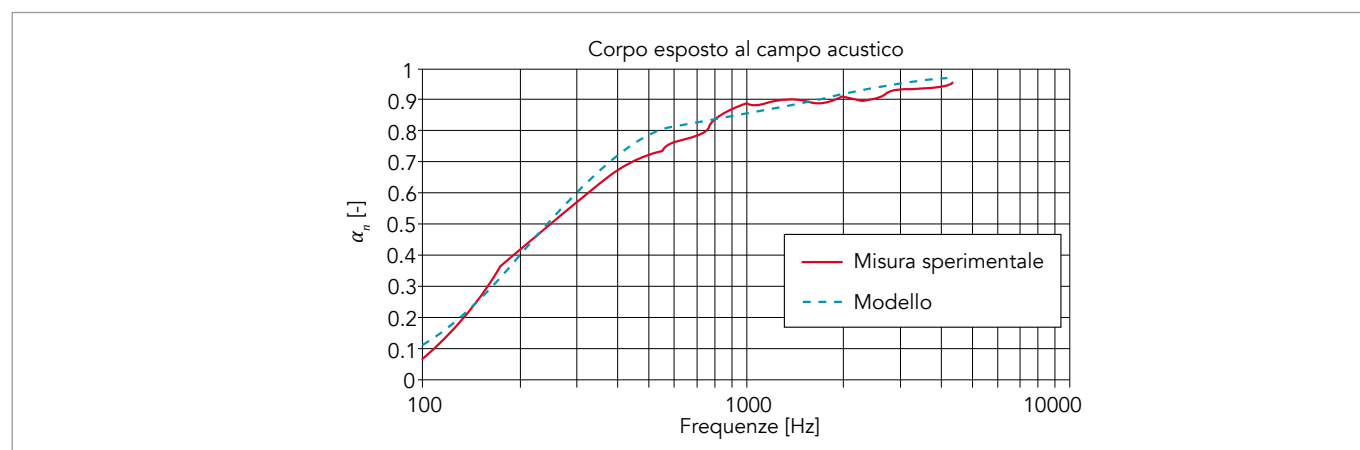


Figura 4.5: Confronto tra misure sperimentali e modello per un materiale a doppia densità con il corpo esposto al campo acustico.

4.4 - Valutazione degli effetti di uno strato resistivo superficiale

La presenza di uno strato resistivo superficiale (ad esempio un velo minerale) applicato al materiale fonoassorbente di base è sempre maggiormente utilizzata da un punto di vista di incremento acustico oltre ad un aspetto estetico. Il parametro fondamentale che regola l'interazione del campo acustico con lo strato resistivo è la sua resistenza specifica al flusso d'aria R_s [rayls], definita, nell'ipotesi di strato non vibrante, come caduta di pressione ai suoi capi rispetto alla velocità delle particelle al suo interno.

Un esempio dell'effetto di uno strato resistivo al variare della sua resistenza specifica su un materiale ROCKWOOL (30 mm – 70 kg/m³) è riportato in figura 4.6.

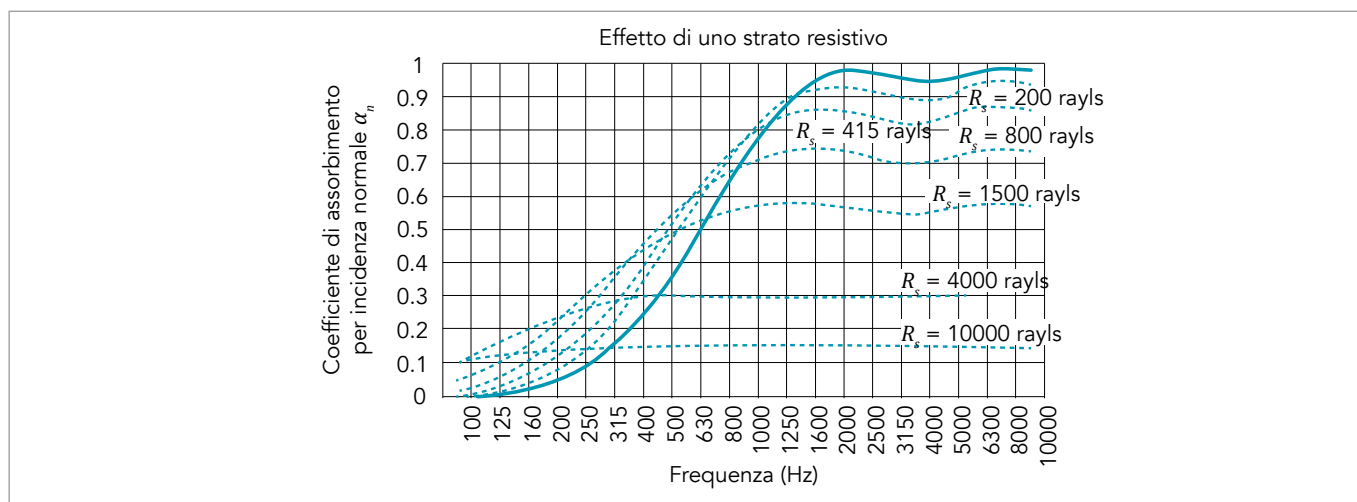


Figura 4.6: Effetto di uno strato resistivo su un materiale in lana di roccia di spessore 30 mm e densità 70 kg/m³.

All'aumentare del valore di resistenza specifica al flusso si passa da contesti in cui la prestazione del materiale di base è pressoché inalterata, con sensibili miglioramenti della prestazione acustica a bassa frequenza, fino a contesti in cui lo strato superficiale è eccessivamente resistivo e fa crollare le prestazioni del materiale a tutte le frequenze di interesse.

4.5 - Assorbimento acustico per incidenza casuale: passaggio da α_n a α_r

Come già illustrato nel Capitolo 2, l'assorbimento acustico dipende anche dall'angolo di incidenza dell'onda acustica sul materiale. Mentre lo studio teorico-sperimentale è finalizzato al calcolo dell'assorbimento per incidenza normale, il dimensionamento di una applicazione di materiale fonoassorbente in ambienti chiusi necessita del dato di assorbimento acustico per incidenza diffusa.

La correlazione tra i dati sperimentali di assorbimento acustico ad incidenza normale e quello ad incidenza diffusa è stato studiato in forma teorica e sperimentale da numerosi autori, ma con risultati non ancora del tutto soddisfacenti. La causa principale è dovuta alle condizioni di prova della misura in campo riverberante (ISO 354) e del passaggio dal campo reale che si realizza nella camera riverberante a quello teorico da cui calcolare l'assorbimento per incidenza diffusa. Come già detto nel capitolo 2, a causa di effetti legati alla dimensione finita del provino, di diffrazione al bordo e di campo non perfettamente diffuso in presenza del materiale i coefficienti di assorbimento per incidenza diffusa sperimentali possono assumere valori superiori a 1 con un senso fisico molto discutibile.

In generale si può comunque dire che nel passaggio tra α_n ed α_r si ha un aumento del coefficiente di assorbimento alle frequenze medio-basse, con uno spostamento verso di esse del primo picco massimo di assorbimento.

Da un punto di vista di simulazioni numeriche è possibile stimare il coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa utilizzando un approccio analitico come segue:

■ A partire dai valori di impedenza caratteristica e costante di propagazione di un dato materiale (che possono essere ricavate da un modello di previsione o da misure sperimentali ad incidenza normale) si effettuano simulazioni dell'impedenza superficiale al variare dell'angolo di incidenza da 0 a 90°. In tale fase il materiale si considera ancora di dimensioni laterali infinite e lo stesso approccio può essere esteso a più materiali in serie;

■ Noto l'andamento dell'impedenza superficiale a tutte le frequenze e gli angoli di incidenza di interesse si determina l'assorbimento acustico per incidenza diffusa aggiungendo una funzione di correzione che tiene conto della dimensione finita del materiale [18] e integrando su tutti i possibili angoli di incidenza.

A titolo di esempio, si riporta nelle figure 4.7 e 4.8 un confronto tra una misura eseguita in camera riverberante (in terzi di ottava) e quella eseguita con il metodo della funzione di trasferimento in un tubo ad onde stazionarie (in FFT) per la stessa tipologia di pannelli di materiale ROCKWOOL a singola e doppia densità. Nelle stesse figure vengono riportati i risultati del modello di previsione del coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa descritto precedentemente.

