

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Dipartimento di Ingegneria Industriale DII  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

ANALISI SPERIMENTALE DI MATERIALI  
RESILIENTI SAGOMATI IN ELASTOMERI  
RICICLATI PER L'ISOLAMENTO  
ACUSTICO E DELLE VIBRAZIONI

*Relatore:* Chia.mo Prof. ANTONINO DI BELLA

*Correlatore:* Ing. LEONARDO LUISON

LUCA DALL'ACQUA D'INDUSTRIA

matricola N. 111147

Anno Accademico 2016/2017

## SOMMARIO

Introduzione .....	4
Capitolo 1 Basi di Teoria Vibratoria.....	6
1.1 Introduzione alla Trasmissione Solida.....	6
1.2 Dinamica del sistema Massa – Molla.....	7
1.3 Descrizione e Meccanica dello Smorzamento.....	10
Capitolo 2 Isolamento Vibrazioni .....	13
2.1 Isolamento struttura vibrante.....	13
2.2 Trasmissibilità e campo di isolamento.....	15
2.3 Influenza dello smorzamento per i sistemi rigidamente connessi .....	21
Capitolo 3 Isolamento Calpestio .....	24
3.1 Definizione e generazione del rumore di calpestio.....	24
3.2 Sistemi e basamenti per l'isolamento del rumore da calpestio.....	25
3.3 Metodi di calcolo normati.....	28
Capitolo 4 Soluzione sagomata: sperimentazione e caratterizzazione .....	29
4.1 Introduzione ai materassini in gomma riciclata.....	29
4.1.1 Mescole di gomme provate per la realizzazione del materassino.....	30
4.2 Geometria sagomata e linee guida di sviluppo.....	32
4.3 Caratterizzazione dei materiali resilienti.....	35
4.3.1 Comportamento a compressione e Modulo Elastico .....	35
4.3.2 Spessore .....	38
4.3.3 Rigidità dinamica .....	39
4.3.4 Scorrimento viscoso a compressione.....	41
4.3.5 Loss Factor .....	43
Capitolo 5 Apparatato Sperimentale.....	45
5.1 Laboratorio.....	45
5.1.1 Qualificazione effettuata.....	47
5.2 Strumentazione e macchinari utilizzati .....	48
5.3.1 Pressa Elettromeccanica .....	48
5.3.2 Macchina calpestio .....	50
5.3.3 Vibrodina .....	50

Capitolo 6	Indagine sperimentale effettuata.....	54
6.1	Primo livello di indagine: costruzione della curva carico-frequenza .....	55
6.2	Secondo livello di indagine: .....	58
6.2.1	Prova di spessore.....	58
6.2.2	Prova di comportamento a compressione.....	59
6.2.3	Prova di rigidità dinamica .....	61
6.3	Terzo livello di indagine.....	64
6.3.1	Prova di calpestio.....	64
6.3.2	Prova smorzamento .....	69
6.3.3	Prova di scorrimento viscoso a compressione .....	76
Capitolo 7	Conclusioni e Soluzioni Proposte.....	81
Bibliografia	.....	86
Ringraziamenti	.....	89

## INTRODUZIONE

Questo lavoro raccoglie le attività sperimentali svolte all'interno del laboratorio di acustica edilizia di proprietà di Isolgomma S.r.l.. Le principali tematiche affrontate riguardano lo studio di materiali resilienti sagomati in elastomeri riciclati per l'isolamento acustico e delle vibrazioni in applicazioni civili ed industriali. Particolare attenzione è stata rivolta all'influenza del profilo geometrico superficiale in relazione all'area di contatto tra l'isolante e il basamento. La sperimentazione condotta in un arco di tempo di circa sei mesi, ha permesso di individuare una possibile miscela per il materassino per applicazioni sotto massetto (in edilizia) di materiali utilizzati provenienti dal riciclo di gomme

Nei primi due capitoli si riassumono le conoscenze di base per l'approccio alla teoria vibratoria, con particolare cura all'introduzione di un modello ad un grado di libertà per descrivere il comportamento di sistemi vibranti. La schematizzazione più semplice per la descrizione di sistema vibrante è il sistema massa-molla, nel quale la frequenza naturale e la capacità di isolamento sono legate semplicemente alla deformazione del supporto elastico utilizzato. Risulta tuttavia necessario ricorrere ad un modello che preveda anche la presenza dello smorzamento, al fine di comprendere la natura della dissipazione di energia negli isolatori. Per tale ragione viene presentato nel dettaglio il modello massa-molla-smorzatore. Dal punto di vista fisico, infatti, l'isolatore è sostanzialmente un filtro meccanico tra la sorgente e il ricevitore con la finalità di ridurre sollecitazioni trasmesse attraverso gli elementi di appoggio. I materiali di cui si tratterà nel dettaglio in questa dissertazione, ovvero i materassini in gomma riciclata, sono degli isolatori di tipo passivo, in cui la risposta alla sollecitazione è auto-generata in accordo alle caratteristiche proprie dello strato.

Nel capitolo 3 si focalizza l'attenzione sul rumore di calpestio, attraverso il quale è possibile esprimere la risposta acustica di un solaio. Secondo normativa UNI EN ISO 10140 è necessario, in sede di misura, impiegare un generatore specifico in grado di produrre una sollecitazione meccanicamente e dinamicamente ben definita. Nella realtà, qualunque sorgente, macchina, dispositivo o elettrodomestico che agisca meccanicamente sulla superficie di un pavimento, può produrre vibrazioni meccaniche di analoga natura impattiva. Uno dei principali metodi utilizzati per incrementare l'isolamento del rumore di calpestio è la progettazione di un sistema a basamento flottante, nel quale il massetto viene separato dal solaio di base mediante l'interposizione di un materiale resiliente.

Nel capitolo 4 si presenta la soluzione sagomata analizzata. Dopo una breve introduzione sulle proprietà della gomma e sulle tipologie di mescole provenienti da riciclo utilizzate per la realizzazione del materassino, si presentano i diversi studi compiuti relativi ad applicazioni sagomate. A partire dalle indagini svolte si vuole ottenere, attraverso l'implementazione della geometria, un materassino in gomma riciclata, dell'altezza di 17 mm, che consenta prestazioni di isolamento per valori di carico inferiori a 0,06 MPa. Nelle sezioni successive si espongono le principali proprietà meccaniche riguardanti i materiali utilizzati come sottofondo nei pavimenti galleggianti: la rigidità dinamica, lo spessore sotto carico, la sua variazione nel tempo ed il comportamento in compressione, con particolare attenzione ai parametri che



maggiormente ne influenzano le prestazioni durante l'utilizzo, indicando come sia stato svolto un lavoro di ottimizzazione per la sagoma da utilizzare e la scelta delle mescole tra il materiale a disposizione.

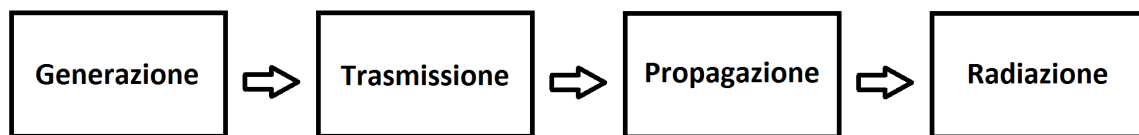
Nel quinto capitolo viene quindi presentato il laboratorio e la relativa qualificazione, che ha consentito la misura della riduzione del rumore di calpestio dei materiali utilizzati come rivestimenti di pavimentazioni secondo la norma UNI EN ISO 10140-3. Nella seconda parte del medesimo capitolo si descrivono i macchinari impiegati per eseguire le prove secondo le diverse normative utilizzate. In particolare: la pressa elettromeccanica per le prove di spessore secondo la UNI EN 12431 e il comportamento a compressione per la UNI EN 826; il generatore di calpestio normalizzato come espresso nella UNI EN ISO 10140-1; la macchina RPMTM nel rispetto della UNI 11059. Quest'ultima è stata utilizzata al fine di controllare delle grandezze statiche e dinamiche, già oggetto di indagine attraverso la UNI EN 29052:1, e di ricavare il valore del *loss factor* con un valutazione tramite il modulo complesso.

Infine nel capitolo 6 si presenta la totalità delle prove sperimentali condotte sui diversi campioni, prodotti in gran parte da riciclo di granuli e fibre di gomma, suddivise in tre livelli successivi di indagine. Nel tempo a disposizione non è stato infatti possibile sottoporre tutti i campioni ad indagine completa e sono state effettuate prove con tempistiche importanti limitatamente ai prodotti più promettenti. Il primo livello di indagine, che ha interessato l'intera totalità dei campioni, è relativo alla valutazione dell'andamento della frequenza naturale al carico. È stato possibile in questo modo confrontare le due tipologie di sagomatura impiegate con le diverse mescole. Per un numero ridotto di campioni sono state successivamente effettuate le prove di valutazione dello spessore, prova di compressione e rigidità dinamica. Infine in rapporto alle tipologie di campioni considerati più promettenti sono state effettuate prove di riduzione di rumore di calpestio in laboratorio, di misure dello scorrimento viscoso e di valutazione dello smorzamento.

# CAPITOLO 1 BASI DI TEORIA VIBRATORIA

## 1.1 Introduzione alla Trasmissione Solida

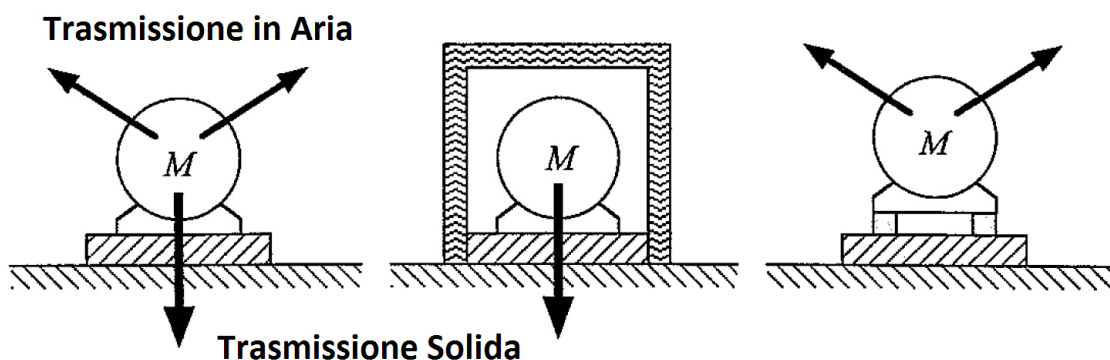
La maggior parte del suono che udiamo ha origine o si trasmette attraverso la vibrazione di corpi solidi. Tali vibrazioni sonore per essere percepibili all'orecchio umano devono avere frequenze comprese approssimativamente nel campo tra i 20 e i 20000 Hertz. Anche limitando lo studio all'analisi allo spettro udibile, la gamma di frequenze risulta molto ampia. L'indagine acustica degli edifici si occupa di un campo di frequenze ulteriormente ridotto, limitando il range di interesse ad un'estensione massima da 50 a 5000 Hz nel quale si procede normalmente con una indagine per bande di 1/3 ottava. Tuttavia la variabilità del campo sonoro rimane estremamente ricca dovuta l'abbondanza degli elementi e dei fenomeni che possono interessare la struttura. Si pensi alla moltitudine di possibili materiali impiegati nell'edilizia e loro eventuali combinazioni e al numero quasi illimitato di configurazioni strutturali possibili, senza contare la diversa natura delle forme d'onda che possono esistere nei solidi.



**Figura 1.1** Le quattro fasi principali del processo di acustica strutturale.

Molto spesso il controllo di suoni o di rumori comporta la conoscenza, e a sua volta il controllo, di fenomeni vibrazionali che li generano. Impianti di ventilazione, impianti di sollevamento e rumore di calpestio possono essere considerati sorgenti di vibrazioni che trasferiscono energia oscillatoria ad una struttura, sono esempi di trasmissione solida. Qualunque propagazione di onde sonore in aria possono raggiungerci ed essere sentite, senza che vi sia differenza che il suono derivi da una trasmissione in aria o sia passato da una trasmissione solida. Tuttavia effettuare un distinguo tra le due forme di trasmissione è importante, devono infatti essere impiegate forme diverse per limitare la propagazione del suono. A differenza dei suoni trasmessi per via aerea, i quali interessano in genere solo i locali adiacenti, i suoni trasmessi per via solida possono produrre effetti in termini di rumorosità ambientali indotta anche lontano dalla sorgente. Tale aspetto ricopre particolare importanza nelle aree interne degli edifici o limitrofe ad esso ove vengano installate macchine o componenti rumorosi dell'impianto.

Questi fenomeni possono essere controllati solo interrompendo opportunamente il percorso delle vibrazioni, ad esempio mediante l'inserimento di strati resilienti, disaccoppiando i macchinari soggetti a forze vibratorie dalla struttura di supporto.

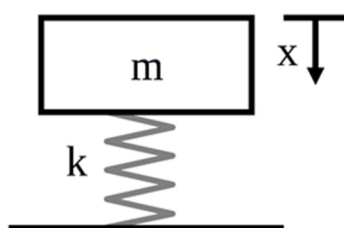


**Figura 1.2.** Diverse forme di trasmissione delle vibrazioni.

L'impiego di supporti elastici è prassi ingegneristica nota quale mezzo per limitare la trasmissione diretta strutturale di vibrazioni tra i macchinari o componenti d'impianto e le strutture dell'edificio. Si possono così eliminare i pericoli connessi con gravose sollecitazioni per i macchinari e si riduce la possibilità di elevata rumorosità ambientale indotta per emissione secondaria di trasmissione vibratoria per via strutturale.

## 1.2 Dinamica del sistema Massa – Molla

L'utilizzo di supporti elastici per il disaccoppiamento di elementi soggetti a forze vibratorie dalla struttura di supporto o viceversa, è una prassi impiantistica nota e largamente utilizzata al fine di consentire una sostanziale riduzione della sollecitazione trasmessa. Procedendo in modo ingegneristico con lo scopo di presentare il problema della gestione delle sollecitazioni trasmesse, introducendo solo dove necessario modelli più complessi, con l'obiettivo di comprenderne e migliorarne le scelte risolutive. Si propone inizialmente di analizzare la più semplice schematizzazione possibile per un sistema vibrante, come il sistema ideale massa-molla. Si tratta di una soluzione lineare ad un solo grado di libertà, che può essere schematizzato come in figura.

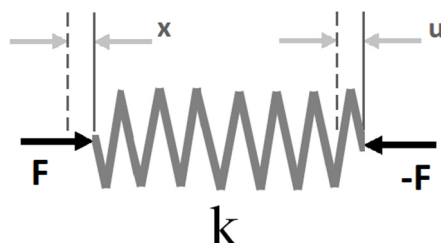


**Figura 1.3** Sistema ad un grado di libertà massa-molla.

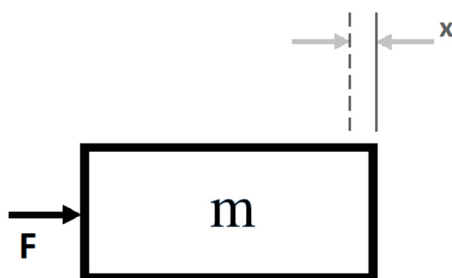
I due parametri che compongono il sistema sono:

Una molla lineare cambia la propria lunghezza caratteristica proporzionalmente alla forza alla quale viene sottoposta. Secondo la legge di Hooke  $F = -k(x - u)$ , la molla ideale è considerata priva di massa. Inoltre la forza applicata ad un estremo, per il principio di azione

reazione, è equivalente ed opposta al valore messo in gioco all'altro capo. La costante di proporzionalità  $k$  rappresenta la costante della molla o rigidità.



**Figura 1.4** Molla lineare.



**Figura 1.5** Massa rigida.

La massa è idealmente un corpo rigido, che interessato da una forza  $F$  per la seconda legge di Newton risponde con una accelerazione  $\ddot{x}$  secondo la legge  $F = m\ddot{x}$ .

Così come presentato, il sistema vibrante si compone di una massa  $m$ , espressa in  $[kg]$ , agganciata ad una molla di costante elastica  $k [N/m]$ , vincolata ad un supporto. La massa è libera di oscillare lungo la sola componente  $X$ , come sistema ad un solo grado di libertà, al cui spostamento sarà dunque legato un singolo valore di spostamento  $x$ . Se la massa viene spostata dalla posizione di equilibrio e successivamente lasciata libera di oscillare senza che vi siano forze esterne che la disturbino, si parlerà di oscillazione libera. Nel caso in cui invece la massa sia ancora soggetta a forze esterne allora parleremo di oscillazione forzata.

Considerando il sistema massa molla ideale, in assenza di un elemento smorzatore, che verrà introdotto successivamente, non vi sono dissipazioni di energia, in accordo con le equazioni di Newton. Per il caso di oscillazione libera, l'equazione del moto può essere scritta come:

$$m\ddot{x} + kx = 0 ,$$

dove la posizione a  $x = 0$  è definita come la posizione di equilibrio della massa.

Le soluzioni all'equazione precedente sono:

$$x = C_1 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + C_2 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right).$$

Che si possono riscrivere come:

$$x = C_1 \sin(\omega_n t) + C_2 \cos(\omega_n t) = C \sin(\omega_n t + \varphi),$$

dove:

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad e \quad \varphi = \tan^{-1}(C_2/C_1),$$

$\varphi$  che prende il nome di angolo di fase, mentre il termine  $\sqrt{k/m}$  è la pulsazione naturale angolare definita come:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [rad/s].$$

È importante constatare che quando, a massa  $m$  costante, aumenta  $k$  aumenta anche la frequenza di risonanza, mentre se, per  $k$  costante, aumenta la massa  $m$  la frequenza di risonanza diminuisce.

Si ha dunque una oscillazione sinusoidale della massa, che si ripete idealmente, per il sistema massa molla in cui il tempo intercorso per completare un ciclo prende il nome di periodo:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad [s].$$

Per effetto della forza peso, la molla subisce una contrazione di valore  $\delta_{st}$  dei supporti, che potrà essere ricavato semplicemente da:

$$\delta_{st} = \frac{mg}{k} \quad [m],$$

dove  $mg$  è la forza peso del corpo rigido. Il termine  $\delta_{st}$  prende il nome di deflessione statica.

A sua volta la frequenza naturale può essere facilmente collegata con la deformazione statica  $\delta_{st}$  infatti:

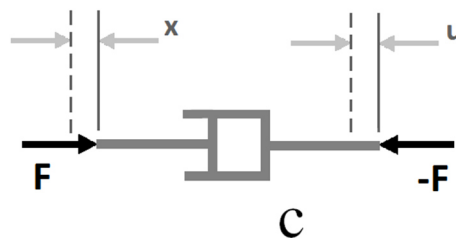
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{mg}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \approx 0.5 \sqrt{\frac{1}{\delta_{st}}} \quad [Hz].$$

Tale relazione può essere applicata solo quando il sistema considerato è contemporaneamente lineare ed elastico.

### 1.3 Descrizione e Meccanica dello Smorzamento

Per approssimarsi maggiormente al comportamento reale di un sistema vibrante è ora opportuno passare alla descrizione di un modello più complesso che consideri anche la presenza di un elemento smorzatore. Nel sistema così costituito si andrà ora ad accumulare energia potenziale nell'elemento molla, e immagazzinare energia cinetica nell'elemento massa o inerzia, dove la vibrazione nel sistema comporterà il passaggio continuo tra energia cinetica e potenziale. Se il sistema ora analizzato è smorzato, una quota parte di questa energia sarà dissipata in ogni ciclo di vibrazione nell'elemento dissipativo smorzatore.

Si ricorda come, per un elemento elastico, la costante  $k$  rappresenti il rapporto tra la forza impressa e la conseguente deflessione, mentre il coefficiente di smorzamento  $c$  rappresenti il rapporto tra la forza resiliente al moto e la velocità del movimento stesso: lo smorzamento nei supporti in gomma o elastomero speciale può derivare dalla dissipazione di energia meccanica che ha luogo nel materiale stesso per effetto del moto vibratorio.

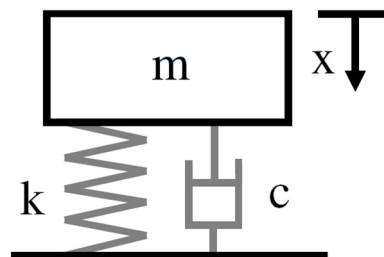


**Figura 1.6** Smorzatore viscoso.

In uno smorzatore viscoso la forza applicata è proporzionale alla velocità relativa nei punti di collegamento con:

$$F = c (\dot{x} - \dot{u}) \quad [N],$$

dove la costante  $c$  prende il nome di coefficiente di smorzamento, ed è il parametro caratteristico dello smorzatore. Lo smorzatore ideale è considerato privo di massa ed anche in questo caso, per la terza legge di Newton, la forza risultante agli estremi è uguale ed opposta.



**Figura1.6** Schematizzazione considerata in cui i valori dei parametri  $k$  e  $c$  del sistema ad un grado di libertà sono assunti costanti.

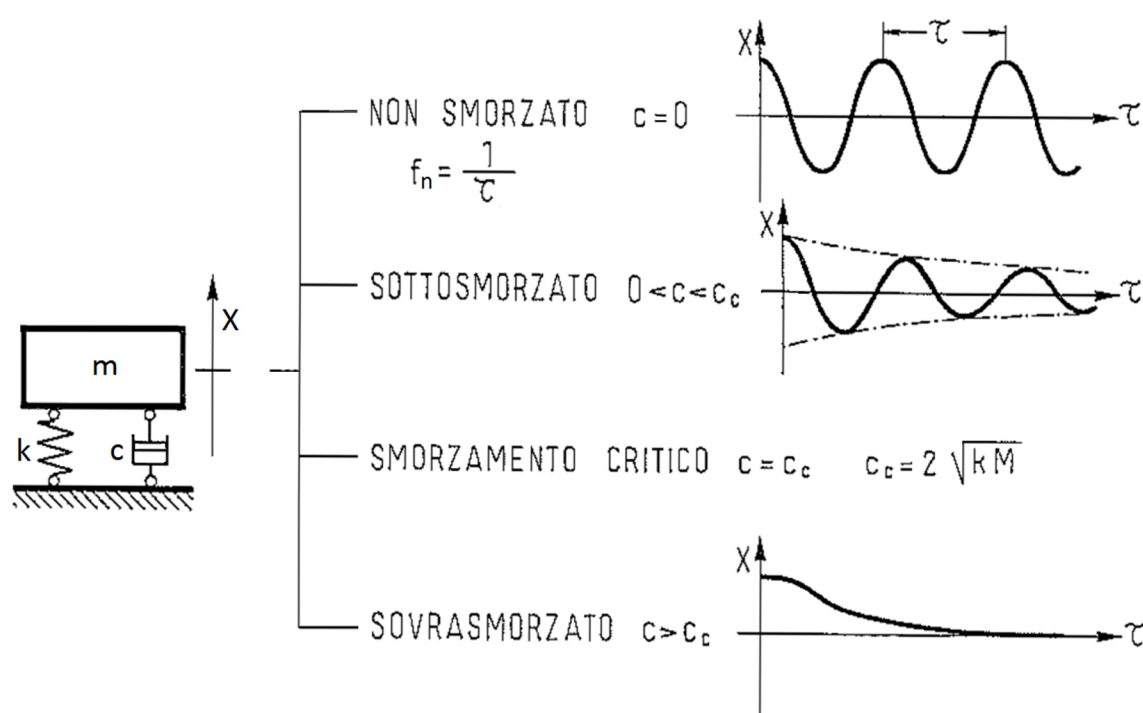
Lo smorzamento si manifesta come una resistenza, è quindi possibile valutare il sistema massa-molla-smorzatore dove molla e smorzatore sono il parallelo. L'equazione differenziale associata al moto della massa  $m$  nel caso di oscillazione libera per un sistema ad un solo grado di libertà sarà:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0,$$

dove la costante di proporzionalità  $c$  è, come anticipato, la costante di smorzamento e si esprime in  $[kg/s]$ .

È usuale definire lo smorzamento del sistema in termini relativi rispetto ai valori dello smorzamento critico, attraverso il rapporto  $\xi = c/c_c$  definito come fattore di smorzamento, dove lo smorzamento critico viene espresso attraverso la relazione:

$$c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n.$$



**Figura 1.7** Oscillazioni libere di un sistema massa-molla-smorzatore ad un grado di libertà.

La forma delle soluzioni dell'equazione dipende dal valore dello smorzamento in relazione allo smorzamento critico:

- Non smorzato

in assenza di smorzamento  $c = 0$ , come precedentemente presentato, la massa oscilla attorno alla posizione di equilibrio con moto armonico puro di frequenza:

$$f_n = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Tale frequenza è chiamata la frequenza naturale del sistema; il valore della frequenza naturale è univocamente legato alla deflessione statica:

$$\sigma_{st} = \frac{mg}{k} \quad [m].$$

- Sotto smorzato

Se lo smorzamento del sistema è inferiore allo smorzamento critico allora la soluzione dell'equazione differenziale è:

$$x = C e^{-ct/2m} \sin(\omega_d t + \varphi),$$

dove  $\omega_d$  è la pulsazione naturale smorzata, che si lega alla pulsazione naturale con la relazione:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad [rad/s].$$

In presenza di uno smorzamento modesto, la massa  $m$  si porta verso la posizione di equilibrio statico, passando ripetutamente per tale posizione, con moto vibratorio oscillante di ampiezza progressivamente decrescente.

- Smorzamento critico

Se lo smorzamento del sistema è pari allo smorzamento critico, con  $c = c_c$ , non c'è nessuna oscillazione e la soluzione dell'equazione vale:

$$x = (C_1 + C_2) e^{-ct/2m}.$$

- Sovra smorzato

Per valori di  $\xi > 1$  non vi è alcun movimento oscillatorio. Nel caso di spostamento dalla posizione di equilibrio il sistema tenderà lentamente alla posizione iniziale e la soluzione dell'equazione differenziale vale:

$$x = e^{-ct/2m} \left( C_1 e^{\omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} t} + C_2 e^{-\omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} t} \right).$$

In presenza di elevato smorzamento la massa  $m$  si porta verso la posizione di equilibrio con moto asintotico senza mai passare la posizione di equilibrio.



## CAPITOLO 2 ISOLAMENTO VIBRAZIONI

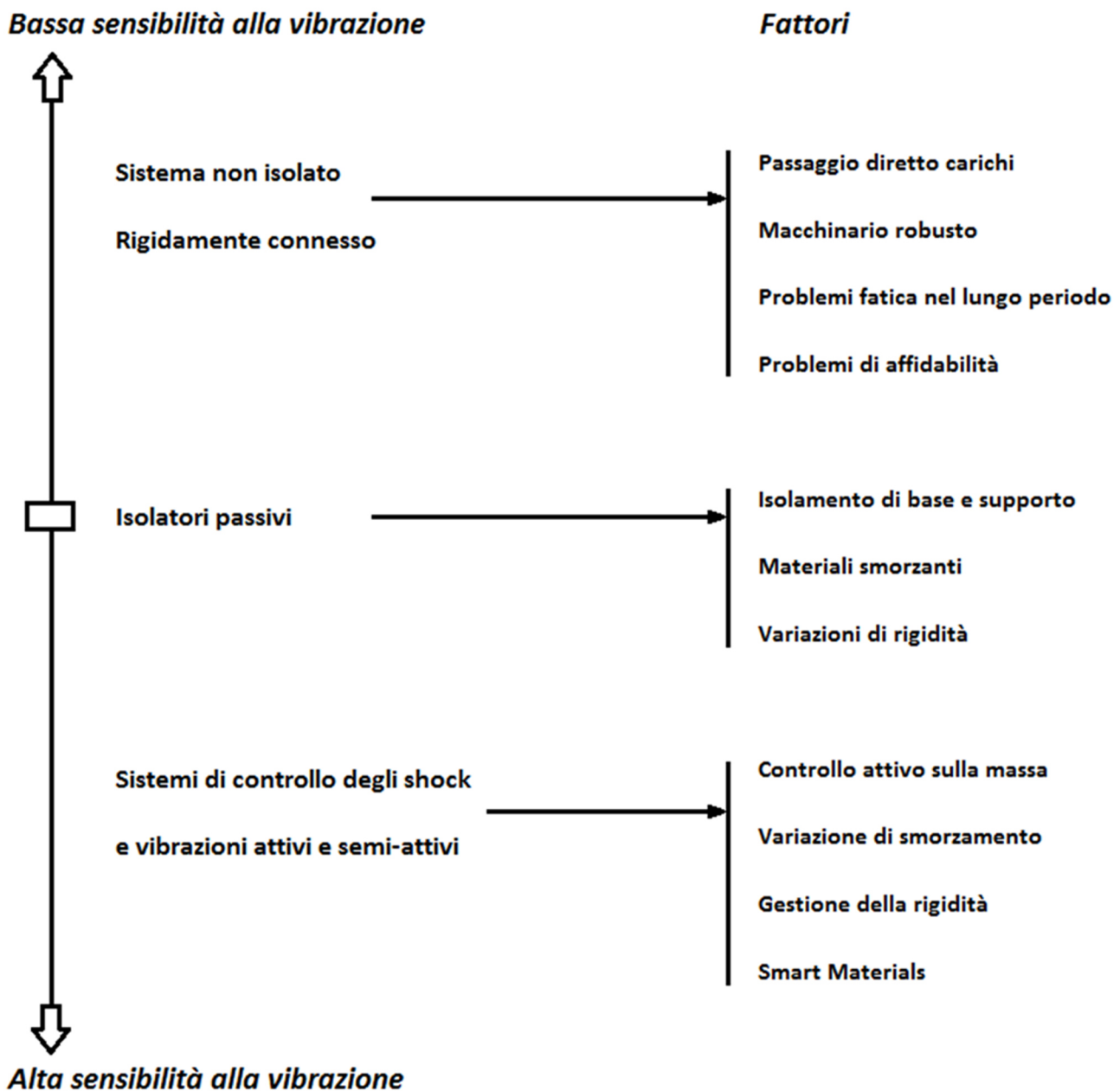
L'isolamento delle vibrazioni si riferisce all'impiego di supporti elastici con l'obiettivo specifico di ridurre le forze di oscillazione o gli spostamenti che sono trasmessi da una struttura ad un elemento meccanico o viceversa. È prassi impiantistica largamente utilizzata, per conseguire una sostanziale riduzione di tali sollecitazioni trasmesse attraverso gli elementi di appoggio, l'impiego di supporti elastici per il disaccoppiamento di macchinari soggetti a forze vibratorie dalla struttura di base. È possibile così eliminare i rischi legati ai danni dovuti alle gravose sollecitazioni a fatica dei materiali e si riduce la possibilità di avere una elevata trasmissione vibratoria per via strutturale.

### 2.1 Isolamento struttura vibrante

La protezione dei macchinari e delle strutture dalle vibrazioni, e quindi il relativo isolamento, è una pratica che negli ultimi anni ha iniziato ad essere ritenuta sempre più importante tanto per il controllo delle basse frequenze di eccitazione per le macchine industriali, quanto per il miglioramento del comfort nelle strutture civili. Per conseguire tale risultato si ricorre all'utilizzo di sistemi isolanti dimensionati per la specifica applicazione, così da ridurre sostanzialmente l'intensità dello shock o vibrazione a cui il sistema in esame è sottoposto.

