

ACUSTICA IN EDILIZIA

a cura di

Giuseppina Emma Puglisi
e Marco Carlo Masoero

L'energia associata ad un'onda sonora incidente su una parete viene da essa parzialmente trasmessa e parzialmente dissipata in calore per effetto di fenomeni d'attrito interno. In ambito tecnico, i fenomeni connessi con la dissipazione e la trasmissione di energia acustica sono identificati, a seconda del contesto, con i termini *fonoassorbimento* e *fonoisolamento*, su cui è essenziale formulare alcune precisazioni.

Il ruolo del *fonoassorbimento* riguarda l'influenza che l'assorbimento e la riflessione del suono esercitano nel determinare la risposta acustica di uno spazio chiuso. Poiché la trasmissione di suono tra un ambiente emettente ed uno ricevente è generalmente un fatto indesiderato per quest'ultimo, sorge la necessità di *isolare acusticamente* l'ambiente disturbato da quello disturbante. L'effetto complessivo del processo di trasmissione e ricezione del suono è dunque influenzato non solo dalle proprietà di fonoisolamento degli elementi che separano i due spazi, ma anche dalle proprietà di fonoassorbimento di entrambi gli ambienti: di qui la necessità di chiarire la natura dei meccanismi fisici che determinano la complessa interazione tra onde sonore e materiali.

A titolo di esempio si consideri il problema della riduzione del livello sonoro in uno stabilimento industriale in cui operano macchinari o impianti rumorosi: il risultato può essere ottenuto con un insieme di provvedimenti che possono riguardare sia la riduzione della potenza sonora trasmessa dal macchinario all'ambiente (interventi di fonoisolamento della sorgente), sia l'incremento del potere

fonoassorbente dell'ambiente in cui è situato il macchinario o dell'ambiente ricevente in cui si trovano i lavoratori (interventi di fonoassorbimento, o di "trattamento acustico", ambientale). Ovviamente le caratteristiche costruttive dei dispositivi utilizzati variano notevolmente a seconda delle applicazioni. Ad esempio, le *cabine silenziose* sono costituite da un involucro chiuso che racchiude completamente la sorgente; per insonorizzare scarichi fluidi (ad esempio, il condotto di scarico dei prodotti di combustione emessi da un motore o da una caldaia o lo scarico della valvola di sicurezza di un impianto a vapore) si utilizzano *silenzianti* di tipo dissipativo o reattivo; per ridurre la trasmissione delle vibrazioni per via solida, il macchinario viene vincolato attraverso un *supporto elastico antivibrante*.

Un'ulteriore precisazione deve essere fatta per chiarire analogie e differenze tra fenomeni di trasmissione di energia acustica e di energia termica, sui quali spesso viene ingenerata confusione dall'uso, evocativo quanto ambiguo, del termine "*materiale isolante termoacustico*". Questo termine deriva la sua origine dal fatto che, in campo edilizio, è parimenti necessario controllare e minimizzare la trasmissione del rumore e la trasmissione del calore attraverso l'involucro dell'edificio, al fine di limitare il disturbo acustico alle persone ed il costo energetico e monetario del riscaldamento degli edifici. In molti casi tale risultato può in effetti essere ottenuto con soluzioni integrate, efficaci su entrambi i fronti, ma tale circostanza non deve essere generalizzata: in effetti, soluzioni ottime sotto il profilo termico possono risultare totalmente inadatte

sotto quello dell'**isolamento** acustico; inoltre, non sempre i materiali che esibiscono buone proprietà di isolamento termico risultano efficaci nei confronti dell'**assorbimento** acustico.

3.1. FONOIOLAMENTO

Per introdurre il concetto di fonoisolamento consideriamo due ambienti adiacenti, 1 e 2, separati da una parete divisoria di area S . Si supponga che nell'ambiente 1 ("ambiente disturbante") sia attiva una sorgente sonora che vi determina un livello di pressione sonora L_{p1} ; il livello di pressione sonora L_{p2} nell'ambiente 2 ("ambiente disturbato") dipende sia dalla trasmissione di energia acustica da 1 a 2, sia dalla risposta acustica dell'ambiente medesimo.

Si definisce isolamento acustico D la differenza fra i livelli di pressione sonora, L_{p1} ed L_{p2} , nei due ambienti:

$$D = L_{p1} - L_{p2} \quad [\text{dB}] \quad (3.1)$$

Il comportamento della parete nei confronti della trasmissione del suono è definito quantitativamente attraverso il suo potere fonoisolante (o attenuazione acustica) R , la cui definizione è:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.2)$$

dove:

W_i = potenza sonora incidente sulla parete, lato ambiente disturbante (w)

W_t = potenza sonora trasmessa all'ambiente disturbato (w)

t = coefficiente di trasmissione (-)

Il potere fonoisolante è dunque una proprietà intrinseca della parete. Esso può essere misurato in laboratorio utilizzando due camere riverberanti affiancate e separate da un divisorio in cui viene inserita una sezione nota della parete in prova.

Noto, per via sperimentale, l'isolamento acustico D fra i due ambienti, si calcola il potere fonoisolante del divisorio "depurando" il risultato dell'effetto di assorbimento dell'ambiente 2 tramite l'equazione:

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2} \quad [\text{dB}] \quad (3.3)$$

dove:

S = area della parete divisoria [m^2]

A_2 = area di assorbimento equivalente dell'ambiente disturbato [m^2]

La trasmissione del suono fra gli ambienti 1 e 2 avviene nella realtà con modalità più complesse di quanto sopra ipotizzato: oltre alla trasmissione per via aerea (che avviene direttamente attraverso la superficie S) si verifica infatti anche una trasmissione per via strutturale attraverso i punti di collegamento tra il divisorio e le altre strutture adiacenti, come rappresentato in Figura 3.1.

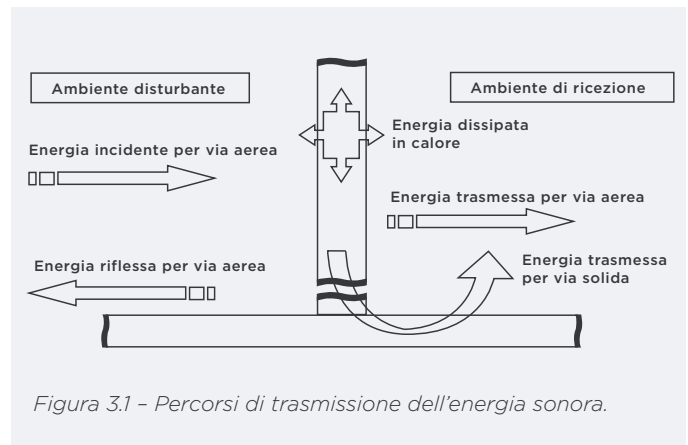


Figura 3.1 - Percorsi di trasmissione dell'energia sonora.

L'applicazione dei valori di potere fonoisolante misurati in laboratorio (ossia in una condizione in cui è possibile eliminare le trasmissioni laterali, come rappresentato nella Figura 3.2 in riferimento ad una sessione di misura presso il laboratorio dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica INRiM di Torino) a situazioni in opera deve dunque essere effettuata con le dovute cautele.

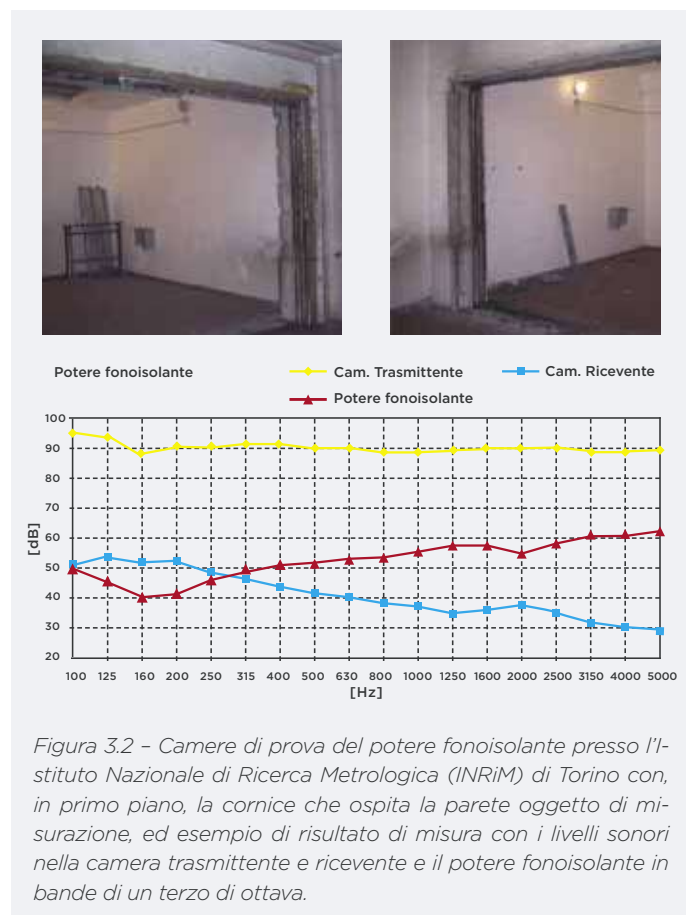


Figura 3.2 - Camere di prova del potere fonoisolante presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) di Torino con, in primo piano, la cornice che ospita la parete oggetto di misura, ed esempio di risultato di misura con i livelli sonori nella camera trasmittente e ricevente e il potere fonoisolante in bande di un terzo di ottava.

3.1.1 ONDE CHE SI PROPAGANO SU UNA PARETE

Diverse tipologie di onde interessano la vibrazione di una parete intesa come una piastra, e in particolare le onde flessionali, quasi-longitudinali e di taglio trasversali (vedi Figura 3.3). Le più importanti sono le onde flessionali, che producono sia la rotazione che lo spostamento laterale de-

gli elementi della piastra, molto pronunciati, e per questo assumono il ruolo principale nella radiazione del suono. Le onde quasi-longitudinali determinano piccoli spostamenti laterali e per questo la radiazione del suono da queste onde è generalmente insignificante comparata con quella delle onde flessionali. Nel caso delle onde di taglio trasversali, solo il movimento della superficie della parete è tangenziale all'aria adiacente, per cui queste onde non sono in grado di irradiare suono. Le onde quasi-longitudinali e le onde di taglio trasversali giocano un ruolo importante nella trasmissione delle vibrazioni tra pareti connesse.

Le onde flessionali pure appaiono quando la lunghezza d'onda dell'energia sonora incidente è ampia comparata con lo spessore della parete. In un pannello sottile, la velocità di propagazione delle onde flessionali c_f si ricava come da formula seguente:

$$c_f = \sqrt{\pi s f \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.4)$$

Dove s è lo spessore della parete (m), f è la frequenza (Hz), ρ è la densità del materiale (kg/m^3), E è il modulo di Young (N/m^2) e ν è il coefficiente di Poisson (-). Dalla relazione 3.4 si evince come le onde flessionali siano "dispersive", cioè la velocità di propagazione non dipenda esclusivamente dalle proprietà fisiche del mezzo, ma anche dalla frequenza, e in particolare dalla sua radice quadrata. Le altre tipologie di onde, così come le onde nell'aria, sono "non dispersive", ed esiste una sola frequenza detta *frequenza critica* f_c alla quale coincidono le due velocità, quella di propagazione del suono nell'aria c_a e quelle di propagazione delle onde flessionali sulla parete c_f (vedi Figura 3.4). La frequenza critica si ottiene dall'equazione 3.4, risolvendola rispetto alla frequenza:

$$f_c = \frac{c^2}{\pi s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.5)$$

Se nominiamo la lunghezza d'onda di propagazione del suono nell'aria λ_a e la lunghezza d'onda flessionale λ_f , dal legame fra lunghezza d'onda e frequenza $c = \lambda \cdot f$ si ha che per $f < f_c$ avremo $\lambda_a > \lambda_f$, per $f = f_c$ avremo $\lambda_a = \lambda_f$, mentre per $f > f_c$ si ha che $\lambda_a < \lambda_f$.

In Tabella 3.1 si riportano la densità, il modulo di Young e il coefficiente di Poisson di alcuni materiali di uso comune.

Tabella 3.1 - Densità ρ (kg/m^3), modulo di Young E (N/m^2) e coefficiente di Poisson ν (-) di alcuni materiali di uso comune in edilizia.

Materiale	E [N/m^2]	ρ kg/m^3	ν [N/m^2]
Mattoni pieni	$2,5 \times 10^{10}$	1800	0,3
Calcestruzzo	$2,6 \times 10^{10}$	2800	0,3
Vetro	7×10^{10}	2500	0,23
Marmo	$3,8 \times 10^{10}$	2600	0,3
Gesso	$1,5 \times 10^{10}$	900	0,3
Legno	$1,2 \times 10^{10}$	700	0,3
Alluminio	$7,3 \times 10^{10}$	2700	0,33
Piombo	$1,7 \times 10^{10}$	11300	0,43
Acciaio	20×10^{10}	7800	0,29

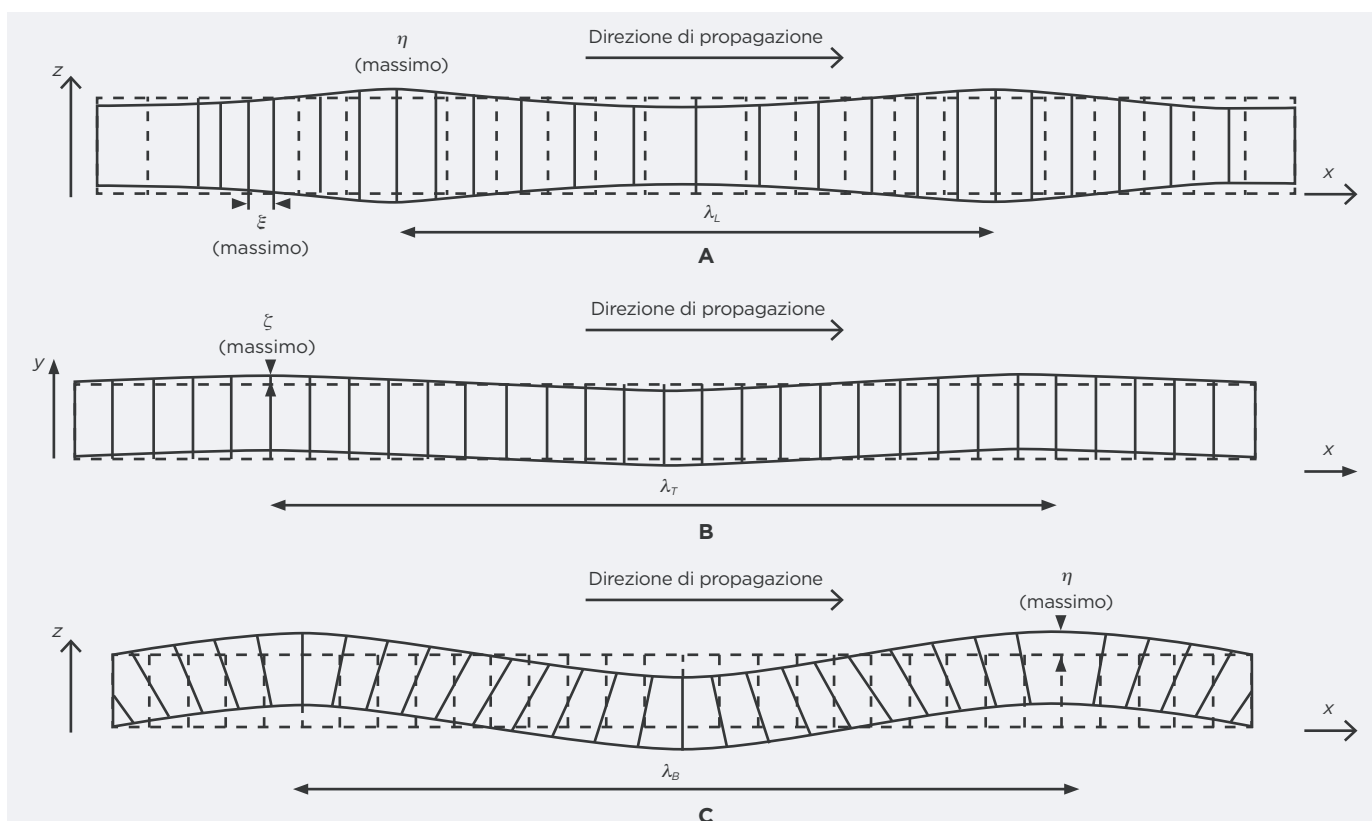
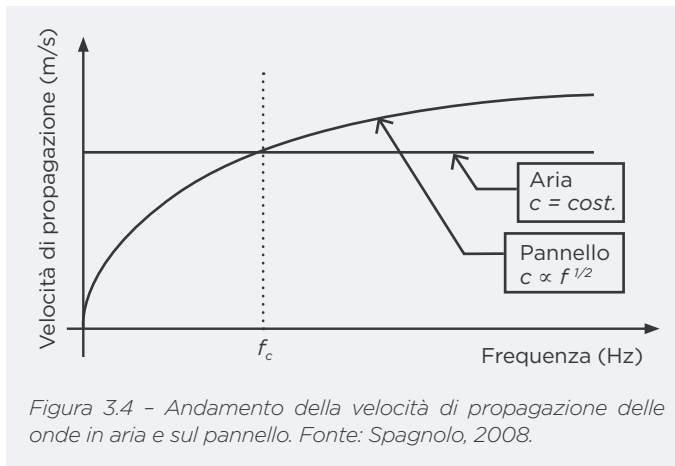


Figura 3.3 - Onde quasi-longitudinali (A), di taglio trasversali (B) e flessionali (C) che si propagano su una piastra. Fonte: Hopkins, 2007.