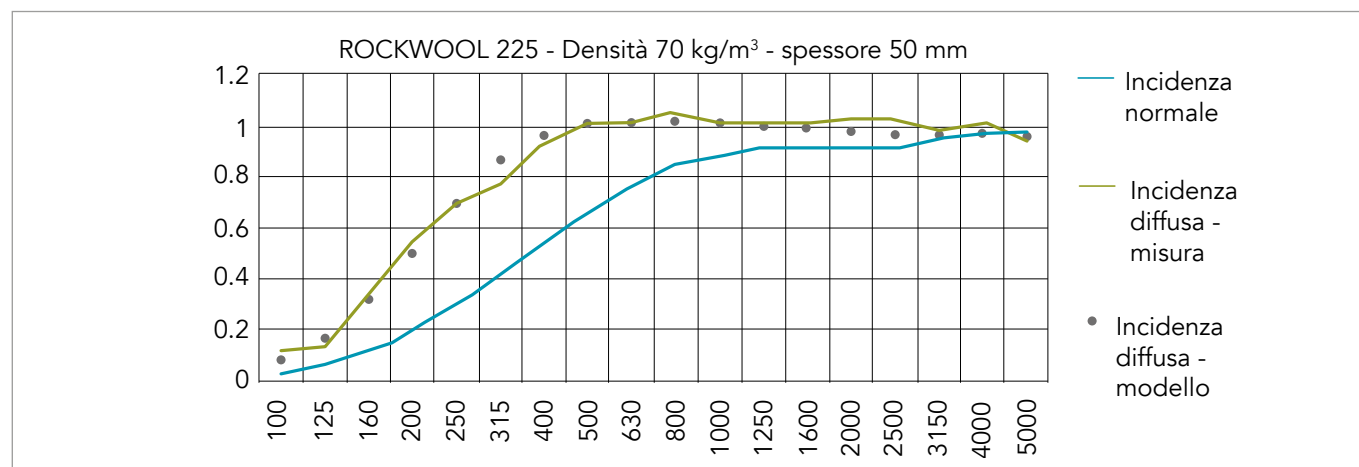


Figura 4.7: confronto tra dati sperimentali di assorbimento acustico per incidenza normale (ISO 10534-2) e per incidenza diffusa (ISO 354) per un pannello di materiale ROCKWOOL 225 (densità 70 kg/m³ e spessore 50 mm).

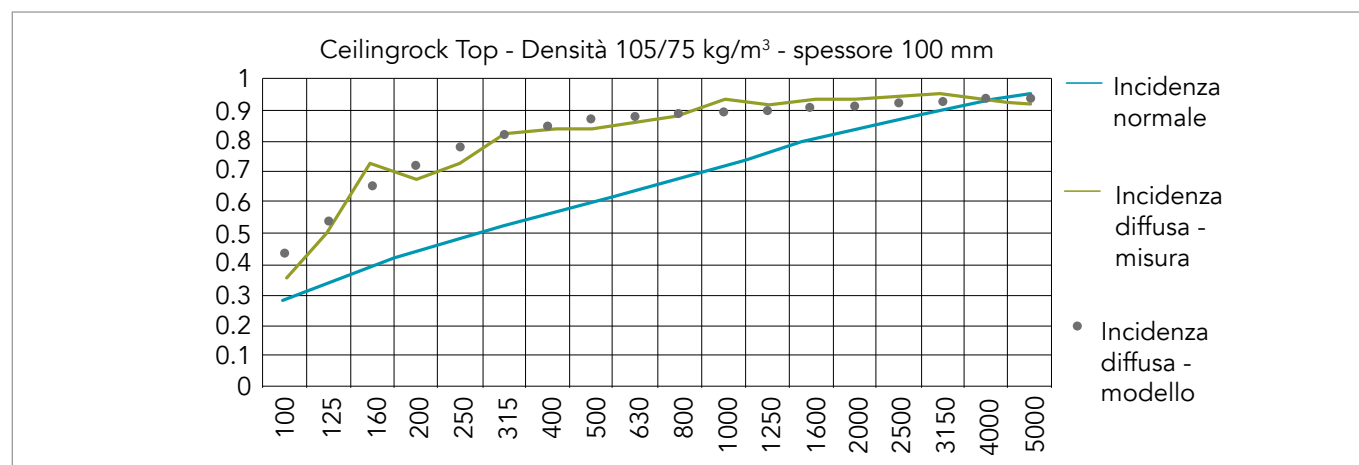


Figura 4.8: confronto tra dati sperimentali di assorbimento acustico per incidenza normale (ISO 10534-2) e per incidenza diffusa (ISO 354) per un pannello di materiale Ceilingrock TOP DD (densità 105/75 kg/m³ e spessore 100 mm).

4.6 - Bibliografia

- [1] M.E. Delany, E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *App.Acoust.*, 3, 1970, pp. 105-116.
- [2] C. Zwikker, J. Eijk, *Physica VIII*, 1941, pp.141.
- [3] L.L. Beranek, Acoustic impedance of porous materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, 13, 1942, pp. 248.
- [4] J.W. Rayleigh, *Theory of sound*, Macmillan, 1929, II vol.
- [5] J.W. Strutt, J.W. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover Publications, 1945, vol. II, pp. 328-333.
- [6] C. Zwikker, C.W. Kosten, *Sound absorbing materials*, Elsevier Publishing Company, 1949.
- [7] M.A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated-porous solid, *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 1956, pp. 168-191.
- [8] K. Attenborough, Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, 73, 1983, pp. 758-799.
- [9] J.F. Allard, C. Depollier, J. Nicolas, W. Lauriks, A. Cops, Propriétés acoustiques des matériaux poreux saturés d'air et théorie de Biot, *J. Acoust. Soc. Am.*, 3, 1990, pp. 28-38.
- [10] Y. Champoux, M.R. Stinson, On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors, *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, 1992, pp. 1120-1131.
- [11] J.F. Hamet, Modélisation acoustique d'un enrobe drainant, Rapport INRETS n.159, Ottobre 1992.
- [12] P. Morse, K. Ingard, *Theoretical acoustics*, McGraw Hill, 1968.
- [13] D.A.Bies, C.H. Hansen, Flow resistance information for acoustical design, *App.Acoust.* 13, 1980, pp. 357-391.
- [14] M. Garai, F.Pompoli, A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements, *Acustica-Acta Acustica Vol 89* (2003) pp. 471-478.
- [15] I.P. Dunn, W.A. Davern, Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers, *App.Acoust.*, 19, 1986, pp. 321-334.
- [16] Q. Wu, Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam, *App.Acoust.* 25, 1988, pp. 141-148.
- [17] Report Tecnico Interno: Studio di modelli di previsione delle proprietà fisico-acustiche di materiali in lana di roccia ROCKWOOL, 2004.
- [18] P. Bonfiglio, F. Pompoli, R. Lioni, A reduced-order integral formulation to account for the finite size effect of isotropic square panels using the transfer matrix method. *J Acoust Soc Am* 2016;139(4):1773–83.





Legislazione e rispetto dei requisiti acustici passivi degli edifici

A cura di Patrizio Fausti

5. Legislazione e rispetto dei requisiti acustici passivi degli edifici

5.1 - Premessa

La legge Quadro sull'inquinamento acustico n° 447 del 24/10/95 [1] stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico. Nel settore delle costruzioni la legge quadro prevede un decreto sui requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici e sui requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti (art. 3, punto e, legge n° 447) ed un decreto sui criteri per la progettazione, l'esecuzione e la ristrutturazione delle costruzioni edilizie (art. 3, punto f, legge n° 447). In ottemperanza al primo punto di queste disposizioni è stato pubblicato il D.P.C.M. 5/12/1997 [2] sulla "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", mentre in merito al secondo aspetto relativo ai criteri di progettazione ed esecuzione delle costruzioni edilizie, il relativo decreto non è stato mai emanato.

L'emanazione del D.P.C.M. 5/12/1997 ha avuto un impatto molto importante nel mondo delle costruzioni sia per l'impulso dato inizialmente alla ricerca e sviluppo di materiali e tecnologie in grado di fare fronte alle richieste più restrittive determinate dai nuovi limiti, sia per l'incertezza relativa ad alcuni aspetti controversi e di difficile interpretazione. Su quest'ultimo punto, in particolare, si è dibattuto per oltre due decenni in incontri, seminari e convegni organizzati da enti e associazioni. Nel corso degli anni sono state formulate richieste di chiarimento ed interpretazione ai vari ministeri coinvolti e molti dubbi sono stati chiariti.

