



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI VIBRAZIONALE DI METAMATERIALI
MEDIANTE PROVE A CARICO STATICO VARIABILE**

**VIBRATIONAL ANALYSIS OF METAMATERIALS
USING VARIABLE STATIC LOAD TESTS**

Candidata:
Maria Antonietta Sacco

Relatore:
Prof.ssa Milena Martarelli

Correlatore:
Ing. Alessandro Annessi

Anno Accademico 2025/2026

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Indice

1	Introduzione	5
2	Teoria di base	7
2.1	Trasmissibilità delle vibrazioni	7
2.2	Banchi prova per la misura della trasmissibilità	8
3	Banco di Prova	11
3.1	Caratteristiche costruttive del banco di prova	11
3.1.1	Funzionalità del banco di prova	13
3.1.2	Normativa ISO 10846-3	13
3.2	Setup preliminari	14
3.2.1	Primo setup sperimentale	14
3.2.2	Secondo setup sperimentale	17
3.3	Setup ottimizzato	18
3.4	Strumentazione per l'acquisizione delle vibrazioni	20
4	Applicazione sperimentale: analisi di un metamateriale	23
4.1	Metamateriale	23
4.2	Misure della trasmissibilità delle vibrazioni	25
4.3	Analisi vibrazionale metamateriale	25
4.3.1	Calcolo delle trasmissibilità	31
4.3.1.1	In termini di forza	31
4.3.1.2	In termini di accelerazioni	36
5	Discussione dei risultati	42
5.1	Risultati con metamateriale nudo	42
5.2	Risultati con metamateriale rivestito	46
6	Conclusioni	50
6.1	Efficacia banco di prova	50
6.2	Performance metamateriale	51
	Bibliografia	52

Indice delle figure

Figura 2.1- Esempio Trasformata di Fourier. Fonte: Università Politecnica delle Marche, Corso «Strumenti e Metodi per la Misura di Vibrazioni», “Analisi segnale”.	10
Figura 3.1- Banco Prova utilizzato per le prove sperimentali (presso il Laboratorio di Misure di Vibrazioni, DIISM, UNIVPM)	11
Figura 3.2- Visione frontale del primo setup sperimentale del banco prova	14
Figura 3.3- Componenti strutturali del primo setup sperimentale	15
Figura 3.4- Componenti sistema di acquisizione primo setup sperimentale	16
Figura 3.5- Visione frontale del secondo setup sperimentale del banco prova	18
Figura 3.6- Setup ottimizzato del banco di prova	20
Figura 3.7- DAQ Siemens	21
Figura 3.8- Amplificatore di potenza G&W (Gearing & Watson Electronics Ltd.) in dotazione ai laboratori dell’Università Politecnica delle Marche, impiegato per l’amplificazione del segnale di eccitazione.	22
Figura 3.9- Shaker elettrodinamico utilizzato nelle prove sperimentali	22
Figura 4.1- Cella elementare introdotta da D’Alessandro et al. [9]	24
Figura 4.2- Metamateriale in esame	25
Figura 4.3- Metamateriale a ”pacco”	26
Figura 4.4- Compressione parziale del metamateriale dopo la seconda prova	28
Figura 4.5- Metamateriale con involucro nel banco prova	29
Figura 4.6- Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova sperimentale sul metamateriale nudo	32
Figura 4.7- Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova di ripetibilità sul metamateriale nudo	33

Figura 4.8- Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata sul metamateriale nudo	34
Figura 4.9- Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova con involucro	35
Figura 4.10- Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata con involucro	36
Figura 4.11- Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova sul metamateriale nudo	37
Figura 4.12- Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova di ripetibilità sul metamateriale nudo . .	38
Figura 4.13- Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata sul metamateriale nudo . . .	39
Figura 4.14- Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova con involucro	40
Figura 4.15- Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata con involucro	41
Figura 5.1- Confronto tra le tre prove sperimentali con metamateriale nudo, in termini di forza	43
Figura 5.2- Confronto tra le tre prove sperimentali con metamateriale nudo, in termini di accelerazione	45
Figura 5.3- Confronto tra le prove sperimentali con metamateriale rivestito, in termini di forza	47
Figura 5.4- Confronto tra le prove sperimentali con metamateriale rivestito, in termini di accelerazione	49

Indice delle tabelle

Tabella 4.1- Valori compressioni delle prima prova con metamateriale "nudo"	27
Tabella 4.2- Valori compressioni della seconda prova con metamateriale "nudo"	28
Tabella 4.3- Valori compressioni della terza prova con metamateriale "nudo"	29
Tabella 4.4- Valori compressioni della prima prova con l'involucro	30
Tabella 4.5- Valori compressioni della seconda prova con involucro	31
Tabella 4.6- Corrispondenza step e compressione Figura 4.6	32
Tabella 4.7- Corrispondenza step e compressione Figura 4.7	33
Tabella 4.8- Corrispondenza step e compressione Figura 4.8	34
Tabella 4.9- Corrispondenza step e compressione Figura 4.9	35
Tabella 4.10-Corrispondenza step e compressione Figura 4.10	36
Tabella 4.11-Corrispondenza step e compressione Figura 4.11	37
Tabella 4.12-Corrispondenza step e compressione Figura 4.12	38
Tabella 4.13-Corrispondenza step e compressione Figura 4.13	39
Tabella 4.14-Corrispondenza step e compressione Figura 4.14	40
Tabella 4.15-Corrispondenza step e compressione Figura 4.15	41

Capitolo 1

Introduzione

L'isolamento dalle vibrazioni rappresenta un tema di crescente interesse nell'ambito dell'ingegneria meccanica, poiché vari sistemi e dispositivi possono essere influenzati da vibrazioni che rischiano di comprometterne l'efficienza, accorciarne la vita utile o causare situazioni di disagio. In questo scenario, l'utilizzo di metamateriali creati per regolare e ridurre la diffusione delle vibrazioni rappresenta un approccio innovativo e di grande potenziale.

L'obiettivo principale di questa tesi è il collaudo di un macchinario dedicato alla valutazione della trasmissibilità di un metamateriale sviluppato per l'isolamento vibratorio. A tal fine, il lavoro prevede un percorso che integra sia l'analisi teorica sia l'attività sperimentale, con lo scopo di verificare l'efficacia del banco prova e di indagare le prestazioni del materiale studiato.

Il capitolo 2 introduce i fondamenti teorici della meccanica vibrazionale, ponendo particolare attenzione al concetto di trasmissibilità e agli strumenti tipicamente utilizzati per la sua valutazione.

La trasmissibilità quantifica la risposta di un sistema rispetto a un ingresso esterno e permette di confrontare materiali, dispositivi e soluzioni progettuali. Il capitolo descrive inoltre i banchi prova conformi alla norma ISO 10846 e introduce l'analisi dei segnali nel dominio della frequenza tramite la trasformata di Fourier (FFT) per studiare la distribuzione energetica e ottimizzare l'isolamento dinamico.

Il capitolo 3 è dedicato al banco prova, uno degli elementi centrali della tesi, progettato

specificamente per soddisfare determinate necessità sperimentali, seguendo le norme di riferimento. Durante le fasi di progettazione e costruzione, sono stati realizzati vari setup sperimentali, ognuno contribuendo all'identificazione di problemi e potenziali migliorie. Grazie a un processo di ottimizzazione graduale, si è arrivati alla formulazione di un setup definitivo, che ha permesso di condurre una valutazione corretta e affidabile della trasmissibilità delle vibrazioni.

Il capitolo 4 approfondisce l'analisi del metamateriale in esame, descrivendone le caratteristiche strutturali. Successivamente, vengono illustrate le prove vibrazionali condotte per studiarne il comportamento dinamico, con una descrizione delle modalità sperimentali adottate. Infine, i dati raccolti vengono presentati in maniera sistematica.

Nel capitolo 5 sono discussi i risultati sperimentali ottenuti, con particolare distinzione tra il metamateriale non rivestito e quello rivestito, al fine di evidenziare le differenze prestazionali.

Infine, il capitolo 6 raccoglie le conclusioni del lavoro e offre alcune considerazioni finali sulle prospettive di sviluppo futuro.

Capitolo 2

Teoria di base

2.1 Trasmissibilità delle vibrazioni

Le vibrazioni possono essere definite come oscillazioni attorno a una posizione di equilibrio e si manifestano in molteplici modi: dal punto di vista temporale possono presentarsi in forma intermittente, continua o casuale, mentre sotto il profilo fisico possono assumere la forma di uno spostamento, di una forza squilibrata o di un momento [1].

Quando il sistema viene eccitato da un moto o una forza esterna provoca una risposta dinamica. Per quantificare l'energia, dovuta all'eccitazione, che viene trasmessa, si utilizza il concetto di trasmissibilità, che è tradizionalmente associato ai sistemi con un unico grado di libertà che subiscono un movimento armonico della base [2]. L'equazione del moto del sistema, nel caso di eccitazione armonica della base o di una forza esterna applicata, può essere espressa nella forma generale:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2.1)$$

dove m è la massa, k la rigidità elastica e $F(t)$ la forza eccitante.

La trasmissibilità si definisce come la relazione tra il modulo dell'ampiezza della risposta (X) e quello dell'ampiezza del moto applicato, o forzante (F_0).

$$T(\omega) = \frac{|X(\omega)|}{|F_0(\omega)|} \quad (2.2)$$

Essa è un parametro adimensionale, che permette di confrontare direttamente la risposta del sistema rispetto all'ingresso indipendentemente dalle unità di misura.

