

PROGETTAZIONE

Rumori da calpestio a bassa frequenza

Metodologie per ridurre il disturbo

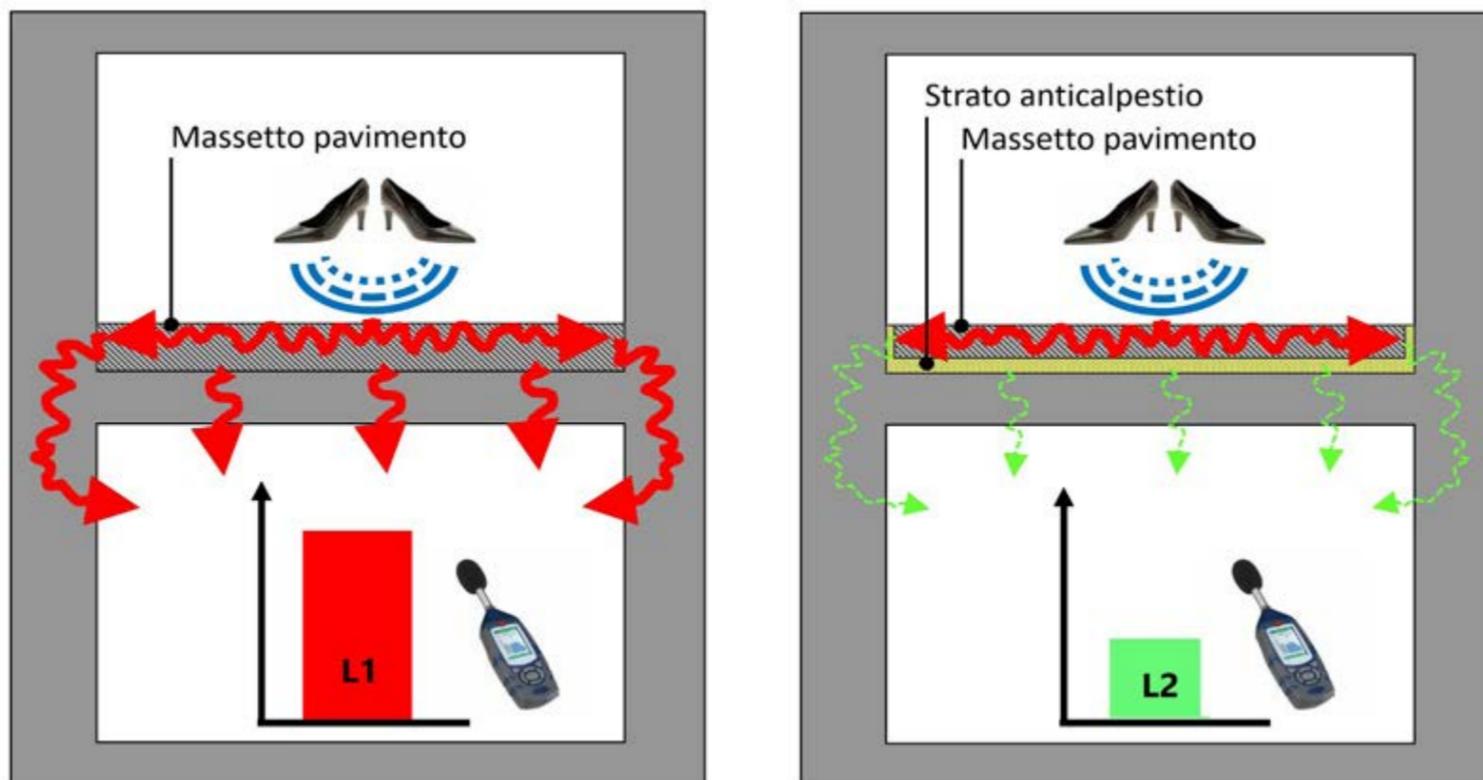


Figura 1.

DI RENZO SONZOGNI* E
MICHELE CATTANEO**

Mettetevi comodi a casa vostra. Spegnete TV, radio e ogni altro macchinario. Vi capita di sentire il rumore di passi provenire dall'alloggio sovrastante del vostro vicino? A volte, anche in edifici recenti, si ha una percezione di colpi sordi, simili a dei tonfi come se il vicino corresse sui talloni. Questo avviene perché i comuni sistemi "anticalpestio" impiegati in edilizia attenuano le frequenze medio-alte, ma normalmente non riducono il passaggio delle basse frequenze. Un tipico sistema per limitare la trasmissione del rumore da calpestio dei solai si basa sul disconnettere il massetto su cui poggia la pavimentazione da tutto ciò che lo circonda, realizzando una vasca in materiale elastomerico, ovvero "morbido", che contiene l'intero massetto di pavimento, confinando (nei limiti del possibile) la vibrazione al solo massetto (Figura 1).

La legislazione italiana ha introdotto limiti sul livello di rumore da calpestio, scegliendo di utilizzare un solo valore, denominato indice unico ($L'_{n,w}$), che rappresenta una sorta di "media" nel campo di bande di frequenza tra 100 Hz e 3150 Hz. Di conseguenza, i produttori hanno sviluppato materiali "anticalpestio" adeguati a rispettare tale requisito. Poiché l'edilizia è il cugino povero della meccanica, i produttori

hanno dovuto bilanciare prestazioni e costi, sviluppando prodotti che permettessero di raggiungere l'obiettivo del rispetto dei limiti di legge in basso spessore, bassa deformazione e costo ridotto. Stiamo parlando dei consueti e ben noti "materassini anticalpestio".