Dal punto di vista fisico, l'isolatore è sostanzialmente un filtro meccanico tra la sorgente e il ricevitore che riduce i carichi dinamici fino a valori accettabili per l'elemento ricevente, garantendo un certo margine di sicurezza. Gli isolatori per shock o vibrazioni ed i sistemi isolanti possono essere raggruppati secondo il loro modo di protezione utilizzato. Quelli di tipo passivo sono i più semplici e meno costosi, essendo liberi da necessità di elementi di controllo e con costi di manutenzione contenuti, sono costituiti da un singolo strato o da una semplice combinazione di strati accoppiati. Tali elementi si oppongono al trasferimento delle vibrazioni meccaniche tramite le loro proprietà fisiche, che consentono un trasferimento ridotto di spostamenti, velocità e accelerazioni. Per effettuare un controllo di tipo passivo l'isolatore dovrà andare a modificare la propria rigidità, che può avere comportamento lineare o non lineare, in funzione o meno del carico, la massa e lo smorzamento del sistema vibrante al fine di diminuire la risposta dinamica. Tali modifiche prendono concretamente forma in aggiunta di basi inerziali, elementi massivi quali ad esempio basamenti in calcestruzzo, e/o nell'inserimento di elementi come molle o smorzatori a fluido o nel nostro caso in gomma.

Vi sono poi gli isolatori semi-attivi e attivi, sistemi di controllo più sofisticati che richiedono sensori ed elementi di controllo con variazione di smorzamento e/o attenuatori di forza. Tale catena di controllo permette maggiore flessibilità dell'elemento di controllo a fronte di costi di manutenzione e di sistema decisamente maggiori.



**Figura 2.1** i diversi tipi di controllo dell'isolamento include sistemi rigidamente connessi, passivi, semi-attivi, attivi.

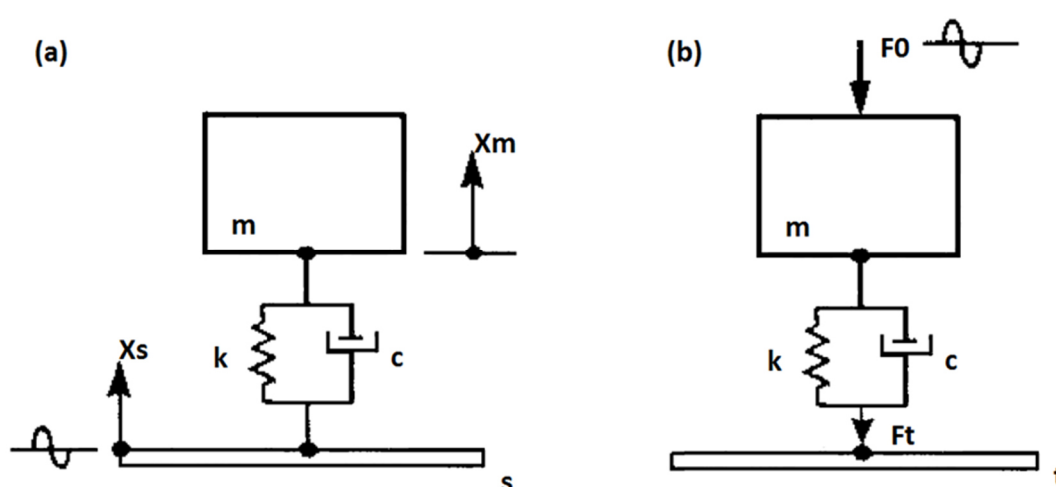
I materiali di cui ci occuperemo nel dettaglio in questa dissertazione, ovvero i materassini in gomma riciclata, sono degli isolatori di tipo passivo, la cui deformazione sotto carico è prevedibile e fornisce le caratteristiche di rigidità e di smorzamento del sistema massa-molla-smorzatore. La risposta è auto-generata in accordo alle caratteristiche proprie dello strato.

I sistemi di isolamento che verranno presentati e discussi nel corso di questo capitolo sono una combinazione ideale di elementi elastici e smorzanti, dove questi elementi, nei materiali resilienti, agiscono come deflettori e immagazzinatori di energia alle frequenze di risonanza

del sistema isolante. La performance dei sistemi isolanti può essere descritta in termini di massima risposta agli ingressi, dove essa, può essere presentata in termini di trasmissibilità.

## 2.2 Trasmissibilità e campo di isolamento

Attraverso l'isolamento da shock e vibrazioni si vogliono ridurre, tenuto conto dell'impossibilità di raggiungere una completa eliminazione, le forze di oscillazione o gli spostamenti che sono trasmessi all'elemento che si vuole proteggere. Per il sistema massa-molla-smorzatore sino ad ora trattato, composto da un elemento connesso, attraverso un sistema isolante, ad una fondazione infinitamente rigida, si vengono ora a presentare le due diverse situazioni fisiche in cui tale sistema può trovarsi nel caso sia interessato da un forzante esterna, come rappresentato in figura.



**Figura 2.2** (a) rappresenta isolamento finalizzato alla gestione della mobilità del supporto, viene classificata come classe di isolamento a, (b) Riduzione della forza originata dall'elemento caricato sulla struttura isolata.

Queste due situazioni, identificate attraverso le due classi (a) e (b), possono essere analizzate separatamente tenendo conto che sono funzione dell'elemento che il sistema isolante dovrà proteggere.

L'obiettivo della classe (a) è isolare i componenti montati dagli spostamenti e dalle vibrazioni provenienti dal supporto o dalla struttura. Nella figura (a) si assume che sia il supporto  $s$  ad oscillare verticalmente con un'ampiezza di  $X_s$  con una data frequenza. La funzione dell'isolatore sarà quella di mantenere lo spostamento della massa  $m$  entro valori ritenuti accettabili. Nel caso rappresentato nella figura (a) il rapporto tra lo spostamento della massa relativo allo spostamento del supporto  $s$  prende in nome di *Motion Transmissibility*.

$$T = \frac{X_m}{X_s}.$$

Per la classe (b) l'obiettivo è isolare la fondazione di supporto dall'elemento sede o tramite di generazione di oscillazioni vibratorie. Come riportato in figura (b), la schematizzazione più semplice si ha con una forza  $F_0$  agente con una data frequenza applicata esternamente alla massa  $m$ . Come detto in questo caso la funzione dell'isolatore o del sistema isolante sarà quello di contenere l'ampiezza della forza  $F_t$  trasmessa al supporto entro i limiti ricercati. Per gli isolatori di classe (b), il valore di interesse  $T_F$  viene semplicemente definito come Trasmissibilità. Tale grandezza adimensionale può essere espressa in termini di rapporto tra l'Ampiezza  $F_0$  della forza agente e la forza  $F_t$  trasmessa:

$$T_F = \frac{F_t}{F_0}.$$

Se per esempio sull'elemento viene applicata una forza o è egli stesso sede di generazione di forza, sarà importante conoscere quanta parte di questa forza verrà trasmessa alla fondazione. Nei capitoli precedenti ci siamo occupati della presentazione del modello massa-molla-smorzatore per oscillazioni libere. Andiamo dunque a presentare la risposta e le equazioni del modello massa-molla-smorzatore ad un grado di libertà nel caso di oscillazione forzata.

Come presentato, le forze in gioco possono essere alternativamente applicate dal sistema al supporto o viceversa. Tuttavia lo studio e l'utilizzo del prodotto è di fatto limitato all'isolamento della struttura dell'elemento disturbante, sia nel caso di isolamento di un macchinario vibrante attraverso un appoggio diretto sul prodotto, sia nel caso di riduzione del rumore di calpestio su un pavimento galleggiante.

Procedendo dunque nell'analisi di isolatori della classe (b), per il sistema massa-molla-smorzatore ad un solo grado di libertà, l'equazione differenziale associata al moto della massa nel caso di oscillazione forzata sarà:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t ,$$

Trovandoci in sistemi dotati di smorzamento, con  $c > 0$ , avremo uno sfasamento tra la forza applicata e lo spostamento generato. Le soluzioni dell'equazione differenziale possono essere scritte nella seguente formulazione:

$$\frac{x}{F_0/k} = \frac{\sin(\omega t - \theta)}{\sqrt{\left(1 - \omega^2/\omega_n^2\right)^2 + \left(2\xi\omega/\omega_n\right)^2}} = R_d \sin(\omega t - \theta) ,$$

dove:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{2\xi r}{1 - r^2} \right) ,$$

in cui per semplicità si è adottata la sostituzione:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} .$$

$R_d$  rappresenta il fattore di risposta adimensionale dato dal rapporto tra l'ampiezza dello spostamento vibratorio e il cedimento della molla generato dall'azione della forza  $F_0$  applicata

staticamente. Le forme delle soluzioni possono essere ricavate a seconda del campo di frequenza riportato, in funzione dell'elemento che ne è il principale responsabile:

$$x \cong \frac{F_0}{k} \sin \omega t \text{ per } \omega \ll \omega_n ,$$

campo in cui il sistema si può definire controllato dalla molla;

$$x = \frac{F_0}{2k\xi} \sin \left( \omega_n t + \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{F_0 \cos(\omega_n t)}{c\omega_n} \text{ per } \omega = \omega_n ,$$

sistema controllato dallo smorzatore;

$$x \cong \frac{\omega_n^2 F_0}{\omega^2 k} \sin(\omega t + \pi) = \frac{F_0}{m\omega^2} \sin \omega t \text{ per } \omega \gg \omega_n ,$$

sistema controllato in massa.

La risultante delle forze agenti sulla fondazione del sistema  $F_T$  può essere ricavata tramite la relazione:

$$F_T = c\dot{x} + kx .$$

Poiché le forze  $c\dot{x}$  e  $kx$  sono tra loro in quadratura, l'ampiezza della forza trasmessa è:

$$|F_T| = \sqrt{c^2 \dot{x}^2 + k^2 x^2} .$$

Il rapporto tra la forza trasmessa  $F_T$  e la forza applicata  $F_0$ , può essere espressa, come già anticipato, in funzione della trasmissibilità  $T$  come:

$$\frac{F_T}{F_0} = T \sin(\omega t - \varphi) ,$$

dove la trasmissibilità  $T$  e l'angolo di fase  $\varphi$  si ricavano rispettivamente come:

$$T = \sqrt{\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} ,$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\xi r^3}{1 - r^2 + 4\xi^2 r^2} .$$

Nelle figure 2.3 e 2.4 vengono riportati gli andamenti della Trasmissibilità  $T$  e dell'angolo di fase  $\varphi$ , in funzione della frequenza angolare per diversi valori di smorzamento. Il rapporto tra la rigidità e la massa influenza solamente la frequenza naturale del sistema, trasladando i grafici lungo l'asse delle ascisse, mentre il valore dello smorzamento influenza essenzialmente l'entità dell'amplificazione nella regione della risonanza ed il grado di isolamento.

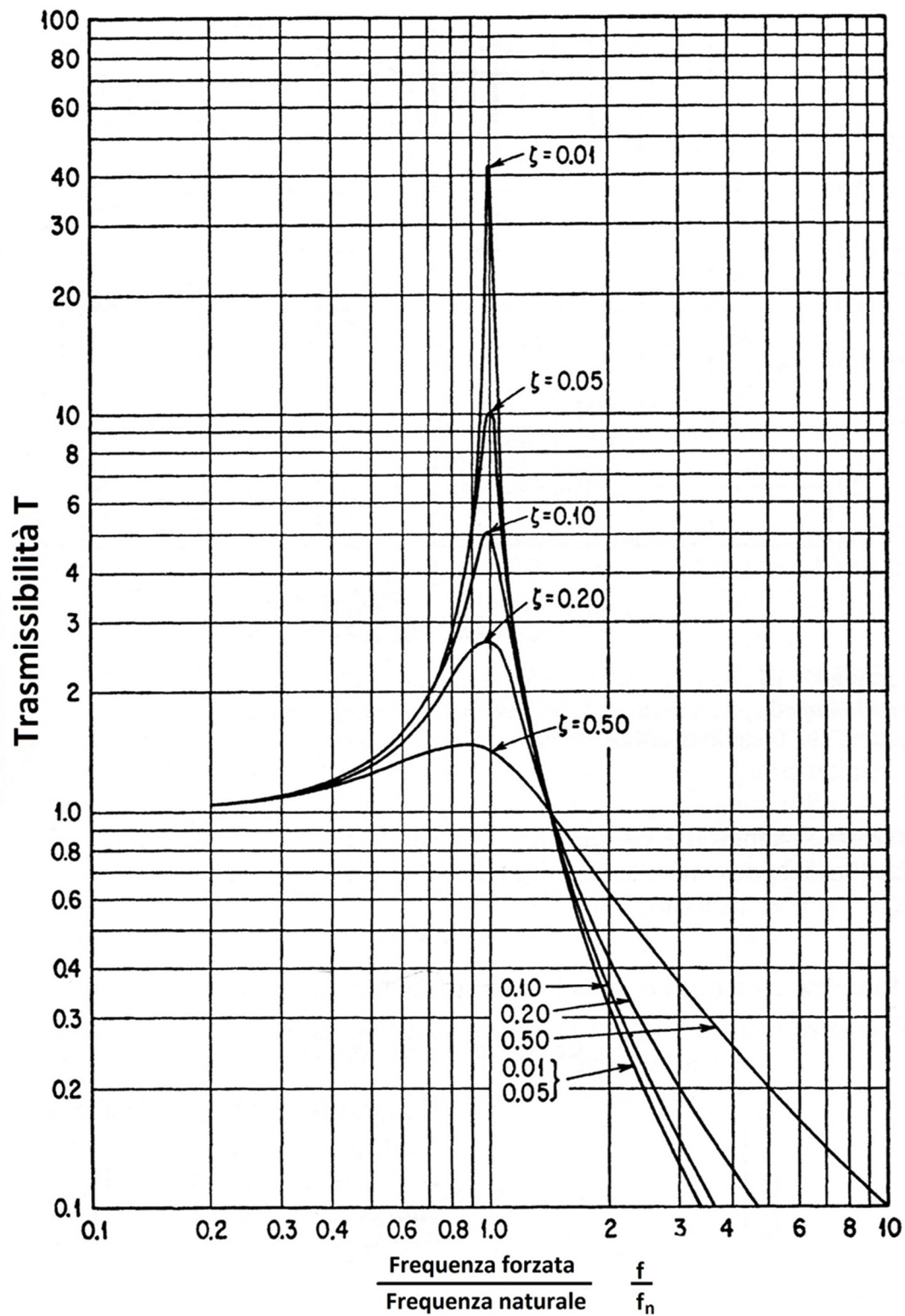
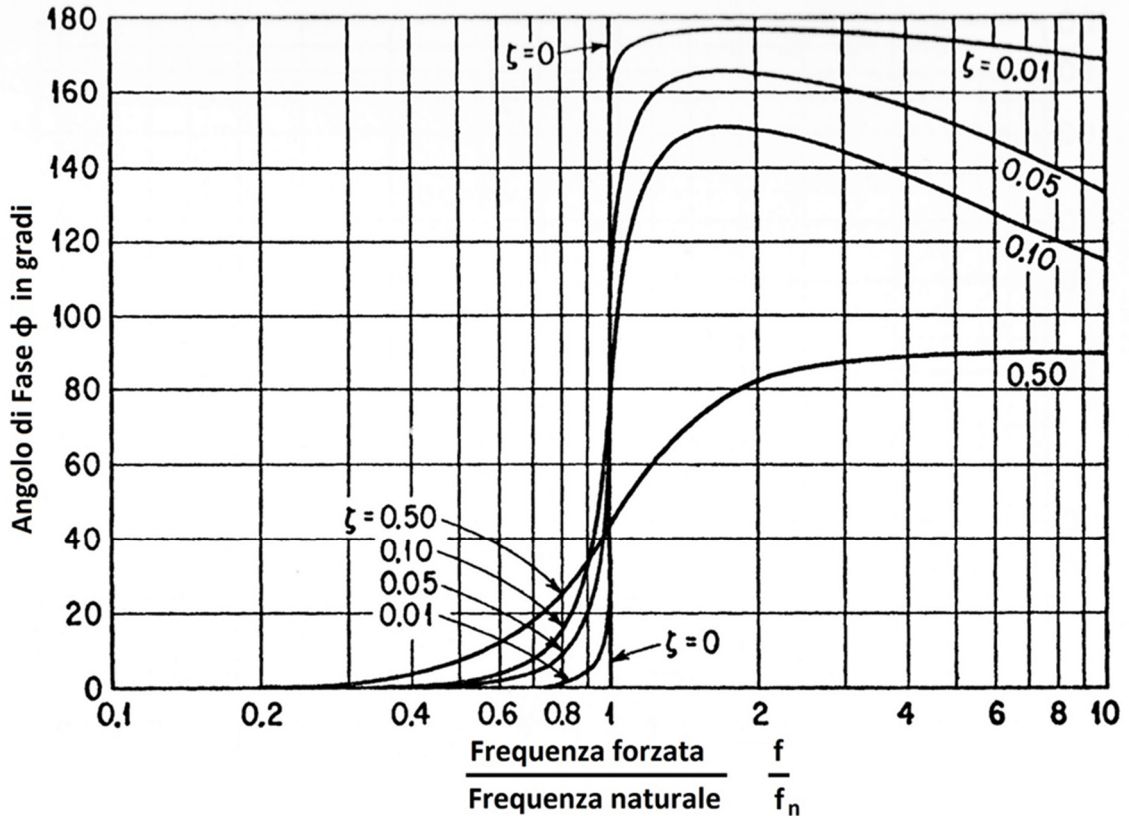


Figura 2.3 Trasmissibilità di un sistema del tipo massa-molla-smorzatore, riportato per diversi valori di smorzamento  $\zeta$ . L'andamento e il valore numerico è uguale sia per la Trasmissibilità relativa alla forza che alla *Motion Transmissibility*.



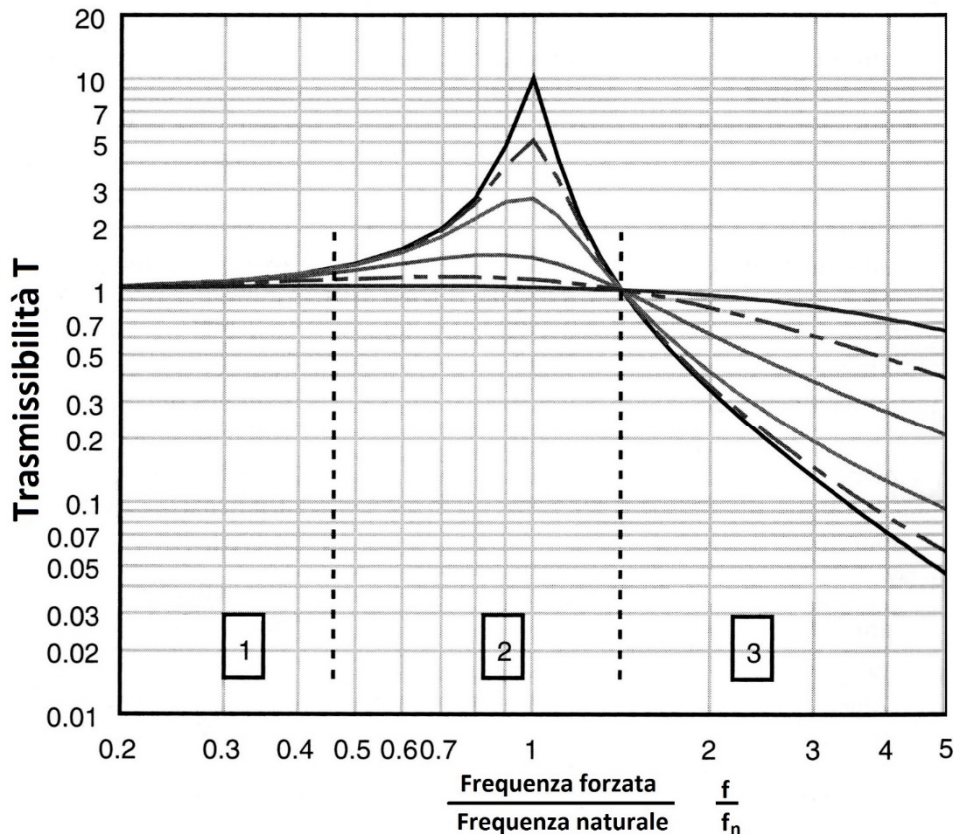
**Figura 2.4** Angolo di fase della Trasmissibilità (o della *Motion Transmissibility*) di un sistema del tipo massa-molla-smorzatore, riportato per diversi valori di smorzamento  $\xi$ , sotto l'eccitazione di una forza sulla massa del sistema o sotto la movimentazione della base.

Attraverso l'analisi numerica si può constatare che per valori di  $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$  la trasmissibilità non è mai inferiore a 1, mentre per valori di  $\omega \ll \omega_n$  l'ampiezza della forza trasmessa è circa uguale a quella di eccitazione. Solo per valori di  $\omega$  tali da avere  $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$  la forza trasmessa è minore di quella di eccitazione. A partire da queste considerazioni è possibile suddividere in tre principali aree il grafico della trasmissibilità di un sistema semplice massa-molla-smorzatore:

- La zona 1 rappresenta il campo in cui il rapporto tra le frequenze di eccitazione  $f$  e la frequenza di risonanza  $f_n$  è minore di 0.5. In questa zona il valore di  $T$  è compreso tra 1 e 1,5 in funzione dello smorzamento. Lo spostamento della massa isolata e della struttura di base sono sostanzialmente analoghi ed in fase a quello dell'elemento disturbante.
- Nella zona 2 in cui il rapporto è  $0.5 \leq f/f_n \leq \sqrt{2}$ , troveremo i massimi valori di  $T$ , raggiungendo il picco nelle condizioni di risonanza. Come precedentemente trattato, tale intervallo costituisce la regione in cui la risposta del sistema risulta quasi

univocamente determinata dallo smorzamento, la cui indagine sarà trattata nel paragrafo successivo.

- La zona 3 prende il nome di regione di isolamento, ha inizio per frequenze di eccitazione  $f > \sqrt{2}f_n$ ,  $T$ , è progressivamente sempre inferiore al valore unitario, ed anche in questo caso il grado di isolamento influenzerà la risposta del sistema.



**Figura 2.5** Trasmissibilità per il sistema massa-molla-smorzatore ad un grado di libertà, al calare dello smorzamento  $\xi$  cresce il picco di amplificazione alla frequenza di risonanza del sistema. Sono individuate le 3 principali aree di interesse.

La conseguenza pratica di questa analisi è che, per ridurre la trasmissibilità delle vibrazioni della macchina alla fondazione, il sistema isolante deve essere dimensionato in modo che la sua frequenza naturale di oscillazione sia molto inferiore alla frequenza a cui il sistema sarà eccitato. In particolare, come si può cogliere dal grafico, è necessario lavorare con valori del rapporto  $f/f_n > 3$ , affinché la trasmissibilità diventi significativamente minore di 1. In caso contrario alla fondazione possono venire trasmesse vibrazioni anche di notevole ampiezza.

Per esprimere la performance, quantificabile in termini di trasmissibilità assoluta e *motion response*, viene utilizzato il grado di isolamento, a volte rappresentato come il valore dall'efficienza  $I = 1 - T$ . L'efficacia dell'isolamento indica la riduzione della vibrazione disturbante in relazione a quella effettivamente trasmessa, venendo solitamente espressa in termini percentuali:



$$\text{Grado di isolamento } o I = \left( 1 - \sqrt{\frac{1 + (\eta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (\eta r)^2}} \right) \times 100 \quad [\%].$$

### 2.3 Influenza dello smorzamento per i sistemi rigidamente connessi

Come ormai appare chiaro, la natura e il grado di isolamento dalle vibrazioni che interessano un sistema sono influenzate dalle caratteristiche smorzanti dell'isolatore analizzato. Le considerazioni che seguono, vengono riportate per il sistema fino ad ora analizzato ad un grado di libertà attraverso la seguente semplificazione, ovvero, che l'elemento e la fondazione siano elementi rigidi e l'isolatore sia privo di massa. Per le basse frequenze, e contestualmente bassi valori del rapporto  $f/f_n$ , lo spostamento della massa isolata segue essenzialmente la sollecitazione del disturbo, consentendo a fondazione e massa di muoversi circa della stessa entità e fase, risultando sostanzialmente indipendenti all'effetto smorzante.

Con riferimento alla figura, nel campo di frequenza  $f/f_n < \sqrt{2}$ , campo di amplificazione, i valori del fattore di smorzamento prossimi all'unità riducono sensibilmente la trasmissibilità. Il massimo valore di trasmissibilità assoluta associata con condizioni di risonanza è funzione unicamente dello smorzamento del sistema, con riferimento alla condizione di smorzamento critico. Per sistemi a basso smorzamento, dove  $\xi < 0.1$  il massimo valore della trasmissibilità può essere espresso tramite la relazione:

$$T_{max} = \frac{1}{2\xi}.$$

Trovandoci ad operare invece nel campo di smorzamento delle oscillazioni disturbanti, per frequenze maggiori di  $\sqrt{2}f_n$  l'incremento dello smorzamento comporta un aumento della trasmissibilità. I supporti elastici risultano efficaci solo se la frequenza della forza vibratoria perturbante è maggiore di  $\sqrt{2}f_n$ , nel caso contrario andiamo incontro a fenomeni di amplificazione, con potenziali forze molto grandi trasmesse alla struttura che si vuole isolare. Sarà dunque fondamentale la scelta di un materiale che operi con frequenza naturale inferiore alla frequenza più bassa che si desidera isolare. Nella maggior parte dei casi, fortunatamente, può risultare piuttosto semplice ricavare tale valore minimo di frequenza, poiché la sollecitazione vibratoria è generata dall'azione di masse non bilanciate in moto rotatorio.

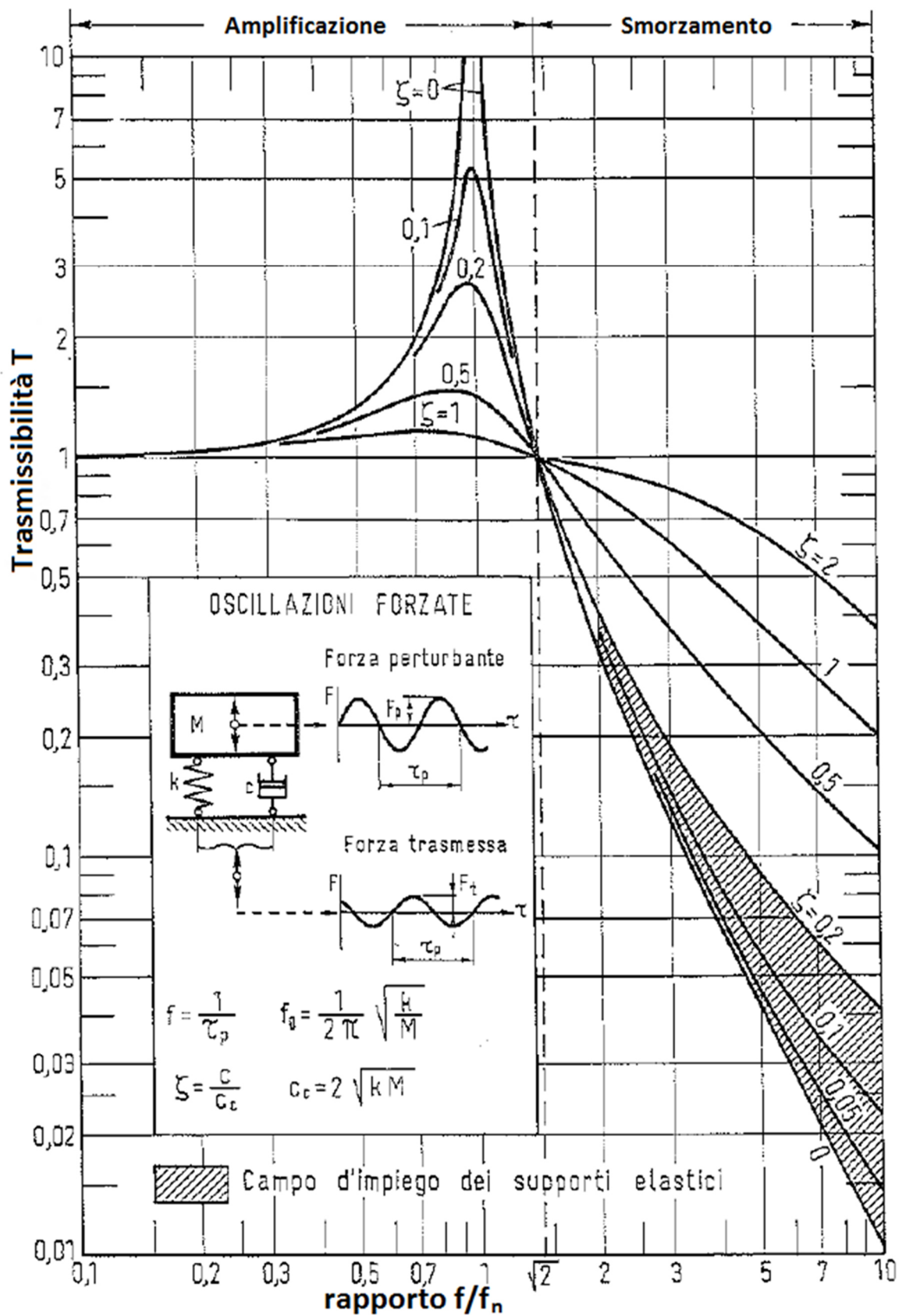


Figura 2.6 Transmissibilità per diversi valori di smorzamento  $\xi$ .  
Il campo d'impiego dei supporti elastici.

Un valore di smorzamento elevato come abbiamo visto introduce dei peggioramenti nelle prestazioni di isolamento, in quanto aumenta la trasmissibilità nel campo di impiego utile. Va tuttavia ricordato che una quota di smorzamento risulta indispensabile per ridurre i consistenti effetti di amplificazione che si possono manifestare intorno alla frequenza di risonanza. Questo è particolarmente vero, riprendendo il caso di una macchina rotante, durante le fasi di avviamento e spegnimento della macchina, in cui si avranno variazioni progressive di numero di giri, per cui si passa inevitabilmente attraverso la condizione di risonanza e conseguentemente nella zona interessata dal fenomeno dell'amplificazione.

Riassumendo quindi, incrementando lo smorzamento si riduce il valore massimo di trasmissibilità in risonanza ma si riduce l'efficacia di riduzione di isolamento in alta frequenza. La maggior parte degli isolatori passivi sono costruiti e dimensionati in funzione di questi due aspetti.

Negli isolatori reali lo smorzamento ha valori tipicamente molto ridotti  $\xi < 0.1$ . L'impiego di materiali con smorzamenti bassi, come riportato in diversi testi [19-21], è principalmente dovuto al fatto che nella pratica è molto raro incontrare sistemi smorzati con valori di smorzamento molto superiori a 0.2, salvo applicazioni specifiche nelle quali non sono tollerati alti valori di  $T_{max}$ , e per bassi valori di smorzamento si hanno piccole variazioni di trasmissibilità.

Sarà dunque opportuno lavorare nel campo riportato in figura 2.6, contenendo lo smorzamento a valori molto ridotti. Per tali valori, la trasmissibilità nel campo di isolamento ha variazione molto piccole da un sistema a smorzamento nullo, si può quindi approssimare la trasmissibilità in un range di valori:

$$T = T_{F0} = \frac{1}{|r^2 - 1|} \approx \left(\frac{f_n}{f}\right)^2,$$

dove tale espressione si applica per

$$r^2 = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 \gg 1.$$

## CAPITOLO 3 ISOLAMENTO CALPESTIO

Il modo più semplice per contenere il rumore da impatto e conseguire un buon isolamento del rumore di calpestio, consiste nell'interporre tra il pavimento e il solaio uno strato di materiale resiliente molto più soffice del pavimento stesso, per conseguire una sostanziale riduzione delle sollecitazioni trasmesse. Può risultare pratico e vantaggioso ricorrere ad una soluzione che comporti un completo disaccoppiamento tra la pavimentazione ed il solaio sottostante, tale configurazione prende il nome di pavimento galleggiante. Si tratta di superfici rigide calpestabili poggianti sul solaio della struttura attraverso l'interposizione di uno strato di materiale resiliente, in cui naturalmente, perché risulti efficace il disaccoppiamento vi deve essere separazione elastica anche lungo tutte le superfici laterali che lo delimitano. Tale strato, che consente la maggiore robustezza e praticabilità della superficie, ha l'effetto di modificare la forma della forza impulsiva e quindi la frazione di potenza meccanica trasmessa al pavimento.