L'analisi di questo fenomeno rivela aspetti di notevole importanza in campo ingegneristico, come l'attenuazione dell'ampiezza della risposta oltre una certa frequenza di eccitazione, la quale crea una fascia di isolamento dinamico. Questo comportamento permette di modificare le caratteristiche dinamiche del sistema con l'obiettivo di diminuire la trasmissibilità e aumentare il livello di isolamento. Allo stesso modo, viene frequentemente considerata anche la trasmissibilità delle forze, che si calcola come il rapporto tra il modulo della forza trasferita al vincolo (F_{out}) e quello della forza applicata (F_{in}).

$$T_F(\omega) = \frac{|F_{out}(\omega)|}{|F_{in}(\omega)|} \quad (2.3)$$

In aggiunta, la trasmissibilità può essere descritta anche in termini di accelerazione, come il rapporto tra il modulo dell'accelerazione della massa o del sistema in uscita (a_{out}) e quello dell'accelerazione del moto imposto dalla base o del sistema in ingresso (a_{in}), fornendo un'ulteriore misura dell'isolamento dinamico del sistema:

$$T_a = \frac{|a_{out}|}{|a_{in}|} \quad (2.4)$$

La sua interpretazione si basa sulla stessa logica fisica della trasmissibilità degli spostamenti, ampliando la comprensione dei meccanismi di propagazione delle vibrazioni e arricchendo la descrizione del comportamento dinamico dei sistemi.[2]

2.2 Banchi prova per la misura della trasmissibilità

Per analizzare come le vibrazioni meccaniche vengano trasmesse, cioè il collegamento fra reazione del sistema e movimento esercitato, si utilizzano banchi di prova specificamente creati per questo scopo. Le prove in banchi per la trasmissibilità delle vibrazioni sono

concepito per analizzare in modo sperimentale le caratteristiche dinamiche di elementi elastici e sistemi di protezione dalle vibrazioni [3]. In particolare, esse permettono di:

- analizzare l'efficacia degli isolatori vibranti;
- stabilire la rigidità dinamica e il coefficiente di smorzamento;
- mettere a confronto materiali e soluzioni progettuali differenti;
- verificare la conformità a standard tecnici internazionali. [3]

In base a quanto stabilito dalla norma ISO 10846 [3], un banco di prova per la valutazione della trasmissione delle vibrazioni è normalmente composto dai seguenti elementi fondamentali:

- Un sistema di eccitazione, di solito uno shaker elettrodinamico, capace di produrre vibrazioni controllate su un ampio range di frequenze;
- Una struttura di supporto rigida, progettata per garantire l'assenza di interferenze dinamiche;
- Un componente in prova, rappresentato dal materiale o dal dispositivo destinato ad assorbire le vibrazioni;
- Una massa di carico, che replica le condizioni operative reali;
- Sensori per le misurazioni, generalmente accelerometri piezoelettrici collocati sia prima che dopo il campione
- Un sistema per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, dedicato all'analisi dei segnali nei domini temporale e frequenziale.

Le verifiche della trasmissibilità possono essere condotte utilizzando varie forme di eccitazione, e la norma ISO 10846 stabilisce procedure standard per assicurare la coerenza e la comparabilità dei risultati; tuttavia, i parametri di trasmissibilità possono essere alterati da vari fattori d'incertezza, come le imperfezioni nella configurazione del banco di prova, la sensibilità e la collocazione dei sensori di misurazione, le fluttuazioni delle condizioni di carico imposte e il comportamento non lineare del componente in esame. Per questo motivo, la normativa internazionale raccomanda specifiche procedure di calibrazione e verifica dell'affidabilità dei risultati sperimentali. [3][4]

Successivamente, i segnali raccolti vengono analizzati con metodologie nel dominio della frequenza, principalmente attraverso la trasformata di Fourier (FFT). La trasformata di

Fourier è una formula matematica che trasforma un segnale campionato nel tempo o nello spazio nello stesso segnale campionato in frequenza temporale o spaziale. Nell'elaborazione dei segnali, la trasformata di Fourier può rivelare caratteristiche importanti di un segnale, ovvero i suoi componenti di frequenza.[5]

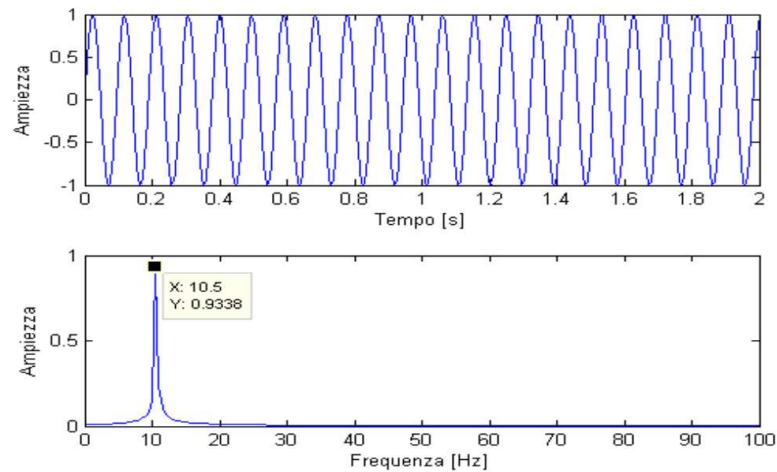
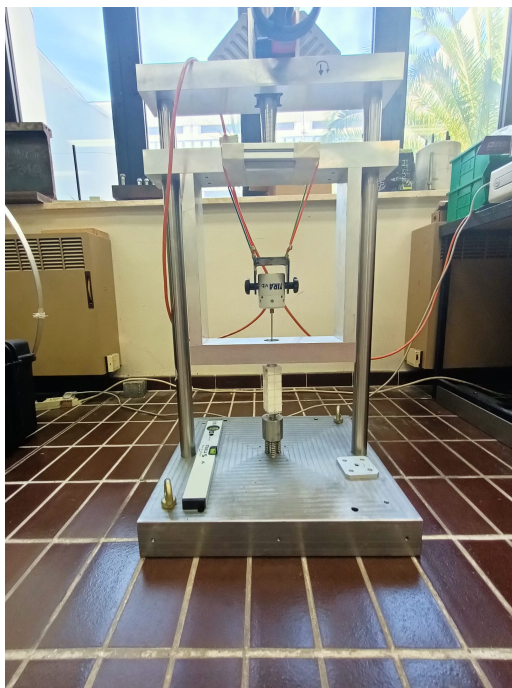


Figura 2.1: Esempio Trasformata di Fourier. Fonte: Università Politecnica delle Marche, Corso «Strumenti e Metodi per la Misura di Vibrazioni», “Analisi segnale”.

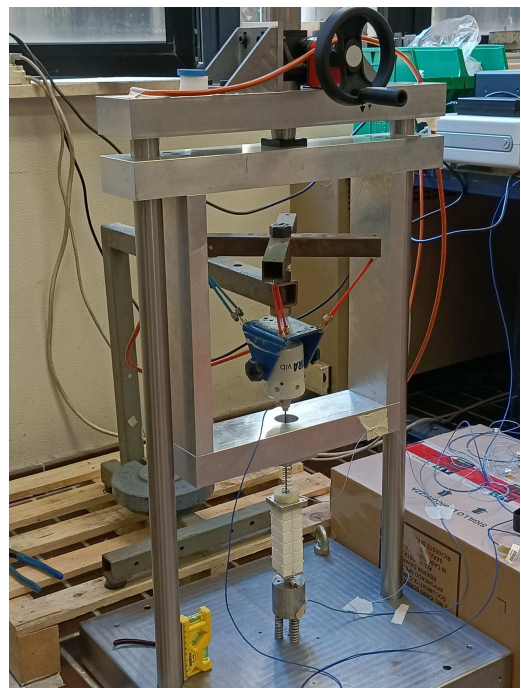
Capitolo 3

Banco di Prova

3.1 Caratteristiche costruttive del banco di prova



(a) Vista frontale del banco prova



(b) Vista laterale del banco prova

Figura 3.1: Banco Prova utilizzato per le prove sperimentali (presso il Laboratorio di Misure di Vibrazioni, DIISM, UNIVPM)

In Figura 3.1 è illustrato il banco per la caratterizzazione dinamica degli isolatori installato presso il laboratorio di "Misure di Vibrazioni" del DIISM¹. Anche se si possono notare altre attrezzature indispensabili per le prove, in seguito si focalizzerà unicamen-

¹Dipartimento di Ingegneria dell'informazione e scienze matematiche. UNIVPM

te sulla spiegazione della struttura meccanica del banco di prova, rimandando l'analisi dell'intero setup ai paragrafi appositi.

Il banco di misura per la caratterizzazione dinamica degli isolatori è stato progettato e prototipato nel contesto del progetto MetaBlock, con l'obiettivo di realizzare una struttura ad elevata rigidità e stabilità, conforme alle normative UNI EN ISO 10846 per la misurazione delle proprietà vibro-acustiche di elementi elastici.[6]

La struttura portante del banco è costituita da un basamento in acciaio ad elevata massa (superiore a 150 kg), progettato per ridurre al minimo l'influenza dinamica della struttura di supporto durante le prove. Il basamento è dotato di fori filettati M5 per l'installazione di sensori o componenti ausiliari e di sedi per il montaggio delle guide lineari, permettendo l'esecuzione sia di prove dirette sia indirette secondo normativa.[6]

L'isolatore riceve un carico statico grazie a un martinetto meccanico, capace di fornire un precarico massimo di 1000 N. Il martinetto è collegato tramite piastre di accoppiamento dedicate e una flangia ad L dotata di fori di regolazione, che permettono un preciso allineamento del sistema e l'applicazione del carico lungo l'asse longitudinale dell'isolatore. [6]

Il movimento relativo della parte mobile è guidato da due alberi rettificati in acciaio cromato, di diametro 40 mm (tolleranza h6) e lunghezza 880 mm, fissati alla piastra superiore mediante viti passanti M8. La presenza di fori sovradimensionati nella piastra consente di compensare le tolleranze di lavorazione e garantire il corretto parallelismo delle guide. La sezione mobile del sistema, che ospita lo shaker elettrodinamico, è composta da un sottoinsieme di piastre sia verticali che orizzontali, progettate per operare in condizioni free-free, e presenta un foro centrale per il collegamento dello stinger di eccitazione. Il contatto con le guide è garantito da cuscinetti lineari in materiale polimerico, i quali forniscono un movimento fluido e riducono l'attrito.[6] Nel complesso, il banco presenta una configurazione modulare conforme ai requisiti normativi, risultando idoneo alla caratterizzazione sperimentale delle prestazioni dinamiche di isolatori innovativi a base di metamateriali.

3.1.1 Funzionalità del banco di prova

Il sistema di prova è stato progettato per applicare un carico statico controllato sul campione lungo l'asse verticale, impiegando un martinetto meccanico.