Esistono però sistemi particolari, definiti a "bassa frequenza di risonanza", che – eventualmente accoppiati ad accorgimenti complementari – permettono di ridurre i livelli di rumore legati al calpestio anche a valori non udibili.

Tali sistemi sono spesso impiegati in situazioni particolari, dove risulta necessario evitare che ai piani sottostanti si percepisca il rumore di calpestio o i colpi su pavimenti provenienti dai piani superiori, riducendo drasticamente e, in alcuni casi, addirittura annullando completamente la percezione del calpestio o di altre attività, come ad esempio il rimbalzo di palloni da basket analizzato nel prosieguo. L'unica controindicazione è che, per ottenere tale miglioramento di prestazione, occorre impiegare elementi particolarmente "morbidi" tali da determinare vibrazioni percepibili e cedimenti del piano di pavimento, aspetto che va valutato con attenzione anche in base al contesto e alla destinazione d'uso dei locali.

Riportiamo un estratto dal libro "Difetti nella progettazione acustica degli edifici" [1] edito da Maggioli SpA, utile a comprendere il funzionamento e la modalità applicativa di tali sistemi.

SISTEMA ANTICALPESTIO "TRADIZIONALE"

Innanzitutto analizziamo la causa della produzione di rumorosità a bassa frequenza di un pavimento con sistema anticalpestio "tradizionale". In Figura 2 i due grafici riepilogano tale problematica e sono relativi a un **soffitto in laterocemento con anticalpestio continuo perfettamente posato** (sistema pavimento galleggiante) e massetto di pavimento radiante, senza controsoffitto e senza contropareti, il cui collaudo acustico ha determinato un indice di rumore di calpestio $L'_{n,w}$ tra 53 e 58 dB, conforme quindi al limite normativo prescritto dal DPCM 5.12.1997 in ambito residenziale ($L'_{n,w} \leq 63$ dB).

Tuttavia il basso rumore di fondo della zona, unitamente a un'attività poco attenta dei vicini, determinava nella fattispecie un disturbo assimilabile a "tonfi sordi" ben percepibili nei limitrofi alloggi. I grafici sono relativi alla rumorosità prodotta da un peso di 8 kg con fondo in gomma lasciato cadere sul piano di pavimento da 10 cm di altezza (Figura 2: fotografia in alto a sinistra), comparabile a un passo a piedi scalzi di persona adulta o di un bambino che corre. È stata adottata tale modalità di misura in modo da renderla ripetibile; inoltre, oltre alle prove di seguito descritte, sono state anche effettuate misure con passi prodotti da persone, con macchina da calpestio normalizzata e con rumore aereo, quest'ultimo per valutare eventuali percorsi preferenziali di rumore (ponti acustici), risultati

poi inesistenti. Contestualmente alla generazione degli impatti sono stati rilevati simultaneamente i **livelli di pressione sonora** sia nell'ambiente emittente al piano terra sia nell'ambiente ricevente al piano secondo, riportati nel grafico superiore (Figura 2). Nel grafico inferiore sono invece riportate le **misure della velocità di vibrazione** di alcuni punti presi a campione, sia sul pavimento poco distante dalla sorgente (nella fotografia in alto a sinistra, vicino agli otoprotettori a coppe, si intravede l'accelerometro) sia in diversi punti delle superfici del locale ricevente (pavimento, soffitto e pareti, alcuni visibili nelle fotografie centrale e inferiore). L'analisi ha riguardato il rumore di calpestio che si trasmette dal piano terra (emittente) al piano secondo (ricevente): è possibile immaginare l'effetto amplificato che si avrebbe considerando un ambiente emittente al piano superiore rispetto a un ambiente ricevente inferiore.

Cosa si nota dai grafici? Nel grafico superiore è visibile, con **linea di colore blu**, il **livello di pressione sonora** in bande di terzi di ottava misurato nel locale emittente in seguito all'impatto del peso sul pavimento. Si noti la forma spettrale, molto simile a quella della velocità di vibrazione del pavimento emittente, in quanto il pavimento è la superficie che vibra con intensità più elevata rispetto alle altre superfici del locale emittente e, di conseguenza, genera il livello di pressione sonora più elevato. Il rilievo dei livelli vibratori è stato arrestato a 1250

Hz poiché l'indagine era rivolta alle basse frequenze disturbanti; infatti, l'attenuazione determinata dal sistema anticalpestio "tradizionale" è normalmente buona alle medio-alte frequenze. Ciò è ben evidente analizzando i livelli di pressione sonora nel locale ricevente: in seguito all'impatto del peso sul pavimento, l'energia viene trasmessa al solaio portante e da qui alle strutture perimetrali (pilastri, setti, murature esterne e interne) e ai restanti componenti dell'edificio. Le due **curve di colore rosso e giallo** rappresentano i **livelli rilevati nell'ambiente ricevente al secondo piano**, rispettivamente il livello misurato nell'istante in cui avviene l'impatto del peso sul pavimento al piano terra e il rumore di fondo nell'alloggio, dalla cui differenza si comprende che il campo di frequenze disturbanti è compreso tra circa 50 e 250 Hz, con maggiore intensità intorno ai 100 Hz, dove il "colpo" produce un aumento significativo e percepibile del livello di pressione sonora di circa 20 dB rispetto al rumore di fondo.