Tuttavia, anche a fronte dello sviluppo di nuove norme tecniche, come quella sulla classificazione acustica delle unità immobiliari, a partire dagli anni 2008-2010 si è manifestata l'esigenza di una revisione completa della regolamentazione sui requisiti acustici passivi. Nell'anno 2010, è stata pubblicata la norma UNI 11367 [3] sulla classificazione acustica delle unità immobiliari. Contestualmente, era atteso un nuovo decreto legislativo per il riordino della materia sui contenuti del quale c'era stata un'ampia condivisone tra Ministero e Associazioni di categoria, ma che poi non aveva visto una prosecuzione dell'iter legislativo. La questione di una nuova legislazione sui requisiti acustici passivi è stata successivamente ripresa in diverse occasioni ma senza la necessaria forza per arrivare con successo alla nuova legislazione [4]. Infatti, la Legge Europea 2013 bis (legge 30/10/2014, n. 161), all'art.19 [5], aveva dato una nuova delega al governo per una "Semplificazione delle procedure autorizzative in materia di requisiti acustici passivi degli edifici". Successivamente, nel D.Lgs. del 17-2-2017 n°42 (G.U. 4/4/2017) [6], "Disposizioni sull'armonizzazione della normativa nazionale sull'inquinamento acustico, a norma art 19, legge 30/10/2014, n. 161", non era stato inserito il riferimento ai requisiti acustici passivi degli edifici, considerato non pertinente.

Pertanto, dopo oltre 10 anni di proposte di revisione, il D.P.C.M. rimane ancora lo strumento legislativo principale per regolamentare i requisiti acustici passivi nell'edilizia privata. Per quanto riguarda il pubblico, invece, dal 2017 sono operativi, anche per l'acustica, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) introdotti dal D.M. 11/01/2017 [7].

Il D.P.C.M. 5/12/1997, emanato inizialmente per le nuove costruzioni, è stato poi esteso anche alle ristrutturazioni grazie ad una serie di chiarimenti interpretativi dei ministeri coinvolti, sebbene la struttura e i valori di riferimento appaiano inadeguati per questo ambito. Le regolamentazioni regionali e comunali, unitamente ad alcune normative UNI sulla corretta posa di serramenti e solai, e i CAM, hanno integrato la tematica risolvendo soprattutto i problemi interpretativi per i nuovi edifici, lasciando invece inadeguata la regolamentazione per le ristrutturazioni che rappresentano già oggi, e lo saranno sempre di più in futuro, la maggior parte delle attività nel settore edilizio. Peraltro, le problematiche acustiche connesse con gli interventi di ristrutturazione e riqualificazione degli edifici possono essere molto rilevanti e ancora rimangono difficoltà interpretative sull'applicabilità o meno del D.P.C.M. 5/12/1997 per le varie tipologie di interventi edili (ristrutturazioni, ampliamenti, manutenzioni straordinarie ecc.). Una nuova regolamentazione dovrebbe chiarire le modalità e i requisiti da adottare quando si interviene sull'esistente e, auspicabilmente, introduce una gradualità degli obiettivi di miglioramento.

5.2 - Contenuti del D.P.C.M. 5/12/1997

5.2.1 - Generalità

Il decreto è strutturato in 4 articoli e un allegato. L'allegato A descrive le grandezze di riferimento, fornisce alcune definizioni e riporta le tabelle con la classificazione degli edifici e i relativi valori limite. L'ambito di applicazione del decreto fa chiaramente riferimento alla situazione in opera. L'art. 1 cita, infatti, che "il decreto determina i requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti in opera, al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore". Per quanto riguarda la classificazione degli ambienti abitativi si considerano le categorie della tabella A che viene di seguito riportata.

Tabella 5.1: Tabella A del D.P.C.M. 5/12/1997 con la classificazione degli ambienti abitativi.

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

All'articolo 2 vengono inoltre definiti i servizi a funzionamento continuo e discontinuo. I servizi a funzionamento continuo sono gli impianti di riscaldamento, di aereazione e di condizionamento. I servizi a funzionamento discontinuo sono gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria.

Le grandezze di riferimento da considerare per la valutazione dei requisiti (articolo 2 e allegato A del decreto) vengono di seguito elencate e definite.

■ **Potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti (R'):** è una grandezza che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra due ambienti. Con il termine "apparente" si intende "misurato in opera" e quindi R' prende in considerazione tutta la potenza sonora che arriva nell'ambiente ricevente, non solo quella che attraversa la parete divisoria. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo **indice di valutazione (R'_{w})**, indicato dal pedice w , che è un valore unico ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.

■ **Isolamento acustico di facciata, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ($D_{2m,nT}$):** è una grandezza che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra l'ambiente esterno (sorgente sonora) e l'ambiente interno (ricevente). Il pedice $2m$ significa che la misura all'esterno viene effettuata a 2 metri dalla facciata; il pedice nT significa che tale risultato viene normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo indice di valutazione ($D_{2m,nT,w}$) ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.

■ **Livello di rumore di calpestio di solai normalizzato (L'_n):** è una grandezza che definisce il livello di rumore trasmesso essenzialmente per via strutturale e che interessa il complesso pavimento-solaio. Il pedice n indica che la misura viene normalizzata rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico. Varia al variare della frequenza. Il decreto prevede il valore limite del suo indice di valutazione ($L'_{n,w}$) ottenuto dai valori alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata.

■ **Livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo slow (L_{ASmax}):** è il valore massimo del livello istantaneo di pressione sonora misurato durante l'evento sonoro causato da un impianto a ciclo discontinuo.

■ **Livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A (L_{Aeq}):** è il valore medio energetico del livello di pressione sonora prodotto da un impianto a ciclo continuo.

■ **Tempo di riverberazione (T):** è il tempo necessario affinché, in un determinato punto dell'ambiente, il livello di pressione sonora si riduca di 60 dB rispetto a quello che si ha nell'istante in cui la sorgente sonora cessa di funzionare. Varia al variare della frequenza.

Per quanto riguarda i valori limite dei parametri sopra citati si fa riferimento alla tabella B del decreto, di seguito riportata, e alle indicazioni inserite all'interno dell'allegato A.

Tabella 5.2: Tabella B del D.P.C.M. 5/12/1997 con i valori limite in funzione delle destinazioni d'uso e dei singoli requisiti acustici.

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

I primi tre parametri sono indici di valutazione (caratterizzati dalla lettera w), gli ultimi due sono valori riferiti al rumore prodotto dagli impianti tecnologici a funzionamento discontinuo (L_{ASmax}) e a funzionamento continuo (L_{Aeq}).

Per quanto riguarda l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente tra ambienti, nel decreto è precisato che questo va misurato tra unità immobiliari distinte.

Il decreto poi specifica che, per l'edilizia scolastica, è necessario determinare anche il tempo di riverberazione, i cui limiti sono quelli riportati nella circolare del Ministero dei lavori pubblici n.3150 del 22 maggio 1967 [8] recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici. In questa circolare si dice che *la media dei tempi di riverberazione, misurati alle frequenze 250 - 500 - 1000 - 2000 Hz, non deve superare 1,2 sec. ad aula arredata, con la presenza di due persone al massimo. Nelle palestre la media dei tempi di riverberazione (qualora non debbano essere utilizzate come auditorio) non deve superare 2,2 sec.*

Nell'allegato A sono inoltre riportate due precisazioni in merito al rumore prodotto dagli impianti tecnologici di cui la prima contrasta parzialmente con i valori limite riportati in Tabella 5.2. Si dice infatti che, per gli impianti, devono essere rispettati i valori limite di 35 dB(A) L_{ASmax} per i servizi a funzionamento discontinuo e 25 dB(A) L_{Aeq} per servizi a funzionamento continuo, quest'ultimo valore precedentemente differenziato nella Tabella 5.2. Le misure di livello sonoro prodotto dagli impianti devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato, e tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

5.3 - Riferimenti normativi

Il decreto fa riferimento ad alcune normative per la definizione e la misurazione dei parametri che definiscono i requisiti acustici passivi. Tali riferimenti normativi sono risultati in alcuni casi errati, incompleti o non aggiornati. Inoltre, alcune normative sono state aggiornate dall'UNI anche successivamente all'approvazione del decreto e le vecchie versioni sono state ritirate. Pertanto, anche considerando il riferimento normativo datato, in alcuni casi è stato necessario utilizzare riferimenti normativi diversi da quelli citati nel D.P.C.M.

Si riportano di seguito i diversi riferimenti normativi dati dal decreto e di fianco quelli corretti e aggiornati alle normative attualmente in vigore.