La stimolazione dinamica del sistema è generata da uno shaker elettrodinamico, opportunamente posizionato all'interno della parte mobile del sistema e collegato all'isolatore tramite uno stinger. Tale configurazione è studiata per garantire la trasmissione dell'eccitazione lungo l'asse di prova, minimizzando l'insorgere di carichi trasversali indesiderati. Nelle modalità operative descritte, il sistema è capace di analizzare la capacità di carico del campione e di esaminare il suo comportamento dinamico, con un'attenzione particolare all'analisi della propagazione delle vibrazioni dalla base fino alla sommità della struttura.

3.1.2 Normativa ISO 10846-3

La costruzione del banco prova e le successive sperimentazioni sono state condotte in conformità alla normativa ISO 10846. Questa norma definisce un metodo per determinare la rigidezza dinamica in trasmissione di supporti elastici soggetti a un determinato precarico. Nel caso specifico, è stato adottato il metodo indiretto, che prevede la misurazione della trasmissibilità della vibrazione.[7]

Il principio fondamentale del metodo consiste nel ricavare la forza di bloccaggio in uscita tramite la rilevazione delle accelerazioni su un corpo di massa m_2 , il quale produce vibrazioni di ampiezza sufficientemente ridotta sul lato in uscita dell'elemento in esame. Questa massa deve essere dinamicamente disaccoppiata dal resto del sistema di prova per evitare la trasmissione laterale. La relazione tra la rigidezza dinamica in trasmissione dell'elemento testato e la trasmissibilità della vibrazione misurata è data da:

$$k_{2,1} = \frac{F_{out}}{u_{in}} = -\omega^2(m_2 + m_f)T \quad \text{con} \quad \omega = 2\pi f, \quad T = \frac{u_{out}}{u_{in}}, \quad |T| \ll 1 \quad (3.1)$$

dove: T indica la trasmissibilità che è molto piccola, m_f indica la massa della flangia di uscita dell'elemento sottoposto a prova; gli indici "1" e "2" indicano il lato di ingresso e di uscita.[7]

Il banco prova, realizzato in conformità alla normativa ISO 10846, è stato progettato seguendo l'esempio tipico di un sistema massa-molla.

3.2 Setup preliminari

3.2.1 Primo setup sperimentale

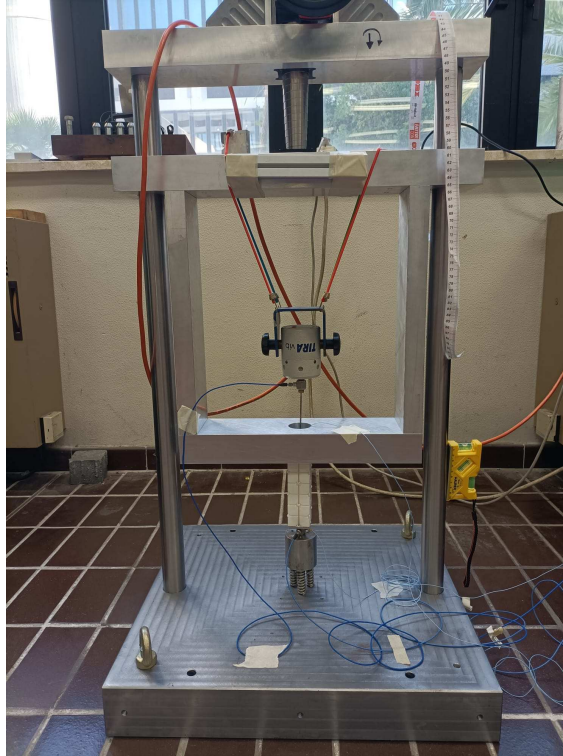


Figura 3.2: Visione frontale del primo setup sperimentale del banco prova

Il primo allestimento sperimentale è stato configurato per l'analisi preliminare delle proprietà dinamiche di una struttura in metamateriale, sebbene tale configurazione si sia successivamente rivelata non conforme ai requisiti normativi del metodo indiretto.

Il sistema è basato su una configurazione massa-molla.

- Sistema di Base (Elemento Elastico): Tre molle ($m_{\text{molla}} = 15.2$ g ciascuna) sono state alloggiare su tre guide ($m_{\text{guida}} = 11.7$ g ciascuna).
- Massa Principale: Al di sopra delle molle è stata posizionata una massa principale ($M_{\text{totale, base}} = 1100.05$ g, incluse tre guide di contenimento superiori).

- **Struttura in Metamateriale:** La struttura vera e propria ($m_{\text{struttura}} = 93.5 \text{ g}$) è fissata a una base piccola ($m_{\text{base piccola}} = 16.5 \text{ g}$), per una massa complessiva di $m_{\text{struttura+base}} = 109.97 \text{ g}$.

L'eccitazione del sistema è stata fornita da uno shaker, inizialmente vincolato rigidamente alla macchina operativa, il cui moto è trasmesso tramite i seguenti componenti:

- **Interfaccia Superiore:** Una piastrina di alluminio ($m = 8.16 \text{ g}$) funge da punto di connessione.
- **Stinger:** Elemento di trasmissione ($m_{\text{stinger}} = 4.42 \text{ g}$, $\phi = 2.5 \text{ mm}$, $L_{\text{utile}} = 96 \text{ mm}$), che collega la piastrina alla seconda cella di carico.
- **Treno di Misura/Attuazione:** Include la Cella di Carico S/N=8623 ($m = 23.05 \text{ g}$) e due adattatori (3.97 g e 4.32 g), per una massa totale di $m_{\text{treno}} = 35.76 \text{ g}$.

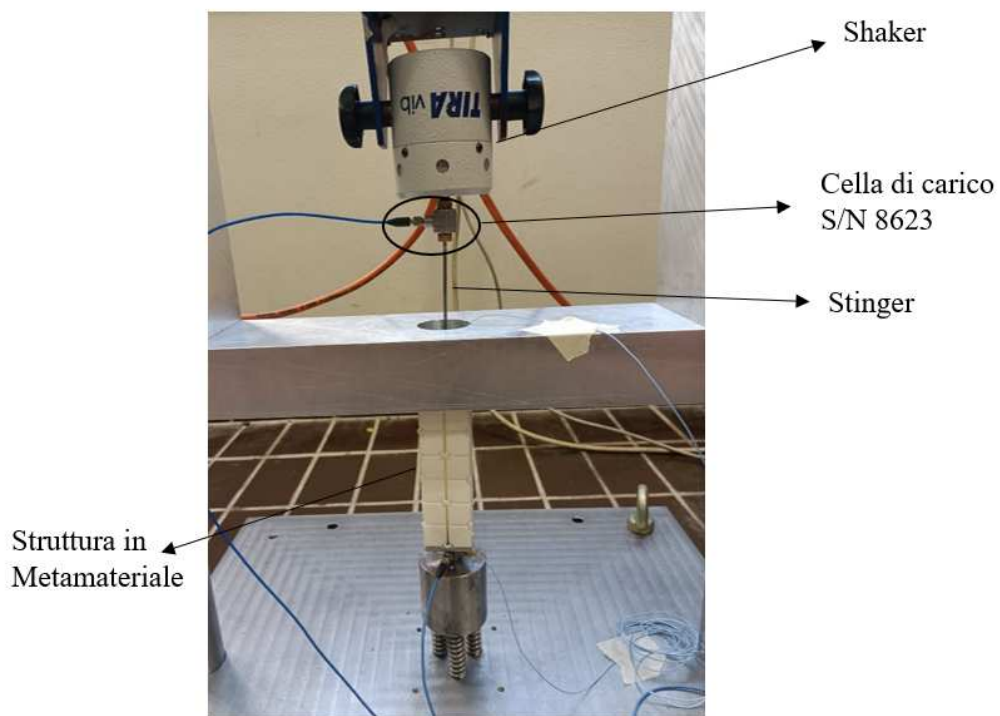


Figura 3.3: Componenti strutturali del primo setup sperimentale

I dati dinamici sono stati acquisiti attraverso una rete di trasduttori:

- la cella di carico inferiore (S/N 8593) è stata destinata alla misura della forza di uscita (F_{out});

- la cella di carico superiore (S/N 8623) è stata impiegata per la misura della forza di ingresso (F_{in});
- l'accelerometro 02 (S/N LW498825), posizionato sulla piastrina inferiore, è stato utilizzato per la misura dell'accelerazione di uscita (a_{out});
- l'accelerometro 01 (S/N LW498826), montato direttamente sulla struttura in metamateriale, è stato impiegato per la misura dell'accelerazione di ingresso (a_{in});

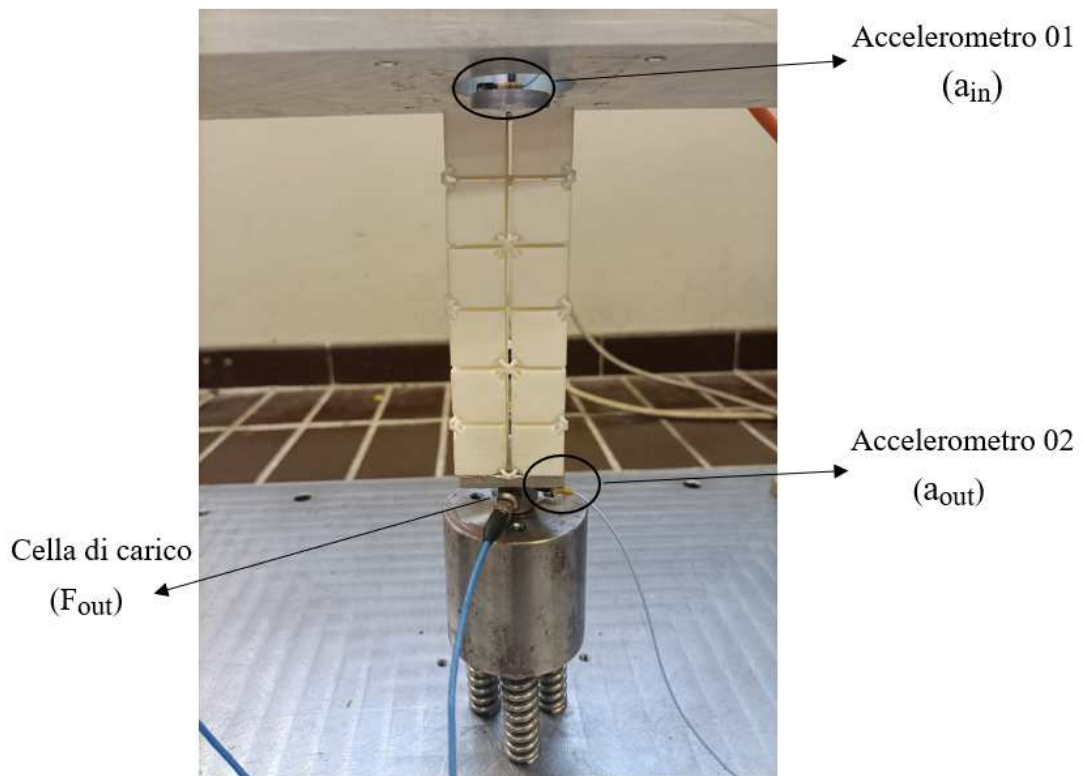


Figura 3.4: Componenti sistema di acquisizione primo setup sperimentale

Il primo setup, pur consentendo la definizione della configurazione meccanica e strumentale del banco prova, non è risultato conforme alla normativa vigente per il metodo indiretto. In particolare, le molle avrebbero dovuto essere collocate sia alla base sia al di sopra della struttura in metamateriale, come previsto dalla normativa, e la modalità di vincolo dello shaker non permetteva di considerare correttamente il contributo combinato del peso della macchina operatrice e del carico applicato dallo shaker. Pertanto, nessuna prova sperimentale è stata effettuata con questa configurazione, rendendo necessaria la