Alle frequenze inferiori tale differenza risulta più limitata – peraltro, l'udibilità umana si riduce progressivamente alle basse frequenze fino quasi ad annullarsi – mentre l'efficacia del sistema "anticalpestio" risulta evidente alle frequenze medio-alte (dal grafico si nota infatti che, in corrispondenza di tali frequenze, il livello della linea rossa del "colpo" è identico a quello della linea gialla del rumore di fondo). Il contributo acustico associato all'impatto segue infatti la curva tratteggiata di colore grigio, corrispondente proprio all'andamento tipico di un sistema massa-molla. La curva del livello di pressione sonora associata all'impatto deriva dalla vibrazione degli elementi di involucro che costituiscono il locale ricevente, che in realtà possono anche modificare, in presenza di proprie frequenze di risonanza, lo spettro di pressione sonora in tale locale. I livelli di velocità vibratoria di alcune superfici sono misurati e riportati nel grafico inferiore. La vibrazione delle superfici del locale ricevente genera il livello di pressione sonora al suo interno visibile nel grafico superiore, in proporzione alla superficie dell'elemento che vibra, per cui nel grafico non necessariamente i valori di vibrazioni più elevati generano i livelli di pressione sonora più elevati. Ad esempio, la curva vibratoria di colore verde è relativa ad una superficie con area estremamente ridotta e nel contri-

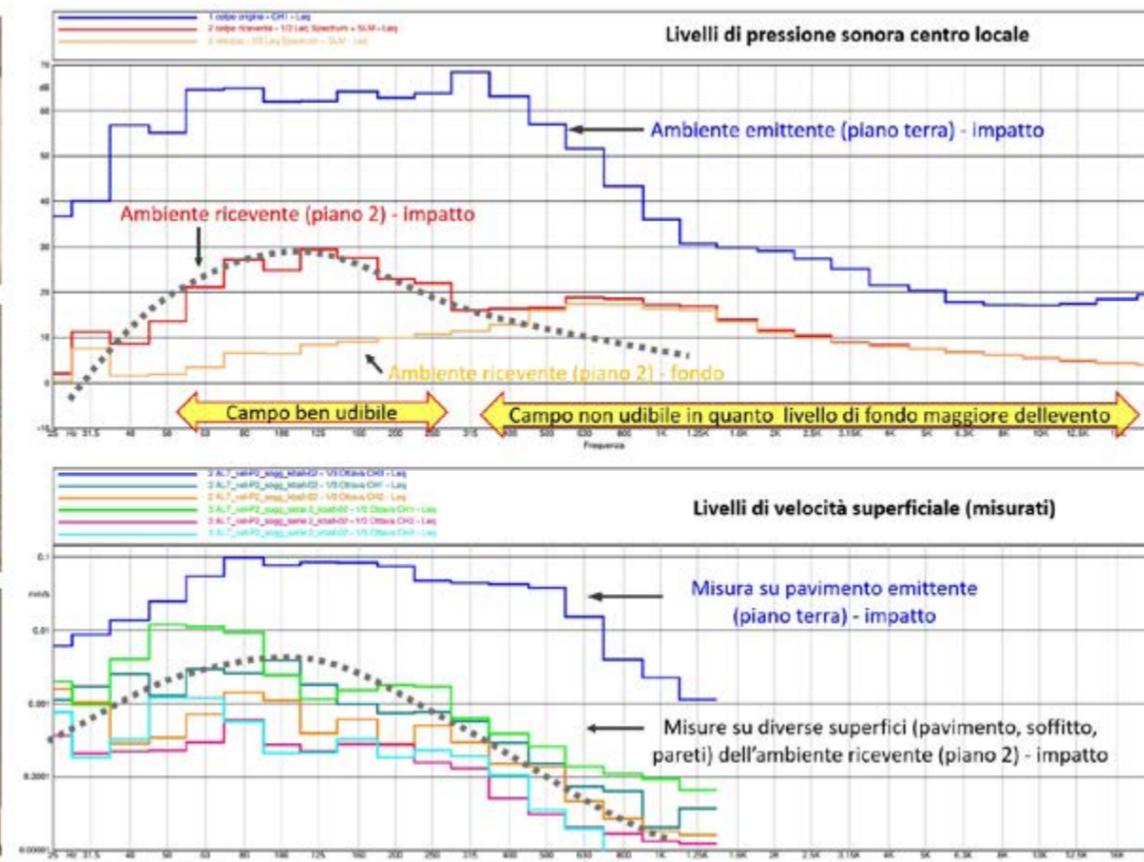
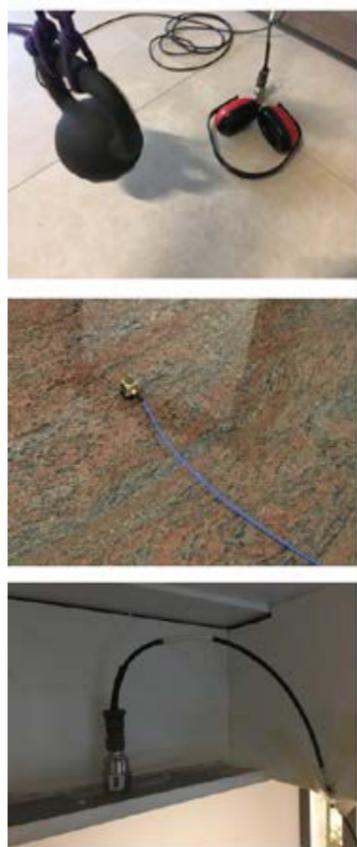