Utilizzando dunque un basamento flottante posto su di un materassino resiliente è possibile dunque ridurre la possibilità di avere una elevata trasmissione vibratoria per via strutturale, andando a diminuire anche la rumorosità ambientale indotta per emissione secondaria. Si ricordi infatti che la trasmissione vibratoria per via solida può produrre effetti in termini di rumorosità ambientale indotta anche lontano dalla sorgente primaria.

### 3.1 Definizione e generazione del rumore di calpestio

Le vibrazioni meccaniche generate sulle strutture rigide, specialmente sui solai, da urti o sollecitazioni di varia natura sono in grado di trasmettersi, per via strutturale, da un ambiente all'altro. Tra tutte le possibili vibrazioni, la fonte più comune di suono d'impatto è costituita dallo scalpiccio sui pavimenti, tanto che il termine più utilizzato per definirlo, anche in ambito normativo, è appunto "rumore di calpestio". Nella realtà, qualunque sorgente, macchina, dispositivo o elettrodomestico che agisca meccanicamente sulla superficie di un pavimento, può produrre vibrazioni meccaniche di analoga natura impattiva.

Attraverso il livello del rumore di calpestio, è possibile esprimere la risposta acustica di un solaio. Come vedremo, in sede di misura viene impiegato, secondo normativa, un generatore specifico in grado di produrre una sollecitazione meccanicamente e dinamicamente ben definita, dunque si può ricorrere a leggi di previsione basate sulla teoria classica.

Analizzando il problema fisico, il rumore da calpestio si può assimilare alla eccitazione di una piastra mediante una sequenza periodica di forze impulsive. Tali forze sono rappresentabili mediante un infinito numero di componenti discrete in frequenza (serie di Fourier) di ampiezza  $F_n$ , date dalla relazione:

$$F_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \quad [N],$$

in cui  $f(t)$  è la funzione nel dominio del tempo del treno di impulsi,  $n = 1, 2, 3, \dots$  e  $T = 1/f$  è il periodo. Se l'impatto ha durata breve, come ad esempio una singola martellata sul

pavimento, l'ampiezza delle componenti relative  $F_n$  può essere approssimata mediante la relazione:

$$F_n \approx \frac{2m}{T} \sqrt{2gh} \quad [N],$$

in cui  $m$  è la massa del martello,  $h$  l'altezza di caduta e  $g$  l'accelerazione di gravità.

Possiamo dunque arrivare a ricavare il valore quadratico medio della forza agente sul solaio in bande di 1/3 d'ottava

$$F_{rms}^2 = \frac{4(2^{1/3} - 1)}{\sqrt{2^{1/3}}} f = 0.926 f \quad [N^2].$$

Da tali valori della forza così ricavati e dell'ammittanza puntuale del solaio, considerandolo come una piastra infinita equivalente, è possibile ricavare la potenza indotta dal generatore di rumore di calpestio su tale superficie. Nel caso sperimentale, mediante un bilancio di potenza incidente su un solaio irradiate, si può dimostrare che il livello di rumore di calpestio in bande di ottava risulta:

$$L_n \approx 10 \log_{10} \left( \frac{\rho_0 c \sigma_{rad}}{5.1 \rho_s^2 c_L \eta h^3} \right) + 120 \quad [dB],$$

in cui  $\rho_0$  è la densità dell'aria [ $kg/m^3$ ],  $c$  la velocità del suono in aria [ $m/s$ ],  $\sigma_{rad}$  il fattore di radiazione del solaio,  $\rho_s$  la densità del solaio [ $kg/m^3$ ],  $c_L$  la velocità delle onde longitudinali del solaio [ $m/s$ ],  $\eta$  il fattore di smorzamento globale ed  $h$  lo spessore del solaio [ $m$ ].

Tale relazione risulta tuttavia di scarso utilizzo pratico a causa della necessità di conoscere grandezze non di semplice determinazione, ma fornisce alcune informazioni di interesse come ad esempio: il livello di potenza sonora irradiata diminuisce di 6 dB ad ogni raddoppio della densità del solaio e di 9 dB ad ogni raddoppio del suo spessore. Inoltre  $L_n$  diminuisce al crescere del fattore di perdita  $\eta$ .

### 3.2 Sistemi e basamenti per l'isolamento del rumore da calpestio

Uno dei principali metodi per incrementare l'isolamento del rumore di calpestio è la progettazione di un sistema a basamento flottante, nel quale il massetto viene separato dal solaio di base mediante l'interposizione di un materiale resiliente. Lo studio dell'entità della riduzione associata a questo tipo di materiali si fonda sull'ipotesi che l'impedenza dello strato superficiale sia inferiore a quella del substrato. Come ogni altro sistema elastico massa-molla, un pavimento galleggiante, posato su un solaio immaginato pesante e perfettamente rigido, è caratterizzato da una propria frequenza di risonanza:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad [Hz],$$

dove  $s'$  [ $N/mm^3$ ] è la rigidità dinamica apparente per unità di area dello strato resiliente e

$m'$  [kg/m<sup>2</sup>] la massa per unità di superficie del pavimento galleggiante.

La riduzione del livello normalizzato di rumore di calpestio, a livello teorico, è fortemente dipendente dalla rigidità dinamica dello strato resiliente. Il miglioramento si manifesta solitamente a valori di frequenza elevati, in particolare al di sopra di una frequenza propria  $f_n$  data da:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_m E}{m h}} = 0,006 \sqrt{\frac{E}{h}} \quad [\text{Hz}],$$

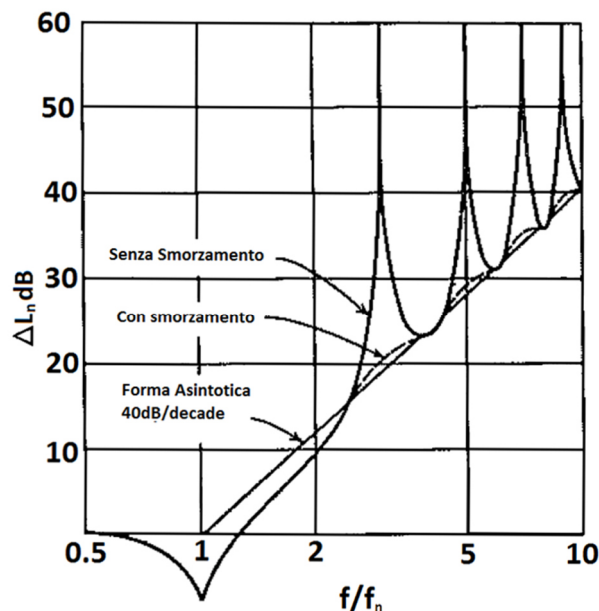
dove  $A_m$  [m<sup>2</sup>] è la superficie di impatto del martello della macchina normalizzata,  $E$  modulo elastico di Young [N/m] del materiale di rivestimento,  $m$  la massa del martello in kilogrammi,  $h$  lo spessore del rivestimento in metri.

Il miglioramento dell'isolamento raggiunto con l'aggiunta di uno strato resiliente può essere espressa attraverso il valore:

$$\Delta L_n = 20 \log_{10} \frac{F}{F'} = 20 \log_{10} \left( \left| \frac{1 - \frac{nf_r}{f_n}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} n \frac{f_r}{f_n}\right)} \right| \right) \quad [\text{dB}],$$

dove  $F$  ed  $F'$  sono rispettivamente la forza agenti sulla superficie in Newton rispettivamente al caso con e senza il materiale resiliente.

Tali considerazioni sono applicabili però a materiali teorici a smorzamento nullo. Le curve ricavate dunque, in condizioni di totale assenza di smorzamento, risulteranno valide solo per solai strutturali molto rigidi.



**Figura 3.1** Andamento teorico della riduzione di rumore di calpestio fornita da uno strato resiliente, in funzione del rapporto della frequenza disturbante sulla frequenza naturale del sistema in presenza o meno dello smorzamento.

Introducendo la presenza dello smorzamento vi è una attenuazione nei picchi, rendendo la funzione continua e assimilabile ad una retta. Per materiali reali, dunque per valutazioni pratiche, è possibile assumere che l'andamento dell'isolamento, raggiunto mediante l'inserimento di elementi resilienti, possa essere, come riportato in figura 3.1, crescente di  $40 \text{ dB/decade}$  nel campo di frequenza  $f/f_n > 1$ .

Come anticipato, prevedere l'impiego congiunto di un supporto elastico e di una base inerziale al fine di creare un pavimento galleggiante che consenta una sostanziale riduzione di tali sollecitazioni trasmesse attraverso gli elementi di appoggio, è una prassi ingegneristica molto utilizzata. I vantaggi di questa sono principalmente legati alla riduzione del rumore impattivo negli ambienti, rimanendo con una base di appoggio sostanzialmente rigida. È possibile caratterizzare il pavimento galleggiante in funzione della sua risposta di attenuazione, come proposto in diversi studi [18- bibA4]

#### *Pavimenti galleggianti localmente risonanti*

Un pavimento galleggiante in cui la forza impattiva venga trasmessa senza che vi sia riverberazione spaziale omogenea si dice localmente risonante. Le onde longitudinali risultano fortemente smorzate, lasciando che la trasmissione sia appunto localizzata nel punto di impatto con la pavimentazione. Nel caso di sollecitazioni impulsive di breve durata, come precedentemente trattato nella serie di Fourier, queste comportano una attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio pari a:

$$\Delta L_n = 20 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_n} \right)^2 \right] \approx 40 \log_{10}(r) \quad [dB].$$

#### *Pavimenti galleggianti a comportamento risonante*

Ci si riferisce a pavimenti galleggianti rigidi e poco smorzati su cui l'azione di forze impattive genera un campo di onde longitudinali omogeneo e riverberante. L'attenuazione del livello di pressione sonora cresce all'aumentare della frequenza di eccitazione e può essere approssimata dalla relazione:

$$\Delta L_n = 10 \log_{10} \left( \frac{2.3m'^2 \omega^3 \eta_s c_L h}{n' s^2} \right) \quad [dB],$$

dove  $m' [kg/m^2]$  la massa per unità di superficie del pavimento galleggiante,  $\omega$  è la pulsazione associata alla frequenza disturbante,  $\eta$  è lo smorzamento strutturale associato alla pavimentazione galleggiante,  $c_L$  la velocità delle onde longitudinali del solaio  $[m/s]$ ,  $h$  è lo spessore del solaio in  $[m]$ ,  $n'$  rappresenta il numero degli strati resilienti applicati ed  $s [N/m]$  indica la rigidezza dello strato.

Tale relazione sottolinea come per questa tipologia di basamenti, a differenza di un pavimento galleggiante localmente risonante, l'andamento dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio può arrivare a crescere fino a  $30 \text{ dB/decade}$  quando il valore del *loss factor*,  $\eta$ , risulta indipendente dalla frequenza. Come verrà analizzato in seguito, il valore di tale coefficiente viene associato normalmente allo smorzamento complessivo del sistema e non al solo smorzamento viscoso dello strato resiliente.

### 3.3 Metodi di calcolo normati

In accordo con le norme, UNI EN ISO 10140:1 [7], UNI EN ISO 10140:5 [10] e UNI EN ISO 717:2 [4], l'attenuazione,  $\Delta L$ , del livello di pressione sonora di calpestio, che esprime il miglioramento dell'isolamento del rumore di calpestio per sistemi a pavimento galleggiante sottoposto a prova, è indipendente dal livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio nudo,  $L_{n,0}$ . Tuttavia al fine di una corretta valutazione degli indici dei livelli di pressione sonora di calpestio normalizzato, confrontabile tra i diversi laboratori, risulta opportuno ricavare un valore di  $\Delta L_w$  da un solaio di riferimento.

Secondo la procedura presente nella UNI EN ISO 717:2 [4] i valori di riduzione in frequenza misurati sul solaio di laboratorio vanno sottratti ai livelli di rumore di calpestio di un solaio nudo di riferimento, il cui indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato è di 78 dB. In questo modo è possibile ottenere i livelli di rumore riferiti al solaio ideale su cui è applicato l'effetto dell'isolamento reale ottenuto dalle misure in laboratorio.

Si può dunque calcolare l'indice di attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L_w$  secondo la relazione:

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

in cui  $L_{n,r,w}$  è l'indice di valutazione del livello di pressione sonora.

Tale procedura consente di migliorare la qualità della stima dei materiali, consentendo il confronto dei test effettuati su solai di base con differenti caratteristiche acustiche tra i diversi laboratori.

Il calcolo dell'indice di valutazione del livello normalizzato di rumore di calpestio,  $L_n$ , è basato sul confronto con un'apposita curva di ponderazione, anch'essa legata alla sensibilità media dell'orecchio umano e anch'essa operante tra 100 Hz e 3150 Hz.

Per valutare i risultati della misurazione in bande di 1/3 d'ottava, si fa slittare, con incrementi di 1 dB, la curva di riferimento appropriata verso la curva ottenuta dalle misurazioni fino a quando la somma degli scarti favorevoli diventa quanto più grande possibile, ma non maggiore di 32.0 dB. Viene generato uno scarto sfavorevole per una data frequenza quando il risultato della misurazione è superiore al valore di riferimento. Il valore della curva di riferimento a 500 Hz una volta ottenuta la traslazione corretta è l'indice del livello del rumore di calpestio.



# CAPITOLO 4 SOLUZIONE SAGOMATA: SPERIMENTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE

## 4.1 Introduzione ai materassini in gomma riciclata

Dotate di buone proprietà fisiche e meccaniche unite alla facilità di trasformazione e da costi relativamente contenuti, le materie plastiche hanno trovato negli ultimi decenni sempre maggiori possibilità di applicazione. Questa loro ampia e repentina diffusione tuttavia, combinata con una vita mediamente breve per la maggior parte delle loro applicazioni, comporta che tali materie siano in maniera sempre più rilevante uno dei principali elementi a generare rifiuti. Si vuole così sottolineare l'importanza di ricercare soluzioni ottimali per il loro riciclo.

Una materia plastica è essenzialmente costituita da polimeri ottenuti da monomeri in genere derivati del petrolio per via sintetica. A partire da un singolo tipo di monomero si possono ottenere diversi polimeri con proprietà e strutture molecolari anche molto differenti, senza contare che diversi tipi di monomero possono in certe condizioni reagire tra loro formando macromolecole dette copolimeri. A loro volta tali macromolecole si possono comporre di diversi monomeri con percentuali differenti e legati tra loro con diverso ordine sequenziale, ad esempio SBR, questa versatilità in termini di proprietà dei materiali elastomerici è una delle loro caratteristiche fondamentali.

Tra le diverse materie plastiche di riciclo, quella che ricopre maggiore interesse nel campo delle applicazioni antivibranti è la gomma, essa possiede infatti notevoli proprietà funzionali per tali applicazioni, come le notevoli capacità smorzanti unite ad una grande capacità di assorbimento di energia. Il comportamento risulta però dipendente dal tempo e dalla temperatura, rendendo l'isteresi del materiale particolarmente evidente e causa due fenomeni; da un lato lo scorrimento viscoso nel tempo, che come detto comporta un aumento nel tempo della deformazione sotto carico costante, e dall'altro il rilassamento delle tensioni, che comporta una diminuzione della tensione nel tempo sotto deformazione costante. La gomma è in grado di sopportare anche grandi deformazioni elastiche in modo reversibile e risulta molto flessibile e resistente agli urti. La deformazione sotto carico ha un comportamento fortemente non lineare, dopo una fase iniziale di buona linearità. La gomma può arrivare a sopportare grandi deformazioni elastiche, questa caratteristica è spesso nota come iper-elasticità, ed è anche un materiale con un comportamento visco-elastico, che presenta quindi una risposta elastica non appena è applicato un carico, tuttavia nel tempo si verifica un lento e continuo aumento della deformazione con gradienti sempre decrescenti. Quando viene rimosso il carico si ha una deformazione continuamente decrescente che segue ad un iniziale recupero elastico, proprietà che come vedremo risulterà molto importante per un materassino antivibrante.

Si ricordi che il comportamento della gomma è influenzato dalla velocità di carico e scarico, ossia quanto più tempo viene impiegato per ottenere il valore finale di tensione, tanto più grande è la corrispondente deformazione. In altri termini, il legame  $\sigma$ - $\epsilon$  di un elemento in gomma sotto l'azione di un carico applicato dipende non soltanto dalle variabili tensioni e

deformazione, ma anche dalla variabile tempo. Il comportamento di un materiale nel tempo può essere studiato considerando il *creep*, ovvero il rilassamento sotto carico o smorzamento viscoso nel tempo, una lenta e continua deformazione di un materiale sotto una tensione costante.

Si può dunque arrivare facilmente a comprendere come, per applicazioni in cui la costanza delle prestazioni del materiale risulti essenziale, nel caso specifico la produzione di materassino da utilizzare sotto massetto o come supporto diretto per macchinari vibranti, l'utilizzo della gomma riciclata permette di gestire molto bene la degradazione di tali prestazioni nel tempo. Una buona parte di questa gomma viene ottenuta dal riciclo degli pneumatici stradali, quindi si tratta di un materiale che ha già subito e/o lavorato in condizioni gravose, sia sotto l'aspetto termico che di sollecitazione ed esposizione alle radiazioni. Si può dunque trattare con buona approssimazione come un materiale stabile, che a differenza di materiali vergini non andrà incontro a fenomeni evidenti di invecchiamento.

#### *4.1.1 Mescole di gomme provate per la realizzazione del materassino*

La mancanza di informazioni specifiche e pregresse sulle combinazioni e caratteristiche di mescole, necessarie a massimizzare la resa di un materassino con geometria sagomata, ha portato all'esigenza di realizzare una sperimentazione che sia in grado di ricavare informazioni specifiche che ne massimizzino le prestazioni. A tale proposito sono state svolte numerose prove su un'ampia gamma di campioni di diverse mescole e diverse geometrie, con l'intento di creare soluzioni che permettessero ad Isolgomma di ampliare il campo delle proposte offerte, con particolare riguardo ad applicazioni sotto massetto per carichi residenziali, industriali e per gestione di vibrazioni di macchine operative a basso peso specifico come ad esempio sono le UTA.

Il materiale riciclato utilizzato per la realizzazione di materassini elastomerici antivibranti è ottenuto principalmente da pneumatici fuori uso e sfridi di lavorazione dell'industria della gomma, attraverso un'operazione di raspatura o macinazione. Gli inerti impiegati sono costituiti maggiormente da mescole di Stirene e Butadiene, SBR, e mescole di etilene, propilene e diene, EPDM, tuttavia sono impiegati anche materiali espansi a cella aperta e materiali espansi a base vinilica.

Nella produzione dei campioni di materassini sagomati testati, i diversi pannelli prodotti sono stati realizzati tramite un procedimento non ancora industrializzato/automatizzato e sono stati utilizzati inerti elastomerici legati a caldo a temperatura e pressione controllate con l'utilizzo di colle poliuretatiche. Sono stati così prodotti numerosi pannelli, composti sia da un'unica tipologia di inerte che da un mix delle tipologie, con gomme di diverse dimensioni, forme, densità e origine.



**Figura 4.1** Fibre di gomma utilizzate proveniente da diversi produttori, ottenuta principalmente da raspatura, si presenta con tipologie, densità e pezzatura differenti.





**Figura 4.2** Gomma in granuli di gomma o di inerti espansi.

#### **4.2 Geometria sagomata e linee guida di sviluppo**

La norma 11059 [11] ci consente di definire un materassino elastomerico, come un prodotto progettato e realizzato per smorzare vibrazioni che dovrà soddisfare alcuni requisiti quali: essere realizzato con spessore costante a “metro quadrato” ad esempio in pannelli; avere una dimensione, spessore, significativamente minore delle altre due, longitudinale  $dl$  e trasversale  $dt$ , con

$$\sqrt{\frac{dl dt}{\pi}} \geq 10 ;$$

Per tale tipologia di prodotti, i carichi in esercizio dovranno essere applicati alla superficie maggiore e prevalentemente in direzione ortogonale ad essa. Il materassino potrà essere realizzato anche in più strati differenti per spessore e materiale, presentandosi con impronte, bugnature ecc., in relazione ad esigenze di produzione o per necessità connesse con l’esercizio e con le prestazioni conseguentemente richieste.

I prodotti dei quali ci occuperemo nel dettaglio in questa dissertazione, sono materassini realizzati con granuli o codini, in gomma riciclata, assemblati con resine a base poliuretanica. Si tratta di isolatori di tipo passivo, la cui deformazione sotto carico è prevedibile e fornisce le caratteristiche di rigidità e di smorzamento del sistema in accordo alle caratteristiche proprie del materassino. Al fine di ottenere strati resilienti dotati di bassa frequenza naturale e conseguentemente alte prestazioni isolanti, la letteratura propone di operare principalmente sulla modifica delle condizioni al contorno, modificando la geometria e le proprietà dell'isolante, aggiungendo elementi massivi o nervature alla struttura. Tra queste, l'implementazione delle caratteristiche del materassino costituisce l'unica soluzione di interesse, nonché quella meno invasiva per la struttura.

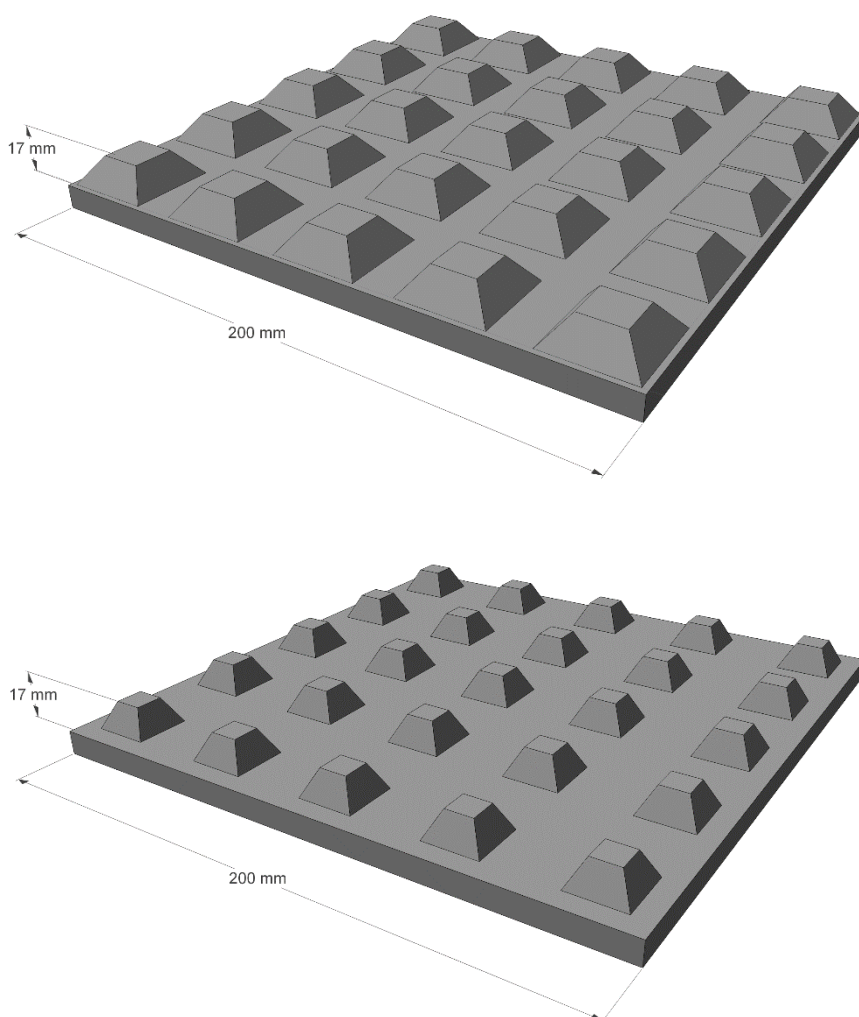
Sono stati condotti diversi studi su geometrie sagomate anche molto diversi tra loro, gli studi effettuati dal Prof. Cheng [30 31], per citarne alcuni, si occupano principalmente di soluzioni con sagomatura a fasci semicilindrici. Attraverso la sagomatura della superficie di appoggio è possibile modificare la rigidità e con essa anche le caratteristiche dinamiche. Con riferimento ad ulteriori pubblicazioni del Prof. Cheng insieme al Prof. Koopmann [32 33] si è valutata nel dettaglio come capacità di riduzione sonora di una struttura dotata di pavimento galleggiante sia influenzata anche dal modulo elastico, dal loro spessore e dall'area effettiva di contatto tra l'isolante e il solaio. La maggioranza dei lavori specifici sulla geometria sagomata presenti in letteratura, tuttavia sono principalmente volti all'analisi teorica della trasmissione e isolamento attraverso modellizzazione ad elementi finiti e non vengono accompagnati da prove di collaudo su elementi realmente prodotti. Sempre in questo verso sono state effettuate anche approfondite analisi numeriche [30 31 39] utilizzando il metodo a elementi finiti per ricercare l'ottimizzazione della geometria. Uno degli obiettivi più importanti delle tecniche di simulazione è quello di ottenere risultati che siano quanto più possibili vicini alla realtà, questo vale anche per le tecniche di ottimizzazione. Non va dimenticata la criticità nell'ottimizzazione di elementi in gomma, la maggior parte degli studi di questo aspetto, riguarda infatti materiali con comportamento lineare nel range dei carichi di esercizio, nei quali problemi principali sono l'introduzione dei carichi e delle condizioni al contorno. Per quanto riguarda la gomma, il processo di ottimizzazione è altamente influenzato dalle non linearità che ne descrivono il comportamento sia statico che dinamico e che possono portare alla non convergenza del problema od alla individuazione di una soluzione non efficace nell'uso pratico.

A tale proposito Isolgomma ha portato avanti negli anni, al suo interno, indagini specifiche nell'ambito dell'ottimizzazione geometrica di materassini sagomati soprattutto per applicazioni di tipo ferroviario. Le ricerche precedenti hanno evidenziato i limiti che possono essere raggiunti utilizzando materassini prismatici con sagoma piena e l'importanza della spaziatura degli appoggi per la gestione del problema del cedimento del campione nella zona compresa tra i diversi piedini. Tali importanti indagini di modellistica e successive prove pratiche per le valutazioni del comportamento reale per materassini sagomati, sono state effettuate da Giuseppe Montella durante la sua tesi di dottorato [27].

Il presente progetto intende dare corso a questo programma integrato di ricerca e di

sperimentazione, ed è destinato allo sviluppo di una nuova gamma di prodotti, in particolare materassini sagomati a base di elastomeri riciclati, da usarsi come materiale resiliente sotto pavimenti galleggianti o appoggio per macchinari vibranti. A tale proposito si è incentrato lo studio sulle prestazioni di due geometrie a forma piramidale presenti su una faccia del materassino, già oggetto di brevetto. I campioni di materiale prodotti utilizzando tali sagomature, vengono riportati attraverso la seguente modalità:

- Campioni prodotti con sagomatura tipo A, “piedino largo” A1, ..., A9;
- Campioni prodotti con sagomatura tipo B, “piedino piccolo” B1, ..., B21.



**Figura 4.3** Le due configurazioni geometriche del prodotto testato.

Partendo dalle informazioni fornite dalle analisi numeriche precedentemente effettuate, che dimostrano come la rigidità è funzione della dimensione degli appoggi, l'idea di base è quella di modificare tale superficie, ridistribuendo carichi superiori, su superfici inferiori attraverso una geometria adatta a ridurre in generale l'entità della vibrazione trasmessa.

Elemento non secondario nello studio è la fattibilità e industrializzazione del prodotto, che da un lato necessita di essere giustificata da un effettivo miglioramento delle prestazioni offerte da tale soluzione, dall'altro lato possa essere realmente prodotto su una linea di produzione. Per queste ragioni ci si è dovuti spesso confrontare col reparto direttivo, col reparto tecnico e reparto di produzione dell'azienda già in fase di produzione dei campioni. Oltre a necessarie considerazioni economiche sono sorti anche problemi di realizzazione tecnologica. Gli appoggi di dimensioni ridotte rappresentano infatti un problema per la distribuzione omogenea del materiale nella sagoma in fase di realizzazione del materassino. Per questa ragione si è deciso di ricorrere ad una combinazione elevata di mescole ed alla produzione di pannelli anche con differenze sensibili in termini di densità superficiale.

L'obiettivo primario della tesi è l'individuazione di una mescola ottimizzata, per una delle due sagomature in esame, che consenta una sostanziale riduzione della trasmissibilità rispetto a materassini pieni di analogo spessore, rispettando tutti i requisiti necessari all'impiego sia sotto massetto galleggiante che come supporto a macchinari vibranti. Nello specifico si vuole ottenere, attraverso l'implementazione della geometria, un materassino in gomma riciclata, dell'altezza di 17 mm, che consenta prestazioni di isolamento per valori di carico inferiori a 0,06 MPa tali da potere competere con prodotti elastomerici schiumati a bassa densità.

### **4.3 Caratterizzazione dei materiali resilienti**

#### *4.3.1 Comportamento a compressione e Modulo Elastico*

Tra le caratteristiche dei materassini resilienti oggetto di studio troviamo il modulo elastico, la valutazione di tale grandezza nel campo di linearità viene effettuata attraverso l'uso della UNI EN 826 [5]. Lo scopo di questa norma, applicabile a isolanti termici per l'edilizia, è definire una procedura specifica che deve essere utilizzata per determinare il comportamento a compressione dei prodotti testati ed evidenziare l'eventuale cedimento o l'irrigidimento del materassino all'aumentare del carico. Tale metodo normato permette di effettuare un controllo sulla qualità, per ottenere valori di riferimento dai quali si possano valutare i fattori di sicurezza per il design.

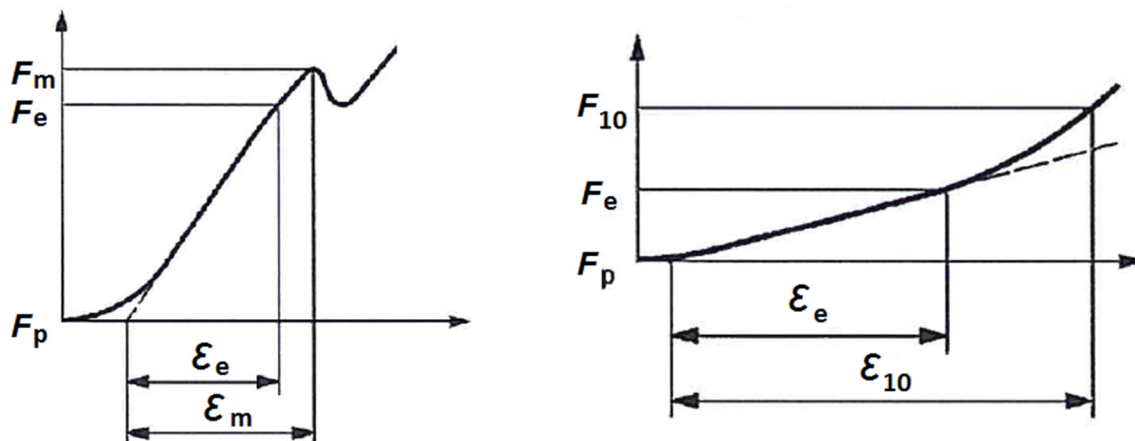
La norma prescrive che la forza di compressione venga applicata perpendicolarmente sulla superficie di maggior area di sezione quadrata del provino misurando l'andamento dei cedimenti in relazione al carico. Attraverso questa prova è possibile inoltre valutare lo stress massimo sopportato dal materiale.