progettazione di un secondo setup sperimentale, volto a garantire la conformità normativa e l'affidabilità dei dati.

3.2.2 Secondo setup sperimentale

Il secondo setup sperimentale è stato progettato per superare alcune criticità del primo allestimento e migliorare la conformità alla normativa. In questa nuova configurazione, le molle sono state installate sia alla base che nella parte superiore della struttura, mentre lo shaker elettrodinamico è stato fissato a una struttura esterna dedicata, separata dalla macchina operante, in modo da isolare il sistema da possibili effetti causati dal peso della macchina. Per quanto riguarda la strumentazione, sono stati introdotti sensori aggiuntivi rispetto al primo setup, tra cui:

- un accelerometro triassiale (S/N LW254737) posizionato sul lato destro della struttura, con massa pari a 5 g, per la misura simultanea delle accelerazioni lungo i tre assi principali (x,y,z);
- una piastrina quadrata, con un peso di circa 71 g, posizionata sulla parte superiore della struttura, su cui è collocato l'accelerometro miniaturizzato 01;
- una molla di contrasto, più flessibile rispetto alle molle inferiori, installata sulla struttura superiore per regolare il comportamento dinamico complessivo del sistema.

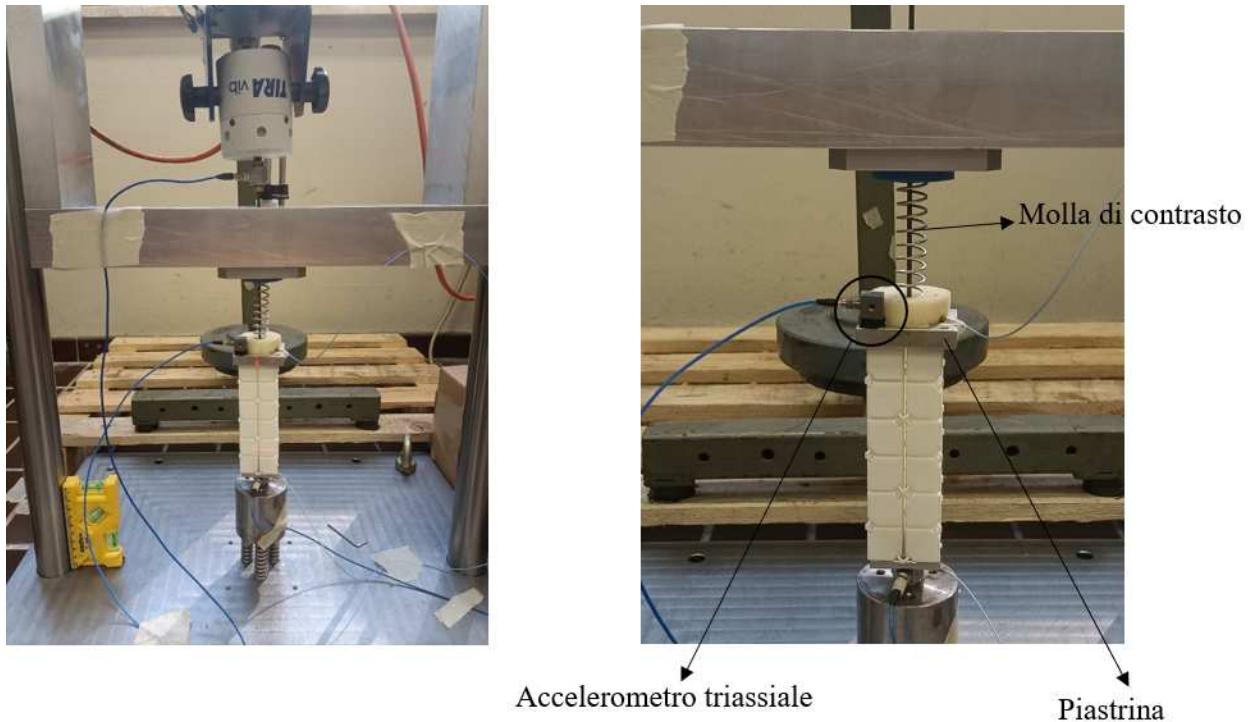


Figura 3.5: Visione frontale del secondo setup sperimentale del banco prova

Nonostante queste modifiche, il setup presenta ancora alcune criticità:

- la molla di contrasto inserita risulta essere poco efficiente in quanto raggiunge velocemente il fine corsa in compressione. Questo comportamento impedisce l'adeguata trasmissione dello sforzo di compressione al metamateriale;
- il numero e la distribuzione degli accelerometri sono insufficienti rispetto a quanto prescritto dalla normativa, rendendo impossibile acquisire tutti i dati necessari per una caratterizzazione completa.

Di conseguenza, si ha un miglioramento rispetto al primo in termini di configurazione meccanica e isolamento dello shaker, ma non consente ancora di eseguire prove sperimentali pienamente conformi alla normativa vigente.

3.3 Setup ottimizzato

Il setup ottimizzato del banco prova è stato progettato per garantire la piena conformità alla normativa vigente per il metodo indiretto e per ottenere dati sperimentali affidabili

sulla struttura in metamateriale.

Le molle alla base sono state sostituite con elementi di rigidezza k pari a 6,32 N/mm, in modo da ridurre e controllare il carico rigido applicato alla struttura e assicurare un comportamento dinamico conforme ai requisiti normativi. Queste, inoltre, sono state fissate tramite delle viti con una testa ridotta rispetto ai supporti precedenti, consentendo un montaggio più stabile e sicuro senza interferenze meccaniche con le altre componenti del banco prova. In aggiunta, la molla di sostegno è stata rimpiazzata da una molla con maggiore rigidità, avente una costante elastica di 4,08 N/mm, per prevenire il raggiungimento anticipato della condizione di fine corsa. Questa decisione permette di ottenere una compressione del metamateriale in modo più gestibile e allineato con le specifiche di progetto.

La strumentazione di misura è stata ampliata e migliorata attraverso l'aggiunta di un numero maggiore di accelerometri rispetto ai precedenti allestimenti sperimentali, con l'obiettivo di assicurare una copertura esaustiva dei punti strutturali più rilevanti. Nello specifico, sono stati utilizzati accelerometri miniaturizzati posizionati in alto sulla struttura, sia a destra ($a_{in}(dx)$) che a sinistra ($a_{in}(sx)$), un sensore posizionato sotto la massa principale e un accelerometro triassiale ($a_{in}(x,y,z)$) montato sul lato destro. Quest'ultimo è stato selezionato per la sua capacità di rilevare le accelerazioni lungo tutti gli assi di interesse, risultando cruciale per una completa caratterizzazione dinamica del sistema.

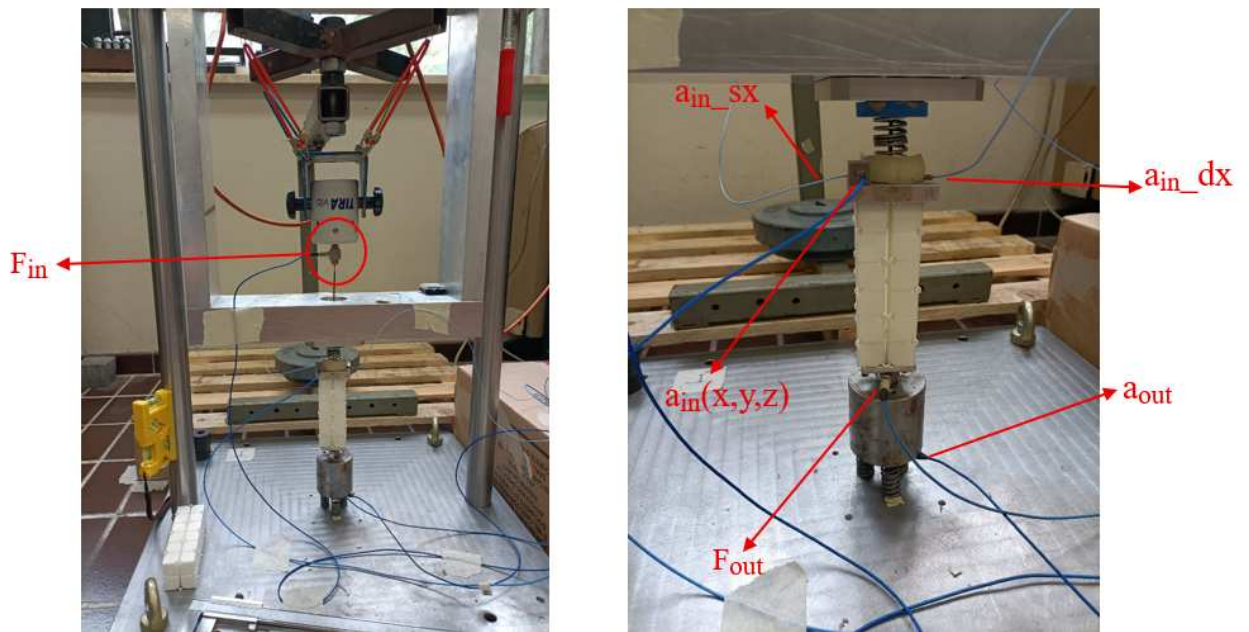


Figura 3.6: Setup ottimizzato del banco di prova

Questo setup ottimizzato consente di eseguire prove sperimentali conformi alla normativa, con un sistema meccanico stabile, molle correttamente dimensionate e una strumentazione completa, permettendo la raccolta di dati accurati per l'analisi delle forze e delle accelerazioni nella struttura in metamateriale.