Figura 2.

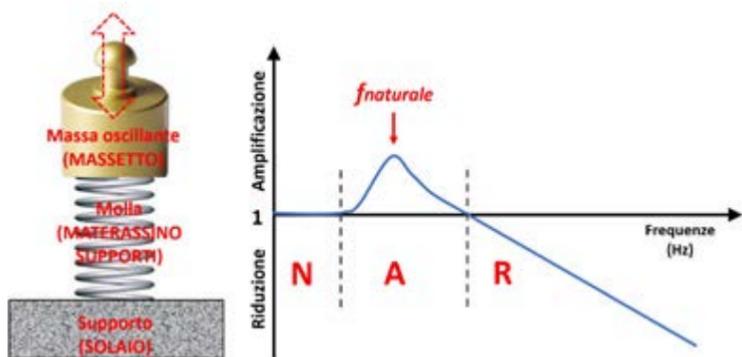


Figura 3.

buto acustico complessivo risulta trascurabile rispetto ad altre superfici, magari di livello vibrazionale inferiore ma di superficie più estesa. Nel caso in esame, nell'ambiente ricevente è risultata preponderante la frequenza intorno a 100 Hz, corrispondente sia alla frequenza di risonanza del sistema anticalpestio al piano terra sia a quella di alcune superfici del locale ricevente. Come detto, l'analisi ha riguardato la propagazione di rumore dal piano terra al piano secondo, per cui è facile immaginare l'incremento di disturbo tra alloggi contigui e, in particolare, da un locale sovrastante a uno sottostante.

COM'È POSSIBILE MIGLIORARE IL COMPORTAMENTO ALLE BASSE FREQUENZE DEI SISTEMI ANTICALPESTIO?

Spesso, un'elevata prestazione di

isolamento ai rumori strutturali, riguardante quindi anche le basse frequenze, viene richiesta da committenti o scenari "speciali", ad esempio durante la progettazione di alberghi superlusso oppure nel caso di palestre o altri locali rumorosi con sottostanti ambienti abitativi, come aule scolastiche o camere d'albergo. La prima opzione è quella di intervenire sul sistema massa-molla, ovvero massetto di pavimento-elemento anticalpestio, adottando in particolare una "molla" più "morbida". In tal modo si abbassa la frequenza naturale del sistema e le vibrazioni "iniziano" a smorzarsi/ridursi a frequenze inferiori. Un sistema massa-molla si comporta infatti in tre modi differenti in relazione alla trasmissione della vibrazione che lo eccita, ovvero a "quanta vibrazione"

originata sul pavimento "si trasmette al supporto". Esiste una zona "neutra" in cui la vibrazione in ingresso viene trasmessa al supporto con pari intensità, una zona in cui la stessa viene amplificata e una zona, a destra di quest'ultima, in cui si ottiene una riduzione (Figura 3).

Nella Figura 4 un esempio schematico di cosa accade. Con il sistema "S1", assimilabile a un "tradizionale" sistema anticalpestio, l'attenuazione inizia a circa 100 Hz, migliorando all'aumentare della frequenza. Il risultato ottenibile è conforme a quanto prescritto dalla normativa di legge, ma restano percepibili le basse frequenze, come visto nell'esempio precedente. Alcune frequenze vengono amplificate, come sempre avviene in sistemi costituiti da masse poggiate su molle. Questo è lo scotto che si paga in ogni caso per poter attenuare le vibrazioni. Un'accorta progettazione permette di spostare le frequenze critiche a seconda dell'obiettivo. Per migliorare il comportamento acustico occorre creare un sistema con una molla più "morbida" e/o con una massa più elevata, in modo da traslare la frequenza naturale del sistema verso sinistra (alle frequenze più basse) e consentendo così l'attenuazione a frequenze inferiori rispetto al sistema "S1".

Questo accorgimento permette di attenuare frequenze, anche basse, già nel campo dell'udibile oltre a migliorare in modo percepibile anche l'attenuazione alle medio-alte frequenze.

Tale soluzione parrebbe facile da applicare, ma nella realtà ci si scontra con le problematiche legate allo "schiacciamento" di materiali morbidi e al conseguente abbassamento dei medesimi nel tempo. Ecco che per garantire un'ottima prestazione acustica alle basse frequenze, garantendo la portata nel tempo e un abbassamento controllato, entrano in gioco materiali che hanno costi superiori a quelli di un comune materassino anticalpestio, anche di 5-10 volte. Tali materiali hanno inoltre schede tecniche più dettagliate rispetto alle schede dei consueti materassini anticalpestio che forniscono in genere solamente il parametro di rigidità dinamica (s') rilevata in una sola condizione di carico.