Quando tale valore corrisponde a una deformazione inferiore al 10%, per tale sforzo di compressione viene ricavata la  $F_m$  applicata.

Quindi per effettuare il confronto delle caratteristiche elastiche dei materiali sarà importante valutare la resistenza a compressione definita come:

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A_0} \quad [kPa],$$

in cui  $A_0 [mm^2]$  è l'area iniziale del provino ed  $F_m [N]$  è la forza massima, qualora, come detto, il cedimento del materiale sopraggiunga prima di una deformazione del 10%.



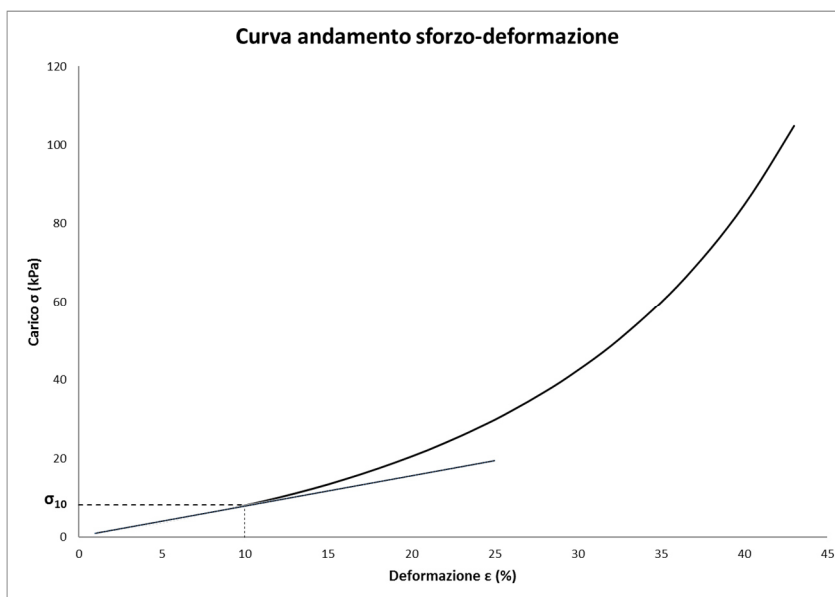
**Figura 4.4** Possibili andamenti della curva stress-cedimento.

Se invece tale valore di deformazione viene superato, senza che ci siano cedimenti o rotture, viene stabilito, come riferimento per il valore di sollecitazione a compressione al 10% di deformazione relativa, l'entità dello stress attraverso la relazione:

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0} \quad [kPa],$$

in cui  $F_{10}$  è il valore della forza corrispondente ad una deformazione relativa del 10%.

I risultati ottenuti per i materassini sagomati in gomma analizzati, che era lecito aspettarsi rientrano nella seconda categoria, andando incontro principalmente a fenomeni di irrigidimento più o meno marcato all'aumentare del carico cui vengono sottoposti, possono essere utilizzati per la definizione del carico in fase di studio del comportamento allo scorrimento viscoso dei materiali.



**Figura 4.5** Esempio di risultato di una prova di compressione per il campione B2.



Viene riportata in figura 4.5 la una curva sforzo-deformazione che può essere ricavata secondo la normativa di riferimento utilizzata. Il comportamento a compressione dopo una fase iniziale lineare normalmente fino a deformazioni di poco superiori al 10%, inizia un progressivo irrigidimento.

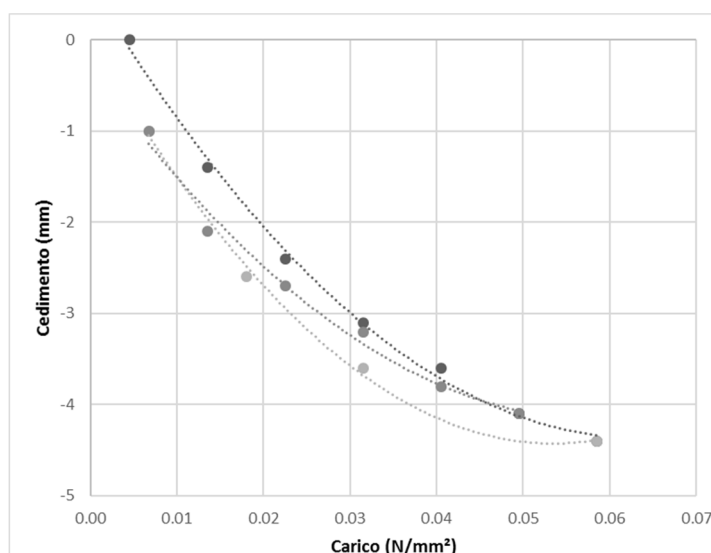
Una volta ricavato l'andamento della deformazione del materassino al carico, la norma prescrive di ricavare il modulo elastico di compressione utilizzando la formula:

$$E = \sigma_e \frac{d_0}{X_e} \quad [kPa],$$

dove:

$$\sigma_e = 10^3 \frac{F_e}{A_0} \quad [kPa].$$

Al fine di valutare il massimo carico di lavoro dal materiale, definito a livello internazionale come *traffic load*, si è deciso di ricorrere alla norma DIN 18134 [note]. Tale norma, prevedendo di sottoporre il materiale a più cicli di carico, è in grado di individuare, tramite il metodo proposto, un intervallo di carico adatto alle proprietà del prodotto in funzione del cedimento ricavato.

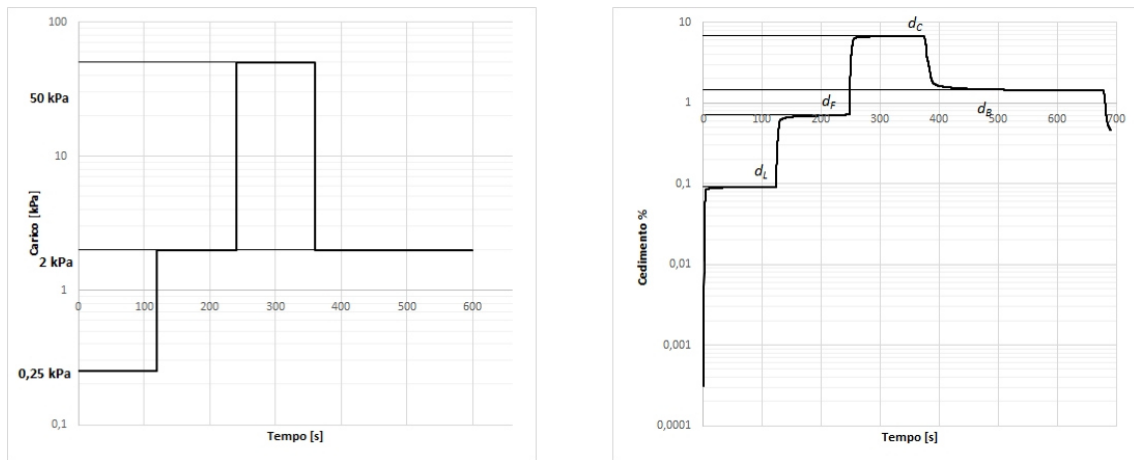


**Figura 4.6** Andamento al carico secondo la procedura descritta norma DIN 18134.

Per questo tipo di materassini, il *traffic load* viene ricavato tramite il valore di cedimento massimo tollerabile, che per applicazioni sotto pavimento galleggiante può essere fissato a 5 mm. La valutazione dunque di tale parametro, permette di conoscere se nel campo di interesse e applicazione il materassino possa essere considerato un materiale resiliente a comportamento lineare o non lineare. Queste informazioni, possono essere facilmente incrociate con quanto ottenuto dalla UNI EN 826 [5], al fine di correlare la deformazione, e conseguentemente come visto il valore del modulo elastico lineare, ad un possibile range di carico ottimale.

### 4.3.2 Spessore

Lo spessore di un prodotto resiliente è una grandezza di particolare interesse, poiché sotto carico potrebbe risultare essere sostanzialmente differente dal valore di partenza, identificato come spessore nominale. Per tale motivazione per la determinazione dello spessore per prodotti per l'isolamento sonoro per l'applicazione sotto pavimento galleggiante si utilizza UNI EN 12431 [13]. Secondo le direttive della suddetta norma, la prova sottopone un campione quadrato, di dimensioni specifiche, ad un ciclo di carico, come proposto in figura 4.7, durante il quale dovrà essere misurato l'andamento dello spessore del prodotto esaminato, in quanto non è nota a priori l'entità del cedimento in seguito all'applicazione di un carico statico considerato.



**Figura 4.7** Misura dello spessore di un materiale utilizzato come sottofondo per pavimentazione galleggiante: ciclo di carico e un esempio di variazione di spessore in percentuale e valori notevoli.

L'iter di misura si completa in circa otto minuti e prevede l'applicazione di un carico iniziale di  $0.25\text{ kPa}$  per  $120\text{ s}$ , seguito dall'applicazione di un carico di  $2\text{ kPa}$  per il medesimo intervallo di tempo. La procedura prosegue con un carico elevato di  $50\text{ kPa}$  per poi riportarsi al carico precedente di  $2\text{ kPa}$  intervallando gli stessi spazi temporali.

La quantità fisica di interesse è rappresentata dalla differenza  $d_F - d_B$ , esprime il valore assoluto fornito dalla differenza tra lo spessore del campione misurato prima e dopo l'applicazione di un carico elevato. Tale differenza che rappresenta la capacità di cedimento e ritorno del materiale, prende il nome di comprimibilità  $c$ . Tanto maggiore sarà la comprimibilità tanto maggiore sarà la deformazione residua nel materiale, è possibile ipotizzare che tale deformazione residua comporti una perdita in termini di prestazioni dovuta alla minore capacità di deformarsi dinamicamente.

### 4.3.3 Rigidità dinamica

La rigidità dinamica risulta essere una delle caratteristiche fisiche più influenti per determinare le prestazioni dei materassini antivibranti. La norma di riferimento utilizzata è UNI EN 29052 [14], che si applica per la determinazione di tale grandezza per unità di superficie di materiali resilienti, aventi superfici superiori lisce, utilizzati in uno strato continuo sotto pavimenti galleggianti.

Lo scopo della norma è quello di permettere il confronto di campioni di produzione di materassini simili di qualità nota e definita. È importante ricordare che la normativa europea vigente, che fa riferimento alla ISO 9052-1 [18], è applicabile solamente per un range di carico contenuto e tipico di applicazioni per edifici residenziali. Non sarà possibile dunque fare riferimento alla tale norma nel caso di carichi statici superiori a  $4kPa$  genericamente indicati come carichi tecnici. La presente norma fa riferimento alla UNI EN 29052-2 per tali carichi, che tuttavia non è stata ad oggi ancora pubblicata.

La rigidità dinamica si definisce come il rapporto tra la forza dinamica e lo spostamento dinamico, tale proprietà fisica è uno dei parametri che contribuisce a determinare l'entità dell'isolamento. La norma propone di valutare la rigidità dinamica apparente per unità di superficie,  $s'$ , attraverso la seguente relazione:

$$s' = \frac{F/S}{\Delta d} \quad [kN/mm^3],$$

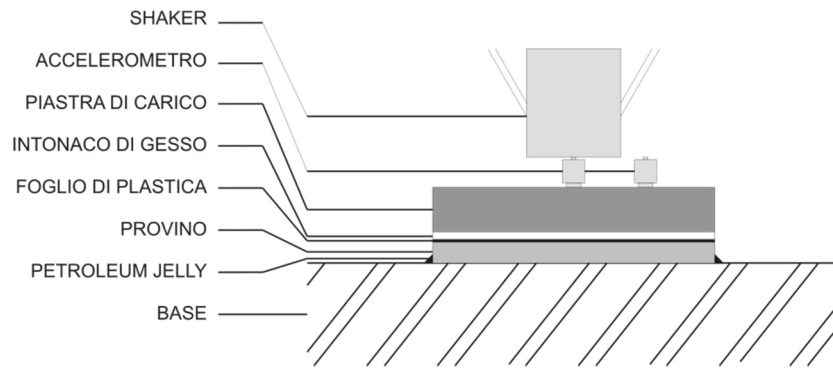
dove  $F$  è la forza dinamica che agisce perpendicolarmente sul provino,  $S$  è l'area del provino e  $\Delta d$  è la variazione dinamica dello spessore di materiale resiliente che ne risulta.

Il principio prescritto dalla norma, in accordo con lo standard ISO, si basa sulla determinazione della rigidità dinamica apparente per unità di superficie mediante un metodo di risonanza del sistema. Si valuta così la vibrazione fondamentale del sistema modellato come un sistema massa-molla, in cui la molla è rappresentata dal provino del materiale resiliente sottoposto a test e la massa data da una piastra di carico, con la quale viene misurata la frequenza di risonanza  $f_r$ :

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

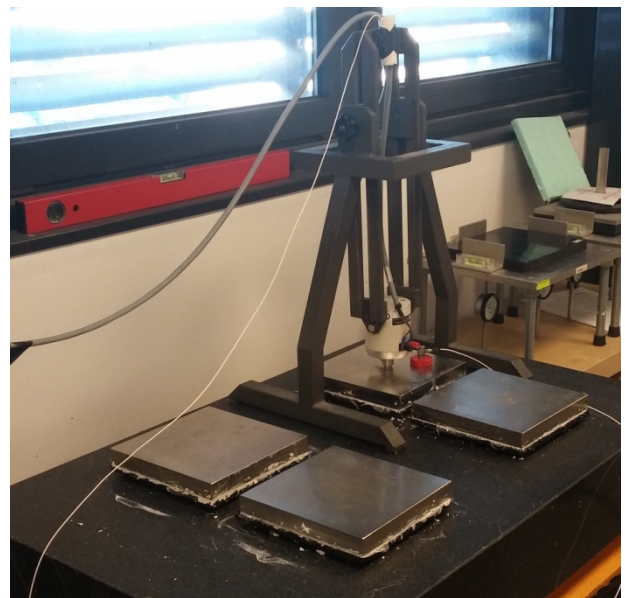
dove  $s'_t$  è la rigidità dinamica apparente per unità di superficie del provino e  $m'_t$  è la massa totale per unità di superficie durante la prova.

I provini quadrati dei diversi campioni di dimensioni  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ , devono essere posizionati tra due superfici piane e regolari, in cui la piastra di carico del peso di  $8\text{ kg}$ , tale da generare un peso per unità di superficie  $200\text{ kg/m}^2$ , deve essere posizionata sopra il materiale, interponendo uno strato fine di gesso ed acqua dello spessore di circa  $5\text{ mm}$ , per consentire al peso di distribuirsi uniformemente su tutto il materiale. Si dovrà inoltre prevedere una pellicola di plastica impermeabile da utilizzare per ricoprire il provino per separarlo dallo strato di gesso.



**Figura 4.8** schema di allestimento di un provino per la misura della rigidità dinamica secondo i dettami della UNI EN 29052.

Le misure per determinare la frequenza di risonanza  $f_r$ , sono state effettuate utilizzando un segnale sinusoidale tramite uno *shaker*, al termine del processo di asciugatura dello strato di gesso, mediante un accelerometro posizionato a media distanza tra il punto di applicazione della forza e il bordo della piastra.

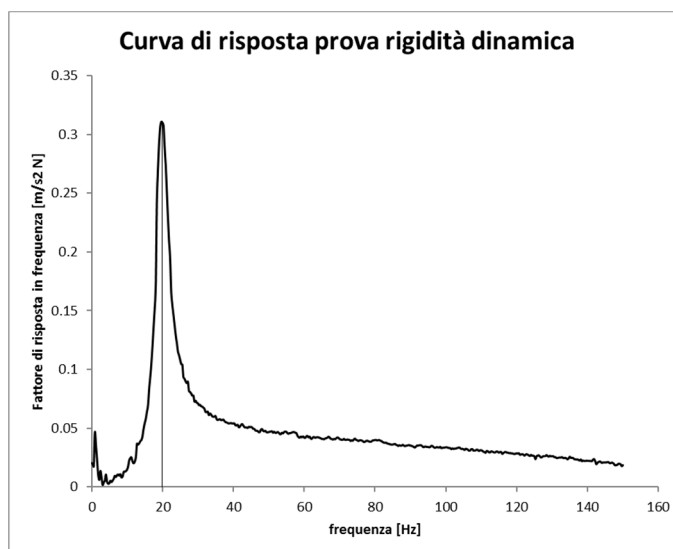


**Figura 4.9** Nelle figure sono rappresentate la condizione di allestimento e di misura dei campioni.

La rigidità dinamica apparente viene ricavata in base alla frequenza di risonanza  $f_r$  dei diversi provini secondo la relazione:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t (f_r)^2 \quad [kN/mm^3],$$

dove  $m'_t$  è la massa totale per unità di superficie [ $kg/m^2$ ] utilizzata durante la prova e che comprenderà sia il contributo della piastra di carico che dello strato di gesso. Tale quantità viene definita apparente, in quanto non tiene conto del contributo allo spostamento dinamico dato dalla vibrazione dell'aria intrappolata all'interno di alcune tipologie di materiali, specialmente i materiali fibrosi dotati di elevata porosità.



**Figura 4.10** Esito della misura della rigidità dinamica: funzione di risposta in frequenza del sistema massa-molla.

#### 4.3.4 Scorrimento viscoso a compressione

Come risulta evidente tra le proprietà fondamentali per la caratterizzazione di un prodotto resiliente per applicazioni acustiche e antivibranti, vi è anche lo scorrimento viscoso a compressione o *compressive creep*. La procedura per la determinazione dello scorrimento

viscoso a compressione nel tempo di un materiale resiliente viene fornita dalla norma UNI EN 1606 [6]. Tale procedura proposta consente, attraverso la misurazione del cedimento incrementale di un provino di dimensioni specifiche, di derivare il comportamento nel lungo periodo del materiale esaminato al fine di poter predire con buona approssimazione lo spessore effettivo del materassino una volta in opera.

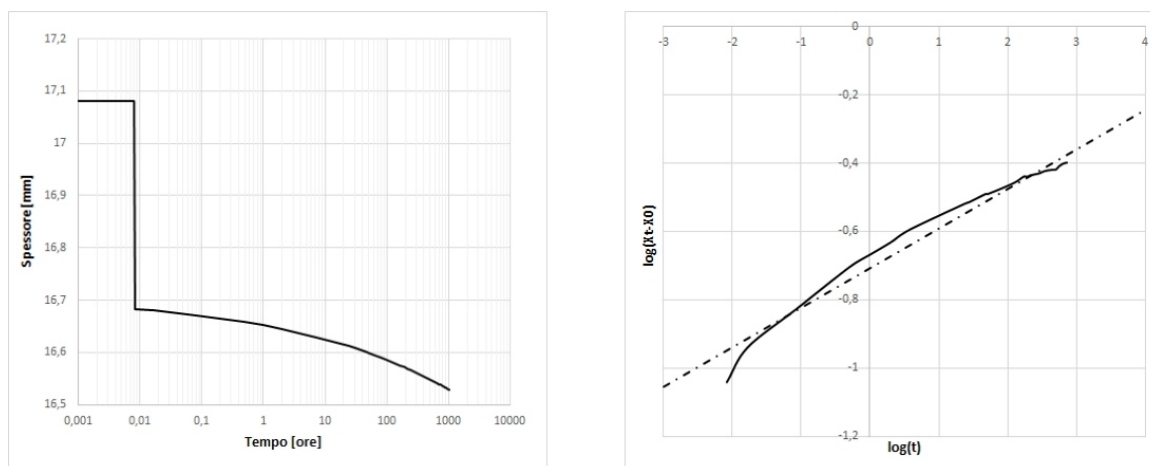
I provini utilizzati per la prova sono stati precedentemente caratterizzati secondo la UNI EN 826 [5], attraverso queste valutazioni, la normativa di riferimento impiegata, permette una corretta valutazione del carico da applicare. Una volta posizionato un carico statico di base, di valore non superiore al 10% del carico di test, anche definito "peso morto", viene effettuata la misura del relativo cedimento a tale carico. Questo valore, che dovrebbe essere paragonabile allo spessore nominale del prodotto, è utilizzato come riferimento per la misura.

Si esegue dunque la misura dello spessore del materiale in un arco di tempo sufficiente, sotto l'azione del carico statico stabilito, che provoca un cedimento di tipo viscoso o *creep* per materiali utilizzati come sottofondo nei pavimenti galleggianti.



**Figura 4.11** Dispositivo per la rilevazione dei cedimenti nel tempo dei materiali utilizzati come sottofondi in pavimenti galleggianti.

Mediante formule di regressione contenute nell'appendice A della stessa norma si può prevedere il comportamento del materiale fino a cinque anni.



**Figura 4.12** Misura della variazione di spessore di un materiale utilizzato come sottofondo per pavimenti galleggianti nel lungo periodo, Risultato della regressione di una prova di *creep* per la valutazione dell'andamento nel tempo.

#### 4.3.5 Loss Factor

Come già ampiamente presentato, la risposta dinamica e le caratteristiche di trasmissione di un sistema vibrante sono essenzialmente determinate dalle proprietà di massa e rigidità, che sono responsabili dell'immagazzinamento dell'energia, e lo smorzamento, che è responsabile della perdita di energia del sistema attraverso una conversione in calore. Tra queste lo smorzamento è il parametro più complesso da predire e, a differenza di masse e rigidità, non può essere ricavato attraverso misure statiche. Va inoltre ricordato che quando si parla di smorzamento viscoso si fa riferimento alla proprietà specifica dell'isolatore, mentre per smorzamento strutturale si intende lo smorzamento che raggiunge la struttura nel suo complesso con l'introduzione dello smorzatore. In entrambe le definizioni comunque il ruolo dello smorzamento risulta fondamentale nell'attenuazione della trasmissibilità nel campo di risonanza.

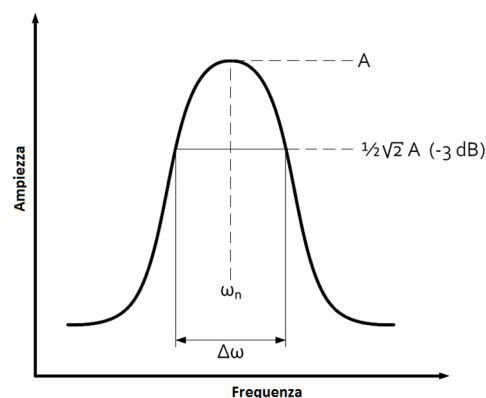
L'indice maggiormente significativo per la valutazione dello smorzamento è il *loss factor*, che è stato originariamente introdotto come misura dello smorzamento intrinseco per i materiali viscoelastici come:

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \tan \varphi ,$$

che rappresenta il rapporto tra la componente immaginaria e la parte reale, rispettivamente la parte in fase e la parte in quadratura associata del modulo complesso. Come analizzato [29], tale definizione è presa dalla norma ISO 6721-1 [17] per un materassino in gomma a partire dall'analisi dello smorzamento. È eventualmente possibile fornire anche una definizione in termini di energia rispetto alla condizione di oscillazione stazionaria attraverso la relazione:

$$\eta = \frac{E_l}{2\pi E_r} ,$$

dove  $E_l$  rappresenta la quota di energia dissipata in ogni ciclo e  $E_r$  rappresenta l'energia meccanica associata alla vibrazione. Si vuole dunque esprimere la frazione di energia meccanica di oscillazione dissipata in ogni ciclo.



**Figura 4.13** Metodo della riduzione dell'oscillazione in risonanza

Vi sono diversi metodi per la valutazione dello smorzamento, come ad esempio la riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione in risonanza o il tempo di decadimento dell'oscillazione libera.

Il metodo della riduzione dell'oscillazione in risonanza, detto anche metodo della riduzione dei 3dB, è una valutazione dello smorzamento del sistema a partire dalla figura di merito del sistema  $Q$  nel quale però non si fa riferimento diretto al *loss factor*,

$$Q = \frac{\omega_n}{\Delta\omega} = \frac{1}{2\xi}$$

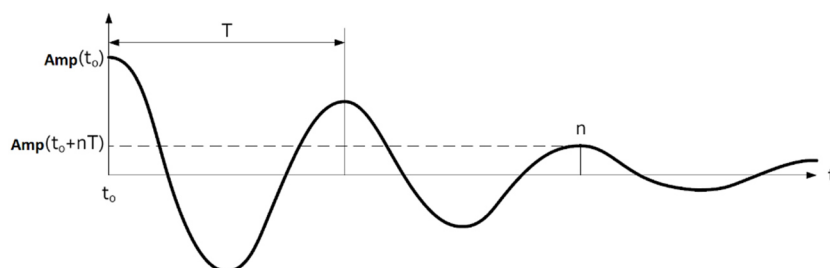
Si può tuttavia esprimere, come suggerito da [34 40] attraverso la relazione:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} = \sqrt{1 + \eta} - \sqrt{1 - \eta},$$

valida per valori di *loss factor*  $0 \leq \eta \leq 0.28$ .

Attraverso il metodo del tempo di decadimento dell'oscillazione libera, il coefficiente di smorzamento può essere ricavato attraverso la risposta temporale, rappresentata dalla funzione  $Amp(t)$ , del sistema risonante, mediante il metodo a decremento logaritmico con la seguente legge:

$$\Lambda = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{Amp(t)}{Amp(t + nT)} \right).$$



**Figura 4.14** Metodo della riduzione dell'oscillazione in risonanza.

Il fattore di smorzamento viene poi ricavato come:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2}}$$

Tale metodo risulta valido per valori di smorzamento  $\xi < 0.5$

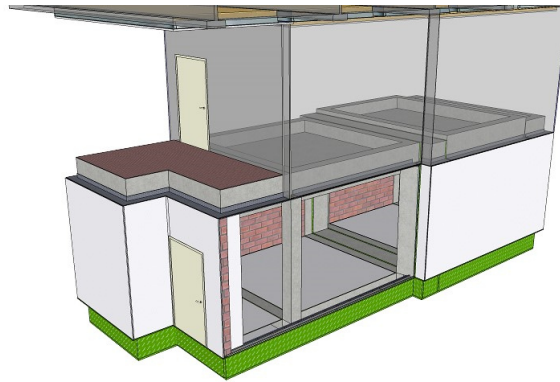
Tali modelli teorici, si scontrano molto spesso con le proprietà reali dei materiali, rendendoli inefficaci per effettuare stime significative. Come verrà presentato in seguito, si è deciso di ricorrere alla normativa UNI 11059 [11] per la valutazione del *loss factor* a partire dai valori sperimentali ricavati attraverso l'analisi del modulo complesso. In quest'ultimo, mentre la parte reale è una costante pari alla rigidità dinamica, la parte immaginaria è una retta con intercetta all'origine pari al coefficiente di smorzamento di natura isteretica e con pendenza proporzionale al coefficiente di smorzamento di natura viscosa.



## CAPITOLO 5 APPARATATO SPERIMENTALE

### 5.1 Laboratorio

Il laboratorio per misure di acustica edilizia di proprietà di Isolgomma S.r.l., ad Albettono (VI), è una struttura progettata con il coordinamento del Dipartimento di Fisica Tecnica - Università degli Studi di Padova e realizzata nel biennio 2007-2008. La struttura, sviluppata per consentire all'azienda di studiare le proprietà acustiche dei solai e dei materiali utilizzati per la loro insonorizzazione, è composta di quattro stanze, due al piano terra e due al primo piano.

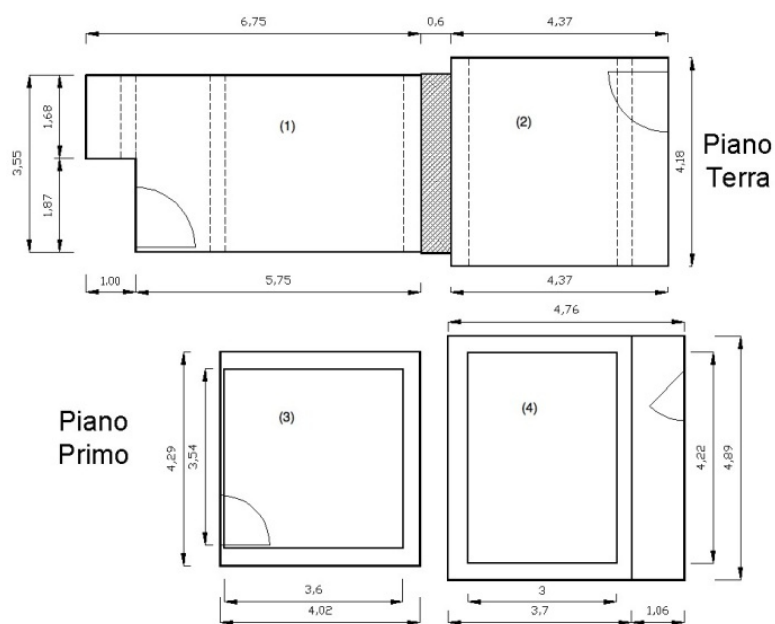


**Figura 5.1** il laboratorio di acustica edilizia di Isolgomma S.r.l., Albettono (VI).

Compatibilmente con la normativa vigente nel periodo, la UNI EN ISO 140-1 [1], l'intera struttura è stata completamente svincolata dall'ambiente esterno, in quanto galleggiante su di uno strato disaccoppiante. Un tale accorgimento si rende necessario per consentire di ridurre fortemente l'ingresso delle vibrazioni di origine ambientale negli ambienti di prova, poiché il laboratorio è collocato all'interno dello stabilimento, nel magazzino aziendale. Per questo motivo, oltre al basamento flottante in gomma, per permettere di isolare le vibrazioni provenienti dagli impianti produzione, è stato progettato con attenzione anche il fonoisolamento delle pareti esterne, e delle porte di ingresso, fondamentali per una corretta tenuta acustica e termica.

L'insieme degli accorgimenti adottati consentono all'interno delle camere del laboratorio di avere i livelli di fondo misurati negli intervalli di frequenza di interesse, da 50 Hz a 5000 Hz, comparabili con il rumore elettrico degli strumenti di misura.

Le coppie di stanze sovrapposte, nell'accoppiamento stanza al piano terra e al primo piano, in accordo alle normative allora vigenti UNI EN ISO 140-6 [2] e UNI EN ISO 140-8 [3], permettono la valutazione delle prestazioni acustiche dei solai e di strati resilienti da impiegare sotto massetto per la creazione di un sistema a pavimento galleggiante. I due accoppiamenti sono dotati di solai fissi, non removibili e vincolati tramite giunti in gomma ad elevato grado di smorzamento laterale, ma sono sostanzialmente differenti, in quanto in uno è posizionata una piastra monolitica in cemento armato, mentre l'altro solaio è in laterocemento.



**Figura 5.2** planimetria del laboratorio. La camera (1) `e ricevente per le misure di potere fonoisolante e di calpestio. La camera (2) `e trasmittente per le misure di potere fonoisolante e ricevente per quelle di calpestio. La camera (3) `e trasmittente per le misure di rumore di calpestio ed `e dotata di solaio in calcestruzzo armato, mentre la camera (4) `e trasmittente per le misure di rumore di calpestio, ma dotata di solaio in laterocemento.