3.1.2 POTERE FONOSOLANTE DI PARETI OMOGENEE E ISOTROPE

Consideriamo il caso semplice di trasmissione attraverso una parete omogenea monostrato. La trasmissione acustica dipende dalle caratteristiche della parete e in particolare dalla sua geometria, massa, rigidità e smorzamento.

Nella vibrazione di una parete sono infatti coinvolte:

- energia cinetica di vibrazione della parete, funzione della *massa*;
- energia di deformazione (potenziale), funzione della *rigidità*;
- dissipazione di energia nella parete, funzione dello *smorzamento*.

La risposta dinamica è data dalla sovrapposizione lineare dei contributi di vibrazione dei singoli modi della parete, che dipendono dalle caratteristiche sopracitate e dalle condizioni di vincolo della stessa.

La trasmissione è di due tipologie:

- *non risonante*, che si verifica quando il moto forzato della parete non va ad eccitarne i modi propri di vibrazione, è dominata dalla massa;
- *risonante*, che si verifica quando sono eccitati i modi di vibrazione della struttura, che irradia a sua volta energia sonora, è dominata dallo smorzamento.

Nel caso dello smorzamento, si distinguono lo *smorzamento interno* η che rappresenta la frazione di energia dissipata intrinsecamente dall'elemento ed è normalmente compreso nell'intervallo fra 0,003 e 0,006, lo *smorzamento da accoppiamento* η_{ij} che rappresenta la frazione di energia ceduta dall'elemento *i*-esimo ad altri elementi (*j*, *k*, ecc.) a cui è accoppiato, e lo *smorzamento totale* η_r che rappresenta l'energia dissipata globalmente dall'elemento *i*-esimo considerato, pari alla somma di tutte le singole energie dissipate. I principali effetti di un incremento di smorzamento di una parete sono un più rapido decadimento delle vibrazioni libere e la riduzione dell'ampiezza di vibrazione alle frequenze di risonanza, alla frequenza critica (si veda di seguito l'effetto di coincidenza) e alle frequenze superiori ad essa, con conseguente incremento dell'isolamento acustico. Appare dunque evidente l'importanza dell'incremento dello smorzamento della parete, che dal punto di vista sperimentale può essere determinato a partire dalla misura del tempo di riverberazione strutturale.

Legge della massa

Nel caso si considerino onde piane incidenti su una parete infinitamente estesa di spessore molto inferiore della lunghezza d'onda incidente (Figura 3.5), la parete vibrerà in modo *non risonante*. Ipotizzando che la massa, la rigidità e lo smorzamento siano distribuiti in modo omogeneo e isotropo, è possibile considerare la parete come un oscillatore massa-molla smorzato sottoposto all'azione di una forza armonica (Figura 3.6). L'oscillatore è costituito da una massa M (kg), sottoposta ad una forza armonica F (N), che rappresenta l'onda sonora incidente, da una molla di rigidità K (N/m) e da un elemento dissipativo avente costante di smorzamento C (kg/s). Quando la frequenza della forza armonica f coincide con la frequenza naturale di risonanza dell'oscillatore f_0 cioè $f = f_0$, il sistema è governato dallo smorzamento, che se basso comporta una più ampia oscillazione della parete con conseguente riduzione del potere fonoisolante R (Figura 3.7). Con $f \ll f_0$ il sistema è governato dalla rigidità ed R presenta andamento decrescente di circa -6 dB/ottava, mentre per $f \gg f_0$ il sistema è governato dalla massa ed R si determina secondo la *legge della massa* descritta di seguito.

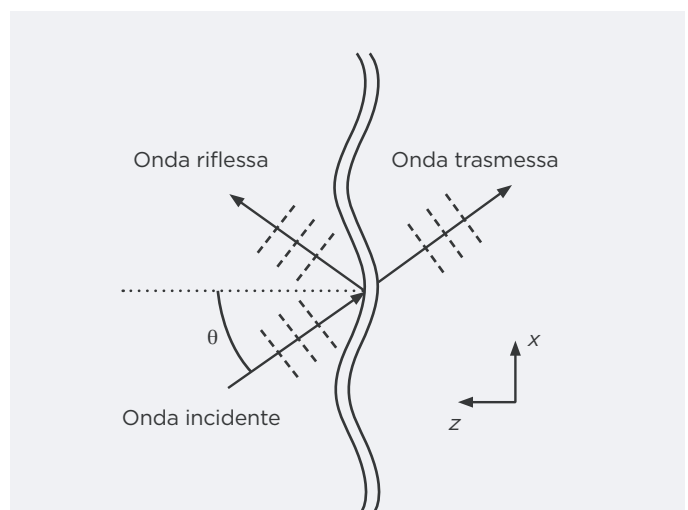


Figura 3.5 - Onda piana incidente su una parete infinitamente estesa (pannello infinito), e onde piana riflessa e trasmessa dalla parete. Fonte: Hopkins, 2007.

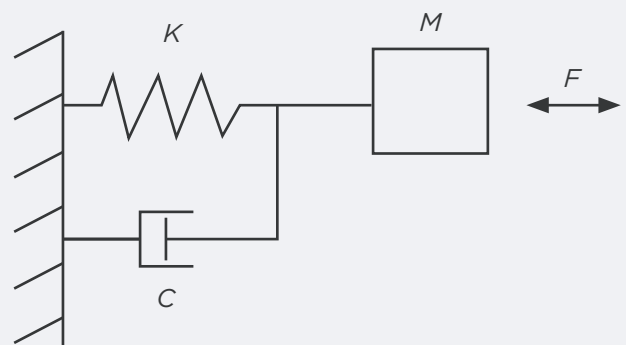


Figura 3.6 - Modello di oscillatore massa-molla smorzato sottoposto ad una forza armonica. M = massa (kg), F = forza armonica (N), rigidità o costante elastica della molla, K (N/m), C = costante di smorzamento (kg/s).

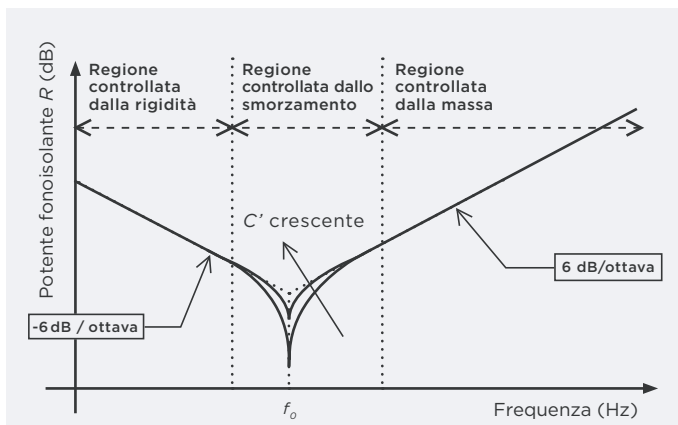


Figura 3.7 - Potere fonoisolante nell'intorno della frequenza di risonanza f_0 dell'oscillatore massa-molla smorzato. Fonte: Spagnolo, 2008.

Nella regione di frequenze oltre la frequenza di risonanza f_0 , il potere fonoisolante R per un angolo di incidenza θ delle onde nell'aria è controllato dalla massa della parete secondo la seguente relazione:

$$R(\theta) \approx 20 \log \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.6)$$

dove $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione in rad/s, f è la frequenza del suono incidente in Hz, m è la massa areica della parete in kg/m^2 , ρ_0 è la densità dell'aria in kg/m^3 e c è la velocità di propagazione del suono nell'aria in m/s .

La relazione 3.6 esprime la *legge della massa*, secondo la quale il potere fonoisolante R di una parete piana, omogenea e isotropa, per una certa frequenza e angolo di incidenza del suono, aumenta di 6 dB per ogni raddoppio della massa areica. Analogamente, fissata la massa areica e l'angolo di incidenza del suono, il potere fonoisolante aumenta con la frequenza, e in particolare di 6 dB/ottava.

Il potere fonoisolante risulta nullo ($R=0$) nel caso non reale di onda radente ($\theta = 90^\circ$), mentre è massimo per $\theta = 0^\circ$, dove si avrà con buona approssimazione:

$$R_0 = 20 \log(f \cdot m) - 42,3 \quad [\text{dB}] \quad (3.7)$$

Il potere fonoisolante ad incidenza diffusa (R_{diff} , ossia per angoli di incidenza θ compresi tra 0° e 90°) può essere determinato con la relazione 3.8 e per incidenza diffusa pratica ($R_{diff,pratt}$, ossia per angoli di incidenza compresi tra 0° e 78° che approssimano meglio il fenomeno reale) con la relazione 3.9:

$$R_{diff} = R_0 - 10 \log(0,23 \cdot R_0) \quad [\text{dB}] \quad (3.8)$$

$$R_{diff,pratt} = 20 \log(f \cdot m) - 48 \quad [\text{dB}] \quad (3.9)$$

Il grafico in Figura 3.8 rappresenta il potere fonoisolante per incidenza normale, diffusa e diffusa pratica, dove si evidenzia come a parità di frequenza il primo sia superiore agli altri due. Il grafico consente di determinare il potere fonoisolante a partire dal prodotto fra la frequenza e la massa areica della parete.

La legge della massa trova un buon riscontro nelle misure sperimentali nel caso di pareti omogenee impiegate comunemente nella pratica edilizia entro un limitato campo di frequenze. Essa è limitata alle frequenze inferiori e intorno a f_0 dagli effetti di rigidità e di smorzamento e alle alte frequenze dall'effetto di coincidenza, come evidenziato in Figura 3.9.

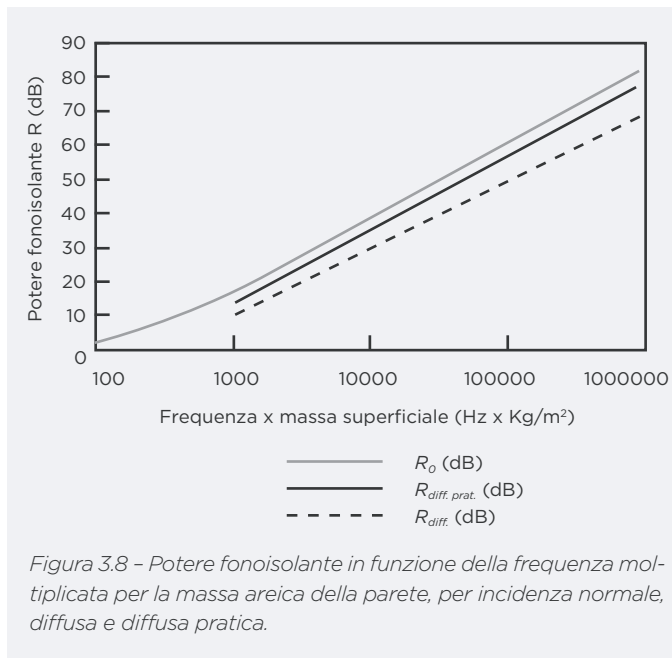


Figura 3.8 - Potere fonoisolante in funzione della frequenza moltiplicata per la massa areica della parete, per incidenza normale, diffusa e diffusa pratica.

Per frequenze inferiori alla frequenza di risonanza f_0 il potere fonoisolante è regolato dalla rigidità della parete, ed in particolare cresce all'aumentare della rigidità areica e decresce all'aumentare della frequenza di -6 dB/ottava, secondo la relazione:

$$R(\theta) \approx 10 \log \left(1 + \frac{K'^2 \cos^2 \theta}{\omega^2 4 \rho_0^2 c^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.10)$$

dove K' è la rigidità areica in N/m^3 .

Per valori di frequenza nell'intorno della f_0 il potere fonoisolante R è controllato dallo smorzamento, ed in particolare cresce all'aumentare dello smorzamento areico secondo la seguente relazione:

$$R(\theta) \approx 10 \log \left(1 + \frac{C' \cos^2 \theta}{2 \rho_0 c} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (3.11)$$

dove C' è la costante di smorzamento areica in $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$.

Il potere fonoisolante presenta una riduzione sensibile in corrispondenza della frequenza critica f_c . Per $f > f_c$ l'andamento di R è analogo a quello descritto dalla legge di massa, da cui si discosta in misura più o meno marcata in ragione dello smorzamento della parete tornando ad aumentare ad un tasso teorico di circa 9 dB per raddoppio di frequenza. A fini cautelativi si può considerare che la pendenza oltre la frequenza critica continui ad essere di circa 6 dB per raddoppio di frequenza.

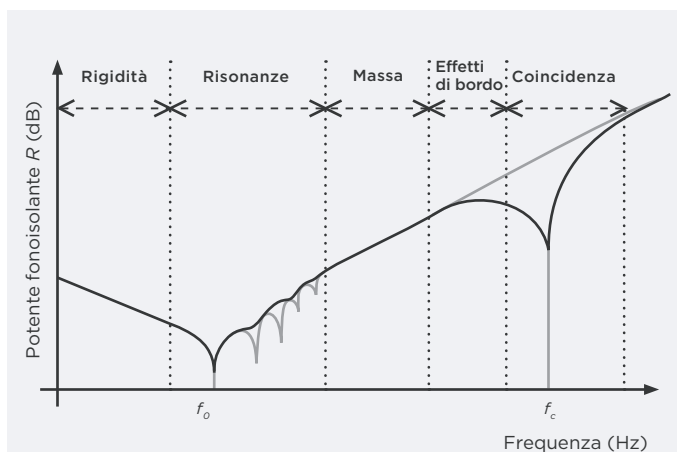


Figura 3.9 - Potere fonoisolante in funzione della frequenza per una parete omogenea e isotropa. Si evidenzia la sua riduzione in corrispondenza della frequenza fondamentale f_0 e della frequenza critica f_c . Fonte: Spagnolo, 2008.

3.1.3 EFFETTO DI COINCIDENZA

Se su una parete sottile e infinita incidono onde piane di lunghezza d'onda λ_a con un angolo θ rispetto alla normale, l'effetto di coincidenza si verifica quando la proiezione della lunghezza d'onda in aria sulla parete $\lambda_a/\sin\theta$ coincide con la lunghezza d'onda λ_f delle onde flessionali sulla parete, come mostrato in Figura 3.10, ovvero:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_a}{\sin\theta} \quad [\text{m}] \quad (3.12)$$

In questa condizione la parete irradia dalla parte opposta l'onda incidente senza subire attenuazioni.

Ciò può esistere solo per lunghezze d'onda $\lambda_a \leq \lambda_f$ e quindi per frequenze $f \geq f_c$ (cfr. Figura 3.4). Al di sotto della frequenza critica f_c le onde flessionali non irradiano suono nell'aria. In tal senso, il caso limite di incidenza parallela per cui θ è uguale a 90° costituisce il caso in cui la lunghezza d'onda λ_a è pari alla lunghezza d'onda flessionale λ_f , quando il $\sin\theta$ è uguale a 1. Ciò accade alla frequenza critica f_c (vedi equazione 3.5) che corrisponde alla frequenza in corrispondenza della quale la velocità di propagazione delle onde flessionali eguaglia la velocità di propagazione del suono nell'aria. La frequenza critica corrisponde alla più bassa frequenza di coincidenza.

A qualsiasi frequenza superiore alla frequenza critica ci sarà sempre un angolo θ che soddisfi la condizione di coincidenza. Infatti, a frequenze inferiori alla f_c si ha che $\lambda_a > \lambda_f$ e non può capitare il fenomeno della coincidenza, mentre a frequenze superiori o uguali a f_c si ha che $\lambda_a \leq \lambda_f$ e può capitare la coincidenza. Le frequenze di coincidenza f_{co} possono essere ottenute in base alla seguente relazione:

$$f_{co} = \frac{c^2}{\pi \cdot s \cdot \sin 2\theta} \sqrt{\frac{3\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.13)$$

dove s è lo spessore della parete (m), f è la frequenza (Hz), ρ è la densità del materiale (kg/m^3), E è il modulo di Young (N/m^2) e ν è il coefficiente di Poisson (-), θ è l'angolo di incidenza dell'onda. Per pannelli reali aventi dimensioni finite chiusi su una cavità, come ad esempio una camera, è stato dimostrato che l'unica frequenza di coincidenza possibile è la frequenza critica f_c .