Ad esempio, molti materiali "speciali" forniscono anche indicazioni di rigidità dinamica (s') sotto diversi carichi, oppure parametri di comportamento dinamico, smorzamento etc. Alcuni materiali hanno anche la capacità di migliorare la propria "flessibilità" quando eccitati da un carico dinamico, al contrario di quanto avviene in genere per i tipici materassini anticalpestio che se "schiacciati" divengono più rigidi e di conseguenza meno performanti. Entrando più nel dettaglio, buona parte di questi sistemi utilizza supporti puntuali o lineari del massetto di calpestio opportunamente distanziati.

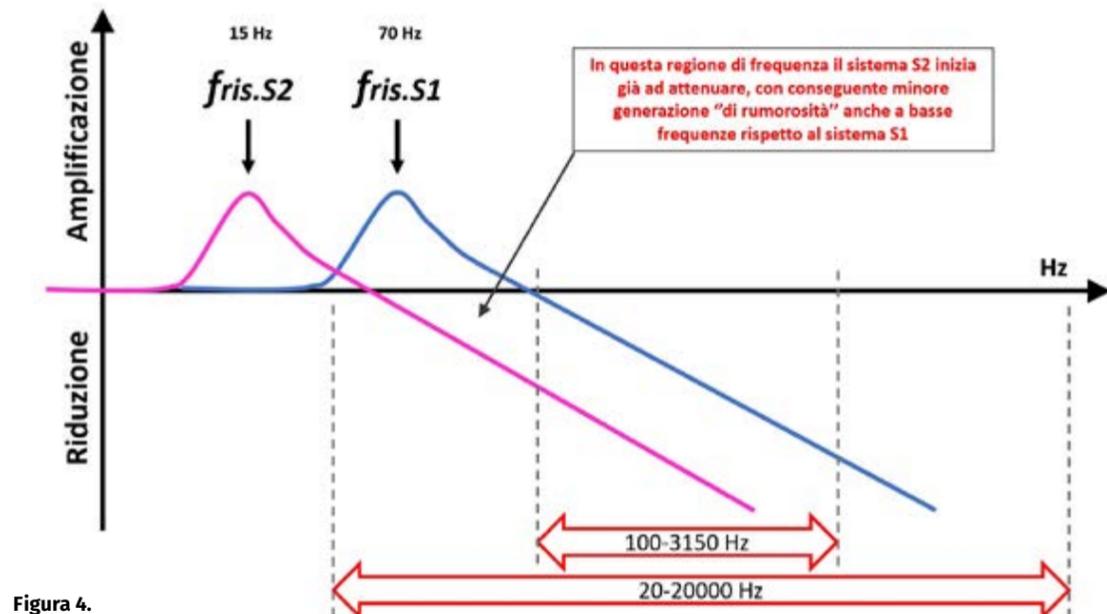


Figura 4.

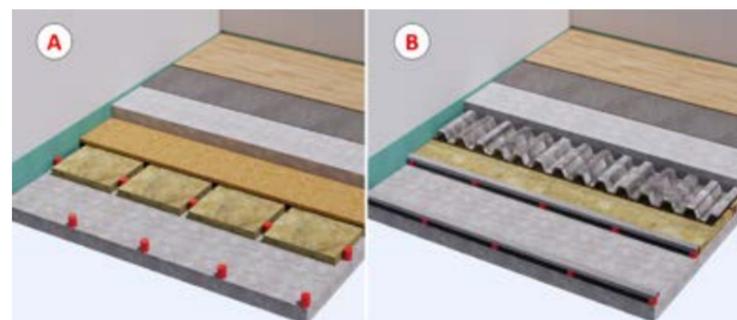


Figura 5.

Si tratta di blocchetti di materiali costituiti da elastomeri lattici, silicologici o poliuretanic.

L'impiego di elementi singolari anziché dei "tradizionali" teli/materassini continui permette di posizionarli a distanza variabile, indicativamente ogni 40-80 cm, permettendo così di modificare il carico agente su ogni elemento e, conseguentemente, di progettare in modo preciso la frequenza di lavoro del sistema. Alcuni di questi sistemi presentano frequenze proprie intorno a 8±20 Hz. Presupposto per un corretto funzionamento di tali sistemi è che i solai di base siano sufficientemente rigidi così da fornire un riscontro fisso; al contrario, solai leggeri e flessibili inficiano le prestazioni. Per quanto concerne la posa, si procede posizionando a interassi calcolati i supporti puntuali, sui quali viene posato un cassero a perdere, in legno o in lamiera metallica, sopra il quale viene realizzato il getto del massetto di pavimento armato. In presenza di lamiera grecata (come cassero a perdere), viene spesso utilizzato un profilo metallico a C come supporto lineare intermedio.