Durante il periodo di attivit  di ricerca svolta, in accordo con le direttive delle norme UNI EN ISO 717-2 [4] e UNI EN ISO 10140-1 [7], le prove effettuate per la valutazione dell'isolamento dal rumore di calpestio in laboratorio, sul materassino utilizzato sotto massetto, si sono limitate all'impiego del solo solaio in cemento armato. Il solaio considerato   costituito da una piastra monolitica in calcestruzzo armato di forma quadrata di dimensioni  $3,6\text{ m} \times 3,6\text{ m}$ , di area totale  $12,96\text{ m}^2$ , mentre lo spessore   di  $14\text{ cm}$ . Grazie alle sue dimensioni risulta adatto sia alla misura del livello di rumore di calpestio in laboratorio secondo norma, sia alla misurazione dell'attenuazione del livello di rumore di calpestio dei materiali.

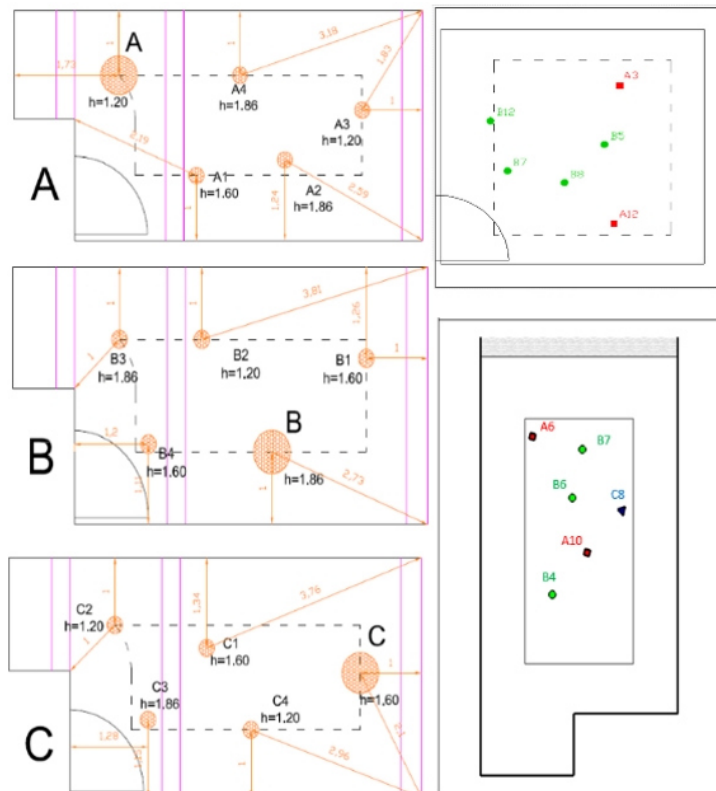
Come anticipato   stata posta particolare attenzione anche alla cura termica della struttura, che si presenta dotata di buon isolamento e di unit  mobili per il condizionamento estivo e il riscaldamento invernale. Attraverso tali accorgimento   possibile favorire la riproducibilit  delle misure, permettendo anche nel periodo di lavoro svolto, inverno 2016-2017, di lavorare con valori di temperatura e umidit  standard.

### 5.1.1 Qualificazione effettuata

La qualificazione del laboratorio è stata effettuata dall'Ing. Luison durante il dottorato di ricerca [25]. La prima fase ha riguardato l'analisi delle caratteristiche di diffusività delle camere con riferimento alle normative vigenti nelle norme della serie UNI EN ISO 140.

Successivamente è stata compiuta la ricerca delle posizioni per effettuare le rilevazioni dei tempi di riverberazione nelle camere di prova. Complessivamente dalla prova, secondo la norma UNI EN ISO 140-1 [1], emerge una buona omogeneità dei tempi di riverbero su tutto lo spettro ed un sostanziale rispetto dei limiti imposti. La conoscenza dei tempi di riverberazione degli ambienti di prova è necessaria per la scelta delle posizioni di sorgente e microfoni da adottare durante il processo di qualificazione del campo sonoro e per le misure in laboratorio di rumore di calpestio.

Le posizioni ottimali per effettuare le misure dell'isolamento da calpestio sono state ricavate con procedure basate sulla minimizzazione degli scarti dei livelli registrati rispetto ai valori medi su di un grande numero di misurazioni. I livelli di rumore di calpestio sono stati campionati negli ambienti riceventi durante l'azione del generatore normalizzato e, mediante l'analisi degli scarti rispetto ai valori medi rilevati, sono state identificate sei posizioni di generatore sopra il solaio e sei posizioni microfoniche in ambiente ricevente, la cui combinazione rappresenti in maniera soddisfacente le caratteristiche diffusive globali dell'ambiente di misura.

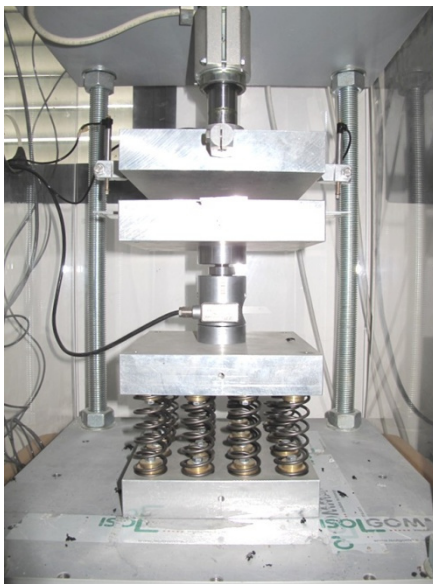


**Figura 5.3** Posizioni di microfono e sorgente durante le diverse prove.

## 5.2 Strumentazione e macchinari utilizzati

### 5.3.1 Pressa Elettromeccanica

La pressa elettromeccanica impiegata è stata progettata appositamente per essere compatibile con le misure di compressione secondo le prove prescritte dalle norme UNI EN 12431 [13] e UNI EN 826 [5]. Per essere adatta alla misura di forze e di spostamenti in gioco, la macchina è munita di due piastre lisce, lucide, rigide, quadrate e parallele con una dimensione minima pari a quella del lato del provino. Una piastra è fissata e l'altra mobile, grazie alla presenza di uno snodo cardanico l'applicazione della forza è permessa solo assialmente. I provini che possono essere esaminati attraverso tale strumento hanno dimensioni non superiori di  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ .



**Figura 5.4** Pressa elettromeccanica per misure di compressione di materiali e analizzatore di segnale.

Lo strumento è dotato di interfaccia parallela HBM Spider 8, in cui all'analizzatore sono collegati 2 sensori di spostamento e una cella di carico. Lo spessore è determinato come una distanza misurata, tramite due sensori di spostamento, tra due piastre piane rigide sulle quali è posizionato il provino e sottoposto a differenti pressioni lungo la superficie di interesse. La pressa è inoltre dotata di un pacco di molle atte ad impedire che sul campione si verifichino eventuali gradienti di forza non desiderati, di fatto smorzando la forza messa in gioco dal motore elettrico. La cella di carico permette la misura e il controllo di forza, durante la prova secondo la norma UNI EN 12431 [13].

Le misure sono condotte tramite software dedicato di nome M.A.C. che permette durante la prova di valutare il comportamento del provino analizzato secondo entrambe le normative citate. Una volta completata la prova è possibile esportare i dati direttamente su un foglio di calcolo Excel o utilizzare direttamente i dati di macchina registrati.

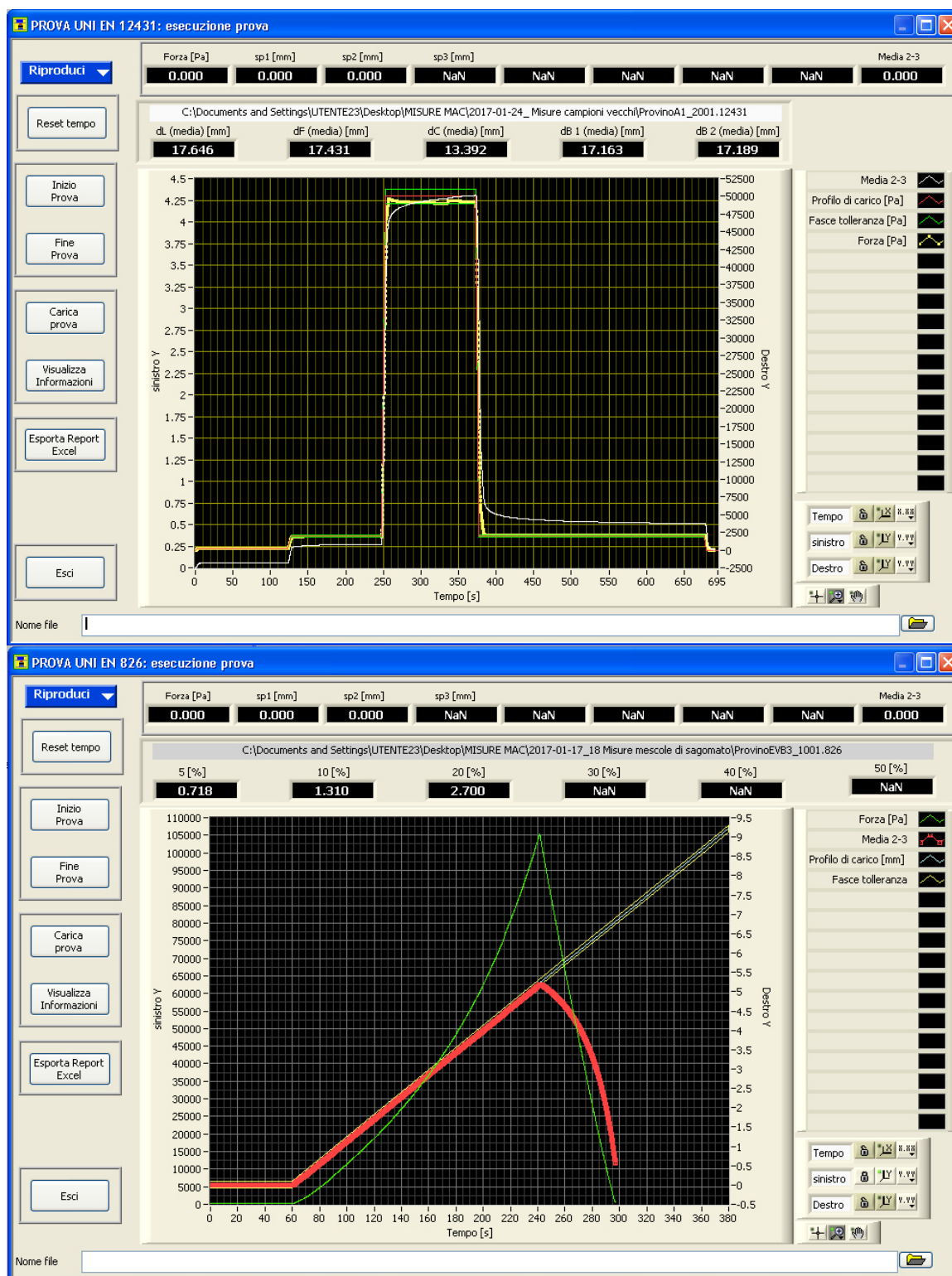


Figura 5.5 L'interfaccia grafico del software M.A.C. utilizzato.

### 5.3.2 Macchina calpestio

L'isolamento al rumore da calpestio viene valutato attraverso l'impiego di una macchina normalizzata, tale necessità è legata al fatto che la misura non è differenziale, ma richiede l'acquisizione del solo livello di rumore in ambiente ricevente. Pertanto la sorgente del rumore impattivo deve consistere in un dispositivo atto a garantire una forza costante e riproducibile sulla pavimentazione. Le attuali norme ISO 10140, richiedono di adottare il dispositivo normalizzato, secondo le direttive riportate nella UNI EN ISO 10140:5 [10] composto da cinque martelli in linea di acciaio distanziati di 100 mm tra loro, del peso di 500 g ciascuno di forma cilindrica con diametro di 30 mm. I martelli vengono lasciati cadere da una altezza di 40 mm sollecitando la pavimentazione con una frequenza di 10 Hertz.

La macchina dovrà essere dotata di supporti per l'isolamento delle vibrazioni e dovrà avere un peso non superiore ai 25 kg.



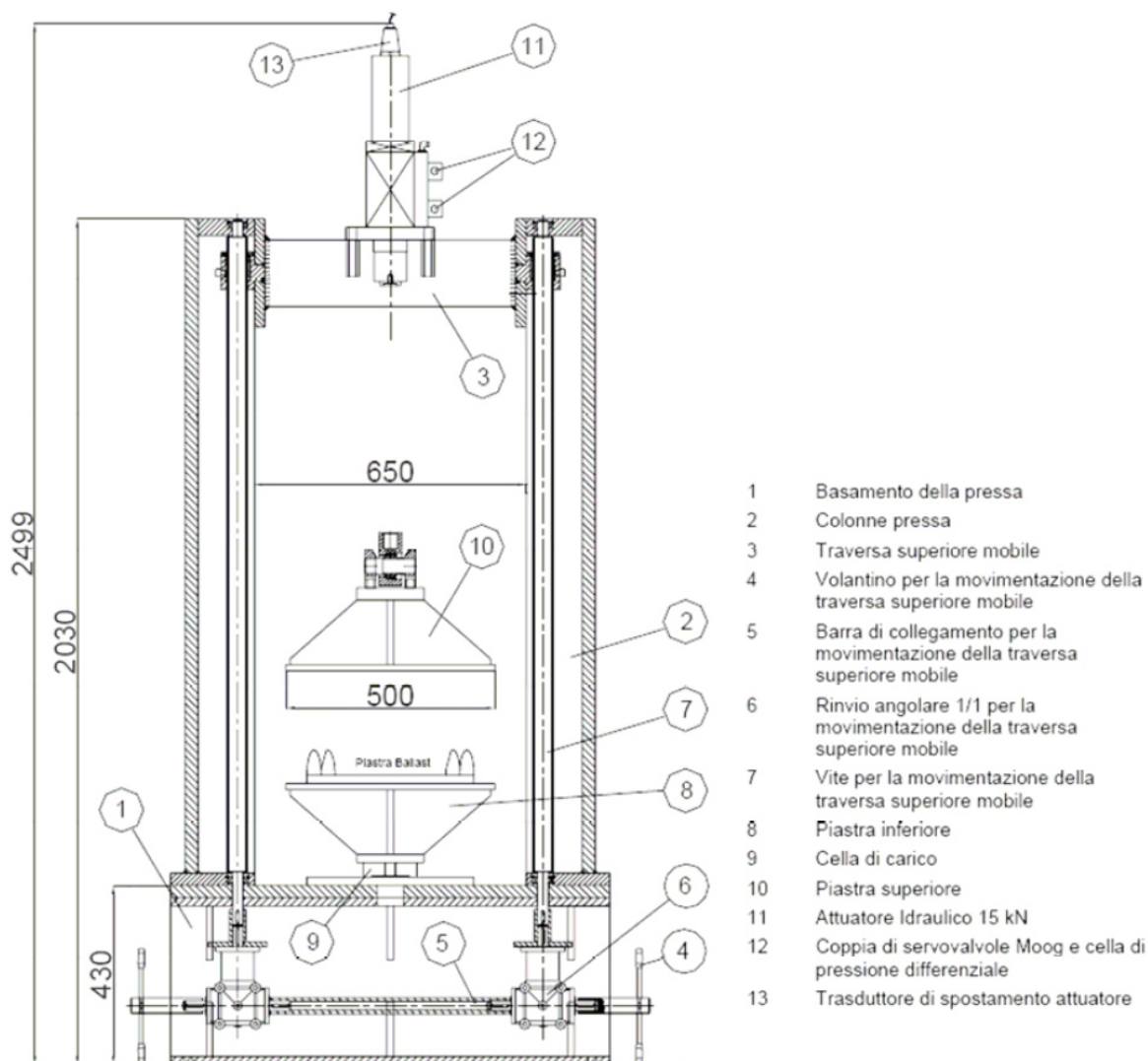
**Figura 5.6** Generatore di calpestio normalizzato secondo le caratteristiche richieste dalla normativa ISO, dotato di radiocomando.

### 5.3.3 Vibrodina

La macchina di prova RPMTM, Resilient Pat and Mat Testing Machine, costituisce il sistema di prova utilizzato per effettuare prove specifiche di caratterizzazione statica e dinamica per i materassini elastomerici, secondo le prescrizioni fornite dalla normativa UNI 11059[11]. La macchina si presenta nel suo insieme con un telaio che sorregge e contiene l'attrezzatura operante poggiato su una robusta piastra metallica, il tutto poggiato su quattro ammortizzatori che isolano il sistema di prova dal piano d'appoggio. Nel suo complesso il sistema di misura comprende: quattro trasduttori di spostamento induttivi *HBM WA – T – 50 mm* e quattro da 10 mm posizionabili ai quattro lati della piastra di carico; due accelerometri induttivi; una cella di carico montata tra il basamento della pressa e la piastra inferiore; sull'attuatore idraulico è montato un trasduttore di spostamento e lateralmente un trasduttore di pressione differenziale.



È stato utilizzato il software specifico, progettato in linguaggio Labview per poter interconnettere, tramite personal computer, l'unità di servocontrollo per svolgere le prove sui materassini sagomati di interesse. Questo strumento è stato impiegato per la valutazione del fattore di smorzamento e del *loss factor*, al fine di eseguire la verifica di tali grandezze valutate coi metodi teorici presentati attraverso l'integrazione delle prove statiche e dinamiche forzate nel range da 2 a 40 Hz in *sweep sine*.



**Figura 5.7** Viene riportata in seguito una descrizione delle caratteristiche principali della macchina stessa, partendo da una visione generale e sviluppando i componenti che maggiormente la caratterizzano.



**Figura 5.8** Macchina di prova RPMTM presente in laboratorio.



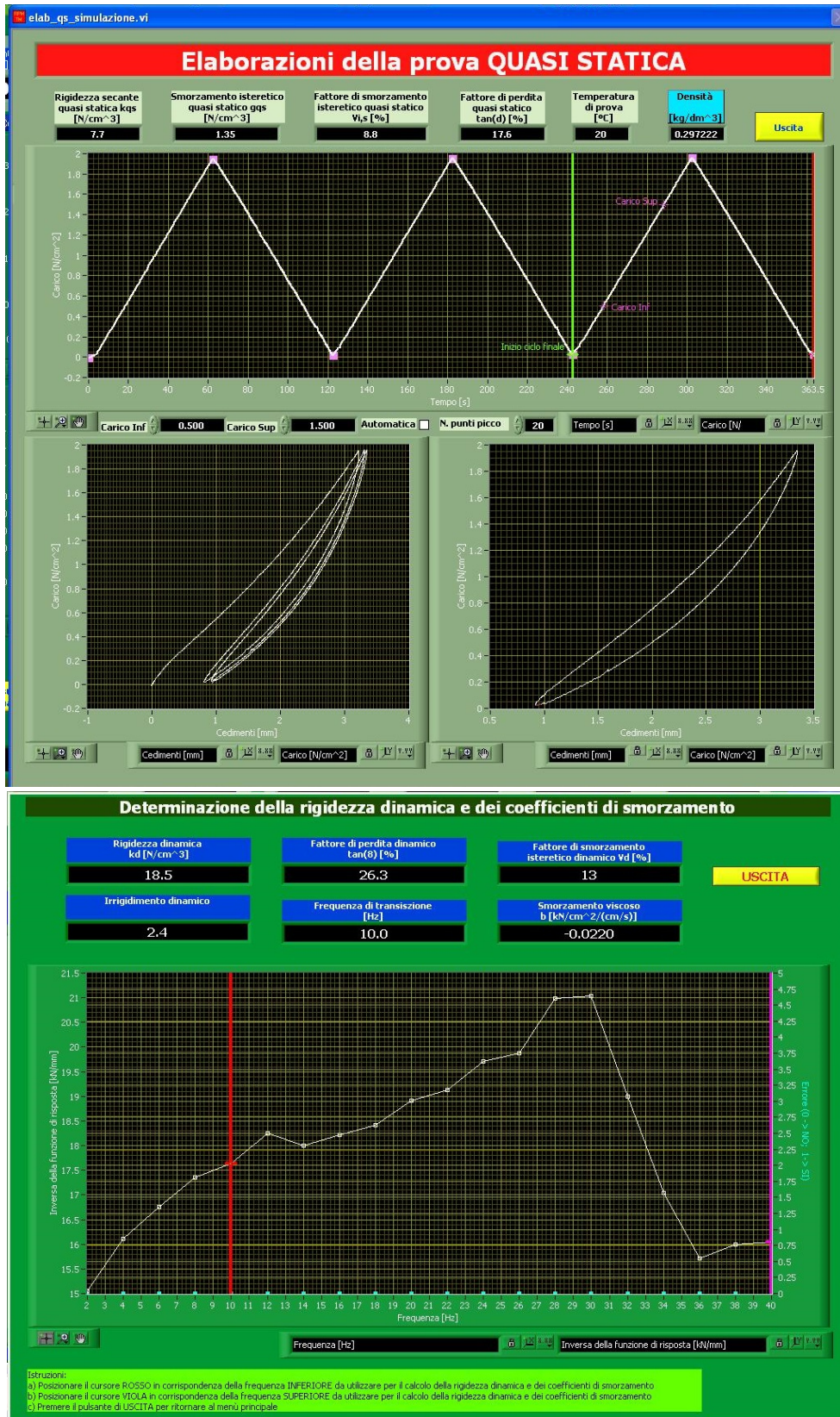


Figura 5.9 Interfaccia grafica del software utilizzato.

## CAPITOLO 6 INDAGINE SPERIMENTALE EFFETTUATA

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti nelle diverse misure effettuate durante il percorso di ottimizzazione e di caratterizzazione di un materassino antivibrante in gomma riciclata a geometria sagomata. L'analisi effettuata si è limitata alla fase di verifica, ossia un'indagine rivolta alla completa definizione delle caratteristiche meccaniche e delle prestazioni di uno specifico materassino elastomerico, per il quale il programma delle prove di caratterizzazione per le diverse tipologie di campioni di mescole e sagomature, prevede l'esecuzione di tutte le tipologie d'indagini descritte nei capitoli precedenti.

I materiali scelti per la generazione delle diverse mescole sono principalmente, come anticipato, combinazioni di granuli e fibre di gomma provenienti da riciclo. Entrambe le tipologie sono state utilizzate andando a creare prodotti con due diverse geometrie con spessori identici ma di densità sostanzialmente differenti.

Per i campioni prodotti sono state scelte tre taglie diverse tali da permettere un'indagine esaustiva nel rispetto delle dimensioni necessarie alle diverse metodologie di prova delle norme considerate. Tutti i provini soggetti a test sono stati comunque misurati e controllati in spessore, peso e dimensioni, scartando quelli che si distaccavano dagli standard produttivi. Infine per ottenere valori maggiormente significativi per i diversi provini campione, non ancora prodotti su linea industrializzata, si sono misurati per ciascuna tipologia di mescola almeno 3 campioni per taglia.

La sperimentazione è stata condotta su trenta campioni in un arco di tempo di circa sei mesi, in accordo alle norme e procedure citate. I risultati sono presentati secondo l'iter di indagine eseguito, che ne rispecchia la fattibilità e ripetibilità, inversamente proporzionale al tempo richiesto per il completamento della misura.

Sebbene lo studio sia stato condotto parallelamente in entrambi i laboratori, non è stato possibile sottoporre tutti i campioni ad indagine completa. Sono state effettuate misurazioni con tempistiche importanti solo per i prodotti più promettenti per ovvi motivi di ottimizzazione dei tempi e delle risorse a disposizione. Per tutti i campioni prodotti sono state effettuate le dovute prove di andamento della frequenza naturale al carico, valutazione dello spessore, prova di compressione e rigidità dinamica. Mentre, solo per un numero ristretto di campioni, saranno in tutto quattro tipologie di provini differenti (A5, B1, B8 e B13). Sono invece state effettuate prove, che sostanzialmente necessitano di lunghi intervalli di indagine, come la prova riduzione di rumore di calpestio in laboratorio, la misura di *creep* e la prova sotto piastra armata.

Si è scelto di porre particolare attenzione alla correlazione tra il valore effettivo della riduzione del livello di rumore di calpestio misurato in laboratorio e il valore teorizzato a partire dalla rigidità dinamica dei materassini sagomati misurati seguendo le diverse norme di riferimento [4 8 12 14].

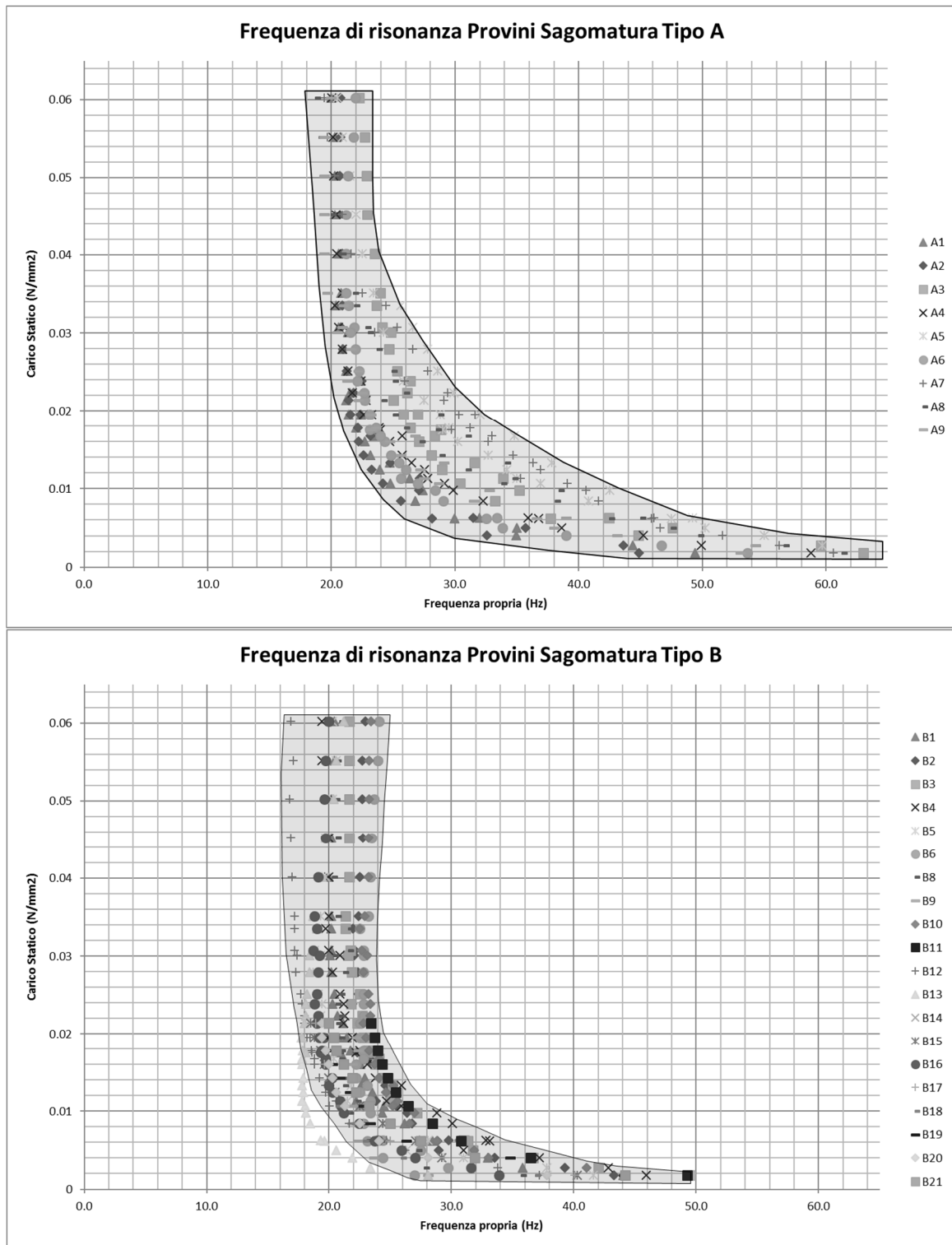
### 6.1 Primo livello di indagine: costruzione della curva carico-frequenza

Uno studio preliminare è stato effettuato per valutare la variazione di resa dovuta alle due varianti geometriche per la sagomatura esaminata. Lo scopo di tale indagine è principalmente legato alla verifica della bontà della risposta in frequenza delle diverse sagomature in relazione alla mescola ed alla densità del materassino, nell'ottica futura per l'azienda di intraprendere la produzione ulteriore di prodotti sagomati per applicazioni antivibranti, ma a carichi sostanzialmente superiori.

Questa prima sulle diverse tipologie di materassini prodotti, viene effettuata attraverso la costruzione della curva di andamento della frequenza naturale al variare del carico, che per la natura e lo spessore del prodotto è fissato al carico massimo di  $0,06 \text{ N/mm}^2$ . In questo campo di applicazione, i primi criteri di confronto tra i diversi provini sono il valore minimo della frequenza di risonanza raggiunto e l'andamento della curva. Tale andamento viene costruito per punti tramite misure successive sul medesimo provino, incrementando progressivamente il carico e registrando il relativo valore di relativa frequenza naturale. Per ciascuna tipologia di mescola sono stati misurati almeno tre campioni per ciascuna taglia così da poter contare su un numero sufficiente di punti medi per la costruzione del grafico.



**Figura 6.1** Misurazione dell'andamento della frequenza naturale su un provino



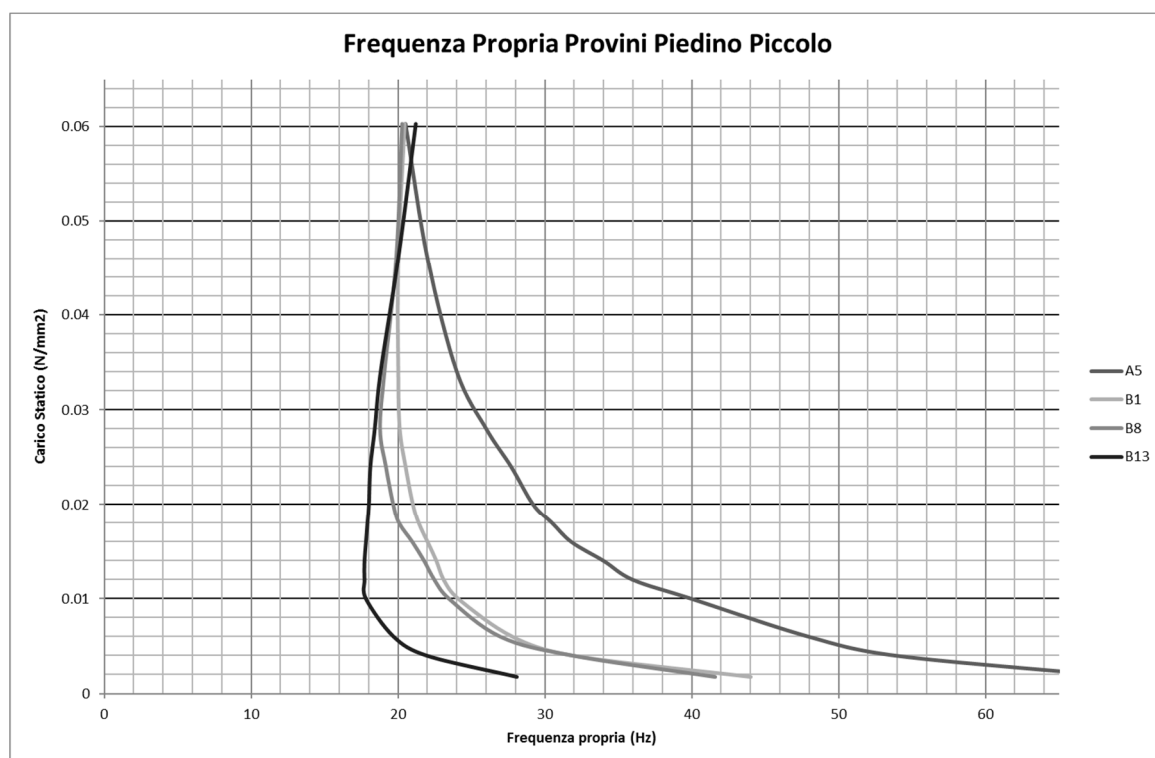
**Figura 6.2** Grafici degli andamenti della frequenza di risonanza dei materassini nelle due diverse forme di sagomatura.