Tabella 5.3: Riferimenti normativi dati dal decreto e aggiornati alle normative attualmente in vigore.

| Grandezze | Riferimenti normativi decreto | Riferimenti normativi attualmente in vigore |
|--|--------------------------------|--|
| Tempo di riverberazione, T | ISO 3382 del 1975 | UNI EN ISO 3382-1,2,3 [9, 10, 11] e UNI EN ISO 354 [12] |
| Potere fonoisolante apparente, R' | EN ISO 140-5 del 1996 (errato) | UNI EN ISO 16283-1 [13] |
| Isolamento acustico di facciata, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT}$ | Nessun riferimento normativo | UNI EN ISO 16283-3 [14] |
| Livello normalizzato di rumore di calpestio, L'_n | EN ISO 140-6 del 1996 (errato) | UNI EN ISO 16283-2 [15] |
| Livello di rumore degli impianti a ciclo continuo e discontinuo | Nessun riferimento normativo | UNI 11367-2010 (Appendice D) [3] tratta da UNI EN ISO 16032 [16] e UNI EN ISO 10052 [17] |
| Indice di valutazione R'_w | UNI 8270-7 del 1987 | UNI EN ISO 717-1 [18] |
| Indice di valutazione $D_{2m,nT,w}$ | Nessun riferimento normativo | UNI EN ISO 717-1 [18] |
| Indice di valutazione $L'_{n,w}$ | UNI 8270-7 del 1987 | UNI EN ISO 717-2 [19] |

5.4 - Osservazioni sul D.P.C.M. 5/12/1997

5.4.1 - Generalità

L'applicazione del D.P.C.M. 5/12/1997 ha creato negli anni una serie di problemi riguardanti sia l'interpretazione che gli aspetti tecnici ed economici legati al soddisfacimento dei requisiti. In alcuni casi, a fronte di incertezze nell'applicazione del decreto, si è fatto riferimento al buon senso. Ad esempio, con riferimento ai valori limite riportati nella Tabella 5.2, non essendo esplicitati i limiti nel caso di edifici con diverse destinazioni d'uso (residenziale-terziario, residenziale-attività artigianali, etc), si è fatto riferimento ai valori limite più restrittivi. In altre situazioni sono stati forniti dei pareri da funzionari ministeriali.

Dubbi sulla applicabilità del D.P.C.M. 5/12/1997 erano nati inizialmente per effetto della mancata emanazione del D.M. sui criteri di progettazione, esecuzione e ristrutturazione degli edifici prevista al punto f, art. 3 della legge 447. Tuttavia, le conoscenze tecniche e le tecnologie costruttive hanno permesso di realizzare edifici a regola d'arte in grado di soddisfare i requisiti previsti dal D.P.C.M. 5/12/1997 anche in assenza del citato D.M. La validità del D.P.C.M. 5/12/1997 viene confermata anche dalla giurisprudenza che ha riportato alcune sentenze orientate al riconoscimento dell'applicabilità del decreto. Inoltre, quando si è in presenza di regolamenti edilizi comunali o d'igiene che hanno recepito il D.P.C.M., è la stessa normativa locale ad essere cogente. Si riportano di seguito altri commenti sui diversi requisiti acustici inerenti dubbi interpretativi e aspetti controversi che possono determinare notevoli incertezze e rischio di contenzioso tra i diversi soggetti coinvolti. Una ulteriore svolta alla definizione di alcuni aspetti controversi del D.P.C.M. 5/12/1997 è stata data dalla pubblicazione della norma UNI 11367 [3], che, pur riferendosi alla classificazione acustica delle unità immobiliari, ha stabilito dei criteri utili anche con riferimento alla verifica dei limiti di legge. In merito ad interpretazioni e chiarimenti del D.P.C.M. 5/12/1997, si veda anche il documento [20] che raccoglie le varie interpretazioni date da funzionari e circolari ministeriali.

5.4.2 - Potere fonoisolante apparente

Per quanto riguarda l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, si fa riferimento ad unità immobiliari distinte. Tale precisazione non è sempre sufficiente a chiarire l'ambito di applicazione del decreto anche perché diversa può essere l'interpretazione sul significato di unità immobiliare. In molti contesti, ed anche nella UNI 11367, è stata adottata la definizione

data dal D.M. 2 gennaio 1998 n° 28 sul catasto dei fabbricati che all'art. 2 chiarisce che "L'unità immobiliare è costituita da una porzione di fabbricato, o da un insieme di fabbricati ovvero da un'area che, nello stato in cui si trova e secondo l'uso locale, presenta potenzialità di autonomia funzionale e reddituale". La lettura di tale articolo esclude dall'applicazione del decreto, ad esempio, le pareti divisorie tra appartamenti e vani scale, le pareti divisorie tra camere di ospedali (quantomeno all'interno dello stesso reparto), le pareti di separazione tra aule scolastiche della stessa scuola. Nella norma UNI 11367 e nel decreto sui CAM, tali ambiti sono stati poi inquadrati in maniera specifica.

5.4.3 - Isolamento acustico di facciata

I valori dei requisiti acustici passivi, in particolare dell'isolamento di facciata, non tengono conto della classificazione acustica del territorio imponendo dei limiti indifferenziati che in alcuni casi potrebbero non essere adeguati rispetto al reale clima acustico del territorio circostante.

I valori proposti per l'isolamento delle facciate, in particolare per le scuole, sono piuttosto restrittivi e difficili da ottenere. Nel caso degli edifici scolastici è richiesta, peraltro, una superficie minima degli elementi finestrati per garantire una adeguata illuminazione naturale. In questi casi il requisito è generalmente ottenibile solo con interventi molto onerosi quali i doppi infissi. Poiché i nuovi edifici scolastici dovrebbero essere realizzati soltanto in aree del territorio particolarmente protette, sembrerebbe inutilmente oneroso un requisito di facciata così elevato. Questo a fronte del fatto che molti edifici scolastici esistenti si trovano invece in situazioni di rumorosità molto elevata con una qualità degli infissi molto bassa. Questa forte differenza tra il nuovo e l'esistente, rimane ancora oggi un aspetto critico che influenza la qualità acustica di molti edifici pubblici e privati. Questo problema viene in parte risolto nei casi di ristrutturazione ed in particolare per gli edifici pubblici con il decreto sui CAM.

5.4.4 - Rumore di calpestio dei solai

Il livello di rumore di calpestio dei solai risulta tanto migliore quanto più è basso il valore numerico ottenuto. Osservando i limiti riportati nella Tabella 5.2, si nota che le prestazioni più restrittive del D.P.C.M. 5/12/1997 sono richieste per gli uffici, le attività ricreative e commerciali.

I valori limite possono tuttavia essere interpretati in maniera diversa e cioè considerando che essi si riferiscono all'ambiente disturbante. In questo modo i limiti più restrittivi ($L'_{nw} < 55\text{dB}$) verrebbero applicati alle attività potenzialmente più disturbanti come gli uffici e le attività commerciali. Anche con questa seconda interpretazione si verificano comunque delle incongruenze in alcuni dei casi in cui si trovano sovrapposte due tipologie diverse di ambienti abitativi.

Per il rumore di calpestio, inoltre, il D.P.C.M. non specifica che i requisiti si riferiscono soltanto ai solai tra unità immobiliari distinte. La verifica potrebbe essere richiesta, quindi, anche all'interno della stessa abitazione. Questo sarebbe tecnicamente possibile soltanto nei casi in cui la trasmissione di rumore aereo tra i due locali, attraverso il vano scala, non sia compromettente per la misura di rumore di calpestio. L'esclusione dalla verifica del requisito all'interno della stessa unità immobiliare è ripresa dalla norma UNI 11367.

5.4.5 - Rumore degli impianti

Relativamente agli impianti tecnologici c'è una contraddizione sui valori limite per i servizi a funzionamento continuo. Nella tabella B del D.P.C.M. 5/12/1997 (Tabella 5.2) viene fissato un limite differenziato di L_{Aeq} pari a 35 dB(A) per gli edifici appartenenti alle categorie A, C, B, F e G e di 25 dB(A) per le categorie D ed E. Tale limite viene invece fissato indistintamente a 25 dB(A) all'interno delle definizioni riportate nell'allegato A. A supporto del valore differenziato sta il fatto che la tabella B fa riferimento all'art. 3 del decreto sui valori limite mentre l'allegato A fa riferimento all'art. 2 sulle definizioni. Considerando però che il D.P.C.M. 14/11/1997 [21] sui limiti delle sorgenti sonore, nell'applicazione del criterio differenziale, ammette che una sorgente possa essere disturbante se il suo livello a finestra chiusa e di notte supera il valore di 25 dB(A) al recettore, allora si dovrebbe considerare come valore limite quello indifferenziato di 25 dB(A). In merito ai valori di riferimento da utilizzare, ci sono pareri discordanti anche nelle circolari ministeriali di chiarimento. Infatti, il Ministero dell'Ambiente nella circolare del 9/03/1999 e

in quella del 13/08/2010 fa riferimento ai valori riportati nel paragrafo definizioni e quindi al valore di 25 dB(A) indifferenziato mentre il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, nella circolare del 27/05/2003, richiama i valori riportati in tabella.