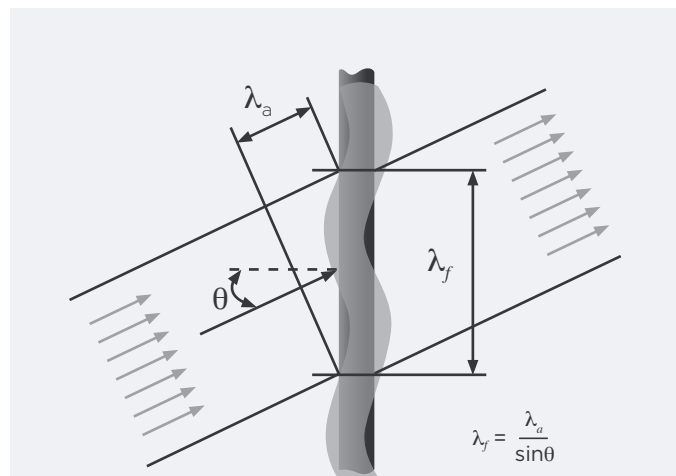


Figura 3.10 - Coincidenza fra la lunghezza d'onda flessionale λ_f e la proiezione della lunghezza d'onda in aria sulla parete $\lambda_a/\sin\theta$.

Per ridurre l'effetto di riduzione del potere fonoisolante in corrispondenza della frequenza critica, si può agire sui termini della formula 3.5 che caratterizzano i materiali della parete. In termini pratici la riduzione dello spessore del pannello permette di traslare la frequenza critica verso frequenze maggiori, al di fuori delle frequenze di interesse pratico che corrispondono all'intervallo compreso fra 100 Hz e 5000 Hz circa, mentre l'aumento dello smorzamento della struttura permette di ridurre la caduta del potere fonoisolante. A titolo esemplificativo la frequenza critica di un muro di calcestruzzo leggero da 8 cm è pari a 425 Hz, quella di un muro in calcestruzzo denso da 12 cm è di 158 Hz, quella di una lastra di vetro da 12 mm è di 1058 Hz, e quella di una lastra di cartongesso da 13 mm è di 3150 Hz.

Al fine di facilitare il calcolo della frequenza critica per pareti omogenee di diverso spessore e materiale, in Tabella 3.2 si riportano i valori del prodotto fra lo spessore della parete s e la frequenza critica f_c per alcuni materiali da costruzione, calcolati per la propagazione del suono nell'aria a 20°C .

Si nota che per alcuni materiali, come mattoni e calcestruzzo, nel caso di spessori si uso comune, la frequenza critica è compresa fra qualche decina e qualche centinaio di Hz, per cui le frequenze di interesse pratico nel caso di queste pareti cadono in una regione dove non è verificata la legge della massa. Per lastre sottili di vetro, cartongesso o legno, la frequenza critica ha sempre un valore elevato e la legge della massa è applicabile sino alle alte frequenze.

Tabella 3.2 - Valori del prodotto fra lo spessore della parete s e la frequenza critica f_c per alcuni materiali da costruzione.

Materiale	$s \cdot f_c$ [m Hz]
Acciaio	12,4
Alluminio	12,2
Calcestruzzo denso	$19 \pm 10\%$
Calcestruzzo leggero	$34 \pm 10\%$
Calcestruzzo poroso	$33 \pm 10\%$
Legno compensato	$20 \pm 10\%$
Ottone	17,8
Perspex	27,7
Rame	16,3
Truciolato	$23 \pm 10\%$
Vetro	12,7

3.1.4 EFFETTO DEI MODI

In condizioni reali le pareti sono di dimensioni finite e connesse ad altri elementi, da ciò deriva che non possono realmente propagarsi su di esse onde flessionali libere, come nel caso ideale di un pannello di dimensioni infinite, ma solo onde stazionarie definite anche modi propri di vibrazione. I modi propri corrispondono a precise frequenze di risonanza, in corrispondenza delle quali si verificano minimi locali del potere fonoisolante (v. Figura 3.9). Ciò che accade è che quando la frequenza del suono che incide sulla parete coincide con le frequenze di risonanza della parete questa oscilla con ampiezza molto maggiore rispetto che alle altre frequenze trasmettendo tutta l'energia sonora che riceve.

Tipicamente le oscillazioni di risonanza hanno una ampiezza decrescente al crescere delle frequenze di risonanza, che sono normalmente al di sotto dei 100 Hz (dunque al di sotto delle frequenze di interesse pratico) nelle pareti di uso comune. L'innescarsi dei modi angolari e di spigolo (effetti di bordo) determina anche una diminuzione del potere fonoisolante nelle frequenze precedenti la frequenza critica alla quale si realizza il massimo accoppiamento fra aria e parete. Dalla frequenza critica in poi tutti i modi angolari e superficiali sono eccitati e la trasmissione è completamente risonante.

Le frequenze di risonanza (o modi propri della parete) dei modi connessi alle onde flessionali si ricavano tramite la seguente formula:

$$f_{m,n} = \frac{\pi s}{4} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \cdot \left[\left(\frac{m}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_y}\right)^2 \right] \quad [\text{Hz}] \quad (3.14)$$

Dove s è lo spessore della parete omogenea (m), E è il modulo di elasticità del materiale (N/m^2), ρ è la densità (kg/m^3), ν è il coefficiente di Poisson, l_x e l_y sono le dimensioni della parete nelle direzioni x e y (m), m ed n sono numeri interi che rappresentano il numero di semilunghezze d'onda contenute nelle dimensioni l_x e l_y (v. Figura 3.11). La più bassa frequenza di risonanza è indicata come frequenza fondamentale, f_0 , e si ricava tramite la formula 3.14 inserendo 1 sia per m che per n .

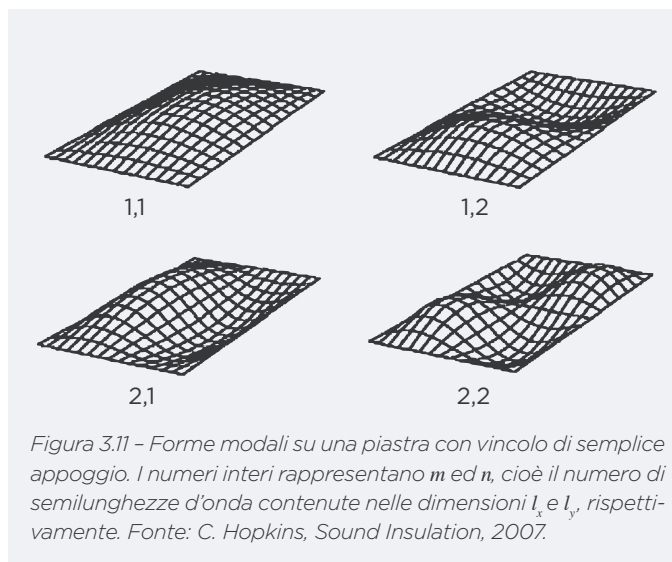


Figura 3.11 - Forme modali su una piastra con vincolo di semplice appoggio. I numeri interi rappresentano m ed n , cioè il numero di semilunghezze d'onda contenute nelle dimensioni l_x e l_y , rispettivamente. Fonte: C. Hopkins, Sound Insulation, 2007.

3.1.5 POTERE FONOISOLANTE DI PARETI DOPPIE

La legge della massa evidenzia che per ottenere un incremento del potere fonoisolante di una parete di 6 dB è necessario raddoppiarne la massa e quindi lo spessore: appare quindi evidente che tale soluzione si scontra con evidenti limiti di ingombro e di costo della parete.

Nelle applicazioni in cui è necessario realizzare pareti sottili ma piuttosto fonoisolanti, risultati soddisfacenti si possono ottenere con strutture composte da pareti doppie separate da una intercapedine. Nel caso di pareti in muratura è importante che entrambe le facce siano intonacate, in quanto l'intonaco presenta un duplice effetto positivo: elimina i ponti acustici dovuti alle fessure che possono esistere fra un mattone e l'altro e aumenta lo smorzamento della parete, migliorandone quindi il potere fonoisolante al di sopra della frequenza di coincidenza. Al fine di ottenere risultati migliori rispetto ad una parete singola di pari massa, la parete doppia deve essere composta da strati completamente disaccoppiati.

Per garantire un adeguato disaccoppiamento è importante che:

- le due pareti abbiano diverse caratteristiche e quindi valori differenti delle frequenze di risonanza e di coincidenza;
- le due pareti siano separate da un'intercapedine d'aria, possibilmente di spessore superiore a circa 80 mm e parzialmente riempita con un materassino di materiale fonoassorbente, che non metta a contatto le pareti, in modo da

- ridurre la riverberazione acustica nell'intercapedine e quindi l'accoppiamento per via aerea;
- le pareti siano collegate alla soletta orizzontale con un giunto elastico, in modo da ridurre l'accoppiamento per via solida.

In linea generale, le pareti doppie mostrano due frequenze specifiche alle quali si riduce notevolmente il potere fonoisolante (Figura 3.12).

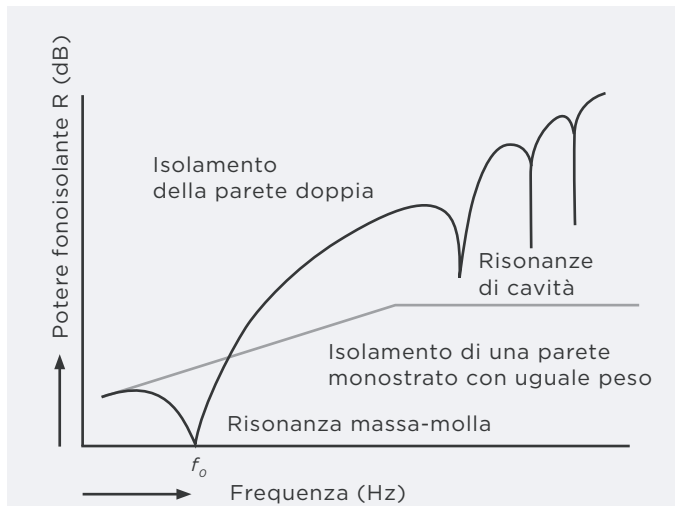


Figura 3.12 - Potere fonoisolante di una parete doppia in funzione della frequenza, dove si evidenziano la frequenza di risonanza massa-molla-massa f_0 e le frequenze di risonanza di cavità.

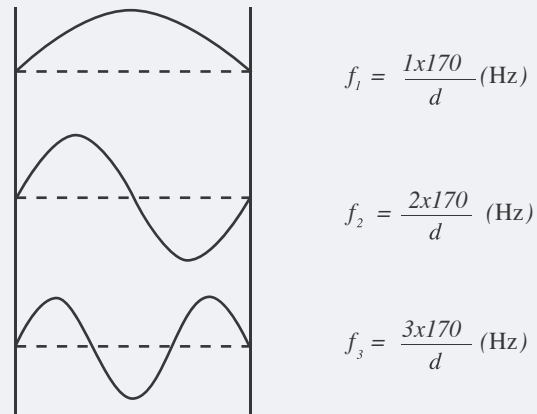
La prima frequenza è quella di risonanza del sistema massa-molla-massa f_0 al di sotto della quale le due pareti risultano acusticamente accoppiate e caratterizzate da una massa pari alla somma delle masse di ciascuna. La molla è rappresentata dall'aria nella cavità e la f_0 si può ottenere dalla relazione:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (3.15)$$

dove d è lo spessore dell'intercapedine (m), m_1 e m_2 le masse areiche delle due pareti che compongono la parete doppia (kg/m^2).

Per ridurre il decremento del potere fonoisolante in corrispondenza di f_0 è possibile agire inserendo del materiale fonoassorbente nella cavità tra le pareti. La seconda frequenza coincide con la più piccola frequenza di risonanza della cavità, d (Figura 3.12 e approfondimento a lato, da cui si traggono anche le relative formule per il calcolo di tutti gli ordini successivi delle frequenze di cavità). Le risonanze di cavità, comunque, non sono quasi mai inferiori a 3 kHz. Al di sopra di tali frequenze le due pareti sono acusticamente disaccoppiate e il potere fonoisolante dell'intero sistema corrisponde all'incirca alla somma dei poteri fonoisolanti delle singole pareti, e cresce con una pendenza di 6 dB/ottava.

Noto lo spessore della cavità è possibile procedere al calcolo delle frequenze di risonanza di cavità applicando i passaggi di seguito:



Frequenze di risonanza di cavità (onde stazionarie). "d", in metri, è pari a metà della lunghezza d'onda.

- si identifica con il termine "d" lo spessore della cavità che corrisponde per il **primo ordine di risonanza di cavità** alla metà della lunghezza d'onda tale che

$$d = \frac{1}{2} \lambda \quad [\text{m}]$$

- nota la relazione che sussiste tra frequenza (f), velocità del suono (c) e lunghezza d'onda (λ) si ha che

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{2 \cdot d} \rightarrow f_1 = \frac{1 \cdot 170}{d} \quad [\text{Hz}]$$

- per il **secondo ordine di risonanza di cavità**, d corrisponde alla lunghezza d'onda tale che

$$d = \lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{d} \rightarrow f_2 = \frac{2 \cdot 170}{d} \quad [\text{Hz}]$$

- per il **terzo ordine di risonanza di cavità**, d corrisponde a $3/2$ della lunghezza d'onda tale che

$$d = \frac{3}{2} \lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3}{2} \cdot \frac{340}{d} \rightarrow f_3 = \frac{3 \cdot 170}{d} \quad [\text{Hz}]$$

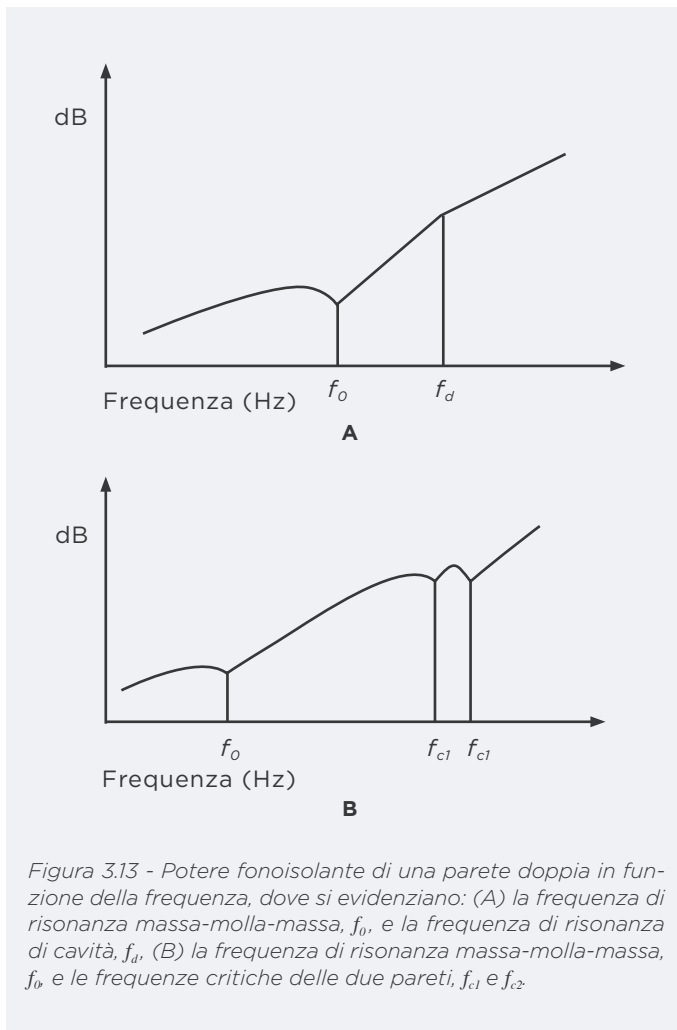


Figura 3.13 - Potere fonoisolante di una parete doppia in funzione della frequenza, dove si evidenziano: (A) la frequenza di risonanza massa-molla-massa, f_0 , e la frequenza di risonanza di cavità, f_d , (B) la frequenza di risonanza massa-molla-massa, f_0 e le frequenze critiche delle due pareti, f_{c1} e f_{c2} .

valutazione del potere fonoisolante apparente (R_w) di laboratorio a partire dalle proprietà dei materiali degli strati di cui sono costituite.

Pareti divisorie e di facciata a secco e tradizionali

Le partizioni verticali appartengono tipicamente a due categorie costruttive, cui si possono ricondurre anche quelle di facciata: le pareti pesanti monostrato o doppie, e le pareti leggere.

Le *pareti pesanti monostrato*, come ad esempio quella in Figura 3.14 sono tipicamente costituite di blocchi in laterizio, calcestruzzo o argilla espansa, ossia di materiali con elevata massa superficiale, fissati tra di loro per mezzo di uno strato di malta. Inoltre, i lati esterni di tali pareti sono tipicamente intonacati.