3.4 Strumentazione per l'acquisizione delle vibrazioni

Il sistema per l'acquisizione delle vibrazioni è stato sviluppato per garantire sia una generazione controllata delle eccitazioni sia un'elevata fedeltà nell'acquisizione delle risposte. Il cuore del sistema di misurazione è un Sistema di Acquisizione Dati (DAQ) LMS SCADAS fornito da Siemens, impiegato per convertire i segnali analogici ricevuti da sensori come accelerometri e celle di carico in dati digitali che possono essere elaborati in seguito.

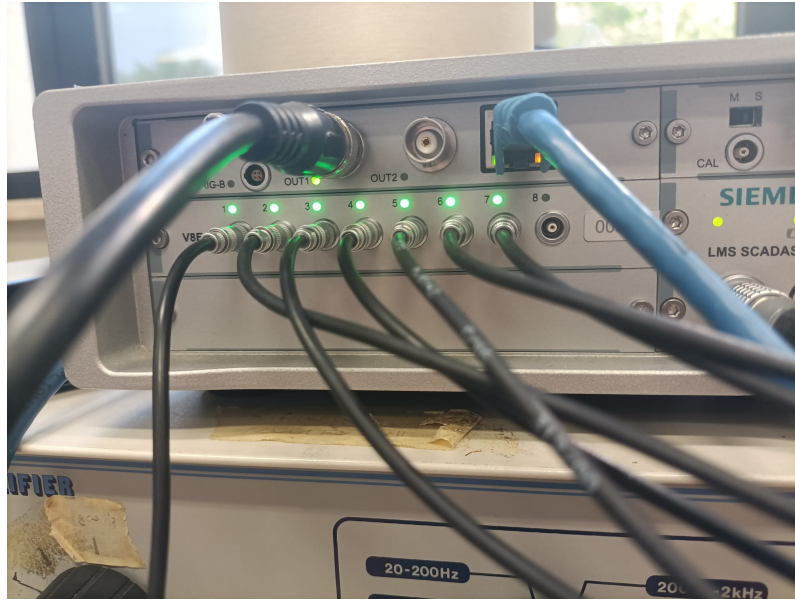


Figura 3.7: DAQ Siemens

I cavi provenienti dai sensori sono collegati agli ingressi del DAQ. Come illustrato nella Figura 3.7, il sistema di controllo e acquisizione è interfacciato con le apparecchiature esterne tramite:

- un cavo Ethernet (blu) che collega l'unità di acquisizione al computer, consentendo la comunicazione, la gestione del sistema e la raccolta dei dati;
- un cavo collegato all'uscita OUT1 dell'unità DAQ, connesso all'amplificatore per pilotare lo shaker.

Gli ingressi analogici del DAQ sono distribuiti su otto canali numerati da 1 a 8:

- canale 1: segnale F_{in} ;
- canale 2: segnale F_{out} ;
- canale 3: segnale $a_{in}(dx)$;
- canale 4: segnale a_{out} ;
- canali 5, 6, 7: tre componenti dell'accelerometro triassiale $a_{in}(x)$, $a_{in}(y)$ e $a_{in}(z)$;
- canale 8: segnale $a_{in}(sx)$, per migliorare la completezza e la precisione delle misurazioni.

Dopodiché, i dati risultanti vengono analizzati attraverso il software Siemens Simcenter Testlab, il quale produce la Funzione di Risposta in Frequenza (FRF).

Il segnale prodotto dal generatore di segnale dell'LMS SCADAS viene amplificato da un amplificatore di potenza (Figura 3.8), che aumenta il segnale di controllo a basso livello per azionare efficacemente lo shaker. L'amplificatore consente di amplificare il segnale generato dal generatore dello scadas (output1).

Lo shaker elettrodinamico (Figura 3.9) riceve il segnale potenziato dall'amplificatore e trasferisce le vibrazioni direttamente al sistema in prova, ancorato al dispositivo. In questo modo, le prove di vibrazione possono essere effettuate in un intervallo di frequenze specifico, assicurando la ripetibilità e l'affidabilità dei risultati ottenuti.



Figura 3.8: Amplificatore di potenza G&W (Gearing & Watson Electronics Ltd.) in dotazione ai laboratori dell'Università Politecnica delle Marche, impiegato per l'amplificazione del segnale di eccitazione.

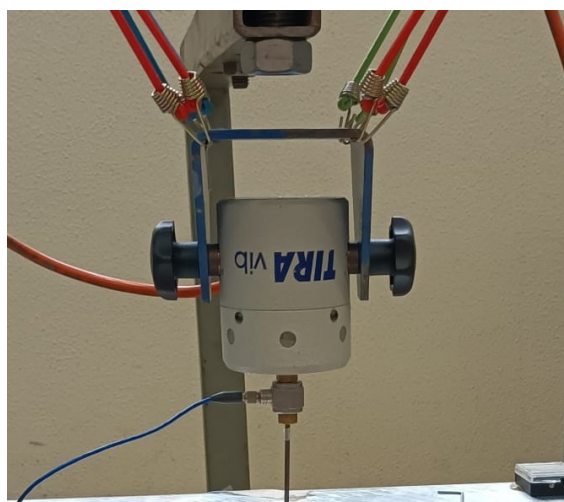


Figura 3.9: Shaker elettrodinamico utilizzato nelle prove sperimentali

Capitolo 4

Applicazione sperimentale: analisi di un metamateriale

4.1 Metamateriale

I metamateriali sono comunemente definiti come strutture artificiali “efficaci” dotate di proprietà inusuali non facilmente riscontrabili in natura. In questa definizione, il termine *efficace* indica che la dimensione p della cella unitaria della struttura, ovvero il suo periodo, è molto più piccola della lunghezza d’onda guidata λ_g dell’onda che si propaga ($p \ll \lambda_g$); di conseguenza, i campi risultano mediati sulle celle unitarie e la struttura viene percepita come un mezzo omogeneo su scala macroscopica. [8]

I metamateriali possono essere progettati come costruzioni elastiche tridimensionali regolari per gestire la diffusione delle onde meccaniche. Attraverso il design geometrico della cella fondamentale, si possono sviluppare intervalli di frequenze elastiche in cui la trasmissione delle onde è notevolmente limitata, differenziando tra modi globali e locali (“*mode separation*” trattato da D’Alessandro et al. nel 2017 [9]) piuttosto che facendo affidamento unicamente sulle caratteristiche intrinseche del materiale. Tale metodo permette di raggiungere elevate capacità isolanti su un ampio spettro di frequenze, offrendo alla struttura un comportamento simile a quello di un filtro meccanico per le onde elastiche a bassa frequenza. [9]

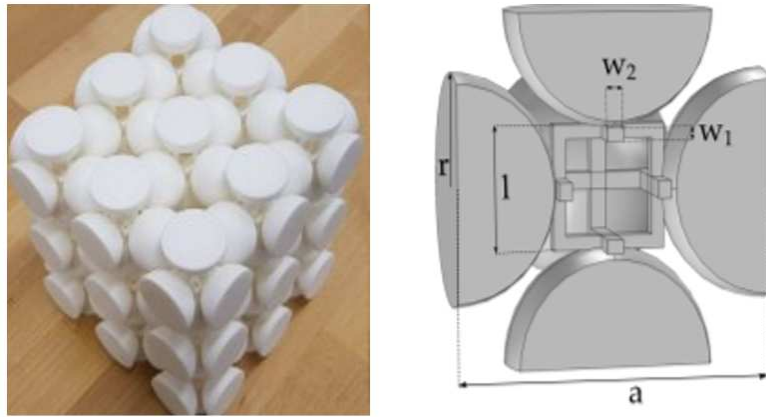


Figura 4.1: Cella elementare introdotta da D'Alessandro et al. [9]

In Figura 4.1 è illustrato il modello della struttura periodica presentato da D'Alessandro et al. (2017) [9], composto da sfere interconnesse tramite collegamenti di tipo scatolare. Quando si verifica l'apertura del primo bandgap, il modo elastico abbraccia l'intera cella unitaria, risultando quindi come un modo globale. In questa disposizione, le sfere si spostano quasi come se fossero oggetti rigidi, comportandosi come masse concentrate, mentre le travi di collegamento conferiscono stabilità al sistema, agendo come molle sotto stress di flessione. L'elevata massa modale presente porta alla manifestazione di questo modo a frequenze basse.

Al contrario, il modo legato alla chiusura del bandgap non coinvolge il movimento delle sfere, ma è invece determinato solo dalle deformazioni delle travi di collegamento; pertanto, è considerato un modo locale. Dato che la massa modale in questo caso è notevolmente inferiore, questo modo si presenta a frequenze più elevate. [9]

La Figura 4.2 presenta il metamateriale utilizzato nelle prove trattate in questo lavoro di tesi, la cui configurazione geometrica prevede una distribuzione della massa nei cubi esterni, accompagnata da molle flessibili che consentano di ottenere frequenze di apertura più basse. Questo approccio permette di realizzare un filtro passa basso con una frequenza di taglio quanto più bassa possibile. [10]

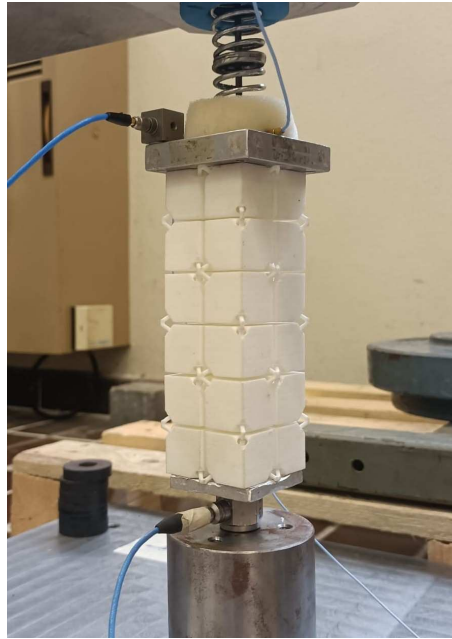


Figura 4.2: Metamateriale in esame

4.2 Misure della trasmissibilità delle vibrazioni

Per il metamateriale in esame, applicato al banco prova, sono state condotte misurazioni relative alla trasmissibilità delle vibrazioni. Queste rilevazioni sono state effettuate tramite il sistema di acquisizione dati illustrato nel capitolo 3.4, con l'obiettivo di quantificare quanto il metamateriale sia efficace nel limitare la diffusione delle vibrazioni all'interno del sistema. I risultati sperimentali ottenuti permettono di esaminare il comportamento dinamico del metamateriale e di metterlo a confronto con le previsioni teoriche, offrendo un'analisi esaustiva delle sue prestazioni operative.