Nell'intercapedine che si crea tra il solaio strutturale e il cassero a perdere viene inserito del materiale fibroso (pannelli fonoassorbenti) per limitare la perdita di isolamento acustico al rumore aereo legata all'intercapedine stessa. È importante che i pannelli fonoassorbenti abbiano uno spessore minore dell'intercapedine e non la riempiano completamente per evitare qualsiasi contatto con il massetto di pavimento ed evitare una riconnessione parassita tra il cassero e il solaio. Il perimetro deve rimanere completamente disconnesso dalle strutture circostanti.

Nella Figura 5 si riportano alcuni schemi di posa, rispettivamente con cassero a perdere in legno, tipicamente OSB (Fig. 5A), e con lamiera grecata autoportante (Fig. 5B). In quest'ultimo caso, per il sostegno provvisorio della lamiera vengono utilizzati dei profili a "C" e la lamiera viene posata con le proprie nervature perpendicolari ai profili. Una volta che il getto si è consolidato, il sistema diviene rigido e autosostenuto sui supporti. In entrambi i casi è fondamentale la disconnessione vibratoria con gli elementi edilizi contigui, mediante la posa di bandella in materiale elastomerico, alla stregua di quanto necessario in qualsiasi sistema anticalpestio tradizionale. Se il miglioramento della prestazione deve riguardare anche le frequenze molto basse, è

segue a pag. 30

PROGETTAZIONE

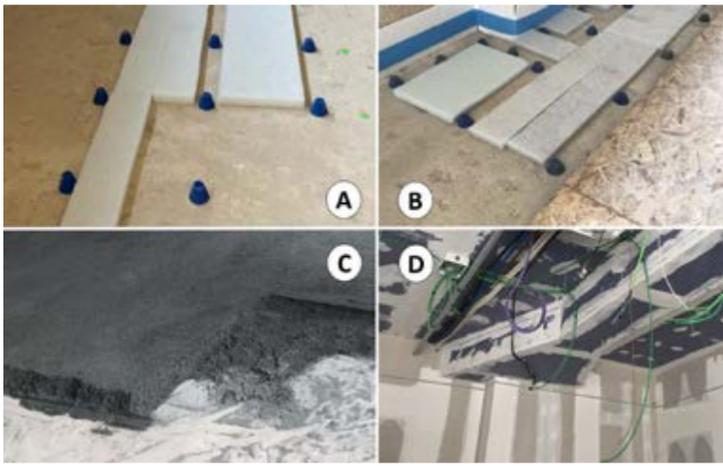


Figura 6.

continua da pag. 29

opportuno evitare anche l'attrito tra il massetto flottante e le pareti, bandelle elastomeriche compresse, lasciando quindi che si formi un vero e proprio distacco fisico tra il massetto di pavimentazione e tutti gli elementi circostanti.

Per creare tale interstizio d'aria si posano dei casseri sottili che vengono poi rimossi "sfilandoli" successivamente alla presa del massetto. Tali sistemi permettono di ottenere prestazioni di isolamento al calpestio molto elevate, ulteriormente migliorabili realizzando nei locali riceventi controsoffitti e contropareti, disconnessi dalle strutture di involucro, in modo da contenere anche i contributi di rumore che "fuggono".

Con questi accorgimenti è possibile ottenere prestazioni veramente eccezionali, fino anche a indici di livello di calpestio normalizzato $L'_{n,w}$ pari a 20-30 dB e addirittura inferiori, il che significa non percepire alcun rumore quando al piano soprastante si svolgono rilevanti attività che percuotono il pavimento.

L'ANALISI DI UN PROGETTO

L'intervento riguarda un solaio di partizione tra una palestra e aule scolastiche sottostanti. La criticità di tale scenario ha richiesto di massimizzare l'isolamento acustico del solaio la cui stratigrafia è la seguente:

1. Pavimento sportivo in gomma granulata e resina Pavisint SL 75, sp. 7 mm;
2. Massetto in sabbia e cemento (armato) con additivo accelerante, 2.200 kg/m³, sp. 5,5 cm;
3. Sottofondo alleggerito in miscela di granulato sintetico Ecolight, 630 kg/m³, sp. 10 cm;
4. Doppio strato di pannelli in legno OSB-3, dim. 125x250 cm, 600 kg/m³, sp. 2,5+2,5 cm;

5. Sistema anticalpestio a bassa frequenza di risonanza Arco Plus costituito da supporti antivibranti in miscela di poliuretano, silicone e lattice Arco Damping, h=6 cm; nell'intercapedine pannelli in fibra di poliestere 20 kg/m³, sp. 5 cm (1 cm in meno rispetto allo spessore di intercapedine);

6. Solaio in cemento armato pieno preesistente, sp. 23 cm;

7. Controsoffitto fonoisolante (con pendini antivibranti): nell'intercapedine (sp. 15 cm) pannelli in lana minerale di vetro, 18 kg/m³, sp. 6 cm; lastra in gesso rivestito Knauf Silentboard, 1.400 kg/m³, sp. 1,25 cm; lamina fonoimpedente Index Topsilantadhesive, 1.250 kg/m³, sp. 4 mm; lastra in gesso rivestito Knauf Diamant, 1.083 kg/m³, sp. 1,25 cm;

8. Intercapedine per passaggio impianti, sp. 50 cm;

9. Controsoffitto fonoassorbente in pannelli Rockfon Blanka, 170 kg/m³, sp. 2 cm. Le aule sottostanti sono dotate di contropareti in cartongesso e la palestra di contropareti in pannelli di lana di legno mineralizzato fonoassorbenti (prevalentemente per il controllo del riverbero).