Nei due diversi grafici riportati nelle figure 6.2, in funzione della diversa sagomatura, sono riportati i valori medi di frequenza naturale, ottenuti su ciascuna tipologia di provino, mentre l'area evidenziata rappresenta la nuvola nella quale si sono distribuite tutte le misure effettuate.

Il lavoro di ricerca svolto sulla natura della miscela e sulla densità dei provini prodotti, ha permesso di conseguire, a parità di geometria, una sostanziale traslazione della curva verso frequenze di risonanza della curva fino di 8 – 10 Hz, e riduzioni molto superiori per i carichi più bassi.

Le aree evidenziate nei grafici dimostrano come, al di là dei valori di frequenza raggiunti per i singoli carichi, ci sia una differenza nell'andamento della risposta dinamica del materassino al carico, dovuta alla variazione di sezione del piedino di appoggio. La soluzione con sagomatura tipo B, da questo punto di vista, ha mostrato maggiore potenzialità di impiego nel campo dell'acustica edilizia permettendo frequenze naturali contenute già ai bassi carichi. La soluzione con sagomatura di tipo A sarà sicuramente oggetto di future analisi per carichi superiori a 0.6 MPa., in quanto non è stato raggiunto un valore di carico sufficiente all'interno del range testato, che comporti un cedimento delle prestazioni, dimostrando maggiore propensione verso applicazioni industriali.

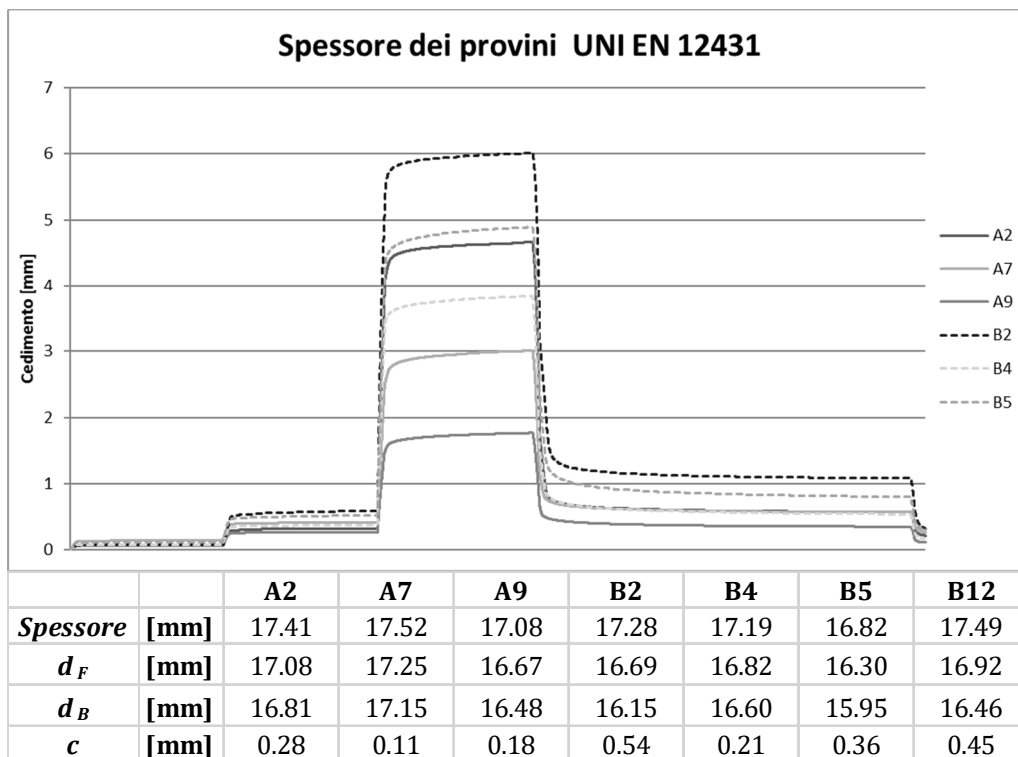
Particolarmente importante, per un materassino antivibrante per applicazioni in acustica edilizia, risulta essere la riposta in frequenza nella fascia di carico tra [0.002 – 0.02] MPa. Per una soluzione con materassino pieno di pari spessore in gomma, risulta infatti complesso operare nelle applicazioni residenziali o nell'isolamento di macchine a basso peso superficiale nel campo tra i 200 e i 2000 [kg/m<sup>2</sup>]. Da qui l'importanza di considerare anche il valore di frequenza naturale in tale specifico range, ha permesso di indirizzare l'indagine delle mescole in maniera indipendente dal valore di frequenza minima raggiunto al carico massimo. Tali linee guide hanno spinto l'ottimizzazione verso mescole a medio-bassa densità sul materassino con sagomatura di tipo B, ottenendo il campione B13. Tale prodotto, come si può notare in figura, risulta l'unico a riuscire a garantire buone performance anche ai bassi carichi, con una curva più consona alle applicazioni di edilizia civile e commerciale per applicazioni di isolamento di rumore di calpestio.



## 6.2 Secondo livello di indagine:

### 6.2.1 Prova di spessore

La prova per il controllo dello spessore del materassino in esame viene effettuata attraverso la pressa elettromeccanica presentata, progettata per effettuare le prove secondo le norme UNI EN 12431 [13] e UNI EN 826 [5]. Lo spessore è determinato come distanza misurata tra le due piastre piane rigide, sulle quali il provino è posizionato e sottoposto a differenti pressioni lungo la superficie di interesse. Attraverso tale procedura si vuole dimostrare la capacità resilienti dei materiali esaminati in termini di recupero delle deformazioni, attraverso la valutazione della comprimibilità  $c$ . Per una corretta determinazione di tale indice, la UNI EN 12431 [13] prevede l'applicazione iniziale di un carico di  $0.25 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$  al termine del quale viene ricavato il valore  $d_L$ . Segue poi l'applicazione di un carico di  $2 \text{ kPa}$  per un tempo di  $120 \text{ s}$ , da cui si ricava  $d_F$ , l'applicazione di un carico di  $50 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$ . Terminato il ciclo di carico il provino viene nuovamente sottoposto un carico di  $2 \text{ kPa}$  per  $120 \text{ s}$  al termine del quale si valuta  $d_B$ .



Al fine di determinare in modo significativo il valore di  $d_B$  è necessario che il provino di materiale sia libero di rigonfiarsi in ragione del carico che insiste sul campione, in prova senza alcuna forza di attrito contraria al moto interferisca.

La valutazione della *comprimibilità* viene effettuata al carico di  $2 \text{ kPa}$  che, applicato a provini con dimensioni di  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , risulta essere pari a di  $200 \text{ [kg/m}^2\text{]}$ . Un carico particolarmente significativo in ambito edilizio in quanto rappresenta un peso standard di un massetto nell'edilizia civile.

I campioni in geometria A, che generalmente per motivi legati al maggior volume presentano una densità a metro quadro superiore, mostrano in genere un indice di



*comprimibilità c* più contenuto. I valori presentati come esempio riportano chiaramente tale andamento, tuttavia sottolineano principalmente che la capacità di recupero alle deformazioni risulta piuttosto omogenea tra le varie mescole e le due diverse geometrie. Tale risultato sottolinea le ottime proprietà resilienti dei pannelli testati che presentano tra loro un valore di comprimibilità contenuto e inferiore al millimetro. La gomma riciclata, che a differenza di materiali vergini non andrà incontro a fenomeni evidenti di invecchiamento, risulta dunque adatta ad applicazioni in cui la costanza delle prestazioni del materiale sia essenziale, nel caso specifico la produzione di materassino da utilizzare sotto massetto o come supporto diretto per macchinari vibranti.

La differenza più evidente tra i risultati proposti infatti è legata alla deformazione sotto alti carichi,  $50\text{ kPa}$ . La capacità di resistenza allo stress di compressione, che in questo caso aumenta quasi linearmente con l'aumento della densità superficiale del campione però, limita però le prestazioni per carichi tipici dell'edilizia civile e quindi per applicazioni di tipo acustico per tale tipologia di materassini. Tale limitazione viene confermata come vedremo nell'applicazione sotto massetto dai risultati della prova calpestio. Ricercando una soluzione per l'impiego acustico, possiamo individuare nella sagomatura tipo B la forma più promettente nella quale si può spingere maggiormente verso densità superficiali medio basse raggiungendo valori di comprimibilità lievemente superiori.

Come accennato in precedenza, la UNI EN 12431 [13] non è in grado di fornire informazioni attendibili sul comportamento del materiale nel lungo periodo, sottoponendo il materassino ad un carico elevato per un intervallo di tempo molto ridotto. Si tenga presente infatti che a livello progettuale, per tenere in considerazione lo spessore reale dopo la posa si utilizza proprio il valore di  $d_B$ . Per tale ragione sono stati condotti specifici studi [38] per la verifica dell'attendibilità nel lungo periodo della suddetta norma, ricavando come ci sia legame intrinseco tra deformazione e prestazioni nel tempo, sottolineando inoltre l'importanza del valore del modulo elastico e della resistenza allo smorzamento viscoso del materiale esaminato. Materiali resilienti in gomma sottoposti a carichi elevati, superiori a  $50\text{ kPa}$ , presentano un andamento di performance stabile nel tempo, mantenendo quasi invariata la capacità di ritorno nel tempo, a differenza di materiali soffici a più bassa densità.

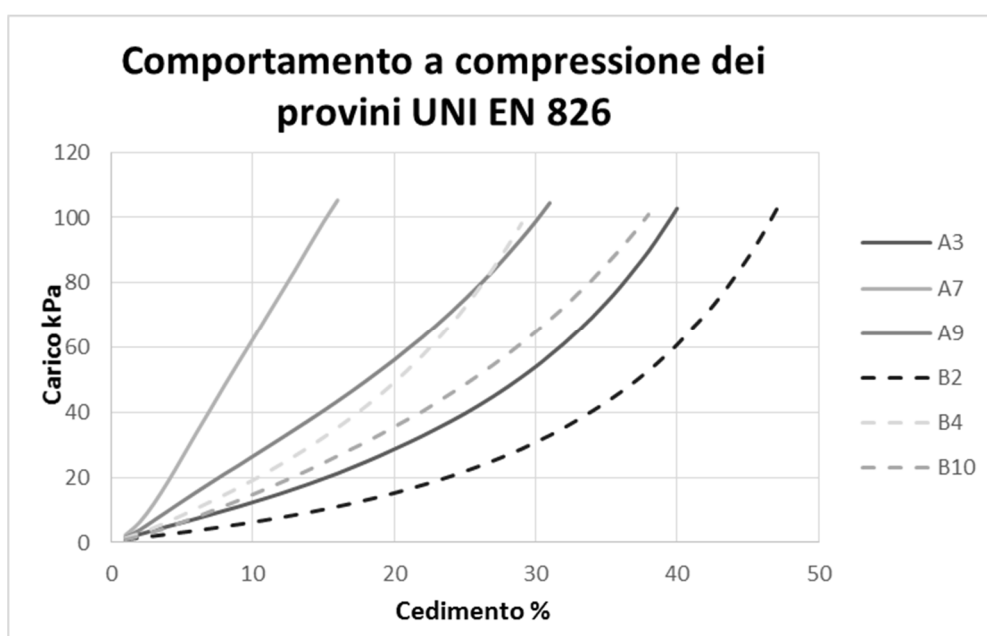
Si è dunque proceduto nell'indagine dei campioni con la determinazione del comportamento a compressione con riferimento alla UNI EN 826 [5], per la valutazione del modulo elastico e per i provini dalle mescole più promettenti ad una valutazione più accurata del cedimento nel tempo, attraverso la procedura proposta dalla norma UNI EN 1606 [6].

### *6.2.2 Prova di comportamento a compressione*

Per la valutazione del comportamento a compressione dei materassini sagomati, esaminati con riferimento alla norma UNI EN 826 [5], è stata impiegata la pressa elettromeccanica presentata che permette una forza applicata perpendicolarmente sulle facce maggiori dei provini quadrati. Lo scopo di tale norma è determinare il comportamento a compressione dei prodotti testati, evidenziandone l'eventuale cedimento o l'irrigidimento del materassino all'aumentare del carico al quale è sottoposto.

La procedura permette di utilizzare provini di diverse dimensioni tra quelle proposte, mentre fissa univocamente le condizioni di umidità e temperatura ed il numero dei campioni da sottoporre a test. Le prove sono state eseguite su almeno tre provini per tipologia di campione così da poter valutare il comportamento medio, con stagionatura sempre superiore alle 6 ore minime stabilite dalla normativa.

Una volta posizionato il provino tra le due piastre della pressa, viene sottoposto a pre-carico di  $250 Pa$ , dove non essendo questo un valore di carico sufficiente per determinare un cedimento rilevante per nessuno dei provini sottoposti a prova, si è valutato sempre  $d_0$  col suddetto carico. Attraverso la pressa elettromeccanica sarà possibile effettuare la compressione del provino, mantenendo una velocità di deformazione uguale a  $0,1d$  al minuto. Tale operazione deve essere portata avanti fino a raggiungere il 10% di cedimento o fino a "rottura" del materiale. Per compiere un'indagine più esaustiva, tale compressione è stata portata avanti fino al raggiungimento di un limite di forza dello strumento pari a  $112.5 [kN]$ , in modo da ricavare l'eventuale cedimento del materassino.

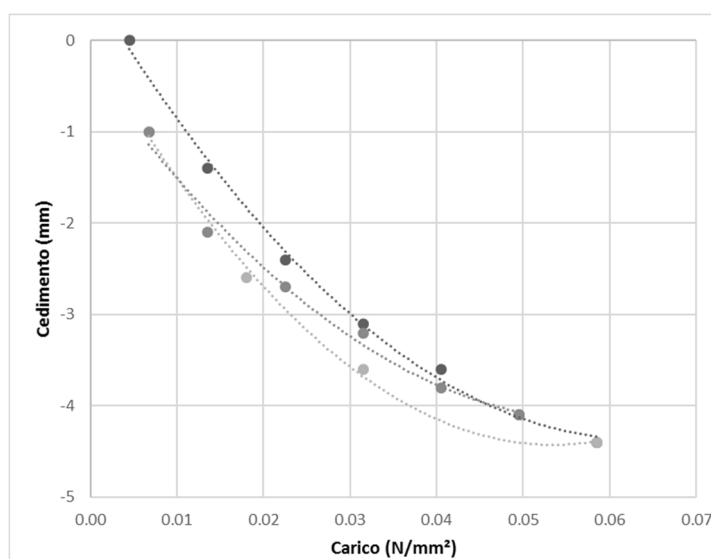


**Figura 6.5** Comportamento a compressione di alcuni campioni, con entrambe le sagomature.

Risulta evidente che operare simultaneamente su geometria, mescola e densità comporti un'estrema variazione nell'andamento deformazione-carico, tuttavia è possibile osservare che vi è un'influenza sensibile tra i campioni con sagomature differenti. Operando con un piedino con base d'appoggio superiore è possibile estendere il campo di linearità fino a carichi nettamente superiori alla soluzione con sagomatura tipo B. Si noti come, ad esempio, il campione A7 mantenga un comportamento lineare in tutto il range di carico, mentre l'insieme dei campioni B raggiunga il proprio limite di linearità per carichi generalmente inferiore ai  $20 kPa$ . Come risulterà chiaro, anche dalla presentazione delle prove successive, il campo migliore di funzionamento per questa tipologia di prodotti è compreso tra la fine del comportamento elastico e l'inizio dell'irrigidimento del materassino.



A tale proposito è stata svolta, con riferimento alla norma DIN 18134 [16], una prova di valutazione del massimo carico di lavoro dal materiale, definito a livello internazionale come *traffic load*. Si tratta di un parametro ricavato tramite il valore di cedimento massimo tollerabile per il materassino, dunque la sua valutazione permette di conoscere se nel campo di interesse e applicazione il materassino possa essere considerato un materiale resiliente a comportamento lineare o non lineare. La norma consente, attraverso due cicli di carico e scarico composti da almeno 10 stage, con incrementi sostanzialmente costanti e decrementi fissati, di valutare la capacità del materiale di gestire il carico. Attraverso tale metodo è possibile ricavare il campo di massima resa del materassino.



**Figura 6.6** Prova di *traffic load* eseguita sul campione B1.

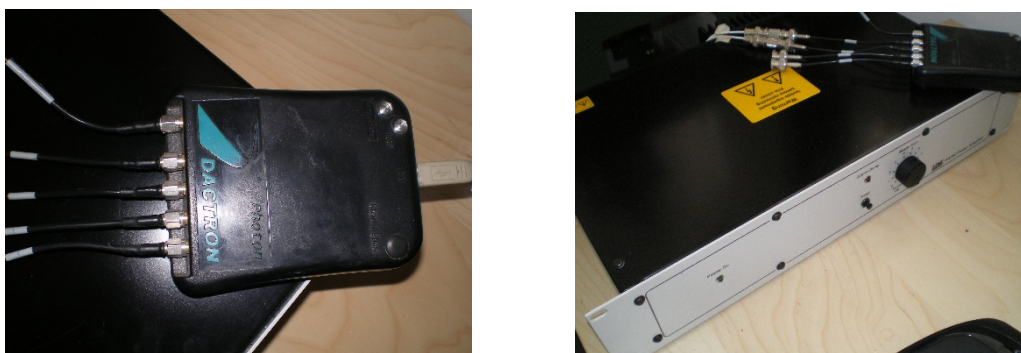
I risultati ottenuti per il campione *B1*, confermano la bontà di quanto anticipato, sottolineando come l'introduzione della sagomatura permetta di abbassare il carico necessario per "far lavorare" la gomma, massimizzando le proprie prestazioni nell'intervallo di carico in cui vi è il passaggio da comportamento lineare verso quello non lineare, iniziando progressivamente ad irrigidire.

Poiché, per poter eseguire tale procedura, ci si è dovuti avvalere del lavoro congiunto dell'intero reparto tecnico, visti i risultati ottenuti, tale prova verrà rieseguita in fase di verifica del materassino sagomato effettivamente prodotto.

### 6.2.3 Prova di rigidità dinamica

La normativa di riferimento, come anticipato, per la valutazione della rigidità dinamica per i diversi campioni di materassino sagomato effettuati è la norma UNI EN 29052:1[14]. Con lo scopo di permettere il confronto di campioni di produzione di materassini simili di qualità nota, la norma descrive la procedura di prova che consente di ricavare la rigidità dinamica apparente dalla misurazione della frequenza di risonanza.

La frequenza di risonanza del sistema è stata rilevata utilizzando uno *shaker* alimentato con un segnale sinusoidale tempo-variante *sine sweep* concentrato alle basse frequenze, nel campo da 2 a 150 Hz.



**Figura 6.7** L'accelerometro ed il sensore di forza in serie allo *shaker* sono collegati ad un analizzatore di segnale *Dactron Photon*, con amplificatore di potenza per il canale di forza.

La norma prescrive di controllare l'andamento della frequenza di risonanza  $f_r$  al fine di valutare la dipendenza con la forza utilizzata durante la misurazione. Lo *shaker* è posto al centro della piastra di carico mentre l'accelerometro va posizionato in tre posizioni sostanzialmente differenti a media distanza tra il punto di applicazione della forza e il bordo della piastra.



**Figura 6.8** Prova di rigidità dinamica.

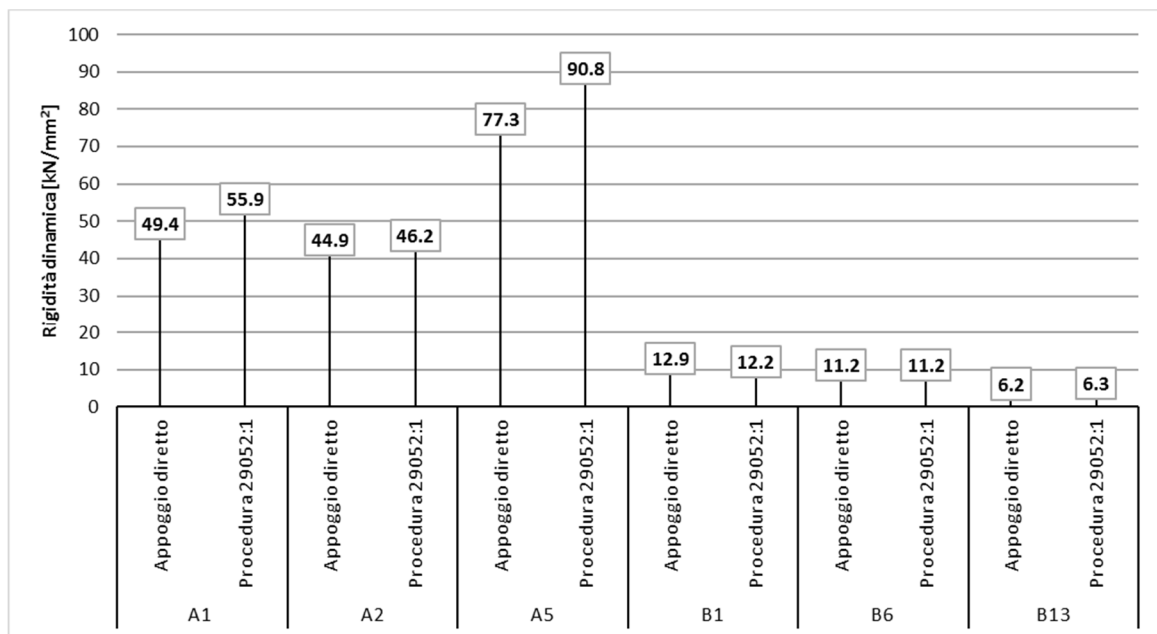
Per ciascuna posizione dell'accelerometro, per la totalità dei campioni nelle diverse mescole analizzati, i valori di forza impressi compresi tra 0.1 N e 0.4 N per diversi punti, ricavando infine la frequenza di risonanza per estrapolazione ad una forza di ampiezza nulla.

La rigidità dinamica viene ricavata in base alla frequenza di risonanza  $f_r$  dei diversi provini secondo la relazione:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t (f_r)^2 \quad [kN/mm^3],$$

dove  $m'_t$  è la massa totale per unità di superficie [ $kg/m^2$ ] utilizzata durante la prova e che comprenderà sia il contributo della piastra di carico che dello strato di gesso. La dipendenza della rigidità dinamica dalla frequenza di risonanza è quadratica, per cui ad alti valori di  $f_r$  corrispondono valori sempre maggiori di rigidità.

I valori di rigidità dinamica, ricavati secondo tali direttive, sono stati confrontati con i valori ottenuti dalle misure effettuate con la sola piastra di carico appoggiata sopra il materiale. Le misure effettuate sui provini con la sola piastra appoggiata sul materiale non hanno una massa superficiale  $m'_t$  leggermente inferiore, non essendo presente lo strato in gesso che normalmente ha un contributo di 200g per ogni provino.



**Figura 6.9** Valori di rigidità dinamica per alcuni campioni, riportati per le due diverse prove.

Durante il lavoro svolto si è potuto constatare come la presenza dello strato in gesso comporti un sostanziale peggioramento della rigidità dinamica, rispetto alla sua stessa valutazione con la sola piastra di carico, solo per i prodotti a più alta densità ed in genere più “rigidi”.

Per i campioni più morbidi non sono stati infatti misurati scostamenti tra i valori di rigidità dinamica ottenuti con la semplice piastra sovrapposta e il test eseguito in base alla normativa UNI 29052:1[14] al netto della differenza di massa che grava sul campione dovuta allo strato di gesso.

## 6.3 Terzo livello di indagine

### 6.3.1 Prova di calpestio

La procedura per la prova di attenuazione di rumore di calpestio si articola in diverse fasi: costruzione e successiva stagionatura di un massetto sopra il materassino in esame; misura dei livelli di rumore nell'ambiente sottostante il solaio, sotto l'azione di un generatore di rumore di calpestio normalizzato; demolizione del massetto e rimozione del materassino; misura del nudo, con una nuova misura dei livelli di rumore sotto l'azione del generatore di calpestio precedentemente impiegato.

Tale tipologia di indagine costituisce uno strumento potente per l'effettiva valutazione delle proprietà acustiche del materassino prodotto e la stima del reale comportamento in opera, ma necessita di tempi inevitabilmente lunghi. Per tale ragione, durante il periodo di ricerca, è stato possibile effettuare solamente cinque misure in laboratorio per la riduzione di rumore di calpestio. Di queste, una prova è stata effettuata con due diversi spessori di massetto, dunque sono stati provati solo quattro tipologie differenti di pannelli identificati in A5, B1, B8 e B13.

Per descrivere le prestazioni di isolamento acustico dal rumore di calpestio, per i solai è possibile utilizzare il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_n$  attraverso la relazione:

$$L_n = L_i - 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad [dB],$$

dove  $L_i$  è il livello medio di pressione sonora misurata quando sul solaio agisce il generatore di rumore di calpestio normalizzato,  $A_0$  è l'area di assorbimento equivalente di riferimento pari a  $10 \text{ m}^2$  e  $A$  è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, calcolata mediante la relazione:

$$A = 0.16 \frac{V}{T} \quad [m^3],$$

in cui  $V [m^3]$  rappresenta il volume dell'ambiente e  $T [s]$  è il tempo di riverberazione.

Per effettuare la misura di  $L_i$ , livello medio di pressione sonora in emittente, secondo la procedura indicata nella norma ISO 10140:3 [8] ci si avvale di una macchina normalizzata, tale necessità è legata al fatto che come detto, la misura non è differenziale, ma richiede l'acquisizione del solo livello di rumore in ambiente ricevente. Pertanto la sorgente del rumore impattivo deve consistere in un dispositivo atto a garantire una forza costante e riproducibile sulla pavimentazione, per la presentazione e descrizione del generatore di calpestio si rimanda al paragrafo relativo 5.3.2.

Il generatore di rumore è stato posizionato in sei punti specifici della superficie del solaio, superiori a quanti richiesti dalla normativa, e si registra il livello di pressione sonora non ponderato su altrettanti sei punti distribuiti nell'ambiente sottostante il solaio, non lavorando in presenza di asta rotante. Tali posizioni sono state valutate, come presentato in precedenza, attraverso un accurato lavoro di qualificazione del laboratorio di prova effettuata dall'Ing. Luison durante il suo dottorato di ricerca [25].

La misura può essere effettuata solo dopo che il livello di pressione sonora si sia

stabilizzato dopo l'accensione della macchina del calpestio, attraverso microfoni, per ogni banda di frequenza di 1/3 d'ottava da 50 Hz a 5 kHz, vengono, misurati durante la prova, anche i livelli di fondo, che andranno confrontati coi livelli  $L_i$  trovati e, se di entità comparabile, questi ultimi dovranno essere opportunamente corretti. Infine si procede al calcolo della media logaritmica dei rilievi effettuati sui ventiquattro rilievi ottenuti dalle combinazioni delle posizioni di sorgente e microfono.

Una volta ottenuti i livelli di rumore di calpestio normalizzati sul solaio analizzato,  $L_n$ , per le due configurazioni di solaio isolato e di solaio nudo, gli stessi livelli vanno sottratti e la differenza rappresenta la riduzione di livello di pressione sonora di calpestio  $\Delta L$ , ottenuta in bande di 1/3 d'ottava.

Dai risultati presentati si può notare come gli andamenti della curva di attenuazione sonora risultino sempre inferiori a quanto stimato dai modelli teorici e dalla norma UNI EN 12354:2[12]. Come analizzato da Cho [32 33], le norme ISO 9052:1[18] e UNI EN 29052 [15] portano a sovrastimare le capacità isolanti dei materiali testati per valori bassi di frequenza naturale, infatti, minore è la rigidità dinamica valutata maggiore risulterà il divario del comportamento effettivo in laboratorio e in opera, sottolineando come il modello ad un grado di libertà considerato, risulti inefficace per una corretta stima della riduzione del rumore di calpestio.

Il comportamento effettivo dell'isolatore risulta traslato rispetto a quanto teorizzato verso valori maggiori di frequenza, rendendo necessaria una valutazione dell'effettiva pulsazione di risonanza nell'applicazione per ricavarne l'andamento del basamento flottante. Il suono di natura impattiva a basse frequenze comporta picchi di risonanza per pavimenti galleggianti che vengono sottostimati con una valutazione attraverso il modello ad un grado di libertà come proposto dalle norme. Le principali ragioni di tale scostamento vengono imputate alla massa che l'isolatore vede realmente e alle condizioni di bordo. Sarebbe dunque auspicabile l'introduzione di un sistema del tipo massa-molla-massa che permetta di valutare anche l'effetto del solaio di base per aumentare l'efficacia dei modelli teorici nel campo di bassa frequenza [41]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)} \quad [Hz],$$

dove  $m [kg/m^2]$  è la massa superficiale del pavimento galleggiante, mentre  $M [kg/m^2]$  è la massa per unità di superficie del solaio di base.