4.3 Analisi vibrazionale metamateriale

Per condurre l'analisi vibrazionale del metamateriale, sono state eseguite diverse prove sperimentali, ciascuna mirata a esplorare specifici aspetti del comportamento meccanico e dinamico del materiale:

- La prima prova prevedeva un caricamento graduale del metamateriale, ottenuto abbassando il banco prova di 2 mm alla volta, fino ad un massimo di 20 mm,

poichè, a questo valore, il materiale era completamente compresso ("a pacco"), come mostrato in Figura 4.3. Questa procedura ha permesso di osservare la risposta del metamateriale a una compressione lenta e controllata, valutando come variava la trasmissibilità delle vibrazioni in funzione della progressiva deformazione.

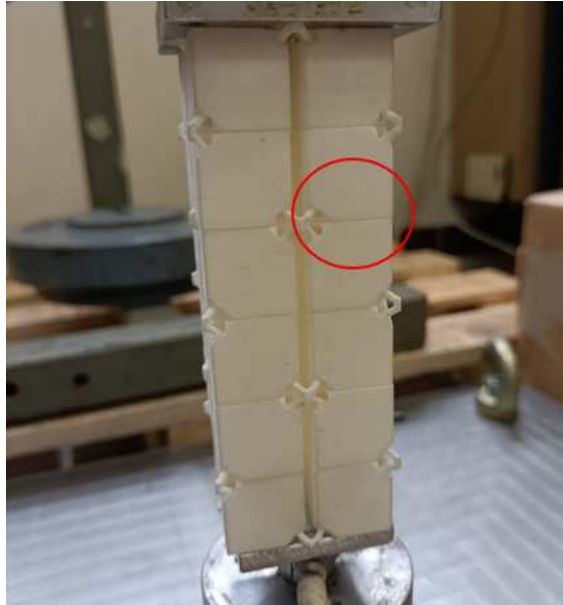


Figura 4.3: Metamateriale a "pacco"

- La seconda prova consisteva in un abbassamento più rapido del banco prova, pari a 4 mm, per analizzare la risposta del metamateriale a una compressione più intensa. In questa fase è stato inoltre valutato il ritorno del materiale, rialzando il banco di 4 mm alla volta, al fine di verificare la capacità del metamateriale di ritornare alle condizioni iniziali e la ripetibilità del comportamento meccanico.
- La terza e ultima prova è stata eseguita aumentando il livello di amplificazione delle vibrazioni a 170, un valore che indica il guadagno dell'amplificatore, ovvero l'incremento dell'ampiezza del segnale che viene inviato all'attuatore. Questa impostazione permette di creare un'eccitazione meccanica più forte, mantenendo costante la frequenza, con l'intento di esaminare come si comporta il metamateriale in condizioni di maggiore sollecitazione dinamica, mettendo in evidenza possibili comportamenti non lineari o cambiamenti nella trasmissibilità del sistema.

Per tutte le prove, il banco prova veniva ribassato attraverso un meccanismo a manovella,

progettato affinché ogni giro producesse uno spostamento di 0,16 mm del banco stesso; questo spostamento veniva rilevato tramite un indicatore di posizione meccanico-digitale ad albero passante.¹ Contestualmente a questa operazione, si procedeva con l'allentamento dello stinger, in modo da prevenire che quest'ultimo fosse sottoposto a trazione, e, di conseguenza, un abbassamento dello shaker.

La procedura utilizzata nella prima prova con il metamateriale "nudo" è mostrata nella Tabella 4.1.

Tabella 4.1: Valori compressioni delle prima prova con metamateriale "nudo"

Posizione (ogni 12,5 giri)	Compressione
9910,9	0 mm
9931,3	2 mm
9952,8	4 mm
9973,3	6 mm
9994,5	8 mm
15,2	10 mm
37,1	12 mm
57,7	14 mm
78,9	16 mm
99,2	18 mm
120,6	20 mm

Dalla prima prova è stato osservato che, quando si raggiungono 8 mm di compressione, la molla di contrasto arriva al suo limite, il che significa che non è più in grado di comprimersi. Di conseguenza, da quell'istante in poi, tutta la compressione avviene esclusivamente nel metamateriale. La lunghezza originale del metamateriale non sottoposto a compressione è di 117 mm; dopo una compressione totale di 10 mm, la sua lunghezza scende a 110 mm, così 3 mm della compressione totale sono stati assorbiti dalla molla. Al termine della prova, con 20 mm di compressione, il metamateriale raggiunge i 106 mm di lunghezza, risultando compresso di 11 mm; di quei 20 mm complessivi, 8 mm sono stati assorbiti dalla molla.

Questa procedura è stata utilizzata anche per la seconda e la terza prova. Nella seconda prova, oltre alla fase di compressione, è stata effettuata una decompressione per verificare

¹ Prodotto dall'azienda italiana FIAMA e composto da due modelli: OP7A16(666)DXF20RD14 e FL-B OP6/OP7 F14

la ripetibilità della prova(vedi Tabella 4.2). Nel corso di questa operazione, è stato notato che la struttura in metamateriale non ritornava completamente alle condizioni iniziali, come si osserva in Figura 4.4: il lato destro presentava ancora una leggera compressione, mentre il lato sinistro si trovava quasi alle condizioni originarie.

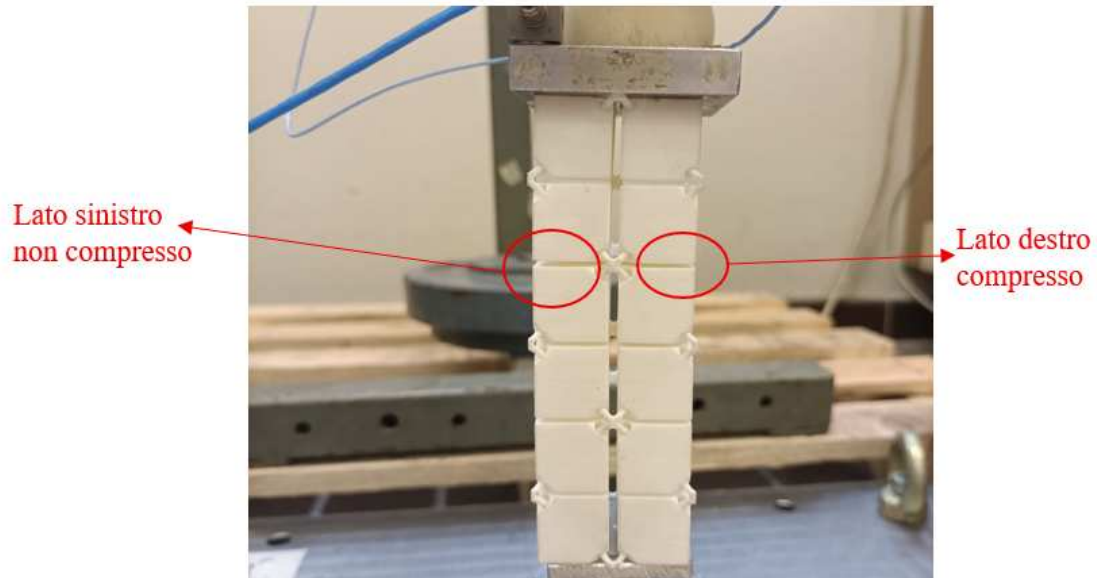


Figura 4.4: Compressione parziale del metamateriale dopo la seconda prova

D'altra parte, la molla di contrasto ritornava completamente allo stato iniziale, quindi risultava del tutto libera.

Tabella 4.2: Valori compressioni della seconda prova con metamateriale "nudo"

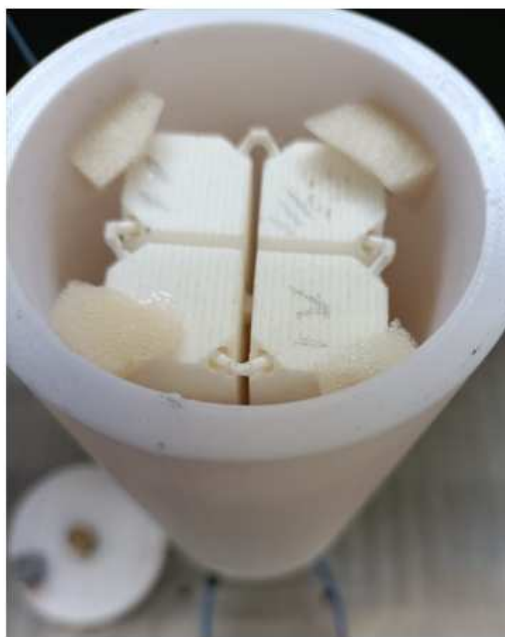
Posizione in andata	Compressione
9910,9	0 mm
9952,8	4 mm
9994,5	8 mm
37,1	12 mm
78,9	16 mm
120,6	20 mm
Posizione al ritorno	Decompressione
78,9	16 mm
37,1	12 mm
9994,5	8 mm
9952,8	4 mm
9910,9	0 mm

Nella terza prova si è proceduto allo stesso modo, impostando l'amplificatore su 170.