In Figura 6.B è visibile la fascia per la disgiunzione perimetrale di tutti gli strati appoggiati ai supporti antivibranti (fino al pavimento), e in Figura 6.D il controsoffitto fonoisolante che riveste anche le travi portanti. Tutti gli impianti sono posizionati al di sotto del controsoffitto fonoisolante senza alcun attraversamento dello stesso. I risultati normalizzati degli indici di calpestio $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$ misurati

Sospensioni puntuali		materassino continuo	
1	2	3	4
30,0	34,3*	30,0	27,9*
40,0	33,6	40,0	27,2
50,0	27,4	50,0	21,0
60,0	21,0	60,0	15,4
70,0	15,4	70,0	10,8
80,0	10,8	80,0	7,4
90,0	7,4	90,0	5,0
100,0	5,0	100,0	3,6
125,0	3,6	125,0	2,7
150,0	2,7	150,0	2,1
175,0	2,1	175,0	1,6
200,0	1,6	200,0	1,2
250,0	1,2	250,0	0,9
300,0	0,9	300,0	0,7
350,0	0,7	350,0	0,5
400,0	0,5	400,0	0,4
500,0	0,4	500,0	0,3
600,0	0,3	600,0	0,2
800,0	0,2	800,0	0,1
1000,0	0,1	1000,0	0,1
1250,0	0,1	1250,0	0,1
1500,0	0,1	1500,0	0,1
2000,0	0,1	2000,0	0,1
2500,0	0,1	2500,0	0,1
3000,0	0,1	3000,0	0,1
4000,0	0,1	4000,0	0,1
5000,0	0,1	5000,0	0,1

Figura 7.

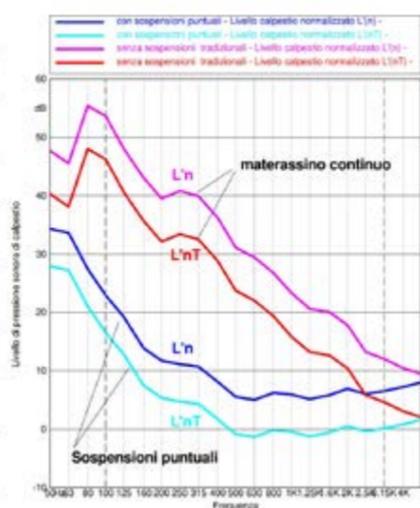
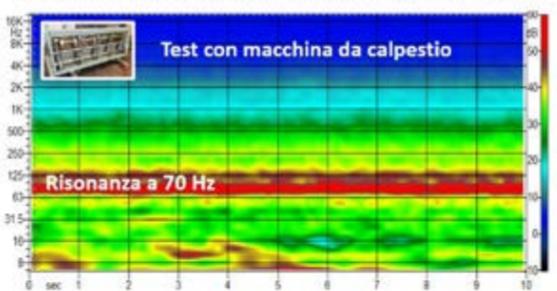


Figura 8.

Trattamento anticalpestio tradizionale con materassino continuo



Lo spettrogramma rappresenta con scala cromatica i livelli di pressione sonora che si susseguono nel tempo. Sulle ascisse l'asse del tempo, sulle ordinate le frequenze. In rosso livelli di pressione sonora più elevati, in blu livelli minori. Si nota la fascia di colore rosso che presenta il livello più elevato. Negli spettrogrammi di destra è relegata a frequenze di circa 20Hz, misurabile dal fonometro, ma non udibile a livello umano.

Sistema puntuale a bassa frequenza di risonanza

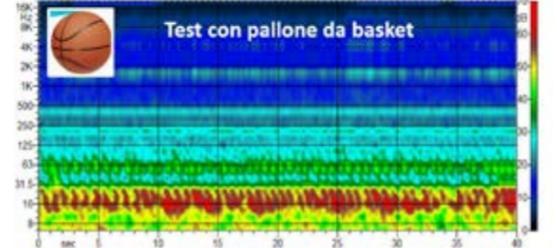
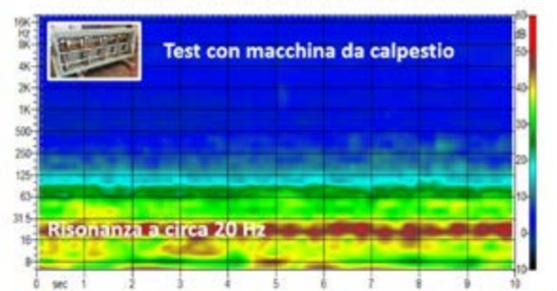


Figura 9.

in opera sono riportati nel grafico di Figura 7 con le curve di colore azzurro e blu.