In attesa di un chiarimento definitivo su questo aspetto, spetta agli enti locali, nella definizione dei regolamenti edilizi comunali, interpretare e scegliere il criterio da adottare.

Il decreto specifica che la rumorosità degli impianti va rilevata nell'ambiente più rumoroso purché diverso da quello in cui il rumore viene generato. Innanzitutto, sarebbe da intendere l'ambiente dove si verifica il massimo disturbo piuttosto che il massimo livello poiché il massimo livello si potrebbe verificare in locali non abitati. Tale precisazione chiarisce che il requisito non è da intendere soltanto come valore limite della sorgente sonora impianto, ma valore limite per l'impianto e la struttura. Vengono esclusi da questa verifica tutti quegli impianti, tipo ventilconvettori, aerotermi, canali con bocchette di immissione rumorose, dove la rumorosità si genera all'interno dell'ambiente considerato. Anche per gli impianti, peraltro, la norma UNI 11367 esclude l'applicabilità dei limiti all'interno della stessa unità immobiliare.

Nel decreto non viene specificato se i valori del livello sonoro del rumore degli impianti vanno corretti per il tempo di riverberazione dell'ambiente. Tuttavia, come anche specificato nella norma UNI 11367 e in tutte le norme per la misura del rumore degli impianti, la correzione per il tempo di riverberazione risulta indispensabile per poter confrontare l'effettiva rumorosità degli impianti con i valori limite previsti.

5.4.6 - Tempo di riverberazione

La nota relativa ai tempi di riverberazione all'interno degli ambienti scolastici fa riferimento alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n.3150 del 22/5/1967 [8] invece che al più recente D.M. 18/12/1975 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica" [22].

5.4.7 - Applicabilità nel caso di ristrutturazioni e cambio di destinazione d'uso

Il D.P.C.M. 5/12/1997 non specifica nulla in tema di ristrutturazione degli edifici. Tuttavia, con una serie di circolari ministeriali e leggi regionali [23], sono stati introdotti una serie di chiarimenti interpretativi che estendono l'applicabilità del Decreto alle ristrutturazioni e al cambio di destinazione d'uso, con una serie di specificazioni che si riportano di seguito. Innanzitutto, viene chiarito che per "ristrutturazione" si intende il rifacimento anche parziale di impianti tecnologici, delle partizioni orizzontali e verticali degli edifici, ed il rifacimento delle facciate esterne, verniciatura esclusa. Viene poi chiarito, con varie circolari e risposte a richieste di chiarimento, che i limiti del D.P.C.M. 5/12/1997 si applicano sostanzialmente a tutti gli interventi di ristrutturazione che interessino le parti dell'edificio solitamente soggette al rispetto dei requisiti acustici passivi, come ad esempio il rifacimento anche parziale di impianti tecnologici e/o di partizioni orizzontali o verticali (solai, coperture, pareti divisorie, ecc.) o delle chiusure esterne dell'edificio (sostituzione serramenti). Il D.P.C.M. si applica anche nel caso di suddivisione interna dell'edificio, limitatamente agli elementi divisorii tra le nuove unità immobiliari, e nel caso di cambio di destinazione d'uso, facendo riferimento in questo caso ai limiti della nuova destinazione. Nel caso di edifici esistenti realizzati antecedentemente all'entrata in vigore del D.P.C.M. 5/12/1997, il parere del Ministero dell'Ambiente del luglio 2020, riprendendo la nota del gennaio 2014 (prot. n. DVA-2014-0002440 del 30/01/2014), esplicita come comportarsi nei casi di ristrutturazione globale o di più semplice ristrutturazione. La ristrutturazione globale o di gran parte delle strutture di una unità immobiliare, delle partizioni orizzontali e verticali e degli impianti e dei servizi a funzionamento continuo e discontinuo, potendo essere assimilata ad una nuova realizzazione dell'edificio stesso, deve essere soggetta al rispetto dei limiti previsti per tutti i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti. La sostituzione, il rifacimento, il ripristino o la manutenzione di alcuni elementi dell'edificio, che prevedano una marginale ristrutturazione o modifica parziale dell'edificio, come nella fattispecie la sostituzione dei soli infissi o l'apposizione di un cappotto atto a migliorare la capacità termica dell'edificio, specialmente se mirati al raggiungimento di migliori standard abitativi, possono essere derogati dall'applicazione del D.P.C.M. 5/12/1997 purché non si determini un peggioramento della situazione preesistente, anche sotto il profilo acustico.

Resta un punto ancora incerto, ed è quello relativo a piccoli lavori di manutenzione che, pur non rientrando nella definizione di ristrutturazione, possono determinare un peggioramento dei requisiti acustici passivi. In ogni caso, il recente approccio del legislatore delinea in maniera chiara come sia necessario, in caso di modifiche parziali di un edificio, assicurare il miglioramento, o quantomeno il mantenimento di tutti i requisiti acustici passivi per l'intero edificio, anche se in deroga ai valori limite normativi. Sebbene limitata a validità regionale, può essere utile menzionare il D.G.R. 809 del 10/07/2006 della Regione Marche, in

aggiornamento ai "Criteri e linee guida L.R. 14/11/2001 n° 28", che introduce una serie di possibilità per le ristrutturazioni per le quali le prestazioni normative non siano tecnicamente conseguibili, incluso il restauro conservativo di edifici storici. In questi casi, la progettazione dovrà comunque tendere al miglioramento delle prestazioni acustiche passive.

5.5 - CAM criteri ambientali minimi

5.5.1 - Generalità e valori di riferimento per i requisiti acustici passivi

Secondo il D.M. 11/1/2017, successivamente aggiornato con il D.M. 11/10/2017 [7], nei casi di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici, devono essere perseguiti criteri di sostenibilità ambientale, cosiddetti Criteri Ambientali Minimi (CAM).

Nello specifico, i valori dei requisiti acustici passivi degli edifici pubblici devono corrispondere almeno a quelli della "classe II" della norma UNI 11367:2010 (Tabella 5.4). Inoltre, per quanto riguarda gli ospedali, le case di cura e le scuole, si fa riferimento al livello di "prestazione superiore" riportato nell'appendice A della norma 11367:2010 (Tabella 5.5). Per quanto riguarda l'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo collegati mediante accessi o aperture ad ambienti abitativi, devono essere rispettati i valori caratterizzati come prestazione "buona" nel prospetto B.1 dell'appendice B della norma UNI 11367:2010 (Tabella 5.6).

Per quanto riguarda gli ambienti interni degli edifici pubblici, vanno rispettati anche i valori limite dei descrittori di qualità interna definiti dalla norma UNI 11532-1 [24], che sono: il tempo di riverberazione, l'indice di intellegibilità del parlato STI la cui relazione con la qualità del parlato è riportata in Tabella 5.7, la Chiarezza C_{50} .

Tabella 5.4: Valori limite della classe II della UNI 11367:2010, richiamati dal D.M. 11/10/2010 per gli edifici pubblici.

| Prestazione da verificare | Classe II UNI 11367 |
|---|---------------------|
| Isolamento acustico normalizzato di facciata $D_{2m,nT,w}$ (dB) | ≥ 40 (dB) |
| Potere fonoisolante apparente di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti di differenti unità immobiliari R'_w | ≥ 53 (dB) |
| Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari L'_{nw} | ≤ 58 (dB) |
| Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo $L_{i,c}$ | ≤ 28 (dBA) |
| Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo $L_{i,d}$ | ≤ 33 (dBA) |

Tabella 5.5: Valori limite della classe superiore del prospetto A.1 della UNI 11367:2010, richiamati dal D.M. 11/10/2010 per gli ospedali, le case di cura e le scuole pubblici.

| Prestazione da verificare | Prest. sup. UNI 11367 |
|--|-----------------------|
| Isolamento acustico normalizzato di facciata, $D_{2m,nT,w}$ | ≥ 43 (dB) |
| Potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti di differenti unità immobiliari, R'_w | ≥ 56 (dB) |
| Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari, L'_{nw} | ≤ 53 (dB) |
| Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento continuo, $L_{i,c}$ in ambienti diversi da quelli di installazione | ≤ 28 (dBA) |
| Livello sonoro massimo immesso da impianti a funzionamento discontinuo, $L_{i,d}$ in ambienti diversi da quelli di installazione | ≤ 34 (dBA) |
| Isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$ | ≥ 55 (dB) |
| Isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$ | ≥ 50 (dB) |
| Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, L'_{nw} | ≤ 53 (dB) |

Tabella 5.6: Valori limite della prestazione buona del prospetto B.1 della UNI 11367:2010, richiamati dal D.M. 11/10/2010 per gli edifici pubblici.

| Prestazione da verificare | Prestazione buona UNI 11367 | |
|---|-----------------------------|--------------------------|
| | Ospedali e scuole | Altre destinazioni d'uso |
| Isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo collegati mediante accessi o aperture ad ambienti abitativi $D_{nT,w}$ | ≥ 30 (dB) | ≥ 36 (dB) |

Tabella 5.7: relazione tra l'indice di trasmissione del parlato (STI-Speech Transmission Index) e la qualità della comprensione del parlato.

| Valori di Speech Transmission Index (STI) | Qualità del parlato in accordo con la CEI EN 60268-16 [25] |
|---|--|
| $0 < STI \leq 0,3$ | Pessimo |
| $0,3 < STI \leq 0,45$ | Scarso |
| $0,45 < STI \leq 0,6$ | Accettabile |
| $0,6 < STI \leq 0,75$ | Buono |
| $0,75 < STI \leq 1$ | Eccellente |

Il decreto specifica infine che i professionisti incaricati devono dare evidenza del rispetto di tutti i requisiti citati sia in fase di progetto iniziale che in fase di verifica finale della conformità.