**Figure 6.10, 6.11** Le diverse fasi dell'intera tempistica di prova dalla stesura del massetto alla misura.

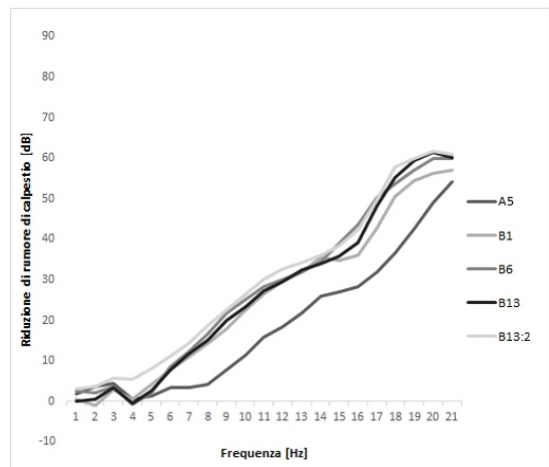
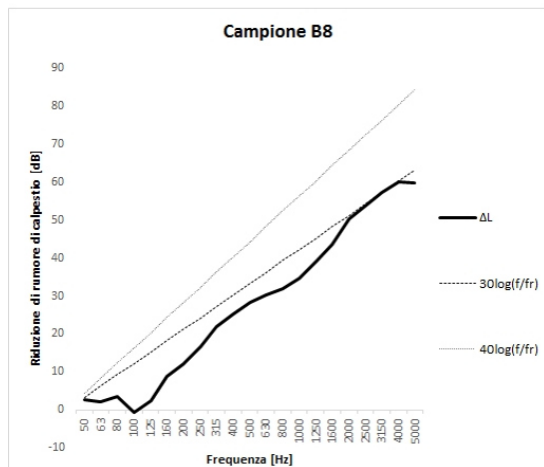
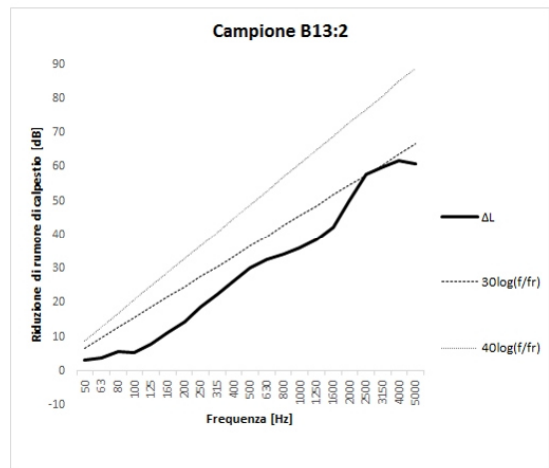
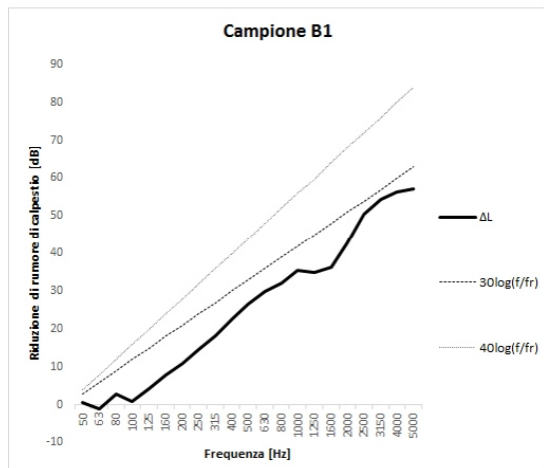
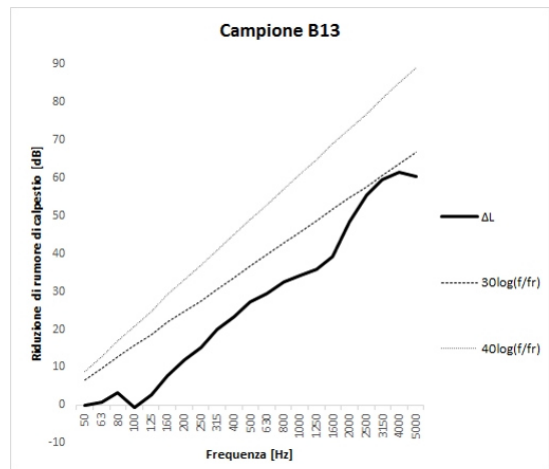
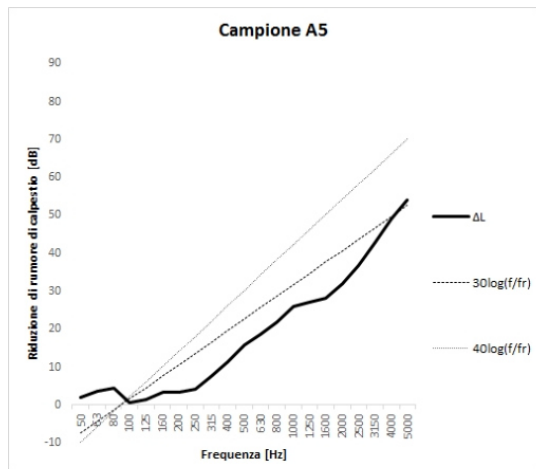


Figura 6.12 Curve di  $\Delta L$  ottenute dalle prove in laboratorio per i campioni esaminati in laboratorio.



Da questo punto di vista il miglioramento della prestazione dovuto ad un aumento del peso del massetto nella misura del campione B13:2, sebbene ancora inferiore ai modelli di stima, sembra confermare che il materassino necessita di carichi superiori per esprimere al massimo le sue proprietà isolanti.

Il confronto con altre pubblicazioni [32 35], relative alla capacità di riduzione sonora di una struttura dotata di pavimento galleggiante, ha comunque evidenziato per i materassini testati in laboratorio l'influenza dovuta al modulo elastico e all'area effettiva di contatto con il solaio. Senza considerare l'importanza conclamata della correlazione tra rigidità dinamica e riduzione di rumore di calpestio [42 43 44].

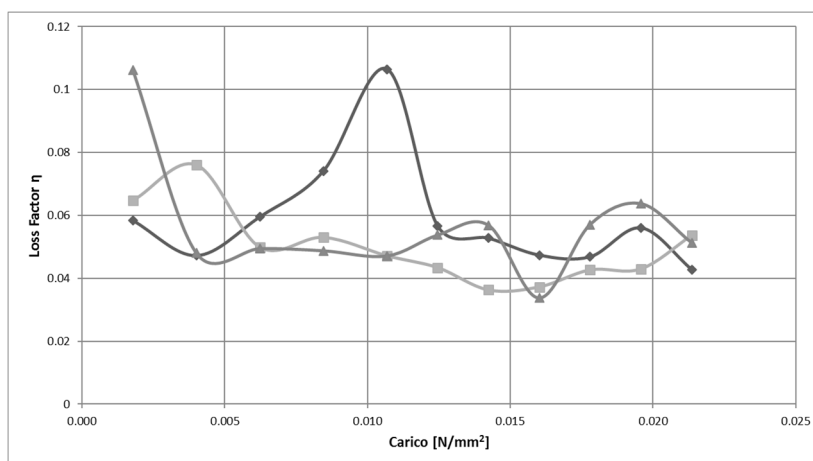
I campioni con sagomatura tipo B hanno dimostrato di riuscire a "far lavorare" maggiormente la gomma, attraverso una maggiore concentrazione del carico anche aiutati dalla densità superficiale minore. Tali osservazioni non possono che avere un risvolto anche di interesse economico, in quanto vi è un minor utilizzo di materiali unito ad un aumento di prestazioni se confrontato con la soluzione di riferimento di tipo tradizionale in gomma, materassino pieno.

Sebbene possa sembrare che a parità di sagoma, per i campioni B, l'ottimizzazione sulle diverse mescole non abbia alterato significativamente l'andamento della riduzione del rumore di calpestio, vi sono stati miglioramenti sensibili nel campo delle basse frequenze. Tali variazioni risultano molto importanti nella valutazione dell'indice  $R_w$ , il cui valore, secondo la norma ISO EN UNI 717-2 [4], è bastato sul confronto con un'apposita curva di ponderazione anch'essa operante tra 100 Hz e 3150 Hz. Le differenze tra le curve di riduzione di rumore di calpestio dei campioni B1 e B13 comportano un passaggio del valore di  $R_w$  da 25 dB a 29dB.

### 6.3.2 Prova smorzamento

Per poter giungere ad una corretta valutazione del fattore di smorzamento e del relativo coefficiente di perdita o *loss factor*, si è deciso di procedere con particolare cura. Come esposto nel paragrafo 4.3.5, i metodi tradizionalmente proposti potrebbero risultare poco affidabili per i materassini testati, dunque si è proceduto a ricavare il valore di smorzamento prima per via teorica e successivamente sperimentale.

L'indagine condotta con il metodo di attenuazione dell'ampiezza, ha evidenziato una variabilità molto marcata di *loss factor* con valori anche molto ridotti per il medesimo campione.



**Figura 6.13** Andamento al carico del *Loss Factor* effettuato per diverse misurazioni sul medesimo campione.

A fronte di tale risultati si è deciso di utilizzare come riferimento la norma per elementi antivibranti UNI 11059 [11]. La presente norma, definendo le modalità di prova per la verifica ed il controllo di materassini elastomerici, consente di svolgere l'indagine sulla qualifica e controllo delle caratteristiche meccaniche e delle prestazioni. Nel nostro caso particolare ci concentreremo sui metodi specifici proposti per una valutazione accurata dello smorzamento e, conseguentemente del *loss factor*, un controllo sulla rigidità dinamica già valutata e presentata in precedenza attraverso il riferimento alla UNI EN 29052:1[14]. Poiché nel corso della ricerca svolta è risultato come vedremo, che un materassino sagomato da 17 mm preso singolarmente non risulta adatto all'isolamento di macchine vibranti a basse frequenze disturbanti, si è proceduto ad indagare su eventuali combinazioni di materiali per la generazione di elementi a maggiore spessore che garantissero le prestazioni desiderate. Lo studio effettuato ha portato un'indagine preliminare di una vasta tipologia di prodotti formati dalla sovrapposizione di strati diversi. Tuttavia una sola soluzione è stata realmente curata nel dettaglio, si tratta di un elemento composito in gomma che sfrutta la tecnologia sagomata di appoggio studiata generando uno spessore complessivo di 45 mm. Tale soluzione per semplicità verrà indicata con il nome di Campione C1.

Sarà necessario effettuare due prove distinte per la determinazione delle caratteristiche meccaniche ricercate per materassini elastomerici analizzati: le prove quasi-statiche e le prove dinamiche forzate.

#### *Prove quasi-statiche*

Per prove quasi-statiche si intendono le prove di caratterizzazione aventi lo scopo di valutare il comportamento meccanico dei materassini elastomerici a fronte di carichi che variano in modo "lento". Tali prove consistono nell'applicazione di carichi crescenti, con legge lineare, sino ad un valore massimo e successivamente decrescente fino a zero pure con legge lineare. Seguendo le direttive della normativa si è scelto di considerare i primi due cicli di carico-scarico come cicli preliminari, che servono per assestare il campione e il suo accoppiamento meccanico all'attrezzatura di prova e successivamente solo l'ultimo ciclo è

preso in esame per la valutazione dei parametri quasi statici.

I campioni da sottoporre a prova dovranno avere dimensioni di almeno  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  con spessori inferiori a 50 mm, e la prova dovrà essere effettuata in ambiente a temperatura controllata, con una durata dei cicli ben definita secondo quanto indicato nella suddetta norma.

Attraverso questa tipologia di prova è possibile misurare il carico applicato al campione ed ai suoi cedimenti in quattro posizioni e in corrispondenza degli spigoli delle piastre di carico, permettendo di ricavare: la curva carico-tempo relativa ai cicli di carico effettuali; la rigidità secante quasi statica,  $k_{qs}$ , valutata considerando la fase di carico del ciclo conclusivo della prova di carico e facendo riferimento alla seguente relazione:

$$k_{qs} = \frac{\sigma_{fin} - \sigma_{in}}{\delta_{fin} - \delta_{in}} \quad [kN/mm^3],$$

dove  $\delta_{in}$  il cedimento per il carico  $\sigma_{in}$  e  $\delta_{fin}$  il cedimento per il carico  $\sigma_{fin}$ . Si osservi che il carico  $\sigma_{fin}$  non corrisponde al valore massimo del carico  $\sigma_{max}$  raggiunto nel corso delle prove; lo smorzamento isteretico quasi statico  $g_{qs}$  per i materassini viene ricavato come:

$$g_{qs} = 2 \times v_{i,qs} \times k_{qs} = \tan(\vartheta_{qs}) \times k_{qs};$$

il fattore di smorzamento isteretico quasi-statico  $v_{i,qs}$  è valutato utilizzando la seguente relazione:

$$v_{i,qs} = \frac{1}{\pi} \times \frac{E_{ciclo}}{E_{carico} - \frac{E_{ciclo}}{2}},$$

in cui:

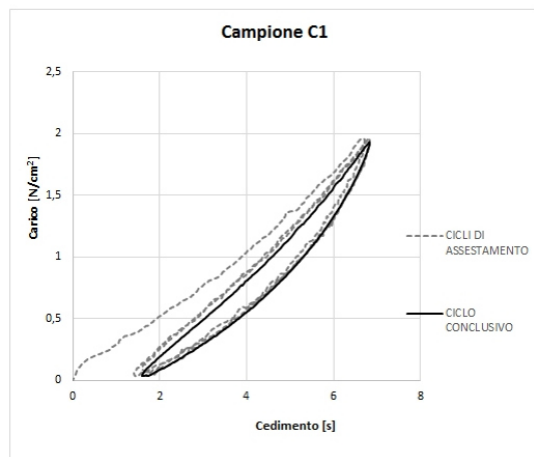
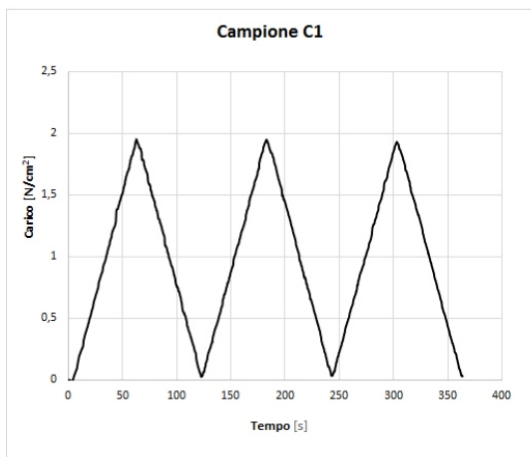
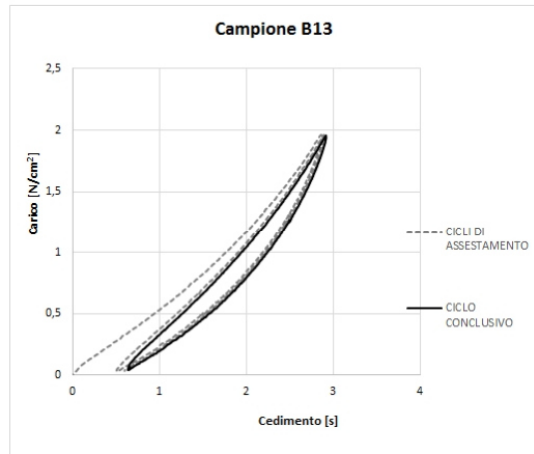
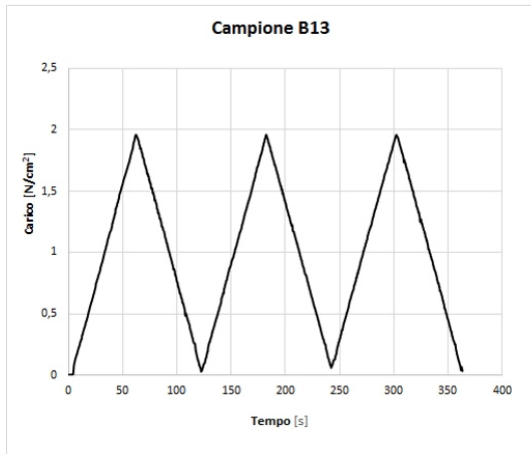
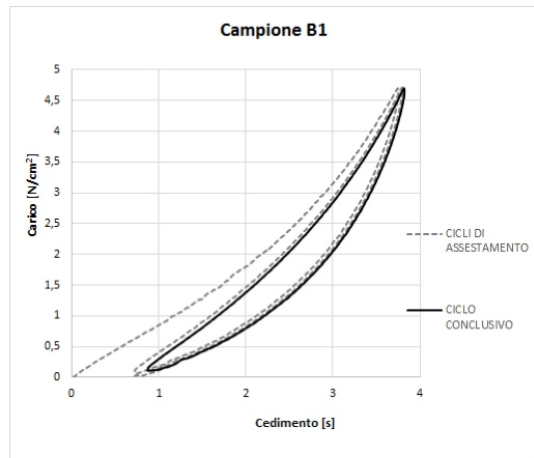
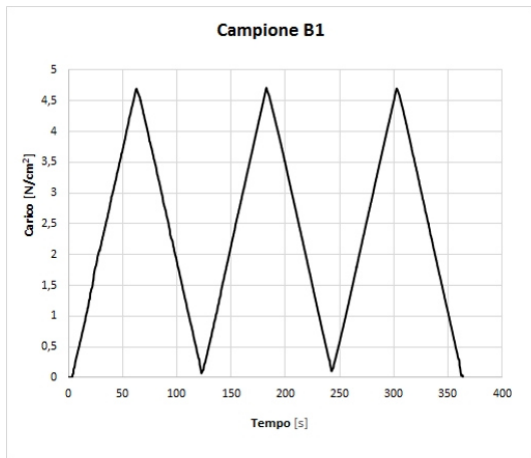
L'energia dissipata nel ciclo completo  $E_{ciclo}$  vale:

$$E_{ciclo} = \int_0^{\delta_{max}} \delta \times d\sigma,$$

e  $E_{carico}$ , l'energia accumulata nella fase di carico:

$$E_{carico} = \int_0^{\delta_{max}} \delta \times d\sigma;$$

infine il fattore di perdita quasi-statico  $\tan(\vartheta_{qs})$  viene ricavato attraverso la relazione:  $\tan(\vartheta_{qs}) = 2 \times v_{i,qs}$ .



**Figura 6.14** Riportati per campione gli andamenti al carico in prova nel tempo con i relativi cedimenti.

### Prove dinamiche forzate

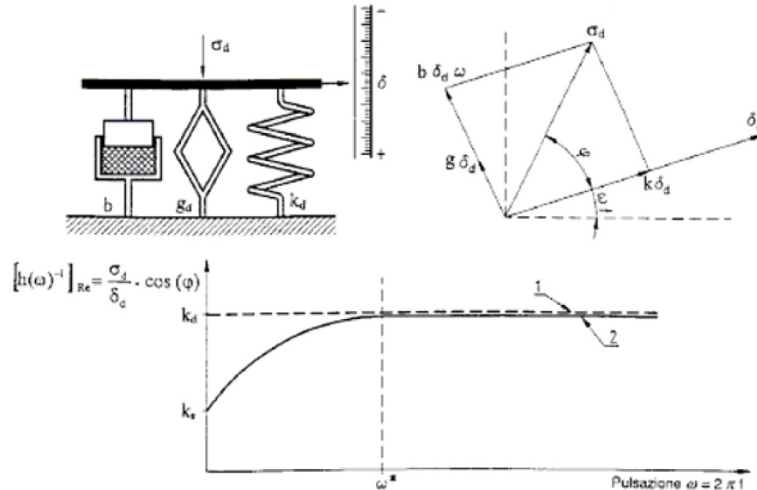
Attraverso le prove dinamiche risulta possibile valutare le caratteristiche meccaniche di materassini elastomerici quali la rigidità e smorzamento del materassino. Tali indagini specifiche, tramite un'opportuna elaborazione dei dati, consentono di determinare i parametri dinamici e la curva di risposta in frequenza cedimento/carico specifico. L'analisi dei dati deve essere effettuata con particolare attenzione, in quanto potrebbero essere presenti apprezzabili forze di inerzia e movimenti dell'attrezzatura di prova capaci di "inquinare" i valori sperimentali ricavati.

Le modalità di prova prevedono l'applicazione di carichi specifici  $\sigma(t)$ , agendo in controllo di forza, caratterizzati dalla presenza di una componente statica,  $\sigma_s$ , e di una componente dinamica,  $\sigma_d$ , variabile nel tempo  $t$  con legge sinusoidale

$$\sigma(t) = \sigma_s + \sigma_d \sin \omega t.$$

Nel corso della prova la frequenza  $f$ , o relativa pulsazione  $\omega$ , è fatta variare tra un valore inferiore  $f_i$  e un valore superiore  $f_f$ , attraverso incrementi o passi discreti  $\Delta f$  al fine di coprire tutto lo spettro di frequenza desiderato.

Con particolare attenzione si è optato per un'indagine specifica, limitata ai soli tre campioni precedentemente individuati, con carico di prova statico  $\sigma_s$  pari al  $1.5 [N/cm^2]$  con un pre-carico di  $0.4 [N/cm^2]$  mentre la componente dinamica associata a  $\sigma_d$  è stata fissata pari a  $\pm 0.5 [N/cm^2]$ , nel campo di frequenza di maggiore interesse, ossia tra 2 e 40 Hz, con passi discreti da 2 Hz.



**Figura 6.15** Modello elasto-viscoso-istereti.

Per determinare la rigidità dinamica e i coefficienti di smorzamento si dovrà fare riferimento a un modello maggiormente complesso rispetto a quanto visto e presentato in precedenza. Facendo riferimento al modello «elasto-viscoso-isteretico», illustrato nella figura 6.15 e assunto come rappresentativo del comportamento ideale del materiale, dovranno essere valutati, attraverso procedimenti statistici di interpolazione lineare, i parametri elastici e dissipativi del campione sulla base della relazione:

$$h(f)^{-1} = [k_d] + j \times [g_d + b \times (2\pi f)].$$

La parte reale della funzione  $h(f)^{-1}$  è una costante pari alla rigidezza dinamica, la parte immaginaria è una retta con intercetta all'origine pari al coefficiente di smorzamento di natura isteretica, e con pendenza proporzionale al coefficiente di smorzamento di natura viscosa.

Non va dimenticato, come riportato sempre in figura 6.15, che i materiali elastomerici risultano avere una zona iniziale soggetta a una transizione dal comportamento quasi-statico al comportamento dinamico caratterizzato da una crescita della rigidezza da  $k_{qs}$  a  $k_d$ . Questo fenomeno è noto come irrigidimento dinamico. Il valore limite di frequenza, nel quale si verifica tale fenomeno, prende il nome di frequenza di transizione  $f^*$  o pulsazione di transizione  $\omega^*$  e andrà stimata e valutata per ogni tipologia di geometria e mescola del materassino esaminato. Le valutazioni e i calcoli, necessari alla stima delle caratteristiche elastiche e dissipative, andranno dunque effettuati con procedimenti statistici di interpolazione lineare per la valutazione dei parametri per frequenze  $f$  maggiori della frequenza di transizione  $f^*$ . È possibile inoltre valutare anche l'irrigidimento dinamico  $R$  se vengono sottoposti a prova i medesimi campioni precedentemente sottoposti a prova quasi-statica.

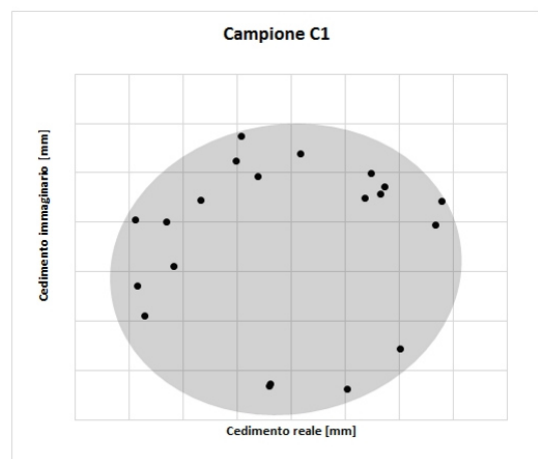
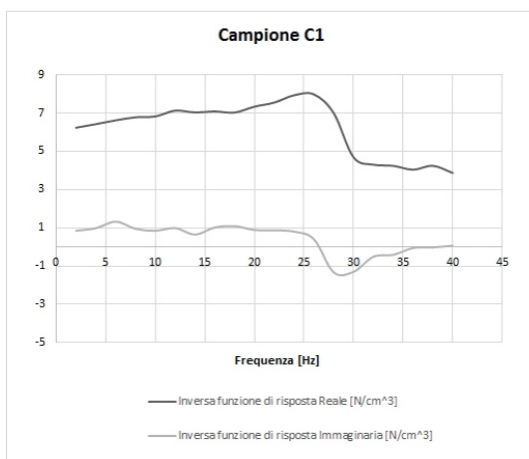
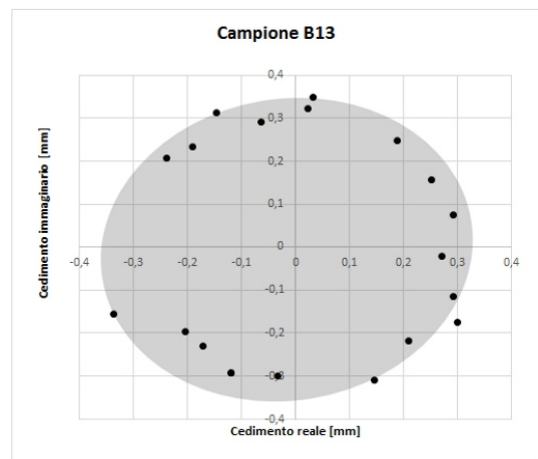
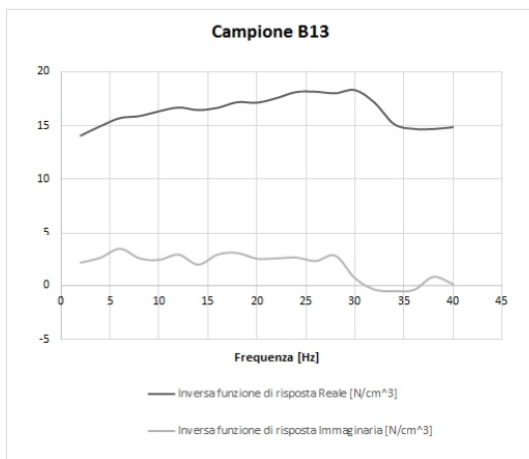
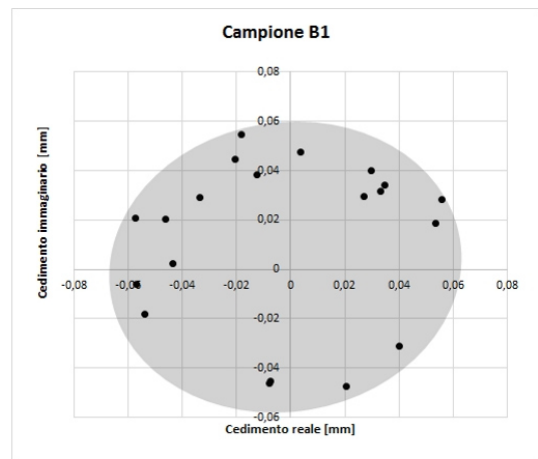
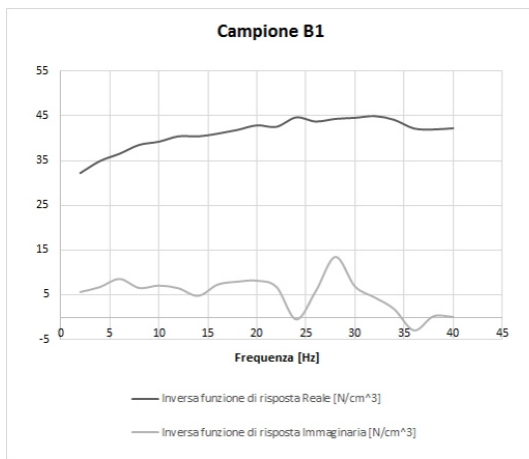
A partire dai parametri  $g_d$  e  $b$ , si valutano quindi il fattore di smorzamento isteretico dinamico  $v_{i,d}$ , il fattore di perdita  $\tan(\theta_d)$  e il fattore di smorzamento viscoso dinamico  $v_{v,d}$  attraverso le classiche espressioni:

$$v_{i,d} = \frac{g_d}{2 k_d}$$

$$\tan(\theta_d) = \frac{g_d}{k_d}$$

$$v_{v,d} = \frac{b}{2 \sqrt{k_d m}}$$

Da questa prova è possibile ricavare, la curva carico-tempo relativa all'andamento in frequenza, la rigidezza dinamica  $k_d [kN/mm^3]$ , lo smorzamento isteretico dinamico  $g_d [kN/mm^3]$ , lo smorzamento viscoso  $b$ , il fattore di smorzamento di smorzamento isteretico dinamico  $v_{i,d}$ , il fattore di perdita dinamico  $\tan(\theta_d)$ , il fattore di smorzamento viscoso dinamico  $v_{v,d}$ .



**Figura 6.16** Riportati per campione gli andamenti delle funzioni di risposta al variare delle frequenze e i relativi valori di cedimento.

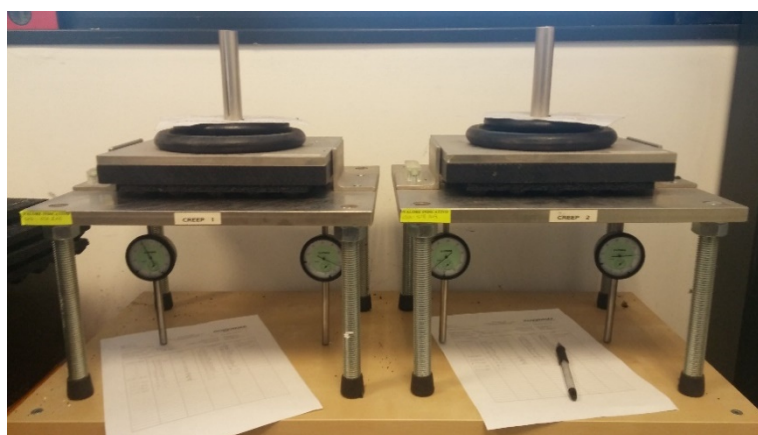
Attraverso queste prove si è potuto ricavare un valore di *loss factor* per le soluzioni analizzate compreso tra 0.16 e 0.20, prossimo ai valori tipici di materassini in gomma a forma piena, e valutare la bontà di misura di rigidità dinamica effettuata con riferimento alla UNI EN 29052:1[14]. I risultati ottenuti confermano tali valori, compresi tra 8 e 16 [ $kN/mm^3$ ], inoltre attraverso la prova effettuata è stato possibile ricavare l'irrigidimento dinamico dei materassini sagomati provati che è compreso tra 1.9 e 2.5.

### 6.3.3 Prova di scorrimento viscoso a compressione

La norma UNI EN 12431 [13] indica una procedura per la determinazione dello spessore degli isolanti utilizzati nei pavimenti galleggianti, tuttavia come detto, non permette la conoscenza dell'andamento di tale grandezza nel tempo. Si è proceduto dunque alla determinazione dello scorrimento viscoso a compressione per poter giungere ad una completa caratterizzazione di un materassino antivibrante, effettuando la misura secondo la norma UNI EN 1606 [6].

Tale norma stabilisce una metodologia per la determinazione di questa grandezza, valutando la deformazione nel tempo generata da un determinato carico statico di materiali utilizzati sotto pavimenti galleggianti. Il comportamento nel tempo del prodotto sottoposto a carico, al fine di poter predire con buona approssimazione lo spessore effettivo del materassino, può risultare di particolare interesse nel caso di applicazioni in campo acustico.

Per poter effettuare tale misura viene richiesto un sistema di carico consiste in una piastra in acciaio nickelato sollevata e poggiante su barre filettate, dotata di livelle per il posizionamento alla quale sono fissati due comparatori a quadrante con precisione di 0,01 mm, che valutano lo spessore in funzione della base di appoggio di riferimento come riportato in figura 6.17.



**Figura 6.17** dispositivi a disposizione per la rilevazione dei cedimenti nel tempo dei materiali utilizzati come sottofondi in pavimenti galleggianti.

La metodologia di prova prevede che, dopo l'applicazione di un "peso morto" per la misurazione dello spessore iniziale del campione, quando il dispositivo di misura si è stabilizzato, si procede all'applicazione del carico ed al monitoraggio a intervalli di tempo



prestabiliti della variazione di spessore. È così possibile valutare l'effetto dello scorrimento viscoso nel tempo del materiale attraverso i valori del cedimento incrementale, misurando la deformazione di un provino campione di materiale di superficie  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  sotto un carico costante in condizioni ambiente controllate. L'entità del carico deve essere stabilita considerando le caratteristiche elastiche del materiale misurate secondo la norma UNI EN 826 [5].

Nell'appendice A della norma stessa sono fornite formule per il calcolo previsionale del comportamento del materiale fino a cinque anni. Perché si possano avere valori significativi senza procedere nella misura per intervalli di tempo eccessivamente lunghi, si è scelto di proseguire la misura per almeno 30 giorni per le tre tipologie di provini di maggiore interesse: B1, B8 e B13.

Attraverso un modello di calcolo, basato sull'equazione di Findley, è possibile descrivere il comportamento dello scorrimento viscoso degli isolanti nel lungo periodo. L'equazione è definita come:

$$X_t = X_0 + m_t b \quad [mm],$$

dove  $X_t$  è la deformazione subita dal materiale,  $X_0$  è lo spessore del materiale a riposo e  $m$  e  $b$  sono costanti del materiale.