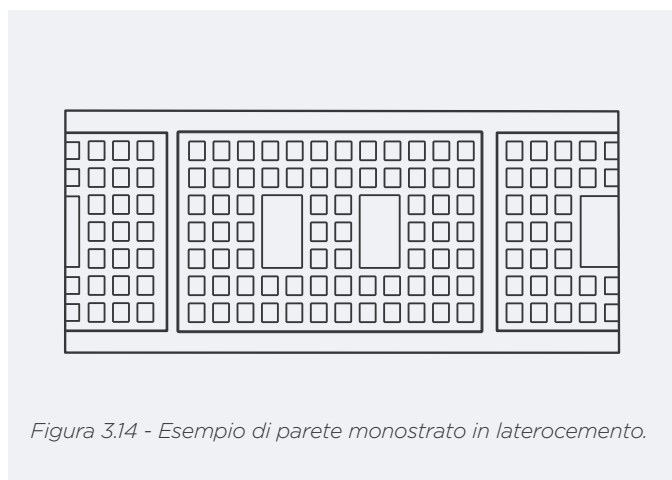


Figura 3.14 - Esempio di parete monostrato in laterocemento.

L'andamento del potere fonoisolante di una parete doppia in funzione della frequenza è caratterizzato dai seguenti andamenti (Figura 3.13):

- per $f < f_0$ il sistema di comporta come una parete singola caratterizzata da massa superficiale pari alla somma delle masse superficiali dei due pannelli, cui consegue un aumento di R pari a 6 dB/ottava ovvero di 6 dB al raddoppio della massa del sistema;
- per $f_0 < f < f_d$ il secondo pannello agisce come una massa indipendente, collegata elasticamente al primo e funzionando come smorzatore dinamico tale per cui R aumenta di 18 dB/ottava;
- per $f > f_d$ il potere fonoisolante R aumenta di 12 dB/ottava.

Naturalmente intervengono anche fenomeni di coincidenza come già visto per la parete singola, per cui è consigliabile che non siano uguali le due frequenze critiche, differenziando materiali e spessori.

3.1.6. ISOLAMENTO ACUSTICO DI PARTIZIONI INTERNE

Si identificano come partizioni interne le pareti divisorie verticali di separazione tra ambienti attigui e i solai divisorii tra ambienti sovrapposti. Per ciascuno di questi elementi architettonici è necessario definire il requisito di indice di

La previsione delle prestazioni acustiche di questi elementi costruttivi in frequenza, risulta incerta a causa della difficoltà nel tenere in considerazione le diverse proprietà dei materiali, la loro geometria e le tecniche costruttive impiegate in opera.

I calcoli previsionali dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w , si basano tipicamente su dati sperimentali misurati in laboratorio, che permettono di individuare delle relazioni basate sulla massa superficiale (m' , compresa tra 50 kg/m² e 400 kg/m²). In letteratura sono disponibili una serie di formulazioni empiriche sempre e comunque basate sulla massa superficiale della struttura considerata, di cui qui di seguito ne sono riportate alcune tratte dalle fonti più autorevoli:

- IEN Galileo Ferraris $R_w = 20 \cdot \log m'$ [dB] (3.16)
- UNI EN ISO 12354-1 $R_w = 37,5 \cdot \log m' - 42$ [dB] (3.17)
- Università di Parma $R_w = 15,4 \cdot \log m' + 8$ [dB] (3.18)
- Norma DIN 4109, Germania $R_w = 31,7 \cdot \log m' - 27,6$ [dB] (3.19)
- Norma EN 12354-1, Australia $R_w = 32,4 \cdot \log m' - 26$ [dB] (3.20)
- Norma EN 12354-1, Regno Unito $R_w = 21,6 \cdot \log m' - 2,2$ [dB] (3.21)

Le *pareti pesanti doppie* (Figura 3.14), come nel caso precedente, sono costituite di blocchi in laterizio, calcestruzzo o argilla espansa con elevata massa superficiale, fissati tra di loro per mezzo di uno strato di malta e intonacati all'esterno. Nel caso di pareti pesanti doppie, tra i due strati di blocchi pesanti è in genere presente un'intercapedine d'aria di almeno 5-10 cm con uno strato di materiale fonoassorbente a parziale o totale riempimento, al fine di incrementare le prestazioni di isolamento. I blocchi di materiale pesante sono in genere posati con spessori differenti, poiché lo spessore diverso determina una diversa frequenza critica e di conseguenza una ridotta perdita di isolamento.

I valori tipici della frequenza critica di questa tipologia di divisori sono nell'ordine di 150-250 Hz.

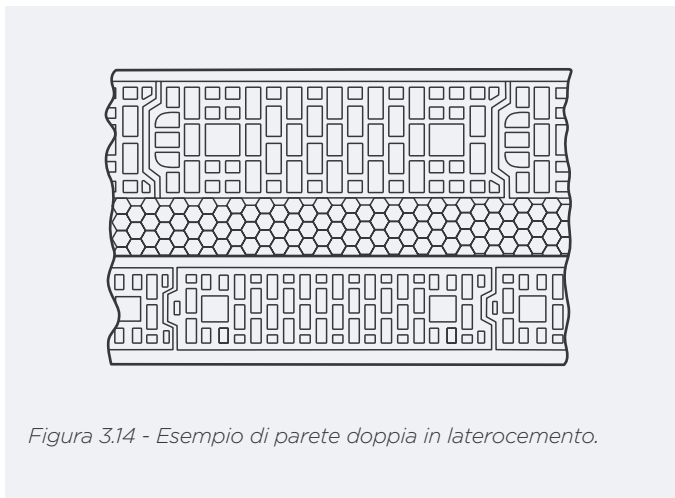


Figura 3.14 - Esempio di parete doppia in laterocemento.

Dalle misure di laboratorio, nel caso di pareti pesanti doppie con intercapedine (d) superiore a 5 cm di spessore anche riempita con materiale fonoassorbente, si applica la relazione:

$$R_w = 20 \cdot \log m' + 20 \cdot \log d - 10 \quad [\text{dB}] \quad (3.22)$$

Si considera una massa superficiale pari alla somma delle singole masse superficiali delle due file di blocchi.

Le *pareti leggere* (Figura 3.15) sono generalmente realizzate in lastre di gesso rivestito e struttura portante in montanti in lamiera piegata. Essendo costituite da materiali con massa superficiale molto ridotta rispetto al caso delle pareti pesanti (tipicamente inferiore a 80 kg/m^2), la loro prestazione acustica in termini di isolamento al passaggio di rumori per via aerea è principalmente definita dal numero di lastre in gesso rivestito utilizzate, dallo spessore della o delle intercapedini d'aria presenti, dall'eventuale riempimento delle intercapedini con materiale fonoassorbente, dall'interasse tra i telai e dalla posa in opera.

L'andamento del potere fonoisolante di questa tipologia costruttiva presenta una rapida ascesa in funzione della frequenza, per poi avere un drastico calo che coincide con la frequenza critica nell'ordine dei 2500-3150 Hz a causa del fenomeno della coincidenza.

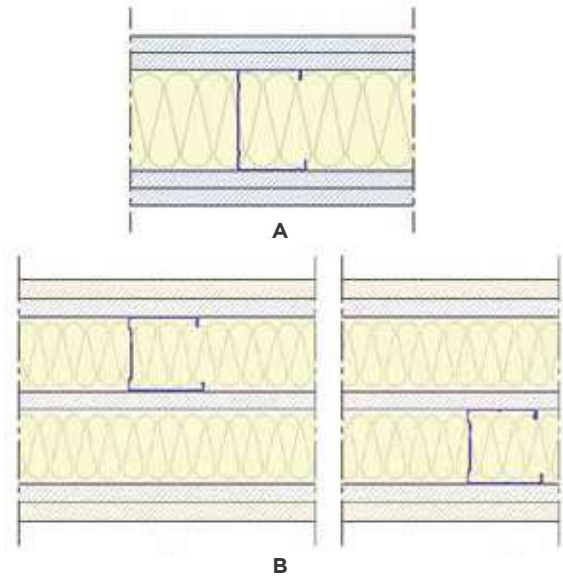


Figura 3.15 - Esempio di pareti leggere in lastre di gesso rivestito, singola struttura (A) e doppia struttura (B).

Nel caso di pareti leggere, la previsione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante segue le relazioni riportate di seguito. In particolare, la relazione 3.23 nel caso di parete leggera ad "ossatura unica", ossia montata su singola struttura, e la relazione 3.24 nel caso di parete leggera a "due ossature separate", ossia montata su doppia struttura:

$$R_{w,\text{singola struttura}} = 20 \cdot \log m' + 10 \cdot \log d + e + 5 \quad [\text{dB}] \quad (3.23)$$

$$R_{w,\text{doppia struttura}} = 20 \cdot \log m' + 10 \cdot \log d + e + 10 \quad [\text{dB}] \quad (3.24)$$

Dove e rappresenta lo spessore del pannello fibroso [cm].

Pareti e solai con placcaggio

Al fine di aumentare le prestazioni acustiche di fonoisolamenti di pareti divisorie interne o di solai interpiano, sia nel caso di interventi sull'esistente sia nel caso di nuove costruzioni, si opera applicando come controparete (o controsoffitto) uno strato aggiuntivo mediante supporto elastico che viene definito *sistema placcante*.

A differenza delle pareti mostrate o doppie in cui sussiste una proporzionalità diretta tra le proprietà fonoisolanti e la massa superficiale della parete stessa, nel caso dei sistemi verticali e orizzontali dotati di controparete l'incremento del potere fonoisolante è principalmente conferito dal sistema risonante che si viene a creare, e sarà tanto maggiore quanto più il numero di giunti rigidi per il collegamento delle due strutture sia ridotto.

Un sistema placcante è tipicamente costituito dall'apposizione di contropareti (o controsoffitti) in lastre di gesso rivestito ad una certa intercapedine dalla struttura di base, che può essere riempita di materiale fonoassorbente al fine di aumentare le prestazioni dell'intero sistema (Figura 3.16). Questa procedura, seppur suscettibile delle caratteristiche della struttura di base considerata, permette di incrementare il potere fonoisolante complessivo nell'ordine di 10-20 dB.

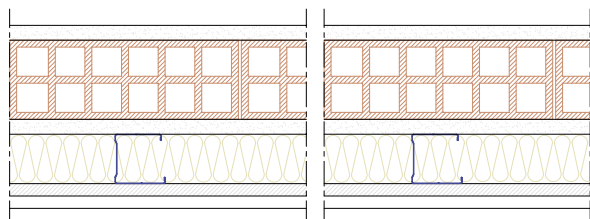


Figura 3.16 - Esempio di sistema placcante a parete, controparete in lastre di gesso rivestito.

L'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante (ΔR_w) per via del sistema placcante è dato dalla relazione empirica che segue:

$$\Delta R_w = 72 - \left(\frac{R_{w,m_1}}{2} + 20 \cdot \log f_0 \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.25)$$

Dove R_{w,m_1} è l'indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura di base (in dB, e con valori tipicamente compresi tra 20 dB e 50 dB), e f_0 è la frequenza di risonanza del sistema placcante (tipicamente compresa nell'intervallo 40-200 Hz).

Per calcolare la frequenza di risonanza del sistema placcante, è possibile ricorrere alle relazioni 2.8 e 2.9, già richiamate al capitolo 2, nel caso di sistemi con strati addizionali i cui strati resilienti siano rispettivamente fissati direttamente alla struttura di base oppure collegati ad essa tramite montanti o correnti. È importante sottolineare che nel caso di frequenze di risonanza del sistema placcante superiori a 200 Hz, l'incremento dell'indice del potere fonoisolante può assumere valori negativi, peggiorando dunque le prestazioni acustiche del sistema complessivo (vedere Tabella 2.12 al paragrafo 2.2.2).

3.1.7. ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA

Per quanto riguarda le proprietà di isolamento acustico delle facciate degli edifici, valgono le indicazioni fornite per il caso di pareti divisorie del paragrafo precedente e i requisiti legislativi e da normativa tecnica riportati al Capitolo 2. Lo spessore di tali elementi costruttivi, che è tipicamente elevato per via di strutture murarie pesanti oppure stratificato anche al fine di garantire il corretto isolamento termico, permette di ottenere proprietà acustiche adeguate. Nel caso di facciata non omogenea, cioè costituita da parete opaca, superficie vetrata, porta, ecc., è necessario computare il potere fonoisolante medio che si ottiene dalla relazione seguente:

$$R = -10 \log \frac{1}{S} \sum S_i 10^{\left(\frac{R_i}{10} \right)} \quad [\text{dB}] \quad (3.26)$$

Dove R_i è il potere fonoisolante del componente i -esimo (ad esempio la porzione vetrata) di superficie S_i , e S è la superficie totale della facciata.

Nel caso si applichi il metodo di calcolo dell'isolamento acustico di facciata a singolo indice riportato nella norma UNI EN 12354-3, il potere fonoisolante nella relazione 3.23 viene sostituito dall'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w .

Superfici vetrate

Ampie superfici vetrate in facciata sono in grado di generare un elevato assorbimento acustico alle basse frequenze, permettendo quindi di ridurre il tempo di riverberazione nell'ambiente interno. A loro scapito, però, sono caratterizzate da una frequenza critica elevata (normalmente nell'intorno dei 2500-3150 Hz, come accade per le pareti di gesso rivestito) e dunque sono in grado di enfatizzare il fenomeno della coincidenza. Inoltre, per effetto della risonanza, massa-aria-massa, l'efficacia fonoisolante di vetri camera è inferiore a quella dei vetri singoli in alcuni casi, come ad esempio quando l'intento è quello di aumentare l'isolamento acustico al passaggio del rumore del traffico. Tale rumore, infatti, raggiunge un picco in termini di emissione nell'ordine dei 100-200 Hz, proprio laddove l'indice di valutazione del potere fonoisolante di un vetro camera può avere un buco per risonanza.

Per incrementare l'indice di valutazione del potere fonoisolante di questi elementi, e dunque della facciata nel suo complesso, si può procedere con diverse soluzioni tra le quali:

- impiegare vetri camera stratificati e non vetri singoli (anche al fine di aumentare l'isolamento termico), per limitare la riduzione di R_w dovuta al fenomeno di coincidenza. A questo scopo, l'utilizzo di lastre di vetro di spessori differenti può fornire ulteriori miglioramenti nelle prestazioni, così come la collocazione delle lastre stratificate verso l'interno dell'edificio e non verso l'esterno;
 - aumentare il più possibile lo spessore dell'intercapedine d'aria tra due lastre di vetro. Dal punto di vista pratico, non sono state misurate in opera delle prestazioni significativamente differenti per intercapedini comprese tra 6 mm e 16 mm, pertanto è opportuno considerare altri intervalli di spessore per fornire benefici prestazionali al sistema. In generale, nel caso di vetri camera è possibile incrementare l'indice R_w alle basse frequenze aumentando lo spessore dell'intercapedine d'aria (ad esempio, utilizzando un vetro di almeno 6 mm di spessore e una intercapedine di almeno 50 mm è possibile spostare la frequenza di risonanza del sistema ad un valore inferiore a 100 Hz);
 - utilizzare un gas a riempimento dell'intercapedine. In particolare, l'inserimento di esafluoruro di zolfo (SF6) garantisce prestazioni migliori rispetto all'Argon o all'aria;
 - montare le lastre di vetro su telai separati e collegati da guarnizioni in gomma in grado di smorzare la trasmissione dell'onda sonora;
 - ricorrere all'impiego di doppi telai per garantire indici di valutazione del potere fonoisolante superiori a 40-42 dB.
- Le formule riportate qui di seguito si riferiscono ai metodi empirici per il calcolo del potere fonoisolante, tutti basati sulla massa areica globale della superficie vetrata (m' in kg/m^2), di diverse tipologie di superfici vetrate:

- vetro semplice e vetri camera

$$R_w = 12 \log m' + 17 \quad [\text{dB}] \quad (3.27)$$

- vetri stratificati

$$R_w = 12 \log m' + 19 \quad [\text{dB}] \quad (3.28)$$

- vetri camera con una lastra stratificata

$$R_w = 12 \log m' + 20 \quad [\text{dB}] \quad (3.29)$$

- vetri camera con due lastre stratificate

$$R_w = 12 \log m' + 22 \quad [\text{dB}] \quad (3.30)$$

Serramento vetrato

Per *serramento vetrato* si intende l'insieme di vetro, telaio, cassonetto per l'avvolgibile oscurante ed eventuale presa d'aria. Questo sistema costituisce l'elemento più debole in facciata, in grado quindi di ridurre sensibilmente le prestazioni globali di isolamento acustico di facciata se non progettato e realizzato correttamente.