Per quanto riguarda i requisiti acustici passivi e quindi il riferimento alla norma UNI 11367, i requisiti minimi richiesti, come mostrato nelle tabelle, sono generalmente superiori agli attuali standard minimi previsti dal D.P.C.M. 5/12/1997, salvo poche eccezioni. Vengono introdotti, inoltre, requisiti specifici per le partizioni verso gli spazi comuni e condominiali, aspetto trascurato dall'attuale legislazione ma molto importante per il comfort acustico.

5.5.2 - Requisiti di qualità interna degli ambienti e riferimento alla serie di norme UNI 11532

Per quanto riguarda i requisiti di qualità interna degli ambienti, il decreto sui CAM fa riferimento alla norma UNI 11532. Questa norma, al momento della pubblicazione del D.M. 11/1/2017, riportava solo le definizioni dei parametri acustici ma non i valori limite di riferimento. Per quanto motivo, l'UNI ha iniziato una specifica attività normativa con l'obiettivo di pubblicare i valori di riferimento per i vari settori considerati dai CAM.

In particolare, nel 2018 è stata pubblicata la norma UNI 11532-1 [24], che fornisce le indicazioni generali comuni a tutti i settori di applicazione, che sono:

- 1) settore scolastico - comunicativo/collettivo - collettivo - piccole sale conferenze e/o polifunzionali col limite di 250 m³;
- 2) settore sanitario;
- 3) settore uffici, con riguardo degli open plan offices;
- 4) settore ristorazione;
- 5) settore direzionale commerciale – sportivo – terziario;
- 6) settore produttivo/industriale – fieristico – espositivo.

Per ciascuno di questi settori è prevista la pubblicazione di una specifica norma con le indicazioni in merito ai descrittori che meglio rappresentano la qualità acustica di un ambiente, ai valori di riferimento in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente stesso.

Al momento attuale, è in vigore la norma UNI 11532-2 [26], pubblicata nel marzo 2020. Tale norma definisce i descrittori acustici che rappresentano la qualità acustica, ed i valori di riferimento, per il settore scolastico, comunicativo/collettivo e piccole sale conferenze e/o polifunzionali.

I valori limite per il tempo di riverbero, indicati dalla UNI 11532-2, si riferiscono a condizioni di occupazione convenzionale pari all'80%. Questa condizione può essere ottenuta, in fase di progettazione, mediante valori di riferimento dell'area di assorbimento acustico delle persone indicati da un allegato alla norma. I valori ottimali del tempo di riverbero sono riportati nella Tabella 5.8, in funzione del volume dell'ambiente e della destinazione d'uso. Per quanto riguarda gli ambienti sportivi, i valori di riferimento per ambienti non occupati, sono riportati nella Tabella 5.9.

Tabella 5.8: Valori limite della prestazione buona del prospetto B.1 della UNI 11367:2010, richiamati dal D.M. 11/10/2010 per gli edifici pubblici.

| Tipo di ambiente | Valore ottimale di T (s) (con 80% di occupazione) | Volume dell'ambiente (m ³) |
|---|---|--|
| Musica | $T_{opt.} = 0.45 \log(V) + 0.07$ | $30 \leq V < 1000$ |
| Parlato – conferenza | $T_{opt.} = 0.37 \log(V) - 0.14$ | $50 \leq V < 5000$ |
| Lezione, comunicazione come parlato/conferenza, interazione insegnante-studente | $T_{opt.} = 0.32 \log(V) - 0.17$ | $30 \leq V < 5000$ |
| Lezione/comunicazione, incluse aule speciali | $T_{opt.} = 0.26 \log(V) - 0.14$ | $30 \leq V < 500$ |

Tabella 5.9: Valori ottimali del tempo di riverberazione per ambienti sportivi, validi per ambienti non occupati.

| Valore ottimale di T (s) per ambienti sportivi non occupati | Volume dell'ambiente (m ³) |
|---|--|
| $T_{opt.} = 0.75 \log(V) - 1.00$ | $200 \leq V < 10000$ |
| $T_{opt.} = 2$ | $V \geq 10000$ |

I valori di riferimento per il descrittore STI (indice di trasmissione del parlato) sono i seguenti: $STI \geq 0,55$ con $SPL = 60$ (dBA) a 1 (m) davanti alla sorgente sonora, con un volume inferiore a 250 m³; $STI \geq 0,5$ con $SPL = 70$ (dBA) a 1 (m) davanti alla sorgente sonora, con un volume maggiore di 250 m³; i valori sono considerati senza sistema di amplificazione del suono, per ambienti arredati con un massimo di due persone. In presenza di impianto di amplificazione il valore di riferimento è $STI \geq 0,6$ con il segnale di emissione nelle normali condizioni d'uso dell'impianto di amplificazione.

La verifica dello STI secondo la norma UNI 11532-2 richiede, in fase di progettazione, la stima del rumore emesso dall'apparecchiatura e del rumore di fondo nell'ambiente interno. Questo aspetto potrebbe rendere la verifica piuttosto complessa. Inoltre, nelle verifiche sul campo, l'incertezza di misura deve essere considerata per tutti i descrittori utilizzati.

Secondo la norma UNI 11532-2, in ambienti interni con un volume inferiore a 250 m³, è possibile verificare la chiarezza C_{50} anziché STI. Il valore di riferimento per il descrittore C_{50} considerato per una stanza arredata con un massimo di due persone, è $C_{50} \geq 2$ (dB). Il valore è considerato senza sistema di amplificazione del suono ed è ottenuto dalla media dei risultati ottenuti per le bande di ottava di 500, 1.000 e 2.000 Hz.

5.6 - La classificazione acustica delle Unità immobiliari

5.6.1 - Le procedure previste dalla norma UNI 11367 [27, 28, 29, 30]

La norma UNI 11367 [3] del 2010, sulla classificazione acustica delle unità immobiliari, mantiene carattere prevalentemente volontario per quanto riguarda l'edilizia privata, mentre ha assunto carattere cogente per alcuni aspetti introdotti nel D.M. 11/01/2017 "Nuove costruzioni, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici" per gli edifici pubblici. La norma UNI 11367 è stata successivamente integrata dalla norma UNI 11444 [31] ed attualmente è in corso di revisione. La norma è rimasta sostanzialmente inapplicata, sia per la crisi del settore edilizia sopraggiunta contestualmente alla sua pubblicazione, che per alcuni aspetti applicativi piuttosto complessi.

La classificazione acustica delle "unità immobiliari" viene valutata sulla base dei "valori medi" delle prestazioni acustiche dei suoi componenti, misurate in opera. Le prestazioni acustiche da misurare sono le stesse previste nel D.P.C.M. 5/12/1997, con una specifica definizione per il rumore degli impianti a ciclo continuo e discontinuo. In sostanza, per ogni singola unità immobiliare, si misurano i seguenti requisiti tra l'U.I. esaminata e le U.I. adiacenti: l'indice di valutazione dell'isolamento acustico d facciata ($D_{2m,nT,w}$), l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente (R'_w) di pareti divisorie e solai, l'indice di valutazione del rumore di calpestio ($L'_{n,w}$) di solai, il livello sonoro corretto immesso dagli impianti a funzionamento continuo (L_{ic}) e discontinuo (L_{id}). Gli ambienti devono essere "acusticamente verificabili" e almeno uno dei due deve essere un "ambiente abitativo". I valori misurati per ogni singola grandezza, considerata l'incertezza di misura (ipotizzata da studi pregressi) per ottenere i valori utili, vanno mediati tra loro con media logaritmica e il valore medio si confronta con i valori di classe. L'uso della media logaritmica fornisce un risultato che tende ad essere significativamente influenzato dalla prestazione del componente peggiore.