Riportando l'equazione in forma logaritmica:

$$\log_{10}(X_t - X_0) = \log_{10} m + b \log_{10} t$$

risulta che  $\log_{10} m$  è l'intersezione della retta sulle ordinate,  $b$  è il coefficiente angolare della retta definita da questa equazione e  $t$  è il tempo. Queste costanti devono essere calcolate mediante un'analisi di regressione basata sulla deformazione misurata in funzione del tempo.

La possibilità di stabilire la variazione dello spessore del materiale su lungo periodo, permette di conoscere anche la possibile variazione della prestazione acustica a lungo termine del prodotto. Come si può notare dai risultati ottenuti, i materassini in gomma riciclata testati vengono interessati da cedimenti percentuali contenuti e solo nei primi periodi. Viene dunque confermata la capacità della gomma riciclata di non incorrere più in fenomeni evidenti di invecchiamento ma di essere in buona approssimazione un materiale stabile.

Tale proprietà è particolarmente gradita in campo edile quanto nel campo acustico in quanto, a differenza di materiali molto cedevoli, permette di fornire il dato di rigidità dinamica del materiale non solo dopo breve tempo, ma anche, con una certa affidabilità, dopo lungo tempo. La variazione della frequenza di risonanza infatti, risulta funzione dello spessore [42], segue l'andamento della legge:

$$f_{r,d'} = f_{r,d} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad [Hz],$$

dove  $f_{r,d}$  [Hz] è la frequenza di risonanza misurata al carico considerato ed  $\varepsilon$  è il rapporto adimensionale, definito come:

$$\varepsilon = \frac{d'}{d},$$

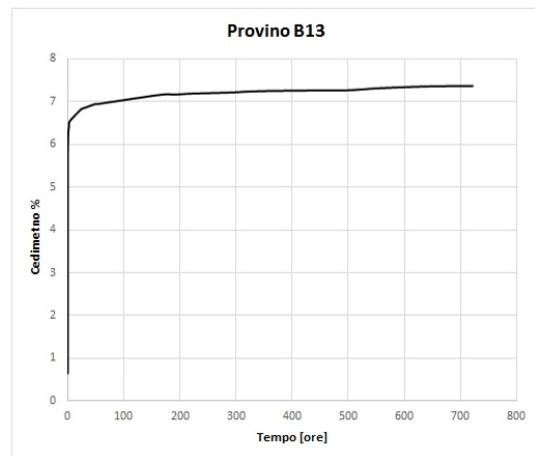
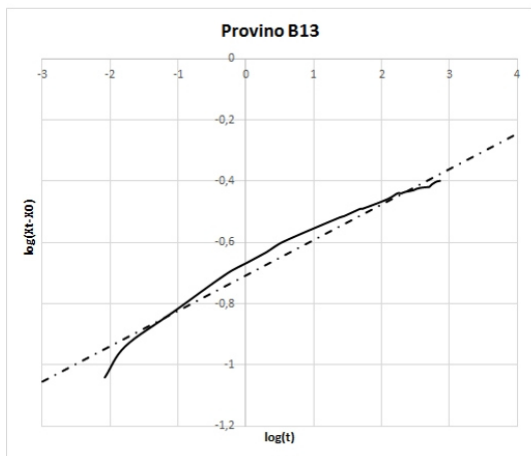
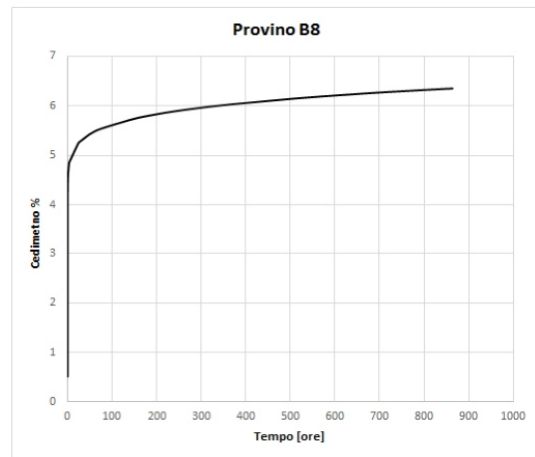
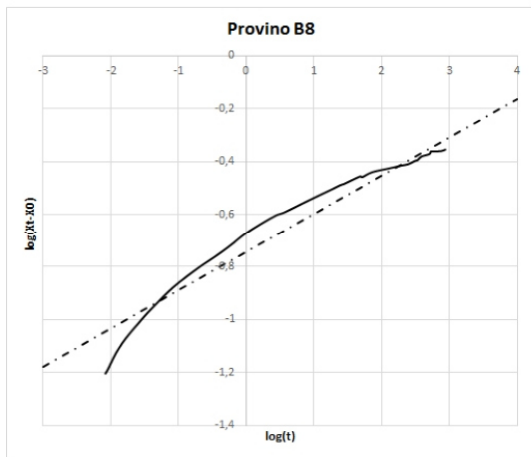
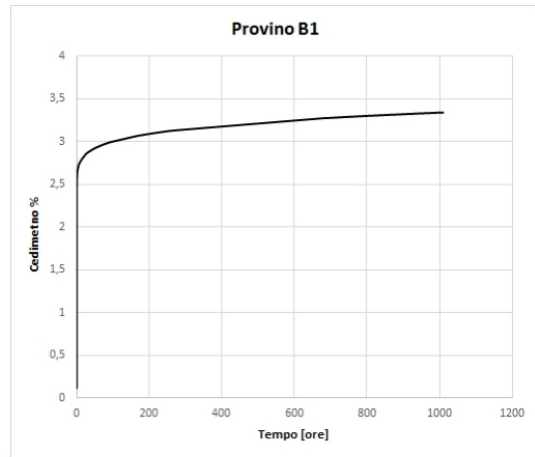
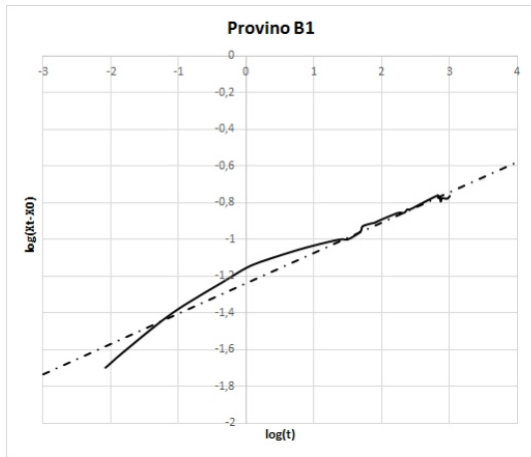


Figura 6.18 Grafici relativi ai *creep* per i diversi materiali.

in cui  $d'$  rappresenta lo spessore al tempo considerato e  $d$  lo spessore teorico.

Il valore di  $f_{r,d'}$  [Hz], frequenza di risonanza misurata sul campione in prova, andrà incontro a un progressivo aumento nel tempo e con esso si avrà l'aumento della rigidità dinamica e conseguente calo delle prestazioni acustiche del sistema. Per la stima di tale andamento sarà opportuno dunque utilizzare lo spessore estrapolato dal modello di calcolo, basato sull'equazione di Findley proposta. La verifica della variazione di spessore a lungo periodo fornisce un'ulteriore accuratezza alla misura della rigidità dinamica e dunque ai relativi modelli previsionali per la determinazione dell'attenuazione da rumore di calpestio.

È stata ipotizzata un'indagine sperimentale sull'andamento nel tempo della frequenza di risonanza per migliorare ulteriormente la caratterizzazione del materassino fornendo un valore indicativo legato al decadimento delle prestazioni. Lo scopo di tale prova risiede, evidentemente, nel ricercare anche per la geometria analizzata, l'andamento della correlazione tra scorrimento viscoso e calo delle prestazioni di un materiale resiliente.

Nelle formulazioni proposte infatti il dato di rigidità dinamica viene estrapolato nell'approssimazione che il modulo di elasticità del materiale resiliente rimanga costante nel tempo, tuttavia nella realtà anche il modulo di elasticità,  $E$ , può essere soggetto a variazioni, a seconda della tipologia del materiale e delle condizioni ambientali a cui è sottoposto[36]. Da qui l'importanza di ricercare un materiale resiliente che abbia rigidità più bassa possibile con elevato modulo elastico nella misura in cui queste portino a cambiamenti ridotti nel tempo.

Come suggerito in diversi altri studi [38 42], la variazione di spessore dovuta al cedimento per *creep* potrebbe avere un'influenza non trascurabile sulle caratteristiche dinamiche del materiale sul lungo periodo. Si è deciso dunque di utilizzare un modello semi-empirico per la valutazione della rigidità dinamica a lungo periodo in relazione al cedimento del materiale, utilizzando le metodologie descritte nelle norme UNI EN 12431[14] e UNI EN 1606 [6], simulando il funzionamento in opera del materassino su di un campione un metro per un

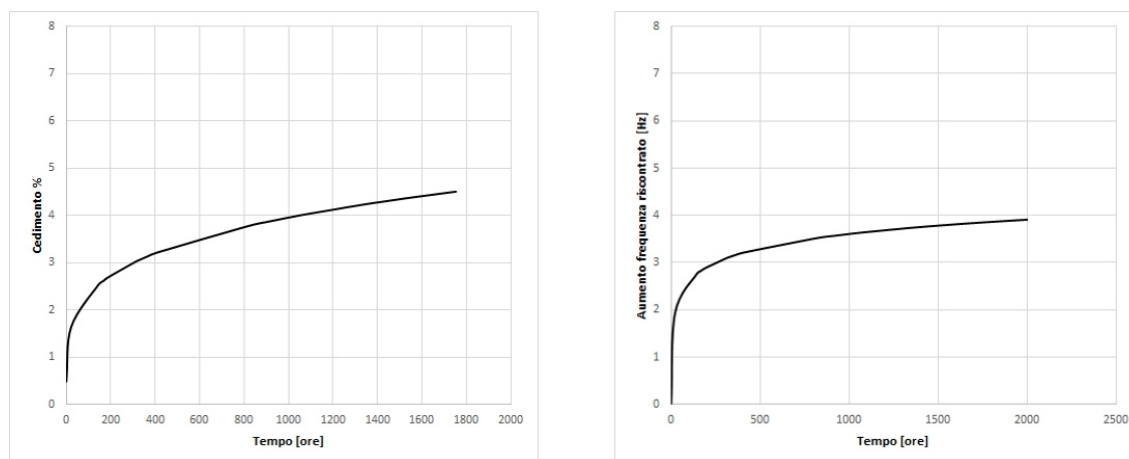


**Figura 6.19** Materassino e piastra armata utilizzata per le misure *creep*.

metro a cui è stato sovrapposto un blocco di cemento armato dal peso circa 1100kg come in figura 6.19 , dotato di due compratori.

La misura delle due grandezze di interesse non è stata fatta in condizioni di temperatura e umidità standard, ma all'interno del magazzino aziendale. Per rendere tale misura significativa si è deciso di proseguirla per tempi molto lunghi, oltre i due mesi, risulta chiaro che è stato possibile nell'intervallo di lavoro svolto, eseguire una sola misura completa. Una seconda indagine è tutt'ora in atto, ma non è stata inclusa nella presentazione.

La prova sperimentale effettuata ha confermato come il cedimento e il calo delle prestazioni rimanga contenuto, con un cedimento inferiore al 5%, e un innalzamento della frequenza proprio inferiore a 4 Hz, confermando come anche per gli alti carichi di prova la soluzione sagomata vada incontro a fenomeni evidenti di scorrimento viscoso solo nel primo periodo successivo alla posa del carico.



**Figura 6.20** Andanamento del cedimento e della frequenza nel tempo del materiale sotto piastra armata.

## CAPITOLO 7 CONCLUSIONI E SOLUZIONI PROPOSTE

L'attività di ricerca svolta ha permesso di effettuare un'analisi sperimentale di materiali resilienti sagomati in elastomeri riciclati per l'isolamento acustico e delle vibrazioni in applicazioni civili ed industriali. Accanto all'analisi dei parametri tradizionali, come la variazione delle proprietà statiche e dinamiche in funzione dei carichi applicati su piccoli campioni, è stato possibile avvalersi dell'utilizzo di un laboratorio conforme alle direttive delle norme UNI EN ISO 10140.

Si è potuto così approfondire l'influenza del profilo geometrico superficiale, relativo all'area effettiva di contatto tra l'isolante e il solaio, e delle mescole elastomeriche dei materassini isolanti, con lo scopo di comprenderne la capacità di riduzione sonora se applicati in un pavimento galleggiante.

La sperimentazione è stata condotta in un arco di tempo di circa sei mesi e ha permesso di curare l'ottimizzazione della geometria e delle mescole per la produzione di materassini realizzati con granuli o fibre di gomma provenienti da riciclo, con lo scopo di effettuare una caratterizzazione acustica e meccanica mirata allo sviluppo di strati resilienti dotati di bassa frequenza naturale e conseguentemente alte prestazioni isolanti, in accordo alle norme vigenti.

Nello specifico si è curata la realizzazione di un materassino sagomato dell'altezza di 17 mm che operi per valori di carico fino a 0,06 MPa, con particolare riguardo ad applicazioni sotto massetto per carichi residenziali, industriali e per il contenimento di vibrazioni di macchine operative leggere, con prestazioni migliorative rispetto a un materiale elastomerico pieno a media o bassa densità.

Spesso si utilizzano materiali molto soffici, come feltri o espansi a bassa densità, che sono altresì efficaci per la riduzione dei rumori di calpestio, ma in cui la performance è suscettibile nel tempo a un degrado se sottoposta a carichi di lungo periodo soprattutto se elevati. Attraverso l'attività di ricerca svolta si è potuto constatare come per applicazioni in cui la costanza delle prestazioni del materiale risulti essenziale, l'utilizzo di tale materassino sagomato in gomma riciclata permette di contenere il calo di prestazioni nel tempo, mantenendo quasi invariata la capacità di ritorno nel tempo una volta rilasciato il carico, a differenza di materiali soffici a più bassa densità.

Tramite l'attività di ricerca svolta si è potuto constatare che la gomma riciclata non risulta soggetta a evidenti fenomeni di invecchiamento, comportandosi in maniera stabile. Le prove effettuate sul materassino oggetto di analisi, dimostrano come anche nel caso di geometria sagomata le prestazioni del materiale in gomma si stabilizzano molto velocemente nella prima settimana di applicazione del carico, periodo del tutto ininfluenza rispetto alla vita utile di un edificio.

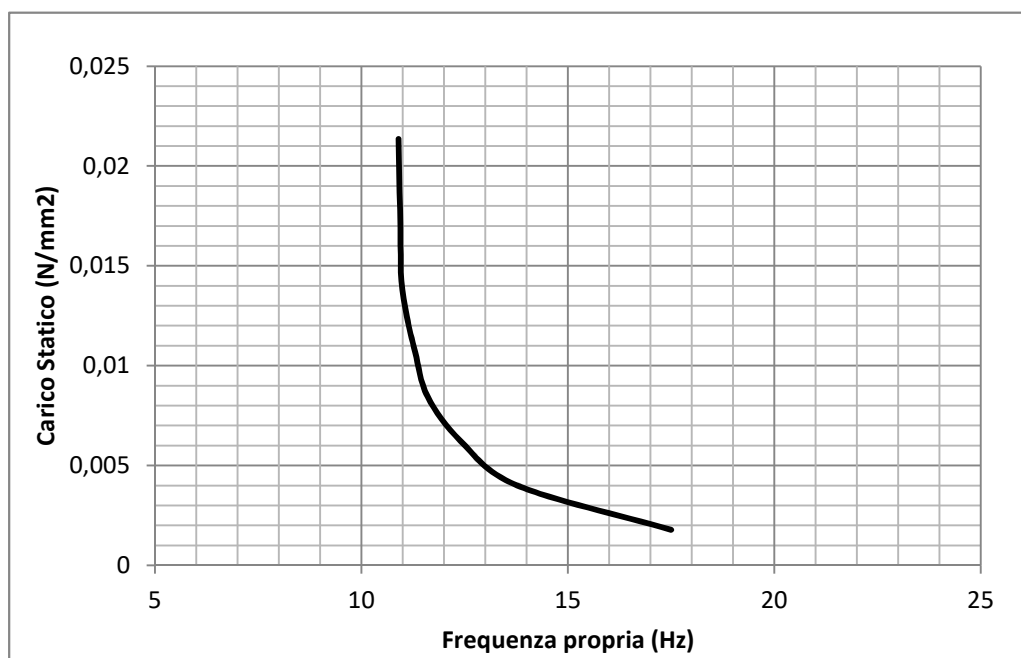
La sperimentazione compiuta ha permesso di individuare una combinazione di geometria e mescola per un materassino in grado lavorare in un vasto range di carichi, da 200 a 5000 [kg/m<sup>2</sup>]. Per questo prodotto è possibile garantire valori di rigidità dinamica tra 8 e 12 [kN/mm<sup>2</sup>] e  $\Delta L$  26 – 30 [dB] che lo rendono adatto per applicazioni sotto basamenti flottanti da 5 a 10 cm, consentendone l'impiego per applicazioni di isolamento di rumore di

calpestio e delle vibrazioni nell'edilizia residenziale, commerciale e produttiva. Le prestazioni di isolamento raggiunte consentono al materassino prodotto di conseguire il raggiungimento di risultati da classe prima secondo la classificazione nazionale UNI 11367 [12].

Lo studio delle possibili applicazioni per la soluzione sagomata è proseguita anche verso l'isolamento dalle vibrazioni di macchinari operanti a bassa frequenza con bassi carichi superficiali.

Per tali applicazioni risulta fondamentale la scelta di un materiale che operi con frequenza naturale inferiore a quella più bassa che si desidera isolare. Per la maggior parte dei casi tale valore minimo di frequenza vibratoria è associata all'azione di masse non bilanciate in moto rotatorio. L'impiego di isolatori passivi, come i materiali resilienti, per l'isolamento delle vibrazioni risulta efficace solo se la frequenza della forza vibratoria perturbante è maggiore di  $\sqrt{2}f_n$ . Studi preliminari hanno evidenziato che il singolo strato del materassino sagomato proposto, con frequenze naturali intorno ai 20 Hz, non risulta essere in grado di garantire prestazioni ragguardevoli di isolamento rispetto a soluzioni in gomma piena di spessore superiore, normalmente impiegate.

Per adattare il carico del macchinario da isolare al materiale sottostante generalmente si riducono le dimensioni dello strato isolante e talvolta si è costretti ad utilizzare appoggi discreti di piccole dimensioni: questo comporta una maggiore difficoltà di posa del sistema antivibrante (sviluppo di sistemi di ancoraggio complessi) oppure, in alcuni casi, fenomeni di instabilità del macchinario durante il funzionamento (possibili sbilanciamenti durante le eventuali fasi di accumulo e scarico di fluidi operativi).

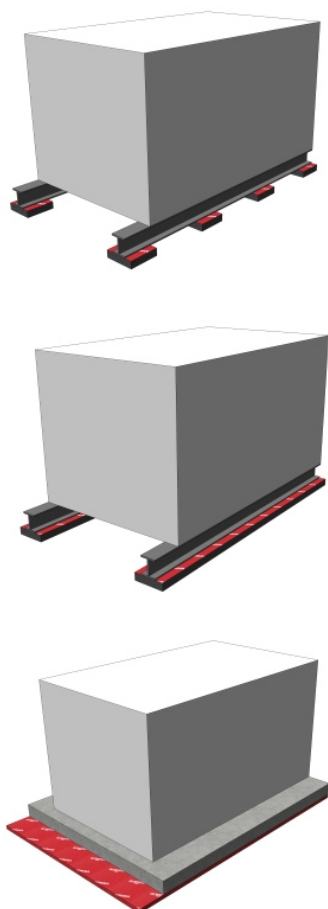


**Figura 7.1** Curva di degli andamenti del frequenza di risonanza della soluzione composita.

Si è dunque proceduto, nell'idea di sfruttare le buone proprietà osservate nei materassini sagomati, al dimensionamento di elemento composito in elementi di gomma, poggiante sul materassino oggetto di studio, la cui combinazione dei diversi strati permette di ottenere un

miglioramento importante delle proprietà meccaniche ai bassi carichi, con spessori contenuti in 45 mm.

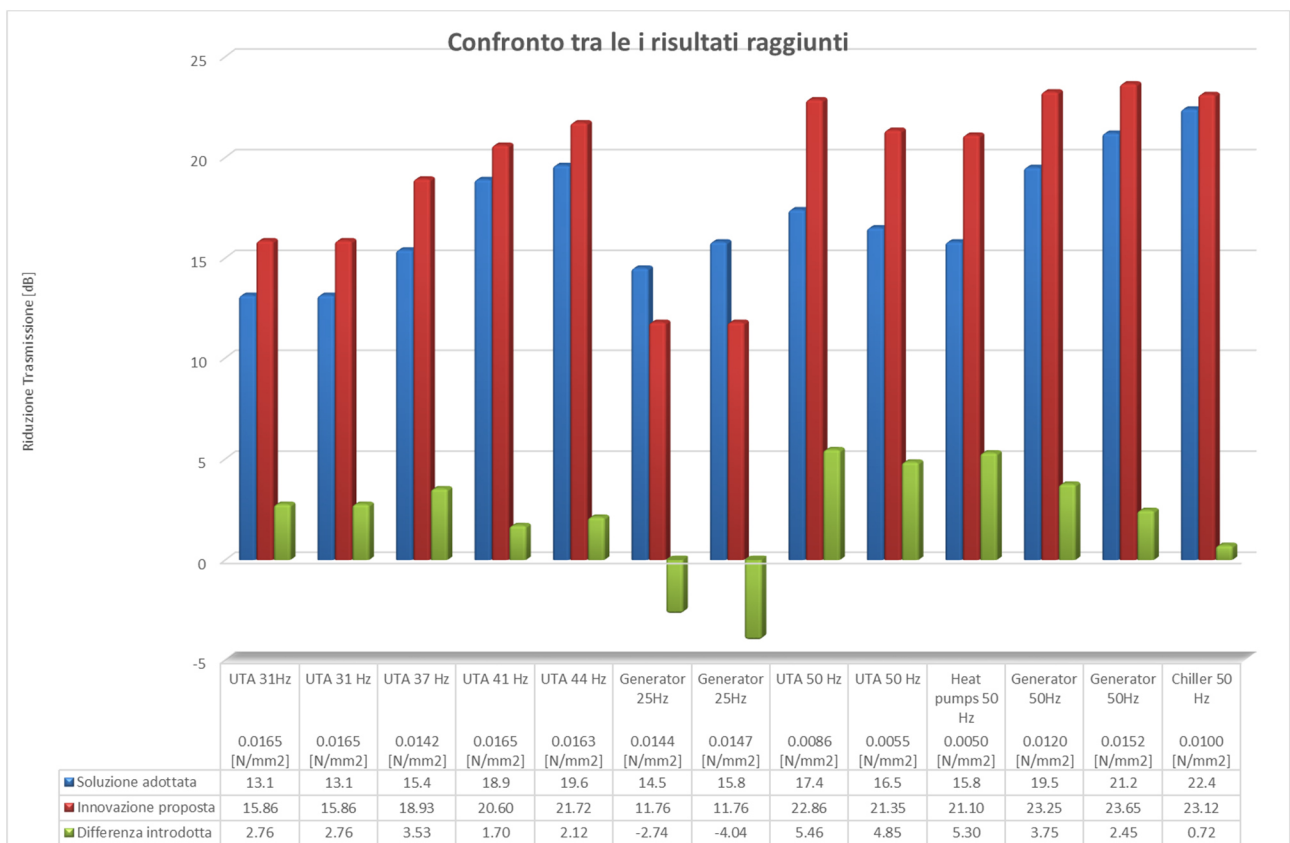
Con questa possibile soluzione, sfruttando la geometria del materiale e lo smorzamento intrinseco dei diversi strati, si potrebbe installare l'isolante sotto l'intera superficie degli appoggi o del basamento inerziale, migliorando notevolmente la stabilità del sistema e la durabilità.



**Figura 7.2** Diversi schemi di posa per i supporti, vengono riportati soluzione a pad e in striscia sotto trave e la posa continua sotto basamento.

Al fine di valutare l'efficacia di tale soluzione si è considerato l'utilizzo ipotetico per una serie macchinari isolati con soluzione piena.

Si è dunque deciso di valutare l'efficacia di tale possibile soluzione confrontandola con soluzioni adottate per l'isolamento delle vibrazioni di diversi macchinari che, complessivamente, sviluppano bassi pesi superficiali.



**Figura 7.3** Grafico di comparazione tra del riduzioni di trasmissione in [dB] per la soluzione composta proposta e la soluzione adottata a materassino pieno per diversi macchinari analizzati.

Attraverso tale indagine è emerso che la soluzione presentata permette di conseguire un miglioramento sensibile nel caso di carichi superficiali molto ridotti, tra i 50 e i 150 [ $kg/m^2$ ], rispetto a una soluzione a gomma piena di spessore paragonabile. Tuttavia per macchinari operanti con frequenze inferiore ai 30 Hz, che generalmente richiedono strati in gomma di spessore superiori fino a 10 cm, come per i gruppi generatori riportati, la soluzione presentata non è in grado di offrire nessun beneficio.

I risultati ottenuti sono comunque considerati molto interessanti in quanto consentono per macchine leggere di larga diffusione, come le unità di trattamento aria, di conseguire un aumento discreto in termini di isolamento nei confronti delle soluzioni a materassino pieno utilizzate, senza incorrere in difficoltà di posa e offrendo maggiore stabilità alla macchina in un'unica soluzione.





## BIBLIOGRAFIA

[1] UNI EN ISO 140-1:2006 "Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale".

[2] UNI EN ISO 140-6:2000 "Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici di elementi di edificio - Parte 6: Misurazione in laboratorio dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai".

[3] UNI EN ISO 140-8:1999 "Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 8: Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato".

[4] UNI EN ISO 717-2:2013 "Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio".

[5] UNI EN 826:2013 "Isolanti termici per edilizia - Determinazione del comportamento a compressione".

[6] UNI EN 1606:2013 "Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione".

[7] UNI EN ISO 10140-1:2010 "Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Regole di applicazione per prodotti particolari".

[8] UNI EN ISO 10140-3:2010 "Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Misurazione dell'isolamento del rumore da calpestio".

[9] UNI EN ISO 10140-4:2010 "Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 4: Procedure e requisiti di misurazione".

[10] UNI EN ISO 10140-5:2010 "Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 5: Requisiti per le apparecchiature e le strutture di prova".

[11] UNI 11059:2013 "Elementi antivibranti - Materassini elastomerici per armamenti ferrotranviari. Indagini di qualifica e controllo delle caratteristiche meccaniche e delle prestazioni".

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

[13] UNI EN 12354-2:2002 "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento acustico al calpestio tra ambienti".

[14] UNI EN 12431-2013 "Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore degli isolanti per pavimenti galleggianti".

[15] UNI EN 29052-1:1993 "Acustica - Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali".

- [16] DIN 18134:2012 "Soil - Testing procedures and testing equipment - Plate load test".
- [17] ISO 6721-1:2011 "Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 1: General principles".
- [18] ISO 9052-1:1989 "Acoustics - Determination of dynamic stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings".
- [19] Beranek L.L., Vér I.L., "Noise and Vibration Control Engineering", John Wiley and Sons, 1997.
- [20] Cavallini A., "Il controllo del rumore negli impianti di climatizzazione", Riello condizionatori, 1986.
- [21] Cremer L., Heckl M., Petersson B.A.T., "Structure-borne sound", Springer, 2007.
- [22] Hopkins C., "Sound Insulation", Elsevier, 2007.
- [23] Spagnolo R., "Manuale di acustica applicata", UTET Libreria, 2001.
- [24] Piersol A.G., Peaz T.L., "Harris' Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill, 2010.
- [25] Luison L., "Studio dell'isolamento acustico in laboratorio di materiali provenienti da riciclo applicati alle strutture edilizie", Dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale, dipartimento di fisica tecnica Università degli studi di Padova, anno 2010.
- [26] Mastroianni G., "Analisi sperimentale del comportamento statico e dinamico di materassini in gomma riciclata per la riduzione degli effetti generate dal traffico ferrotramviario", Tesi di laurea in Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Facoltà di Ingegneria Federico II di Napoli, anno 2005.
- [27] Montella G., "Mechanical characterization of a tire derived material and its application in vibration reduction", Dottorato di ricerca in Ingegneria Strutturale, Facoltà di Ingegneria Federico II di Napoli, anno 2015.
- [28] Bettarello F., Brosio E., Fausti P., Schiavi A., "Il controllo del rumore di calpestio: Progettazione e verifica ai sensi del D.P.C.M 5-12-91", Seminario AIA-GAR.
- [29] Carfagni M., Lensi E., Pierini M., "The loss factor as a measure of mechanical damping", Università di Firenze.
- [30] Cheng W. N., Cheng C. C., Koopmann G. H., "A new desing strategy for minimizing sound radiation of vibrating beam using dimples", Journal of Vibration and Acoustics, 133, October 2011.
- [31] Cheng W. N., Cheng C. C., Koopmann G. H., "Dynamic beam modification using dimples", Journal of Vibration and Acoustics, 130, August 2008.
- [32] Cho T., "Vibro-acoustic characteristics of floating floor system: The influence of frequency-matched resonance on low frequency impact sound", Journal of Sound and Vibration, 332, 2013, 33-42.
- [33] Cho T., "Experimental and numerical analysis of floating floor resonance and its effect on impact sound transmission", Journal of Sound and Vibration, 332, 2013, 6552-6561.
- [34] Graessner E. J., Wong, C. R., "The Relationship of Traditional Damping Measures for

Materials with High Damping Capacity: A Review," ASTM STP 1169, 1992.

[35] Kim K., Jeong G., Yang K., Sohn J., "Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level", *Building and Environment*, 44, 2009, 1589-1600.

[36] Lee J. Y., Kim J., Chang H. J., Kim J.M., "Long-term structural behavior of resilient materials for reduction of floor impact sound", *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8, (2014)509-513.

[37] Lee J. Y., Kim J., "Deflection of Resilient Materials for Reduction of Floor Impact Sound", Hindawi Publishing Corporation, the *Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 612608, 11 pages.

[38] Lee J. Y., Kim J., Kim J., Kim J., "Evaluation of the long-term sound reduction performance of resilient materials in floating floor systems", *Journal of Sound and Vibration*, 366, 2016, 199-210.

[39] Montella G., Govindjee S., Neff P., "The exponentiated Hencky strain energy in modeling tire derived material for moderately large deformations", *Journal of Engineering Materials and Technology* 138, 2016.

[40] Nashif, A. D., Jones, D. I. G., Henderson, J.P., "Vibration Damping", John Wiley, New York, NY, 1985

[41] Neves e Sosa A., Gibbs B.M., "Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors", *Applied Acoustics*, 72, 2011, 177-189.

[42] Schiavi A., Alasia F., Pavoni Belli A., Corallo M., Russo F., "Determinazione della rigidità dinamica a lungo periodo", *neo-EUBIOS* 17, anno VIII, settembre 2006.

[43] A. Schiavi et al., "Estimation of Acoustical Performance of Floating Floors from Dynamic Stiffness of Resilient Layers", *Journal of Building Acoustics*, Vol.12 (2), 2005, 99-113;

[44] A. Schiavi et al., "Un modello empirico per la previsione del comportamento acustico di pavimenti galleggianti dalla misura della rigidità dinamica dei materiali elastici utilizzati come sottofondi", *Rivista Italiana di Acustica*, Vol. 29 n.1-2, 2005.

[45] Shorter P. J., Langley R. S., "Vibro-acoustic analysis of complex systems", *Journal of Sound and Vibration*, 288, 2005, 669-699.

[46] Vér I.L., "Impact noise isolation of composite floors", *Journal of Acoustical Society of America* 50 (4), 1970, 1043-1050.