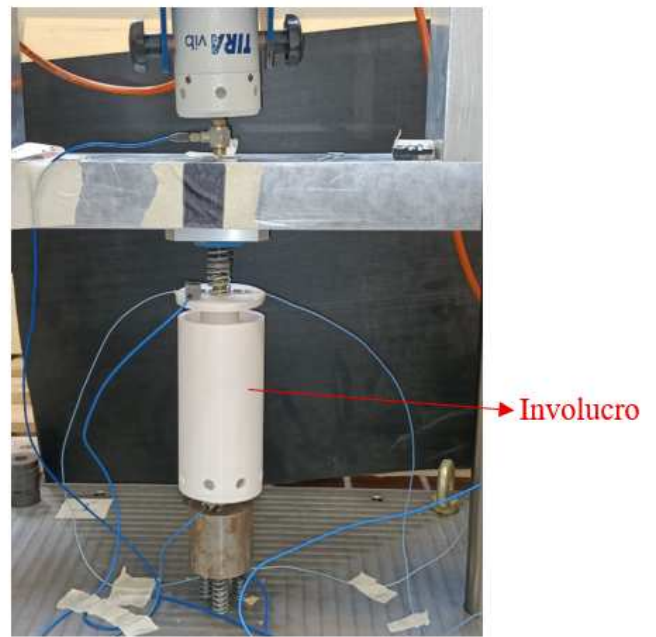
Tabella 4.3: Valori compressioni della terza prova con metamateriale "nudo"

Posizione	Compressione
9910,9	0 mm
9952,8	4 mm
9994,5	8 mm
37,1	12 mm
78,9	16 mm
120,6	20 mm

Queste prove sono state eseguite con il metamateriale "nudo", come mostrato in Figura 4.2. Successivamente, il materiale è stato rivestito con un involucro protettivo e le stesse analisi vibrazionali sono state ripetute, al fine di valutare come il rivestimento influenzi il comportamento dinamico complessivo del metamateriale.



a) Visione interna dell'involucro



b) Involucro inserito nel banco di prova

Figura 4.5: Metamateriale con involucro nel banco prova

Come illustrato in Figura 4.5, l'involucro è composto da due parti principali: il contenitore che ospita il metamateriale e il relativo coperchio. Al coperchio è stato fissato lo *stinger* tramite un apposito adattatore; sullo stesso coperchio è inoltre stato montato un accelerometro triassiale. L'insieme formato dal coperchio, dall'adattatore, dallo stinger e dall'accelerometro triassiale ha massa $m = 41,26$ g. Il contenitore che contiene il

metamateriale ha massa $m = 115,61$ g.

Per acquisire i dati si sono rese necessarie le seguenti modifiche:

- Due accelerometri miniaturizzati sono montati sul coperchio, rispettivamente a destra e a sinistra, per acquisire le vibrazioni locali.
- L'accelerometro dedicato alla misura di a_{out} è stato collocato sotto l'involucro per registrare l'uscita dinamica secondo la configurazione corrente del setup.
- Le celle di carico sono rimaste nella posizione del setup ottimizzato per garantire la comparabilità dei dati.

Anche in questo caso sono state eseguite due diverse prove sperimentali:

- la prima prova con una compressione pari a 2 mm nella fase di andata e a 4 mm nella fase di ritorno;
- la seconda prova con il sistema impostato a un fattore di amplificazione pari a 170.

Tabella 4.4: Valori compressioni della prima prova con l'involucro

Indicazione manovella in andata	Compressione
9570,8	0 mm
9591,7	2 mm
9612,6	4 mm
9633,4	6 mm
9654,4	8 mm
9675,2	10 mm
9696,4	12 mm
9717,9	14 mm
9738,8	16 mm
9759,7	18 mm
9780,5	20 mm
Indicazione manovella al ritorno	Decompressione
9738,8	16 mm
9696,4	12 mm
9654,4	8 mm
9612,6	4 mm
9571	0 mm

Dalla Tabella 4.4 si evidenziano diverse letture fornite dal contatore di giri; questo varia a causa del fatto che l'altezza del banco prova è stata incrementata dall'involucro, modificando così lo zero rispetto alle misurazioni effettuate in precedenza. Inoltre, è stato necessario

impiegare uno stinger di dimensioni ridotte, per evitare il contatto del metamateriale con l'apparecchiatura. Di conseguenza, l'abbassamento dello shaker è stato effettuato fino a 14 mm, poiché non era possibile ridurre ulteriormente la posizione in questa configurazione del setup. Nella seconda prova con l'involucro si è impostato l'amplificatore a 170.

Tabella 4.5: Valori compressioni della seconda prova con involucro

Indicazione manovella	Compressione
9570,8	0 mm
9612,6	4 mm
9654,4	8 mm
9696,4	12 mm
9738,8	16 mm
9780,5	20 mm

4.3.1 Calcolo delle trasmissibilità

Per ogni grado di compressione e per ogni test, sia nel caso del metamateriale "nudo" che dell'involucro, sono stati raccolti i dati attraverso il sistema di acquisizione illustrato nel Capitolo 3. Queste informazioni sono state processate con il software Testlab, che permette di stimare, dai dati nel dominio del tempo, le funzioni di trasferimento espresse in termini di modulo e fase, considerando sia la forza sia l'accelerazione, nell'intervallo di frequenza compreso tra 0 e 10 kHz. Dopo questa fase, i dati sono stati trasferiti ed analizzati in ambiente Matlab, avvalendosi di codici creati ad hoc. Tale metodologia ha reso possibile l'analisi della risposta dinamica del metamateriale in differenti configurazioni sperimentali, consentendo di confrontare i risultati in relazione alle modifiche delle condizioni di eccitazione.

4.3.1.1 In termini di forza

Partendo dalla trasmissibilità in termini di forza, distinguiamo ancora una volta le prove effettuate con metamateriale "nudo" e con involucro.

- Metamateriale "nudo"

Nella Figura 4.6 è presentata la funzione di trasmissibilità del sistema, espressa in termini di modulo e fase, ottenuta dalla prima prova sperimentale condotta sul

metamateriale privo di rivestimenti. I risultati mostrano i dati relativi agli Step 0, 1, 4, 7, 8 e 10, scelti per illustrare alcuni dei principali livelli di compressione esaminati. I valori corrispondenti sono riportati ed evidenziati nella Tabella 4.6. La linea nera a 1 rappresenta il valore di riferimento dell'ampiezza della trasmissibilità, che indica il caso limite in cui la vibrazione si trasmette indisturbata attraverso il metamateriale in tutto il campo di frequenza considerato. Affinchè il metamateriale si comporti come un isolante perfetto, l'ampiezza della trasmissibilità deve essere minore di 1 e pertanto la curva deve giacere nella zona sottostante la linea nera.

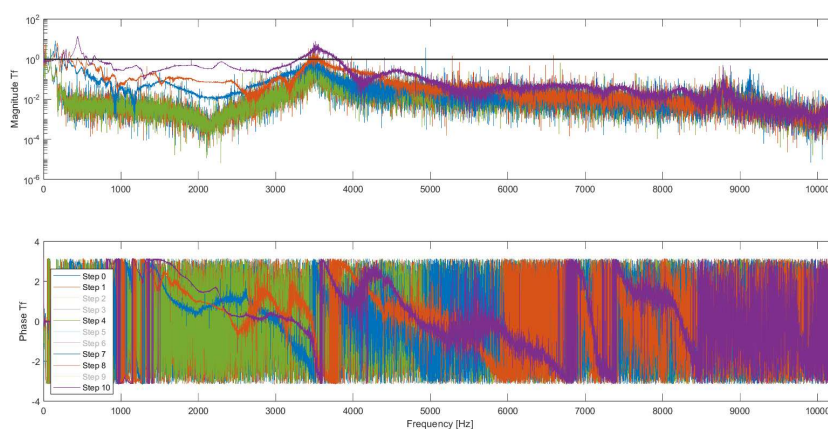


Figura 4.6: Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova sperimentale sul metamateriale nudo

Tabella 4.6: Corrispondenza step e compressione Figura 4.6

Step	Compressione
0	0 mm
1	2 mm
2	4 mm
3	6 mm
4	8 mm
5	10 mm
6	12 mm
7	14 mm
8	16 mm
9	18 mm
10	20 mm

La Figura 4.7 presenta la funzione di trasmissibilità correlata alla prova di ripetibilità, derivante dalla seconda raccolta di dati sperimentali. In questo caso, vengono visualizzati gli Step 0, 2, 4, 5, 6, 7 e 10. I valori corrispondenti sono evidenziati nella Tabella 4.7.

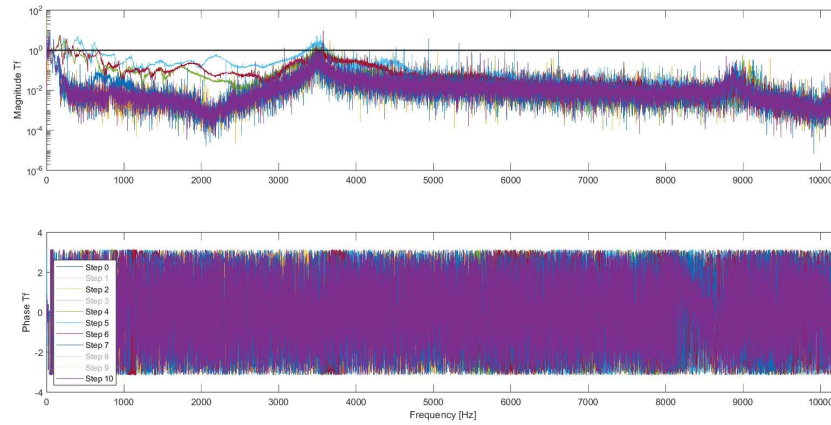


Figura 4.7: Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova di ripetibilità sul metamateriale nudo

Tabella 4.7: Corrispondenza step e compressione Figura 4.7

Step	Compressione
0	0 mm
1	4 mm
2	8 mm
3	12 mm
4	16 mm
5	20 mm
6	16 mm
7	12 mm
8	8 mm
9	4 mm
10	0 mm

Infine, la Figura 4.8 illustra la trasmissibilità relativa alla terza prova, che si distingue per un comportamento amplificato.