Una volta determinata la classe acustica dell'unità immobiliare per ciascuno dei cinque requisiti definiti nella tabella (se applicabili), si calcola la classe acustica complessiva dell'unità immobiliare che si ottiene come media pesata dei valori delle diverse classi, considerando anche eventuali risultati peggiori della classe IV. Il valore unico della classe acustica semplifica la lettura della qualità acustica per l'utente finale. Tuttavia, trattandosi di un valore medio, è possibile che singoli requisiti siano di classe acustica inferiore a quella dichiarata come globale e pertanto la percezione per l'utente potrebbe essere diversa da quella calcolata, in base alla sensibilità e alla criticità di ciascun requisito. La classe globale va comunque accompagnata dalla classe per ciascun requisito.

Nella Tabella 5.10 si riportano i valori delle classi acustiche previste dalla norma UNI 11367 per gli edifici con destinazione residenziale, direzionale ed ufficio, ricettiva (alberghi, pensioni e simili), ricreativa, di culto e commerciale.

Tabella 5.10: Valori limite riferiti alle diverse classi acustiche degli edifici secondo la UNI 11367.

| Classe acustica | $D_{2m,nT,w}$ (dB) | R'_w (dB) | $L'_{n,w}$ (dB) | L_{ic} (dBA) | L_{id} (dBA) |
|-----------------|--------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| I | ≥ 43 | ≥ 56 | ≤ 53 | ≤ 25 | ≤ 30 |
| II | ≥ 40 | ≥ 53 | ≤ 58 | ≤ 28 | ≤ 33 |
| III | ≥ 37 | ≥ 50 | ≤ 63 | ≤ 32 | ≤ 37 |
| IV | ≥ 32 | ≥ 45 | ≤ 68 | ≤ 37 | ≤ 42 |

La classe acustica ottenuta si considera una proprietà intrinseca dell'edificio ed è pertanto indipendente dal clima acustico esterno o della zona in cui si trova. La possibilità di correlare l'isolamento acustico di facciata al clima acustico esterno è considerata a livello informativo nell'appendice L della norma.

Le misure del rumore degli impianti vanno corrette secondo il tempo di riverberazione misurato nell'ambiente oggetto di rilevazione e, limitatamente al caso del rumore degli impianti a funzionamento continuo, anche per l'eventuale rilevanza del rumore residuo.

In caso di edifici con tipologia seriale, cioè con elementi tecnici che si ripetono uguali secondo schemi che dipendono da caratteristiche distributive, organizzative e funzionali degli ambienti delle unità immobiliari, la norma UNI 11367 prevede, alle appendici G e H, la possibilità di adottare criteri di campionamento, per ciascun requisito acustico, al fine di ridurre il

numero di prove. Tale campionamento si basa sull'individuazione di insiemi omogenei di elementi da cui ricavare le prestazioni acustiche rappresentative dell'intero gruppo ed estendibili a tutti gli elementi tecnici con le stesse caratteristiche, adottando un'apposita incertezza di campionamento. Edifici con caratteristiche seriali non sono frequenti, ad eccezione di grandi complessi immobiliari residenziali o grandi alberghi. In questi casi, la norma consente di eseguire le misure su un numero limitato di elementi tecnici applicando al risultato finale l'incertezza di campionamento. Quest'ultima è funzione dello scarto tipo tra le misure e del livello di fiducia scelto per le valutazioni. La norma suggerisce la possibilità di scegliere tra tre livelli di fiducia (70, 75 e 80 %). La procedura può diventare molto complessa quando ne risulta un numero elevato di gruppi omogenei. In questo caso il numero di misurazioni complessive potrebbe rimanere molto elevato e la procedura molto laboriosa. La norma consente al tecnico che esegue le misurazioni di derogare rispetto alle procedure previste purché questo non comporti errori nella valutazione della classificazione e sia chiaramente esplicitato e motivato nella relazione di verifica.

Per quanto riguarda l'isolamento al rumore aereo interno ed il rumore di calpestio per l'edilizia ricettiva, la norma prevede dei valori di riferimento anche per le partizioni interne alla medesima unità immobiliare (pareti e solai tra camere di albergo). In questo caso, tuttavia, la grandezza usata per l'isolamento ai rumori aerei interni è l'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ($D_{nT,w}$) e non il potere fonoisolante apparente (R').

Con riferimento agli edifici adibiti a scuole ed ospedali, la norma UNI 11367 non prevede la determinazione della classe acustica ma la verifica di valori di riferimento con prestazione di base e prestazione superiore, per vari requisiti delle partizioni, delle facciate e degli impianti.

5.6.2 - La procedura prevista dalla norma UNI 11444 [31]

In caso di sistemi edilizi non seriali, caratterizzati da un insieme di unità immobiliari con elementi tecnici che non si ripetono in maniera frequente, l'applicazione della tecnica di campionamento indicata dalla norma UNI 11367, per tutti o solo alcuni dei requisiti acustici, non risulta idonea per limitare adeguatamente il numero di prove, rendendo molto onerosa la procedura per la classificazione acustica delle unità immobiliari e quindi poco applicabile la UNI 11367 stessa. Infatti, considerando i sistemi edilizi più frequenti (residenziali e non), si hanno solitamente tipologie con un ridotto numero di elementi tecnici omogenei e quindi con un elevato numero di gruppi; il numero di misure rimane pertanto elevato in relazione al sistema edilizio da classificare. In queste situazioni, peraltro, anche l'approccio statistico alla base del calcolo dell'incertezza di campionamento risulta poco attendibile.

La norma UNI 11444-2012 (in revisione) contiene le linee guida per la selezione di unità immobiliari in edifici non seriali e fa riferimento alla procedura di classificazione prevista nella UNI 11367. La norma descrive la procedura per selezionare il "caso peggiore" in un campione di unità immobiliari in base agli elementi costruttivi misurabili per i quali ci si aspetta le prestazioni peggiori. La norma prevede che la classificazione venga eseguita una percentuale minima del 10% di unità immobiliari (con almeno 2, per edifici con non più di 4 unità e 3, per edifici con un massimo di 30 unità). In ogni unità immobiliare selezionata, vanno misurati i requisiti di tutte le partizioni, facciate e impianti secondo la procedura indicata dalla UNI 11367. Al termine, si calcolerà la classe acustica solo per le unità immobiliari misurate, mentre per le altre unità immobiliari la classe acustica potrà essere estesa tenendo in considerazione il criterio cautelativo utilizzato.

5.6.3 - La norma internazionale ISO/TS 19488 [32]

A livello internazionale è stata recentemente pubblicata la norma sulla classificazione acustica ISO/TS 19488, sviluppata dall'ISO/TC43/SC 2 (Building Acoustics). La norma non rientra, al momento, negli accordi di Vienna e pertanto non verrà recepita automaticamente dal CEN e dai singoli paesi europei. La norma è piuttosto articolata per quanto riguarda i valori limite e i requisiti da utilizzare. Innanzitutto, sono previste sei classi, dalla A alla F, per i consueti requisiti di isolamento ai rumori aerei e di calpestio, rumore degli impianti, e, limitatamente ai vani scala comuni e aree di accesso, anche tempo di riverberazione o assorbimento acustico.

Sia per l'isolamento al rumore aereo che per il rumore di calpestio, sono considerate tre diverse categorie di partizioni di separazione: tra ambienti interni in tutte le direzioni, tra ambienti verso vani scala comuni o verso aree di accesso e tra

ambienti posti in vicinanza di locali rumorosi. Nel caso della ISO/TS 19488, alcune delle prestazioni acustiche sono descritte da indicatori differenti rispetto al D.P.C.M. 5/12/1997. In particolare, si fa riferimento ad indici a singolo numero corretti con termini di adattamento spettrale che considerano, in alcuni casi, anche le basse frequenze fino a 50 Hz, nonché a valori limite di facciata in funzione del L_{den} .

Per quanto riguarda le procedure di verifica e campionamento, la norma risulta notevolmente più snella rispetto alla norma italiana UNI 11367 e sicuramente, da questo punto di vista, potrebbero essere colti degli spunti per la revisione della norma italiana.

Nella ISO/TS 19488, sono descritte due procedure di verifica alternative, una (procedura "A"), basata su calcoli progettuali, ispezioni visive e misure sul campo (con numero ridotto di misurazioni), l'altra (procedura "B") basata solo su misure sul campo. Per la procedura "B", almeno il 10% dei componenti dell'edificio deve essere selezionato e devono essere sufficientemente rappresentativi dell'abitazione completa. Nella norma si consiglia di selezionare stanze o partizioni con risultati attesi inferiori (partizioni con costruzioni a fianchi critici o posizioni sfavorevoli nell'edificio) anche se non vengono date indicazioni su eventuali criteri di scelta. È inoltre possibile selezionare un numero di misure maggiore se si sospetta che le prestazioni variano tra le diverse abitazioni.