In primo luogo, le elevate prestazioni acustiche del serramento vetrato dipendono dalla tenuta all'aria del telaio perimetrale, che è normata dalla UNI EN 12207 attraverso la definizione di 5 classi in base. La classe più performante è la classe 4, la quale (a titolo esemplificativo) identifica la capacità di un telaio di essere permeabile a 100 Pa al passaggio di 3 m³ d'aria all'ora per ogni m² di superficie. In secondo luogo, è opportuno sottolineare che il materiale di cui è costituito il telaio non ha un'influenza significativa sulla prestazione acustica del serramento vetrato, per vetri con potere fonoisolante inferiore a 37 dB, dunque la scelta di telai in legno, acciaio o alluminio risulta trascurabile in sede progettuale, se l'area dell'elemento è considerata come area del vetro più il telaio. La posa in opera dei telai è normata dalla UNI 11296, che riporta schemi e prescrizioni pratiche per garantire l'isolamento di facciata dal rumore esterno. La norma UNI EN 14351-1 invece specifica le caratteristiche prestazionali delle finestre, delle porte e dei serramenti, comprese quelle acustiche, definendo anche le modalità di determinazione delle loro caratteristiche mediante prove di laboratorio e/o calcolo e/o assunte da tabelle.

L'influenza dei cassonetti per avvolgibili sul fonoisolamento del serramento vetrato è di difficile quantificazione per una carenza di dati di laboratorio specifici sul solo elemento, poiché nella maggior parte dei casi si procede alla valutazione in laboratorio dell'intero sistema di telaio, superficie vetrata e cassonetto. La loro presenza, comunque, può portare ad una riduzione dell'indice del potere fonoisolante complessivo di facciata anche superiore ai 10 dB nel caso in cui si tratti di cassonetti non dotati di sistemi di silenziamento, ossia di materiale fonoassorbente e di rinforzo acustico del pannello che divide il cassonetto dall'ambiente interno. Le prese d'aria, ossia le bocchette di aerazione, devono allo stesso modo essere progettate con elevate capacità di attenuazione acustica per non compromettere le prestazioni globali di facciata. A tal scopo è opportuno selezionare quelle che sul mercato presentano l'integrazione con silenziatori acustici.

3.1.8. ISOLAMENTO DAL RUMORE DA CALPESTIO

Uno specifico aspetto del fonoisolamento di strutture edilizie orizzontali riguarda l'isolamento dal rumore da calpestio, ovvero del rumore generato dall'impatto sulla superficie del pavimento che si propaga per via solida all'ambiente sottostante. Mentre nel caso del rumore trasmesso per via aerea si ha l'obiettivo di aumentare quanto possibile il valore dell'indice di potere fonoisolante per garantire una ottima prestazione acustica del componente edilizio, nel caso del rumore di calpestio il rispettivo indice deve tendere a valori bassi per garantire una ottima prestazione acustica.

Per il rumore di calpestio si valutano le prestazioni complessive del sistema costituito da soletta e ambiente sollecitando la prima con una sorgente normalizzata di rumore impattivo, detta *macchina da calpestio*, e misurando il livello di pressione sonora nel locale disturbato sottostante (Figura 3.17).

Esistono differenze significative nei risultati di misura, e dunque negli approcci atti a ridurre questa trasmissione, in base alla tipologia di struttura di base, che può essere di tipo pesante o leggera a seconda del sistema costruttivo. In linea generale, strutture di base con elevata massa tendono a trasmettere i rumori per via impattiva in misura inferiore rispetto a strutture leggere con massa minore. A titolo esemplificativo, un solaio tradizionale con massa maggiore ai 400 kg/m² è in grado di fornire un grado sufficiente di isolamento alla trasmissione dei rumori per via solida.

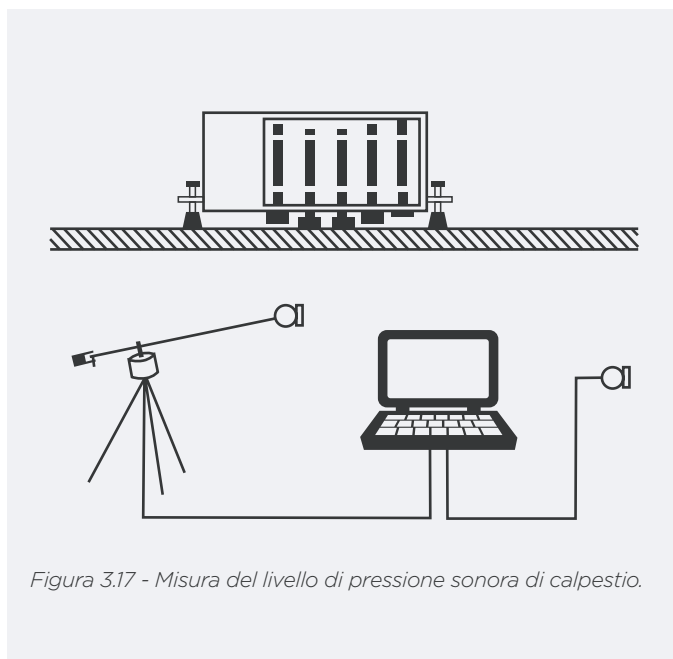


Figura 3.17 - Misura del livello di pressione sonora di calpestio.

Entrambe queste tipologie costruttive vengono normalmente trattate per mezzo di rivestimenti in aderenza o galleggianti al fine di ridurre il livello di rumore da calpestio, agendo dunque prevalentemente alle alte frequenze

piuttosto che alle basse. I rivestimenti in aderenza vengono usati per ridurre la potenza dell'impatto sul sistema di base, sostanzialmente isolando meccanicamente la superficie calpestabile del solaio. Il trattamento con pavimenti galleggianti, invece, consiste nell'interporre tra struttura portante e sottofondo del pavimento uno strato in materiale elastico e smorzante (ad es. in gomma, lana di vetro, resine sintetiche espanse, sughero, ecc.) che deve essere tassativamente risvoltato lateralmente, in modo da evitare contatto diretto fra pavimento e muri verticali così da desolidarizzarli.

Pavimenti galleggianti

I pavimenti galleggianti hanno la principale caratteristica di non presentare connessioni rigide con le strutture laterali (le pareti) per ridurre al massimo la trasmissione laterale dell'energia sonora. Esistono tre grandi categorie di pavimenti galleggianti (Figura 3.18) in funzione della tipologia di connessione tra il pavimento calpestabile e la struttura di base, che può essere puntuale, continua su tutta la superficie o lungo assi, e le cui prescrizioni per la corretta composizione e posa in opera sono normate dalla UNI 11516.

Le prestazioni in opera dei pavimenti galleggianti sono indicate in termini di indice di attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio (ΔL_w). ΔL_w si ottiene a partire dalla massa per unità di superficie del sistema comprensivo di pavimento galleggiante e massetto, e a partire dalla rigidità dinamica per unità di superficie dello strato resiliente, come indicato alle formule 2.13 e 2.14 al Capitolo 2 nel caso di strutture con massetto in calcestruzzo o a secco, rispettivamente. La posa dei pavimenti galleggianti deve prevedere operazioni a regola d'arte al fine di garantire ottime prestazioni al sistema complessivo. La Figura 3.19 riporta, a titolo esemplificativo, il confronto tra corretto e scorretto posizionamento

dello strato di materiale elastico e smorzante tra il pavimento e il solaio in una serie di esempi pratici. Una delle principali criticità in questo senso è quella legata alla necessità di garantire che il massetto di livellamento posato a copertura degli impianti non presenti alcun tipo di asperità, che il sottofondo sia privo di discontinuità, che vi sia il risvolto sulle pareti del materiale elastico resiliente e che non vi sia contatto fra il pavimento e il battiscopa rigido.

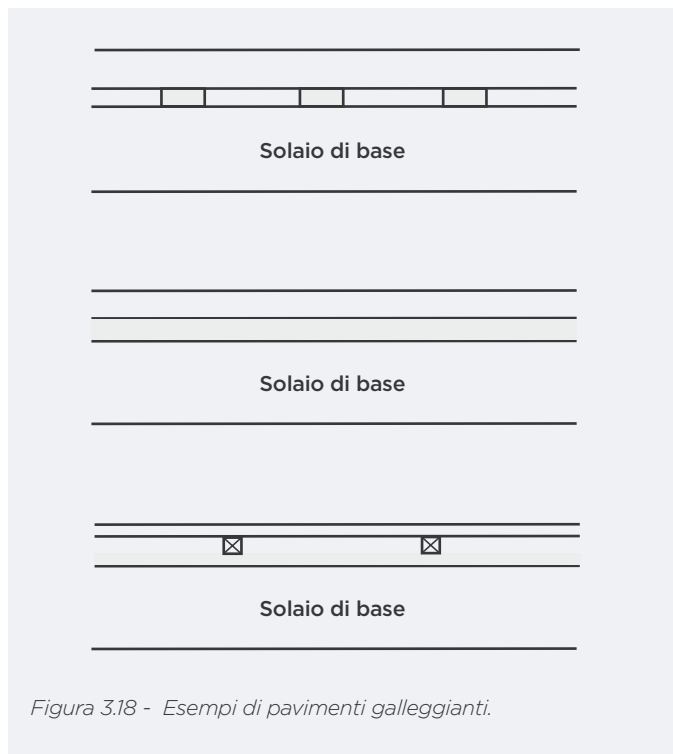
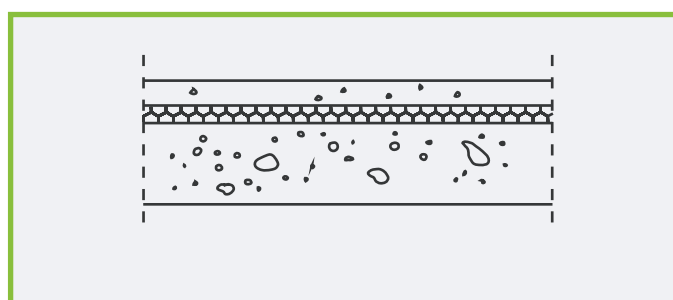
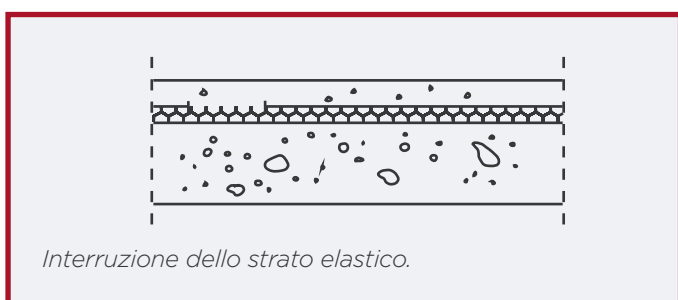
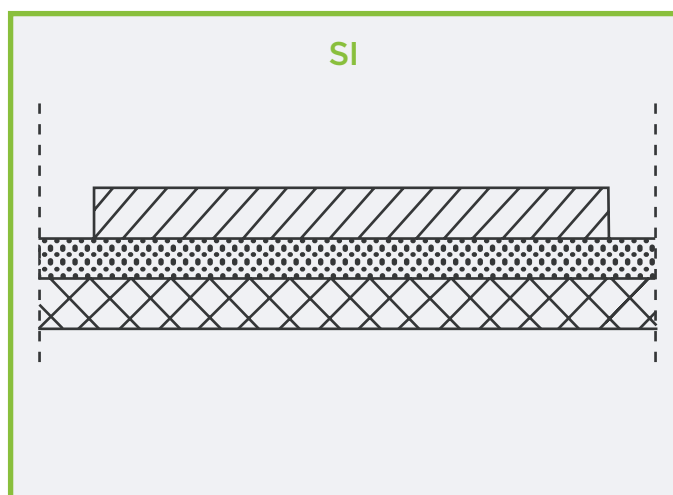
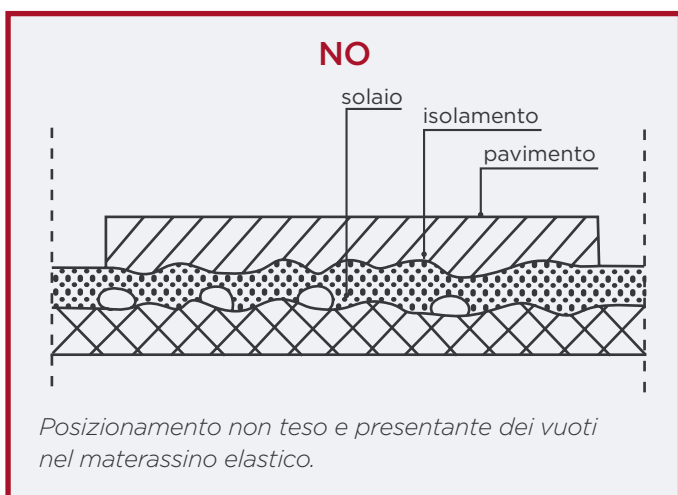
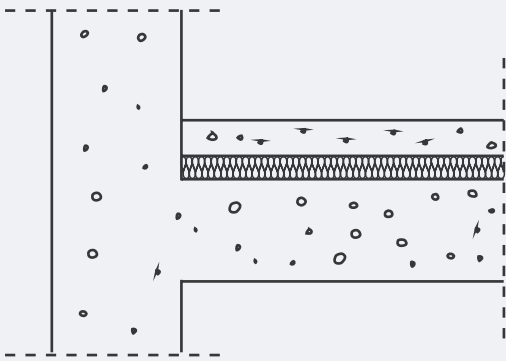


Figura 3.18 - Esempi di pavimenti galleggianti.

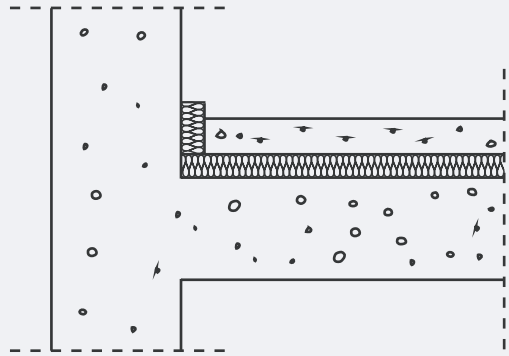


NO



Assenza di risvolti dello strato elastico in corrispondenza delle pareti verticali.

SI



Riduzione dello spessore del massetto.

Non corretto posizionamento del battiscopa.

Non corretto posizionamento degli impianti.

Figura 3.19 - Modalità di realizzazione corretta di un pavimento galleggiante.

3.2 IL COMFORT ACUSTICO DEGLI EDIFICI

3.2.1 ASSORBIMENTO ACUSTICO E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI FONASSORBENTI

Laddove l'energia sonora riverberata sia eccessiva in un ambiente, il comfort acustico in esso può essere fortemente compromesso. La soluzione a tale problema consiste nel trattare le superfici dell'ambiente tramite l'utilizzo di materiali ed elementi fonoassorbenti che sono in grado, principalmente, di controllare il tempo di riverberazione e il livello di pressione sonora globale ad opportuna distanza dalla sorgente sonora.

L'interazione tra l'energia sonora e una superficie implica che una quota dell'energia venga trasmessa, una quota assorbita e una quota riflessa dalla superficie stessa. Facendo particolare riferimento alla quota assorbita, rappresentata dal coefficiente di assorbimento acustico α , essa è da intendersi come il rapporto tra l'energia sonora assorbita e quella incidente sulla superficie, ed è pari a 0 quando tutta l'energia è riflessa, ovvero pari a 1 quando è tutta assorbita. Esemplicando e riferendosi a casi tipici dell'ambito edilizio, un coefficiente di assorbimento acustico pari a 0,55 indica che il 55% dell'energia sonora incidente viene assorbita dalla superficie in oggetto.

La variazione del coefficiente di assorbimento di un materiale dipende principalmente:

- dal meccanismo di assorbimento del materiale, che si basa sempre sulla conversione di una parte dell'energia sonora incidente in calore ma può concretizzarsi con diverse modalità. In particolare, si tratta di meccanismi di assorbimento per porosità che sfruttano la dissipazione attraverso i pori o le fibre del materiale, per risonanza di membrana che sfruttano la risonanza di un pannello e per risonanza di cavità;
- dalla frequenza, poiché i meccanismi di assorbimento portano a far variare il coefficiente α nello spettro facendolo aumentare in corrispondenza di determinate frequenze o intervalli di frequenza;
- dall'angolo di incidenza dell'onda sonora, poiché in base alla modalità di misurazione del coefficiente in laboratorio è possibile ricavare α per incidenza normale se si ricorre al metodo delle onde stazionarie in tubo su campioni di dimensioni ridotte in accordo con la norma UNI EN ISO 10534-2, oppure per incidenza casuale se si eseguono misurazioni in camera riverberante su campioni di grandi dimensioni in accordo con la norma UNI EN ISO 354. Tra le due metodologie di misura, la più rappresentativa delle condizioni reali risulta essere quella dell'incidenza casuale.

In Figura 3.20 sono rappresentate le tipiche curve dei coefficienti relativi a materiali che assorbono per porosità, risonanza di membrana e di cavità. Materiali complessi che

risultano dalla combinazione di questi materiali permettono di incrementare il coefficiente di assorbimento in particolare su un intervallo di frequenze più ampio.