Contestualmente al sistema a bassa frequenza su supporti puntuali è stato realizzato, in altri ambienti dello stesso edificio, anche un sistema "tradizionale", con variazione del solo anticalpestio, ma identica realizzazione di tutti gli altri accorgimenti a contorno (solaio di base, controsoffitti, contropareti, etc.): ciò ha permesso quindi di confrontare i due sistemi anticalpestio nelle medesime condizioni. Nello stesso grafico (Figura 7) sono infatti anche rappresentati, con curve di colore rosso e magenta, i livelli L'_{n} e L'_{nT} del sistema "tradizionale" con materassino continuo in polietilene espanso (spessore di 10 mm e rigidità dinamica $s'=10$ MN/m³ dichiarata dal produttore) steso, in sostituzione del sistema anticalpestio su supporti puntuali, tra il sottofondo alleggerito - di spessore maggiorato per compensare la quota dei supporti puntuali e dei pannelli in OSB mancanti - e il massetto, identico al precedente. Il confronto grafico tra le due stratigrafie descritte, entrambe molto performanti, evidenzia come il sistema anticalpestio su supporti puntuali, rispetto al tradizionale materassino continuo, determini migliori prestazioni di isolamento al rumore trasmesso per via solida a tutte le frequenze (riportate da 50 a 5000 Hz).

Tale risultato consegue da una traslazione verso sinistra - ovvero verso le basse frequenze - della curva di attenuazione del sistema massa-molla, come ben evidenziato dal grafico. Verosimilmente anche l'attenuazione alle alte frequenze (da 500 Hz a sali-

re) seguirebbe l'andamento della pendenza della curva di attenuazione, ma come visibile si è già al limite della capacità di rilievo del fonometro (si tratta di livelli sonori bassissimi) e non è stato possibile nella fattispecie valutarne la prestazione. Analizzando, inoltre, i livelli medi di pressione sonora di calpestio e del rumore di fondo rilevati si evince che, con il sistema anticalpestio su supporti puntuali, il generatore di calpestio normalizzato - la macchina che si impiega per collaudare in opera l'isolamento al calpestio dei solai - non risulta udibile quando attivo, come visibile in Figura 8.

Nel grafico sono evidenziati, con linea tratteggiata di colore verde, il livello di pressione sonora del rumore di fondo e, con le curve di colore blu e rosso, i livelli medi di pressione sonora rilevati negli ambienti riceventi con generatore di calpestio in funzione, rispettivamente per il solaio con supporti puntuali a bassa frequenza di risonanza e con materassino continuo tradizionale. Con linea tratteggiata sottile, sono inoltre riportate le curve isofoniche fino a quella minima, la più bassa tra tutte, che rappresenta la soglia di udibilità umana - denominata MAF (Minimum Audible Field) - sotto la quale l'orecchio umano non percepisce alcun rumore anche se lo stesso risulta presente.

Nel caso del sistema anticalpestio a bassa frequenza di risonanza, realizzato mediante supporti antivibranti puntuali, il grafico (Figura 8) evidenzia livelli di pressione sonora immessi nell'ambiente ricevente (con generatore di calpestio attivo) leggermente superiori al rumore di fondo - peraltro molto basso! - solo da 50 Hz a 400 Hz

mentre, alle frequenze superiori, le curve di livello medio immesso e di fondo praticamente coincidono. Allo stesso tempo, fino a 1250 Hz non risulta percepibile alcun tipo di rumore in quanto i livelli rilevati sono inferiori alla soglia di udibilità (solo la sensibilità microfonica del fonometro permette di rilevarli). In definitiva, in un ambiente già molto silenzioso, il rumore del generatore di calpestio non risulta udibile ad alcuna frequenza.

In conclusione, si riportano in Figura 9 anche gli spettrogrammi - che rappresentano con scala cromatica il livello di pressione sonora in frequenza e nel tempo - dei livelli di calpestio dei due sistemi a confronto (anticalpestio continuo e con supporti puntuali), in cui ben si evidenzia la diversa frequenza di risonanza alla quale si concentrano i livelli sonori più elevati (rappresentati in rosso). Nella stessa figura è riportato anche lo spettrogramma relativo al livello sonoro rilevato in aula durante una misura effettuata con un pallone da basket fatto palleggiare nella soprastante palestra dotata del sistema anticalpestio con supporti puntuali descritto: i livelli di pressione sonora più elevati, concentrati alle frequenze di 16÷20 Hz, risultano sotto la soglia di udibilità; in altre parole, i palleggi di basket in palestra non sono percepibili nell'aula sottostante.

*INGEGNERE EDILE, LIBERO PROFESSIONISTA, TECNICO COMPETENTE IN ACUSTICA, ESPERTO IN MATERIA DI ACUSTICA ED EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI

**INGEGNERE CIVILE, LIBERO PROFESSIONISTA, TECNICO COMPETENTE IN ACUSTICA, ESPERTO IN ACUSTICA EDILIZIA, ARCHITETTONICA E AMBIENTALE, PROGETTISTA DELL'INTERVENTO ANALIZZATO

NOTE

[1] Parti del testo (in corsivo) del presente articolo, così come le Figure prese in esame, sono tratte in accordo con l'autore e l'editore dal cap. 10 (pagg. da 396 a 404) del libro "Difetti nella progettazione acustica degli edifici. Come prevenire i danni e correggere gli errori", Maggioli Editore, di Renzo Sonzogni, edito da Maggioli Editore, 2021, ISBN 8891644879.