5.7 - Considerazioni sulla revisione delle norme UNI 11367 e UNI 11444

Nei dieci anni successivi alla sua pubblicazione, lo schema di classificazione acustica italiana, fornito dalle norme UNI 11367 e UNI 11444, è stato applicato solo in pochi casi. Il motivo è da cercare principalmente nella procedura piuttosto laboriosa e costosa, in un periodo critico per il settore delle costruzioni. La norma UNI 11367 prevede la possibilità di eseguire un campionamento finalizzato alla riduzione del numero di misurazioni da eseguire; questo richiede una serie di procedure di selezione dei campioni e di calcolo dell'incertezza di campionamento che risulta corretta dal punto di vista procedurale e teorico ma complicata dal punto di vista pratico. L'incertezza di campionamento dipende della differenza dei risultati tra le misurazioni e dal livello di confidenza scelto per le valutazioni. Applicando un livello elevato di fiducia ed in presenza di misure che forniscono risultati piuttosto diversi, l'incertezza del campionamento può portare a correzioni molto significative. Lo standard suggerisce la possibilità di scegliere tra tre livelli di fiducia (70, 75 e 80%) e questo produce risultati che non sono completamente comprensibili dagli utenti finali. Inoltre, spesso il numero di elementi tecnici omogenei è ridotto e questo determina un numero elevato di gruppi omogenei all'interno di ciascun requisito, con un numero considerevole di misurazioni e calcoli dell'incertezza di campionamento.

La revisione della norma UNI 11367 dovrebbe pertanto puntare soprattutto ad una procedura più snella per la selezione dei campioni da misurare. La procedura di selezione del campione basato sugli elementi più critici, per i quali ci si aspetta i risultati più bassi, prevista dalla norma UNI 11444, potrebbe essere completamente integrata nella norma UNI 11367, tenendo anche conto delle indicazioni riportate nella norma internazionale ISO/DTS 19488. L'attuale procedura della UNI 11367 è infatti numericamente compatibile con il passaggio a una classificazione basata su criteri di prestazione minima.

La revisione della UNI 11367, oltre a fornire gli aggiornamenti bibliografici e normativi necessari, potrebbe anche fornire utili linee guida per la sua applicazione alle ristrutturazioni e riqualificazioni anche parziali degli edifici. Infine, la revisione della norma dovrebbe includere un allegato con indicazioni sui metodi di calcolo da applicare per stimare le classi in fase di progettazione.

5.8 - Bibliografia

- [1] Legge quadro sull'inquinamento acustico n° 447 del 26 ottobre 1995, pubblicata sulla G.U. n°254 del 30/10/95.
- [2] D.P.C.M. del 5/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" pubblicato sulla G.U. n°297 del 22-12-97.
- [3] UNI 11367:2010; Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari, Procedura di valutazione e verifica in opera.
- [4] P. Fausti, G. Cellai, S. Secchi, F. Serpilli, A. Tombolato, Quali prospettive per una nuova regolamentazione dei requisiti acustici degli edifici, in atti del seminario dell'Associazione Italiana di Acustica "Stato di attuazione del D.Lgs. 42/2017: come si stanno evolvendo le norme sul rumore ambientale" Napoli, 12 ottobre 2018.
- [5] Legge 30/10/2014, n. 161, Disposizioni per l'adempimento degli obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia all'Unione europea - Legge europea 2013-bis. Art. 19: Delega al Governo in materia di inquinamento acustico. Armonizzazione della normativa nazionale con le direttive 2002/49/CE, 2000/14/CE e 2006/123/CE e con il regolamento (CE) n. 765/2008. Comma 2, lettera f).
- [6] Decreto Legislativo 17/2/2017, n° 42 (GU 4-4-2017), Disposizioni in materia di armonizzazione della normativa nazionale in materia di inquinamento acustico, a norma dell'articolo 19, comma 2, lettera f) della legge 30 ottobre 2014, n. 161.
- [7] D.M. 11 gennaio 2017 - Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili. (17A00506) (GU Serie Generale n.23 del 28-1-2017) <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/01/28/17A00506/sg>.
- [8] Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n.3150 del 22/5/1967, "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici".
- [9] UNI EN ISO 3382-1:2009; Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 1: Sale da spettacolo.
- [10] UNI EN ISO 3382-2:2008; Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.
- [11] UNI EN ISO 3382-3:2012; Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 3: Open space.
- [12] UNI EN ISO 354:2003; Acustica - Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante.
- [13] UNI EN ISO 16283-1:2018; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.
- [14] UNI EN ISO 16283-2:2018; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio.
- [15] UNI EN ISO 16283-3:2016; Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Isolamento acustico di facciata.
- [16] UNI EN ISO 16032:2005; Misurazione del livello di pressione sonora di impianti tecnici in edifici – Metodo tecnico progettuale.
- [17] UNI EN ISO 10052:2021; Acustica - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti - Metodo di controllo.
- [18] UNI EN ISO 717-1:2021; Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.

- [19] UNI EN ISO 717-2:2021; Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio.
- [20] Guida ANIT, Requisiti acustici passivi e classificazione acustica: sintesi del D.P.C.M. 5/12/1997 e della UNI 11367, Febbraio 2019.
- [21] D.P.C.M. del 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" pubblicato sulla G.U. n°280 del 1-12-97.
- [22] D.M. 18/12/1975 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica" pubblicato sulla G.U. n. 29 del 2-2-76.
- [23] Guida ANIT, Acustica e ristrutturazioni: obblighi di legge e soluzioni tecnologiche, Gennaio 2019.
- [24] UNI 11532-1:2018; Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1: Requisiti generali.
- [25] EN 60268-16:2011; Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index (Misura di STI: Speech Transmission Index – Indice di intelligibilità del parlato).
- [26] UNI 11532-2:2020; Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico.
- [27] R. Cremonini, P. Fausti, S. Secchi, The Italian standard UNI 11367 regarding the sound classification of single properties: overview of procedures, in European Symposium "Harmonization of European Sound Insulation Descriptors and Classification Standards", Florence, December 14th 2010, ISBN 978-88-88942-32-2, DOI: 10.13140/2.1.1657.4725.
- [28] A. Di Bella, P. Fausti, F. Scamoni, S. Secchi, Italian experiences on acoustic classification of buildings, in Proceedings of InterNoise 2012, August 19-22 2012, New York, pp. 5598-5609.
- [29] P. Fausti, G. Cellai, A. Di Bella, S. Secchi, Sampling strategies for the verification of acoustic performances of buildings, in Proc. of Euronoise 2018, May 27-31 2018, Heraklion, Crete – Greece.
- [30] P. Fausti, A. Di Bella, A. Santoni, F. Scamoni, S. Secchi, G. Semprini, The Italian classification scheme of buildings – application to apartments and schools, in Proceedings of the e-Congress Inter-Noise 2020, 23-26 Agosto 2020, Seoul, Corea.
- [31] UNI 11444:2012; Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Linee guida per la selezione delle unità immobiliari in edifici con caratteristiche non seriali.
- [32] ISO/TS 19488:2021; Acoustics — Acoustic classification of dwellings.

Il Gruppo ROCKWOOL

ROCKWOOL Italia S.p.A. è parte del Gruppo ROCKWOOL. Con oltre 70 dipendenti, siamo l'organizzazione locale che offre sistemi di isolamento avanzati per l'edilizia.

Nel Gruppo ROCKWOOL ci dedichiamo ad arricchire la vita di tutti coloro che entrano in contatto con le nostre soluzioni. La nostra expertise si presta perfettamente a far fronte a molte delle principali sfide odierne in fatto di sostenibilità e sviluppo, dal consumo energetico all'inquinamento acustico, dalla resilienza al fuoco alla carenza idrica e alle alluvioni.

La nostra gamma di prodotti rispecchia la diversità di bisogni a livello mondiale e aiuta i nostri stakeholder a ridurre la propria impronta energetica.

La lana di roccia è un materiale versatile ed è la base di tutte le nostre attività. Con circa 11.700 colleghi appassionati in 39 Paesi, siamo il leader mondiale nelle soluzioni in lana di roccia: dall'isolamento degli edifici ai controsoffitti acustici, dai sistemi di rivestimento esterno alle soluzioni per l'orticoltura, dalle fibre speciali per uso industriale ai prodotti isolanti per il settore industria, marina e offshore.

ROCKWOOL Italia S.p.A.

Via Canova, 12
20145 Milano
Tel. 02.346.13.1

ISBN 978-88-908722-8-0



www.rockwool.com/it