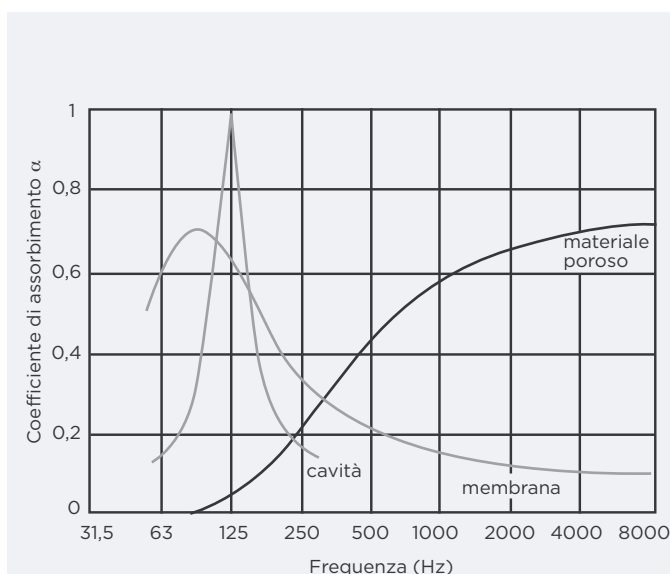


Figura 3.20 - Variazione in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico in funzione del meccanismo di assorbimento acustico (porosità, risonanza di membrana, risonanza di cavità).

Dal punto di vista progettuale è opportuno mettere in evidenza che l'impiego di un materiale fonoassorbente dipende certamente dalle sue caratteristiche acustiche, ma anche dalle sue proprietà meccaniche, di resistenza al fuoco, di facilità di montaggio ed eventuale manutenzione/sostituzione.

Materiali per l'assorbimento acustico per porosità

I materiali porosi presentano una struttura eterogenea, costituita da una matrice solida che racchiude piccole celle piene d'aria, aperte verso l'ambiente. Le onde sonore che incidono sul materiale mettono in vibrazione l'aria contenuta entro le celle: la dissipazione dell'energia di vibrazione causata dai fenomeni di attrito viscoso determina l'effetto di fonoassorbimento per porosità che si manifesta alle frequenze medio-alte.

Le prestazioni dei materiali fonoassorbenti porosi dipendono principalmente (i) dalla struttura della matrice solida, (ii) dalla resistenza al flusso d'aria del materiale, che si può determinare sperimentalmente misurando la portata d'aria che attraversa un campione di materiale di geometria nota in funzione della differenza di pressione ad esso applicata, (iii) dal diametro delle fibre del materiale, (iv) dal grado di porosità, che è determinato dal rapporto tra il volume

occupato dai pori e il volume totale del materiale. A titolo esemplificativo, i materiali porosi principalmente utilizzati in edilizia hanno diametri di dimensione compresa tra $1\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$, e grado di porosità non inferiore al 90%.

L'assorbimento è legato alla velocità di spostamento delle particelle d'aria, che è nulla in corrispondenza della superficie riflettente e massima ad una distanza pari a $\lambda/4$. Immaginando di porre un pannello di materiale fonoassorbente poroso lungo il tragitto di un'onda stazionaria, ad ogni multiplo dispari della distanza $\lambda/4$ si avrà un picco di assorbimento. Conseguenze che:

- aumentando lo spessore s dello strato di materiale, il fonoassorbimento si estende progressivamente verso valori minori di frequenza, come appare evidente dal grafico in Figura 3.21, e pertanto il coefficiente di assorbimento risulta praticamente costante per $s \geq \lambda/4 + \lambda/8$;
- laddove sia presente una intercapedine di spessore s' tra la parete rigida e il pannello fonoassorbente poroso il massimo assorbimento del sistema sarà sempre in corrispondenza di $\lambda/4$ ma si dovrà considerare come spessore totale la somma del pannello e dell'intercapedine ($s+s'$).

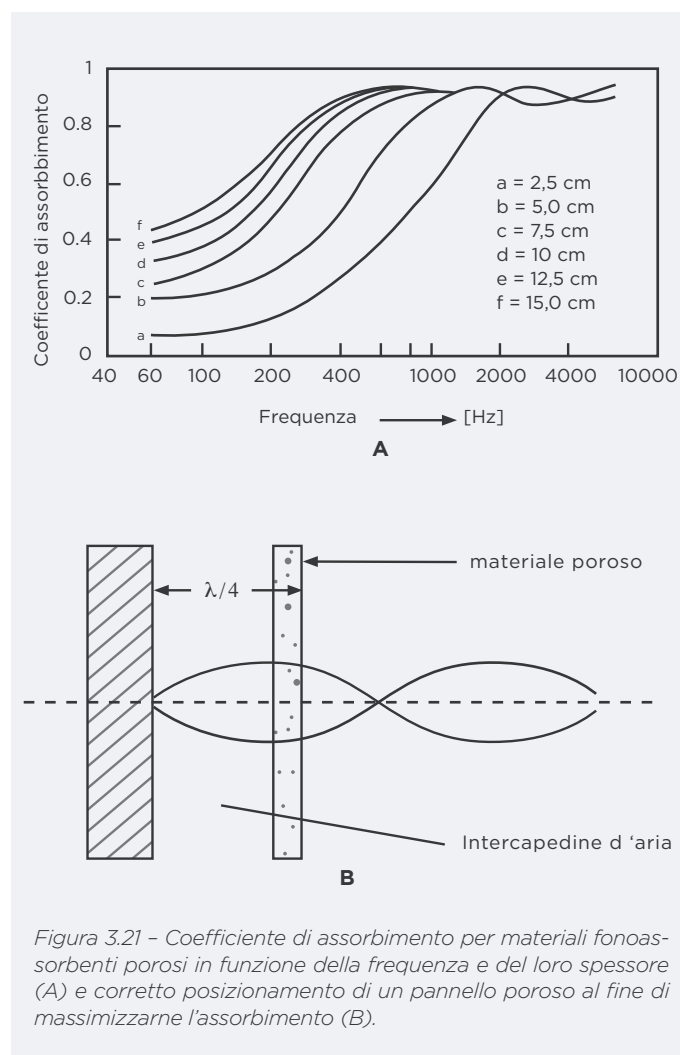


Figura 3.21 - Coefficiente di assorbimento per materiali fonoassorbenti porosi in funzione della frequenza e del loro spessore (A) e corretto posizionamento di un pannello poroso al fine di massimizzarne l'assorbimento (B).

I rivestimenti fonoassorbenti porosi possono essere realizzati con diverse modalità:

- stendendo sulla parete di base un rivestimento continuo, ad es. un intonaco realizzato miscelando ad un opportuno legante dei "fiocchi" di materiale poroso;
- applicando direttamente sulla parete di base pannelli in materiale fibroso o poroso;
- realizzando, con pannelli in materiale fibroso o poroso, un controsoffitto o una controparete con interposta intercapedine d'aria tra pannello e parete di base.

Dal punto di vista merceologico i materiali fonoassorbenti porosi possono essere classificati in:

- materiali fibrosi di origine minerale, ad esempio la lana di vetro e lana di roccia;
- materiali cellulari di origine minerale, ad esempio il vetro cellulare;
- materiali cellulari sintetici, ad esempio il poliuretano espanso;
- materiali fibrosi di origine vegetale, ad esempio le fibre in legno mineralizzato;
- materiali fibrosi sintetici, ad esempio le fibre poliestere.

Materiali per l'assorbimento acustico per risonanza di membrana

Rispondono a questo comportamento i sistemi costituiti da una lastra di materiale non poroso, ad esempio legno o gesso dallo spessore ridotto, posizionata ad una data distanza da una parete rigida con cui è vincolata perimetralmente tramite una struttura, come rappresentato in Figura 3.22.



Figura 3.22 - Rappresentazione di un sistema vibrante costituito da un pannello posto ad una certa distanza dalla parete rigida.

Quando l'energia sonora incide sulla superficie, tale sistema si comporta come un pannello vibrante: l'effetto di fonoassorbimento è determinato dalla dissipazione dell'energia di vibrazione dovuta sia allo smorzamento del materiale del pannello sia all'attrito viscoso nell'intercapedine d'aria.

Nel suo complesso, il pannello vibrante può dunque essere assimilato ad un sistema massa-molla: il pannello funge da massa oscillante che mette in vibrazione l'aria contenuta nell'intercapedine e che possiede una certa rigidità. La frequenza di risonanza f_0 di un pannello vibrante è dipendente dalla densità superficiale del pannello stesso, dalla sua rigidità che è a sua volta dipendente dal tipo di supporto che lo lega alla parete rigida, e dalla rigidità dell'intercapedine d'aria. Si calcola come indicato dalla relazione 3.28:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.31)$$

dove:

m = densità superficiale del pannello (kg/m^2),

d = distanza del pannello dalla parete (m).

In corrispondenza della frequenza di risonanza del pannello vibrante si ha il suo picco di assorbimento acustico, che risulta quindi essere altamente selettivo nell'intorno di f_0 e comunque maggiore alle basse frequenze per la dipendenza di f_0 dalla densità superficiale del pannello e dalla dimensione dell'intercapedine esplicitata in formula 3.28. Infatti, date le dimensioni caratteristiche dei pannelli, tipicamente dell'ordine del metro, le frequenze proprie di vibrazione del pannello si situano nella parte inferiore del campo dell'udibile.

La Figura 3.23 mostra come al crescere della densità superficiale e della distanza del pannello dalla parete rigida, invece, la frequenza di risonanza e di massimo assorbimento acustico tenda a diminuire.

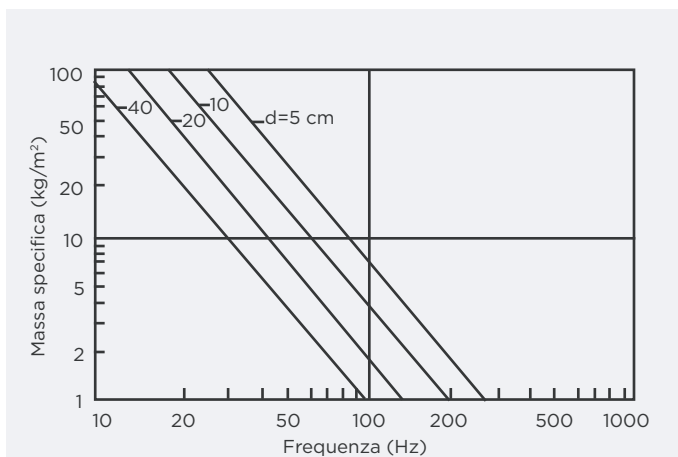


Figura 3.23 - Andamento della frequenza di risonanza di pannelli vibranti sottili in funzione di diversi spessori di intercapedine (da Crocker, Price 1975).

In Figura 3.24 si mostra che per aumentare la frequenza di risonanza di un pannello vibrante o per estenderne l'efficacia di assorbimento in un intervallo maggiore, si può agire inserendo materiale poroso in intercapedine e variando le proprietà fisiche del pannello stesso.

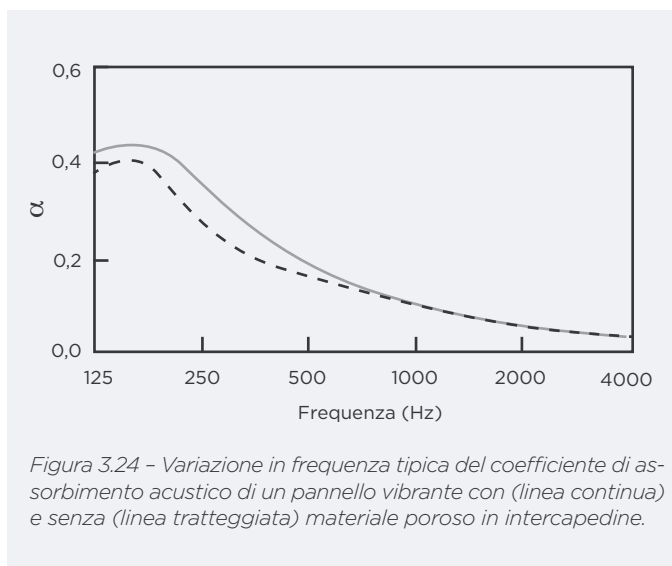


Figura 3.24 - Variazione in frequenza tipica del coefficiente di assorbimento acustico di un pannello vibrante con (linea continua) e senza (linea tratteggiata) materiale poroso in intercapedine.

Materiali per l'assorbimento acustico per risonanza di cavità

In ambito edilizio, la tipologia di sistema basato sull'assorbimento acustico per risonanza di cavità maggiormente utilizzato è il risonatore di Helmholtz. Si tratta di un sistema costituito da una cavità di volume V racchiusa da pareti rigide e un'apertura relativamente stretta, detta "collo", di lunghezza l e sezione S . L'aria contenuta all'interno della cavità entra in vibrazione quando il collo del risonatore è investito da un'onda sonora, dunque le sue compressioni e rarefazioni periodiche generano il fenomeno dissipativo che determina l'assorbimento dell'onda sonora stessa.

Si può desumere che un risonatore si comporti come sistema massa-molla poiché l'aria contenuta nel collo funge da massa vibrante che eccita l'aria presente nella cavità, la quale funge da molla, dissipando l'energia incidente particolarmente in corrispondenza della frequenza di risonanza dell'intero sistema. Tale frequenza fondamentale di risonanza si ottiene, a calcolo, dalla relazione 3.32:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.32)$$

dove:

c_0 = velocità di propagazione del suono nel mezzo elastico (m/s),

S = area del collo del risonatore (m^2),

l = lunghezza del collo del risonatore (m),

V = volume della cavità del risonatore (m^3).

In letteratura sono presenti formulazioni del calcolo della frequenza di risonanza dei risonatori di Helmholtz che tengono conto della complessità del fenomeno dissipativo dell'energia, in termini di perdite viscosive di attrito, tramite una correzione del fattore della lunghezza del collo l in funzione del raggio del collo stesso, come indicato nell'equazione 3.33:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot (l + 1,6r)}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.33)$$

dove:

c = velocità di propagazione del suono nel mezzo elastico (m/s),

S = area del collo del risonatore (m^2),

l = lunghezza del collo del risonatore (m),

V = volume della cavità del risonatore (m^3),

r = raggio del collo del risonatore (m).

La frequenza di risonanza dei risonatori di Helmholtz varia in maniera direttamente proporzionale alla sezione del collo e in maniera inversamente proporzionale alla sua lunghezza ed al volume della cavità. Risulta dunque comune integrare tali sistemi nella pratica edilizia per l'assorbimento acustico delle frequenze medio-basse.

L'inserimento di materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità del risonatore porta ad un abbassamento del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza, ma si ottiene in compenso un miglioramento del fonoassorbimento alle frequenze adiacenti a quella di risonanza come mostrato in Figura 3.25.

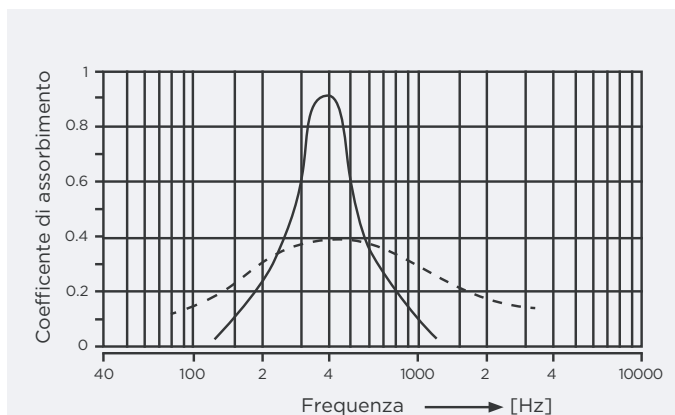


Figura 3.25 - Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento di risonatori acustici di Helmholtz in assenza (linea continua) e presenza (linea tratteggiata) di materiale fonoassorbente poroso nella cavità.

Oltre al risonatore di Helmholtz, in edilizia è comune utilizzare un particolare tipo di risonatore acustico costituito dai pannelli forati. Si tratta di lastre sottili, dotate di opportuna foratura, posate ad una distanza pari ad alcune decine di millimetri dalla parete di base e frequentemente con interposto materiale poroso, in modo da realizzare un insieme di risonatori di Helmholtz come rappresentato in Figura 3.26. I fori presenti sul pannello si comportano come colli di singoli risonatori, e la porzione di aria corrispondente a ciascun foro costituisce la cavità di ogni singolo risonatore.

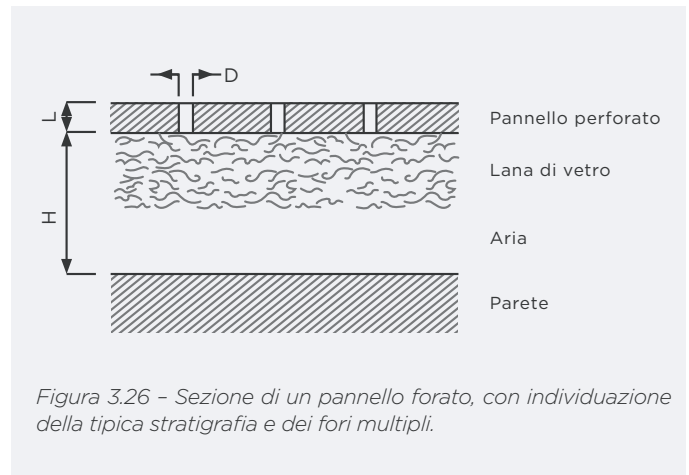


Figura 3.26 - Sezione di un pannello forato, con individuazione della tipica stratigrafia e dei fori multipli.

Le onde sonore incidenti mettono in vibrazione i volumetti d'aria retrostanti i fori, e l'effetto di fonoassorbimento è determinato dalla dissipazione dell'energia di vibrazione per attrito viscoso nell'aria. I pannelli forati determinano un assorbimento selettivo, che si localizza alla frequenza f_0 come indicato nell'equazione 3.31, che è funzione dell'area complessiva e della percentuale di foratura del pannello.

A differenza dei risonatori singoli di Helmholtz, però, i pannelli forati permettono un assorbimento su un intervallo di frequenze maggiore, poiché l'oscillazione delle molecole d'aria nelle cavità singole dovute all'incidenza di un'onda sonora le porta a convogliarsi verso i fori e a generare così molteplici fenomeni dissipativi anche a frequenze attigue a quella di risonanza.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d \cdot t}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.34)$$

dove:

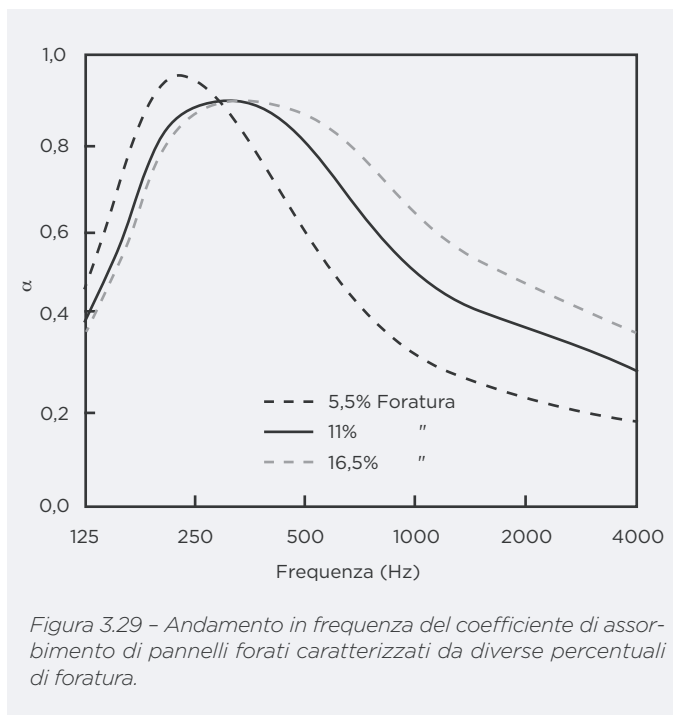
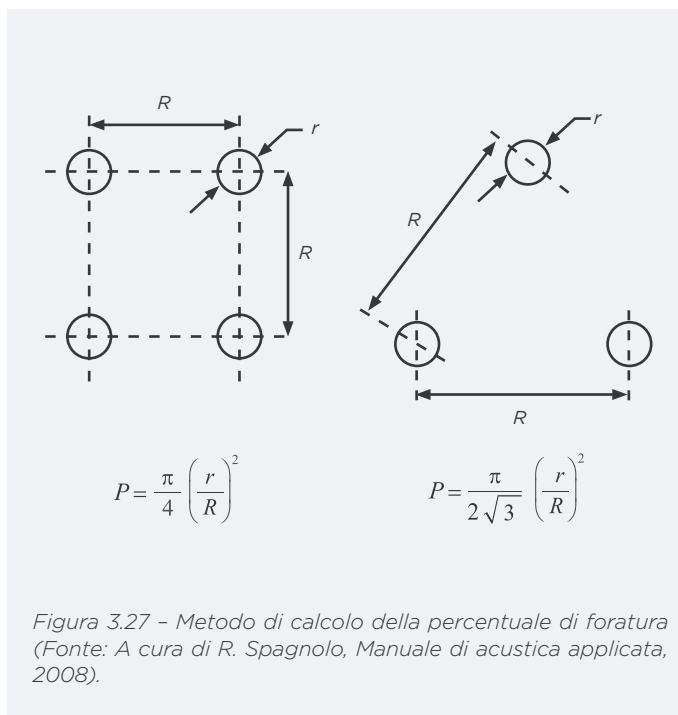
c = velocità di propagazione del suono nel mezzo elastico (m/s),

P = rapporto tra l'area forata e l'area complessiva del pannello (percentuale di foratura) (%),

d = distanza del pannello dalla parete (eventualmente comprensiva dello spessore totale dato da intercapedine d'aria e materiale fonoassorbente poroso interposto) (m),

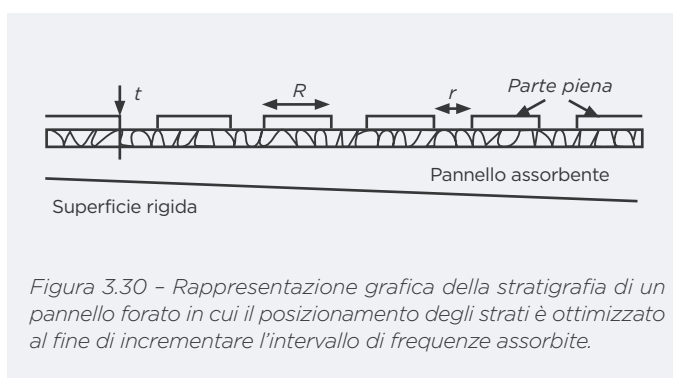
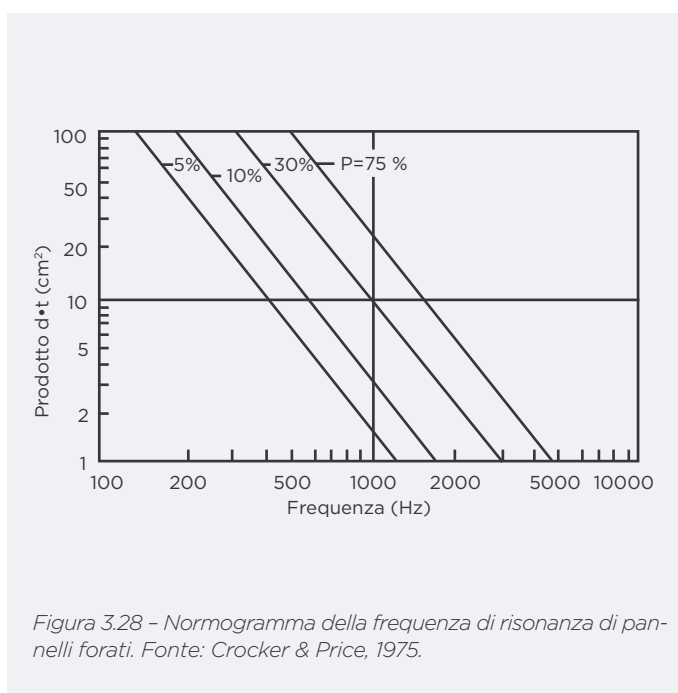
t = spessore del pannello forato (corrispondente alla lunghezza del collo di ciascun risonatore) (m).

La frequenza di risonanza dei pannelli forati, analogamente a quanto accade per i risonatori singoli di Helmholtz, varia in maniera direttamente proporzionale alla percentuale di foratura e in maniera inversamente proporzionale allo spessore del pannello ed allo spessore dell'intercapedine d'aria. I pannelli forati comunemente utilizzati in edilizia hanno uno spessore che varia tra i 3 e i 30 mm ed una percentuale di foratura tra il 10% e il 50%. La Figura 3.27 rappresenta la modalità di calcolo della percentuale di foratura nel caso di pannelli forati.



Poiché spessori di intercapedine superiori a circa 30 cm sono difficili da utilizzare in opera in quanto inciderebbero pesantemente sulla fruizione degli ambienti confinati riducendone significativamente il volume, l'utilizzo dei pannelli forati di spessore tipicamente compreso tra i 3 mm e i 30 mm è prevalentemente per l'assorbimento delle frequenze comprese tra 200 Hz e 5000 Hz, come mostrato nella Figura 3.28 a rappresentazione del normogramma relativo alla variazione della frequenza di risonanza. In Figura 3.29 si riporta invece l'andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento di pannelli forati caratterizzati da diverse percentuali di foratura.

L'inserimento di materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità del pannello forato modifica il coefficiente di assorbimento aumentandolo in misura importante nell'intono della frequenza di risonanza. Per incrementare anche l'efficacia di assorbimento acustico su uno spettro più ampio di frequenze è opportuno progettare la stratigrafia del pannello forato in modo tale che il pannello stesso sia posizionato in maniera inclinata rispetto alla superficie rigida cui è connesso, come rappresentato in Figura 3.30, così da generare un insieme di risuonatori singoli che presentano diversi volumi di cavità che contribuiscono quindi ad estendere l'intervallo di frequenze interessate dal fenomeno dell'assorbimento.



3.2.2. UN INTERVENTO DI CORREZIONE ACUSTICA

In questo paragrafo è descritto l'intervento di correzione acustica realizzato in un'aula di scuola primaria. Il valore aggiunto di tale intervento, oltre a quello primario di garantire il comfort acustico per docenti e discenti, è stata l'integrazione delle soluzioni acustiche con quelle di messa in sicurezza strutturale del soffitto.

Il caso studio

Il plesso scolastico cui appartiene l'aula oggetto della correzione acustica è situato in un'area urbana mista, in cui sono presenti edifici residenziali e terziari, e che non è distante da un ospedale. L'aula è a pianta rettangolare e di dimensione pari a 60,3 m² (6,7 m x 9 m), l'altezza del soffitto piano è di 4,6 m e il volume di 277,4 m³. Sono presenti tre grandi aperture finestrate che permettono l'affaccio sul cortile che separa l'edificio da una grande arteria stradale, percorsa da mezzi pubblici e veicoli privati. Le finestre presentano un sistema di oscuramento ad avvolgibili con cassonetto interno. Il pavimento è in graniglia e le pareti intonacate. La porta di ingresso, sormontata da un sopraluce trasparente, è ricavata all'interno di una nicchia posta lungo la parete che confina con il corridoio. Sulla parete della lavagna è presente una porta che delimita un armadio a muro. Gli altri arredi presenti allo stato di fatto *ante-operam* sono costituiti da scaffalature metalliche chiuse e a vista, da 20 banchi con sedia e due cattedre. Sulle pareti sono presenti disegni e cartonati esplicativi a supporto della didattica. La Figura 3.31 rappresenta la condizione dell'aula *ante-operam*.

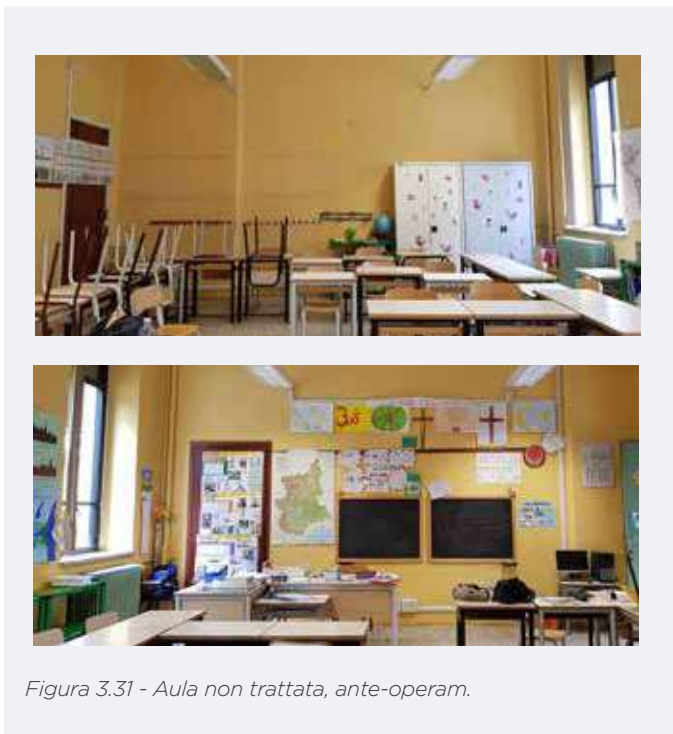


Figura 3.31 - Aula non trattata, *ante-operam*.

Le misurazioni acustiche *ante-operam*

La caratterizzazione della qualità acustica nella condizione *ante-operam* è stata eseguita ad aula non occupata ma arredata ed è stata basata sulla misurazione del tempo di riverberazione. Le misurazioni sono state eseguite a norma UNI EN 11532-2 facendo uso di un clappatore come sorgente sonora, ossia una sorgente impulsiva costituita da due braccia di legno con interposta gomma-piuma, che se sollecitate generano un rumore impulsivo di breve durata ed elevata intensità, e di un fonometro modello XL2 di NTi Audio and Acoustic Analyser come ricevitore del segnale.

L'esito delle misurazioni *ante-operam* restituisce un tempo di riverberazione in condizione di aula arredata ma non occupata (T_{inocc} , s) pari a 2,1 s \pm 0,4 s nel range di frequenza 125-4000 Hz. Come riportato in Tabella 3.3, per stimare il valore in condizione di aula arredata e occupata sono stati eseguiti i seguenti passaggi per ogni banda di ottava da 0,125 kHz a 8 kHz:

- Calcolo della differenza di assorbimento equivalente (ΔA_{tot} , m²) dovuto all'occupazione dell'aula da parte di 20 alunni di scuola primaria (corrispondenti all'80% degli occupanti, come richiesto dalla UNI EN 11532-2);
- Calcolo dell'assorbimento equivalente dell'aula occupata ($A_{tot,occ}$, m²), come somma dell'assorbimento equivalente dell'aula non occupata ($A_{tot,inocc}$, m²) ottenuto dall'inverso della formula di Sabine (equazione 3.32) e del ΔA_{tot} ;
- Calcolo del tempo di riverberazione in condizione di aula occupata (T_{occ} , s) in funzione del $A_{tot,occ}$, a partire dalla equazione 3.32.

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A_{tot}} \text{ (s)} \quad (3.35)$$

Dove V è il volume dell'ambiente (m³) e A_{tot} è l'assorbimento acustico equivalente (m²).

Secondo tale calcolo, il tempo di riverberazione *ante-operam* in condizione di aula occupata è stimato pari a 1,6 s (deviazione standard, SD , pari a 0,3 s) range di frequenza 125-4000 Hz.

Tabella 3.3 - Parametri acustici dell'aula nella condizione *ante-operam*, in bande di ottava.

	Frequenza [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α di un alunno di scuola primaria (-) [17]	0,17	0,21	0,26	0,30	0,33	0,37	0,40
ΔA_{tot} dell'aula occupata [m ²]	3,40	4,20	5,20	6,00	6,60	7,40	8,00
$A_{tot,inocc}$ dell'aula non occupata [m ²]	14,0	19,4	19,8	18,8	20,0	25,3	27,0
$A_{tot,occ}$ dell'aula occupata [m ²]	17,4	23,6	25,0	24,8	26,6	32,7	35,0
$T_{20,occ}$ dell'aula occupata [s]	2,2	1,7	1,6	1,6	1,5	1,2	1,1

Come dettagliato al paragrafo 2 nella sezione relativa alle norme tecniche, la UNI EN 11532-2 individua il valore ottimale del tempo di riverberazione in funzione della destinazione d'uso dell'aula e del volume. Per le aule didattiche in cui è richiesto elevato grado di intelligibilità del parlato anche per persone con deficit uditivi o non madrelingua, ovvero in cui è prevista la presenza di più oratori, la norma identifica la formula 3.33 per la previsione del valore ottimale del tempo di riverberazione nel range 125-4000 Hz (T_{ott} , s):

$$T_{ott} = [0,32 \cdot (10 \log_{10} V) - 0,17] (s) \quad (3.36)$$

Dove V è il volume dell'ambiente [m^3].

I risultati ottenuti in entrambe le condizioni di occupazione dell'aula sono superiori a quelli calcolati come ottimali in base all'equazione 2. Infatti, il valore ottimale e nell'intervallo di frequenza 125-4000 Hz, è pari a 0,60 s nel caso di aula occupata e 0,65 (standard deviation, SD 0,01 s) nel caso di aula non occupata.

Il trattamento acustico

Basando il progetto di correzione acustica su criteri di massimizzazione della chiarezza del parlato e riduzione del tempo di riverberazione, l'intervento è stato finalizzato a trattare con materiale ad elevate prestazioni di assorbimento acustico le pareti laterali di fondo aula e lato corridoio, e in più l'intero soffitto dell'aula, come mostrato in Figura 3.32. In particolare, sono stati impiegati i seguenti materiali, i cui coefficienti di assorbimento sono riportati in Tabella 3.4:

- Per le pareti laterali, sistemi fonoassorbenti a parete Akusto™ Wall A Texona in pannelli 2700x1200x40 mm, nella quantità di 26 m²,

- Per il soffitto, sistema fonoassorbente Ecophon Master™ F in pannelli 600x600x40 mm, nella quantità di 60 m².

In Figura 3.32 sono riportate delle immagini dell'aula a seguito del trattamento acustico.



Figura 3.32 - Aula trattata, post-operam.

Tabella 3.4 - Coefficienti di assorbimento (α , -) dei materiali utilizzati per il trattamento acustico dell'aula.

	Frequenza [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ecophon Akusto™ Wall A	0,20	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ecophon Master™ F	0,25	0,80	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

L'intervento di messa in sicurezza del controsoffitto

Gli interventi di correzione acustica, in quanto interventi di manutenzione straordinaria sull'esistente nella maggior parte dei casi, devono prevedere necessariamente le adeguate verifiche di fattibilità strutturale al fine di garantire la sicurezza degli utenti una volta completati. Nel caso di inserimento di controsoffitti acustici, dunque, è essenziale verificare la resistenza dei solai esistenti e la pratica che nei tempi più recenti si sta mirando a mettere in atto è quella di integrare l'intervento acustico con l'inserimento di uno strato antisfondellamento. Le prestazioni acustiche del nuovo pacchetto con prestazioni strutturali ed acustiche, però, non sono note con facilità e accuratezza metrologica, dunque la previsione delle prestazioni in opera è incognita in fase progettuale. Nell'ambito della progettazione e realizzazione di questo intervento di miglioramento, è

stato raggiunto un duplice importante obiettivo: da un lato quello di esecuzione di un progetto acustico a regola d'arte, dall'altro quello di certificazione di un innovativo sistema di controsoffitto con elevate prestazioni antisfondellamento ai carichi di caduta e acustiche che può garantire i requisiti di sicurezza occupazionale degli utenti. Nello specifico, i pannelli Ecophon Master™ F adottati per il trattamento superficiale del soffitto sono stati accoppiati ad un sistema antisfondellamento Gyproc Fireline di dimensioni nominali standard 1200x3000x15 mm e peso nominale 12,7 kg/m², formate da nucleo in gesso, fibra di vetro e vermiculite con rivestimento esterno in carta (Figura 3.33). Gli esiti della certificazione del sistema innovativo di controsoffitto, che hanno soddisfatto i requisiti di sicurezza ai carichi di caduta, sono stati approvati dall'Istituto Giordano S.p.A. (Gatteo, FC) e sono contenuti in un rapporto di prova ufficiale.

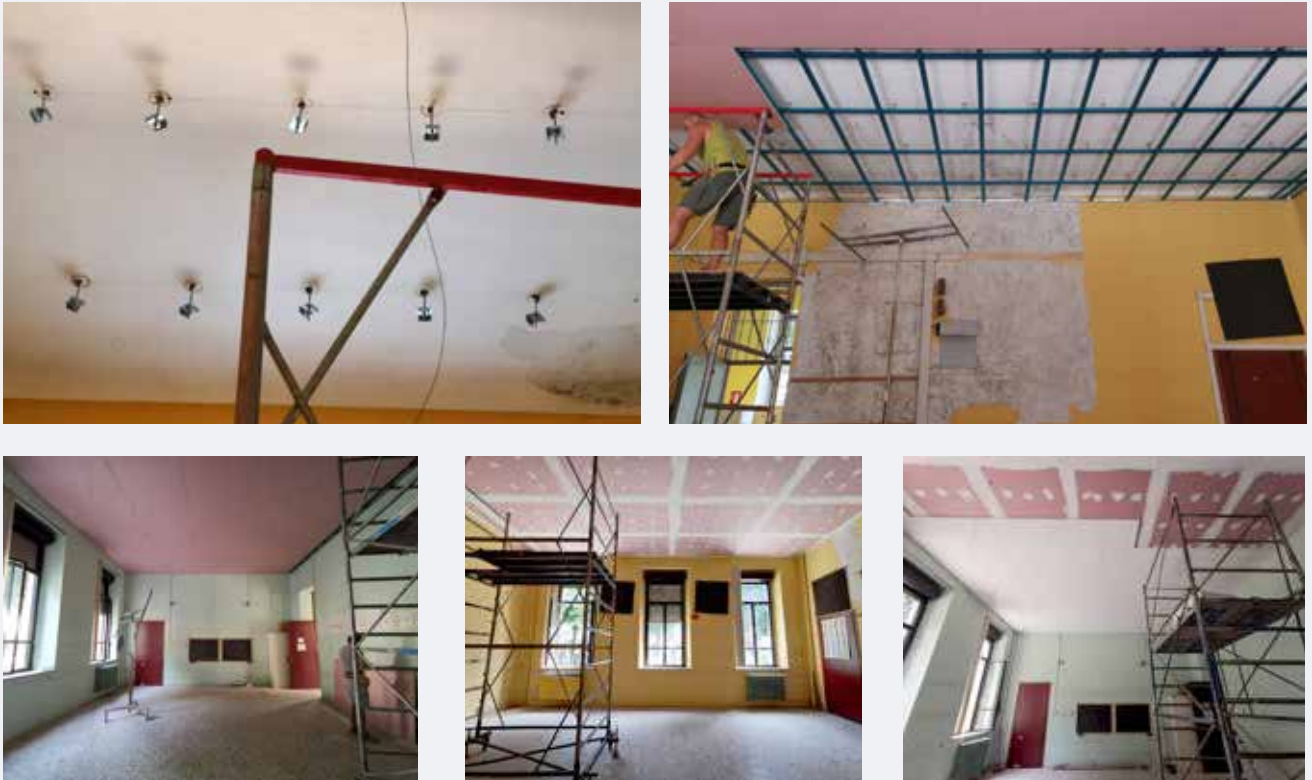


Figura 3.33 - Installazione tramite pendinatura e sottostruttura metallica del controsoffitto antisfondellamento Gyproc Fireline e, nell'ultima immagine a destra, dei pannelli fonoassorbenti Ecophon Master™ F in aderenza.

Misurazioni acustiche *post-operam* e risultati del collaudo

A seguito dell'intervento di correzione acustica, integrato al consolidamento con sistema antisfondellamento, sono state eseguite le misurazioni *post-operam* per valutare l'efficacia del progetto. In conformità alla norma UNI EN 11532-2, è stato nuovamente misurato il tempo di riverberazione e in più anche il parametro della chiarezza del parlato (C_{50} , dB).

Per tali misure *post-operam* è stata considerata una condizione occupata dell'aula, simulando la presenza degli alunni per mezzo di pannelli fonoassorbenti in fibra 100% poliestere come mostrato in Figura 3.34. La strumentazione utilizzata è consistita in una sorgente direttiva (modello Talkbox di NTi Audio and Acoustic Analyser) per la misurazione della C_{50} , in modo da replicare il diagramma di emissione del segnale vocale, in un dodecaedro omnidirezionale (modello 4292-L di Brüel&Kjær) per la misurazione del tempo di riverberazione, e in un fonometro di classe-1 (modello XL2 della NTi Audio and Acoustic Analyser) come ricevitore in entrambi i casi.

La Talkbox è stata collocata in corrispondenza della posizione tipicamente assunta dall'insegnante e ad una altezza dal pavimento pari a 1,5 m, mentre il fonometro è stato posizionato in asse con la sorgente in corrispondenza della prima fila di banchi, poi della fila centrale e infine dell'ultima fila. La Figura 3.35 rappresenta schematicamente la distribuzione di sorgenti e ricevitori nell'aula al fine di eseguire le misurazioni descritte.



Figura 3.34 - Posizionamento dei pannelli fonoassorbenti in fibra 100% poliestere per la simulazione dell'occupazione dell'aula.

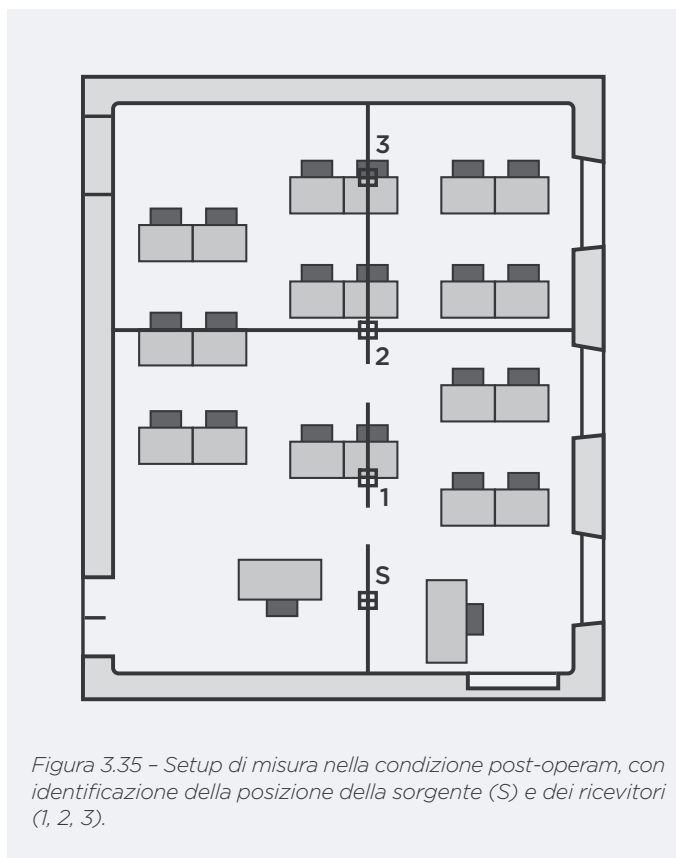


Figura 3.35 - Setup di misura nella condizione *post-operam*, con identificazione della posizione della sorgente (S) e dei ricevitori (1, 2, 3).

Il tempo di riverberazione è stato misurato in accordo con la procedura descritta nella norma UNI EN ISO 3382-1. Le sorgenti sono state impostate al fine di emettere un segnale *sweep* esponenziale di intensità adeguata ad assicurare il corretto rapporto segnale-rumore per tutte le bande di frequenza da 50 Hz a 22000 Hz. Ogni *sweep* acquisita per ciascuna sorgente e in ciascun punto di misura è stata convoluta con il suo filtro inverso al fine di ottenere la risposta all'impulso da cui è stato possibile estrarre i parametri acustici di interesse.

La Tabella 3.5 riporta i risultati del collaudo, eseguite in condizioni di aula arredata e simulata occupata. In accordo con quanto indicato nella norma UNI EN 11532-2, è stato possibile valutare l'andamento del tempo di riverberazione anche in condizioni di aula non occupata. La Figura 3.36 mostra, in base alle misurazioni e ai calcoli eseguiti *ante-operam* e *post-operam*, il confronto tra i tempi di riverberazione in condizione di aula simulata occupata, anche in relazione al valore ottimale indicato in UNI EN 11532-2 per le aule adibite allo svolgimento di attività didattica.

Nel caso delle curve riferite a dati misurati in campo per mezzo di misurazioni ripetute, inoltre, i grafici riportano l'andamento in frequenza dell'incertezza estesa associata alla misura e calcolata in accordo a quanto indicato nella UNI EN 11532-2.

Tabella 3.5 - Valori del tempo di riverberazione *ante-operam* e *post-operam* in bande di ottava, misurati o calcolati ad aula non occupata (T_{inocc} s) o simulata occupata (T_{occ} s). Sono inoltre riportati i valori ottimali nelle condizioni di occupazione (T_{inocc} e T_{occ} s) a norma UNI EN 11532-2.

Ante-operam								
	Frequenza [Hz]							Media 125-4000 Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
T_{inocc} (s) - misurato	2.8	2.0	2.0	2.1	2.0	1.5	1.5	2,1
T_{occ} (s) - calcolato	2.2	1.7	1.6	1.6	1.5	1.2	1.1	1,6

Post-operam								
	Frequenza [Hz]							Media 125-4000 Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
T_{inocc} (s) - calcolato	1.3	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0,7
T_{occ} (s) - misurato	1.2	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0,6

Valori ottimali								
	Frequenza [Hz]							Media 125-4000 Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$T_{inocc,ott}$ (s)	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.70	0,7
$T_{occ,ott}$ (s)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

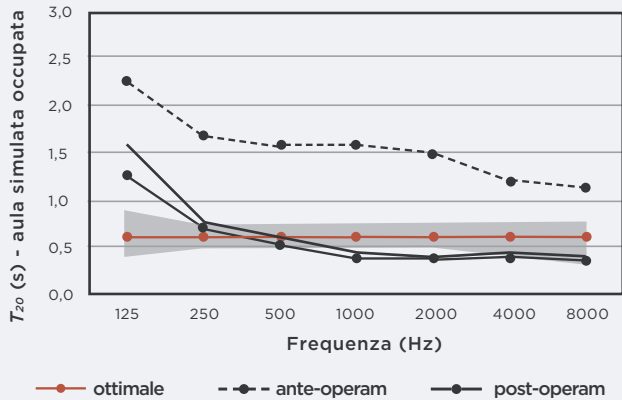


Figura 3.36 - Confronto tra ante-operam (calcolo) e post-operam (misura) del tempo di riverberazione (T_{20} , s) in condizione di aula arredata e simulata occupata. L'area in grigio si riferisce all'intervallo di conformità, e la curva nera continua e sottile indica l'andamento in frequenza dell'incertezza estesa associata alla misura post-operam, entrambi calcolati in accordo alla UNI EN ISO 11532-2.

In sintesi, a seguito dell'intervento di correzione acustica il tempo di riverberazione misurato *post-operam* nelle condizioni di aula non occupata è risultato, come media in frequenza tra 250 Hz e 2000 Hz, pari a 0,61 s (*SD* 0,18 s). Considerando la condizione simulata occupata, il tempo di riverberazione misurato *post-operam* è risultato pari a 0,60 s (*SD* 0,34 s). Da ciò si evince dunque che i risultati

del collaudo siano adeguati sia in condizione di aula non occupata sia in condizione di aula occupata.

Per quanto riguarda la misurazione della chiarezza del parlato, non è stato possibile effettuare un confronto tra le condizioni *ante-* e *post-operam*. Tuttavia, la letteratura scientifica mostra che questo parametro risulti correlato negativamente e significativamente al tempo di riverberazione (ossia all'aumentare del tempo di riverberazione, la chiarezza diminuisce) e che dunque nella condizione *ante-operam* ci si potesse aspettare un valore di C_{50} inferiore al limite indicato come ottimale dalla UNI EN 11532-2, che è pari a 2 dB come media spaziale tra più posizioni, al fine di garantire le ottime condizioni di ascolto finalizzato all'apprendimento in aula.

Considerando la condizione di aula simulata occupata, i risultati mostrano che nell'intervallo 500-2000 Hz la C_{50} è sempre superiore a quella richiesta dalla norma. In particolare, la Tabella 3.6 riassume i valori misurati di C_{50} in bande di ottava e poi mediati nell'intervallo 500-2000 Hz, separatamente per ciascun ricevitore e che restituiscono come media spaziale un valore di 11,2 dB. Come richiesto dalla norma di riferimento, UNI EN 11532-2, a questo valore medio si associa una incertezza di misura U che, calcolata come prodotto tra il fattore di copertura k relativo all'intervallo di fiducia del 95% e lo scarto tipo di riproducibilità pari a 1 dB, risulta essere pari a 1,65 dB. Pertanto, il valore medio della C_{50} nell'ambiente, corretto dell'incertezza di misura U , equivale a 9,5 dB.

Tabella 3.6 - Chiarezza del parlato (C_{50} , dB) misurata *post-operam* nella condizione di aula simulata occupata.

	Frequenza [Hz]							Media 500-2000 Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Ricevitore 1 (prima fila)	2,3	5,4	11,2	14,7	16,4	17,6	19,7	14,1
Ricevitore 2 (fila centrale)	0,6	3,5	6,6	11,5	10,5	13,1	15,1	9,5
Ricevitore 3 (ultima fila)	0,8	7,4	6,5	12,9	10,4	11,6	12,9	10,0

Bibliografia essenziale

Hopkins C., Sound Insulation, Elsevier, 2007.

Spagnolo R. (a cura di), "Manuale di acustica applicata", Cittàstudi, 2008.

Crocker M.J., Price A.J., "Noise and noise control", vol. I, CRC, Cleveland, 1975.

Beranek L.L., "Acoustics," McGraw-Hill, 1993.

UNI EN ISO 354, Acustica - Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante.

UNI EN ISO 10534-2, Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo della funzione di trasferimento