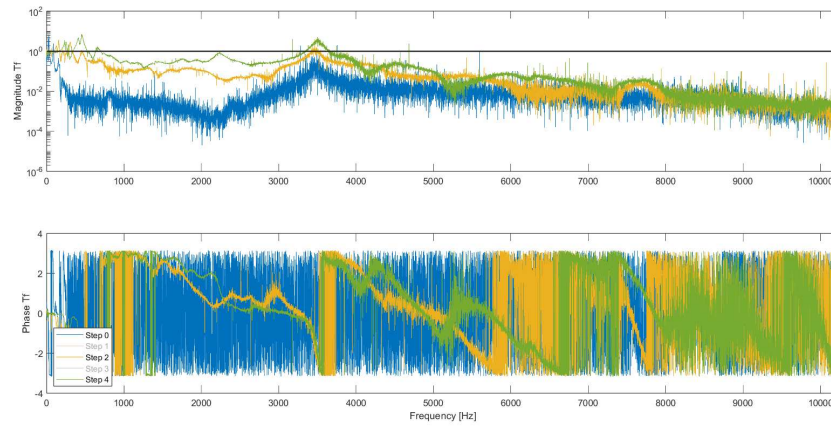


Figura 4.8: Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata sul metamateriale nudo

Tabella 4.8: Corrispondenza step e compressione Figura 4.8

Step	Compressione
0	4 mm
1	8 mm
2	12 mm
3	16 mm
4	20 mm

- Metamateriale con involucro

Le Figure 4.9 e 4.10 mostrano la capacità di trasmissione del metamateriale con involucro, riferendosi rispettivamente alla prima prova e al test amplificato.

Come si può notare nella Figura 4.9, sono messi in rilievo i passaggi 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14 e 15, al fine di sottolineare i risultati delle acquisizioni. È importante ricordare che dalla fase 10 ha inizio la fase di ripetizione del test.

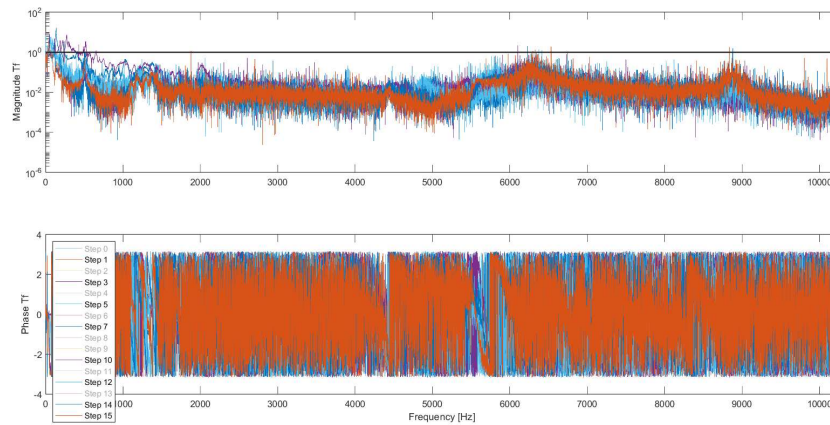


Figura 4.9: Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova con involucro

Tabella 4.9: Corrispondenza step e compressione Figura 4.9

Step	Compressione
0	0 mm
1	2 mm
2	4 mm
3	6 mm
4	8 mm
5	10 mm
6	12 mm
7	14 mm
8	16 mm
9	18 mm
10	20 mm
11	16 mm
12	12 mm
13	8 mm
14	4 mm
15	0 mm

Nella Figura 4.10, invece, sono messi in evidenza i passaggi 0, 3, 4 e 5, scelti per illustrare l'andamento della risposta nel test amplificato. I corrispondenti valori sono riportati nella Tabella 4.10.

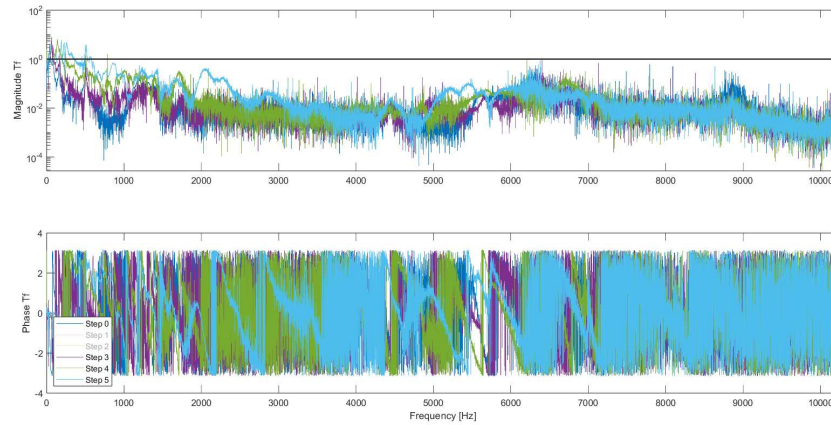


Figura 4.10: Funzioni di trasmissibilità in termini di forza, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata con involucro

Tabella 4.10: Corrispondenza step e compressione Figura 4.10

Step	Compressione
0	0 mm
1	4 mm
2	8 mm
3	12 mm
4	16 mm
5	20 mm

4.3.1.2 In termini di accelerazioni

Allo stesso modo in cui è stata determinata la trasmissibilità per la forza, è stata calcolata anche per l'accelerazione in ogni test, sia che si consideri il metamateriale da solo sia che si analizzi la situazione con l'involucro.

- Metamateriale "nudo"

Le Figure 4.11–4.13 presentano le curve derivanti dalle misurazioni effettuate, corrispondenti rispettivamente alla prima prova, alla prova di ripetibilità e a quella amplificata. In particolare, nella Figura 4.11 sono messi in evidenza gli step 0, 2, 4, 6, 8 e 10, i cui valori numerici sono evidenziati nella Tabella 4.11.

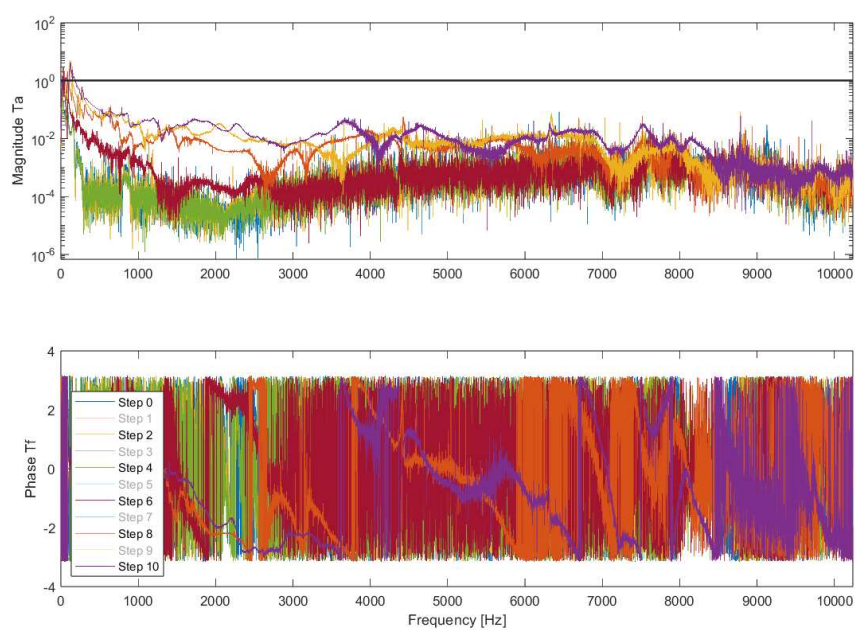


Figura 4.11: Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova sul metamateriale nudo

Tabella 4.11: Corrispondenza step e compressione Figura 4.11

Step	Compressione
0	0 mm
1	2 mm
2	4 mm
3	6 mm
4	8 mm
5	10 mm
6	12 mm
7	14 mm
8	16 mm
9	18 mm
10	20 mm

Analogamente, la Figura 4.12 mostra gli step 0, 2, 4, 5, 6, 7 e 10, i cui valori sono riportati nella Tabella 4.12.

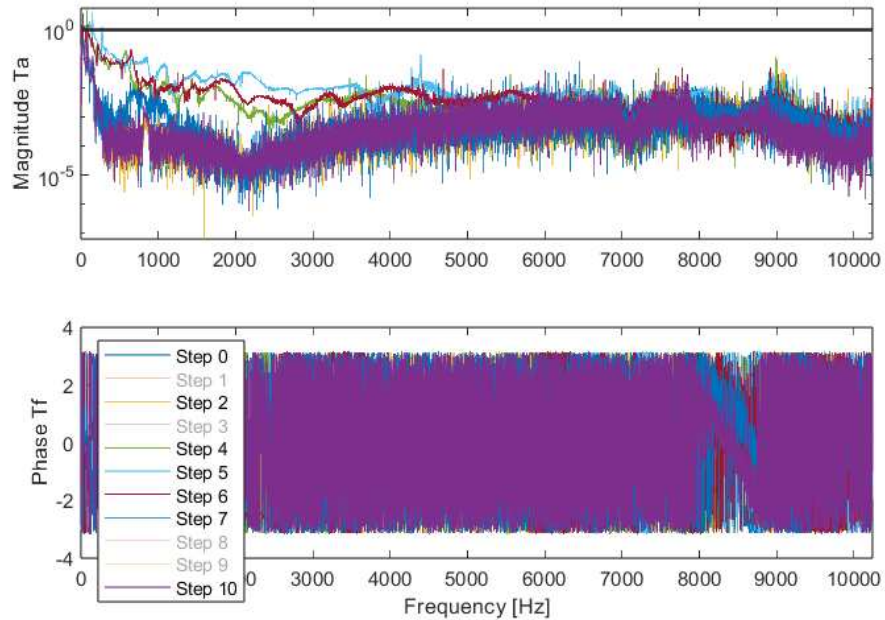


Figura 4.12: Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova di ripetibilità sul metamateriale nudo

Tabella 4.12: Corrispondenza step e compressione Figura 4.12

Step	Compressione
0	0 mm
1	4 mm
2	8 mm
3	12 mm
4	16 mm
5	20 mm
6	16 mm
7	12 mm
8	8 mm
9	4 mm
10	0 mm

Infine, la Figura 4.13 mostra gli step 0, 2 e 4 relativi alla prova amplificata.

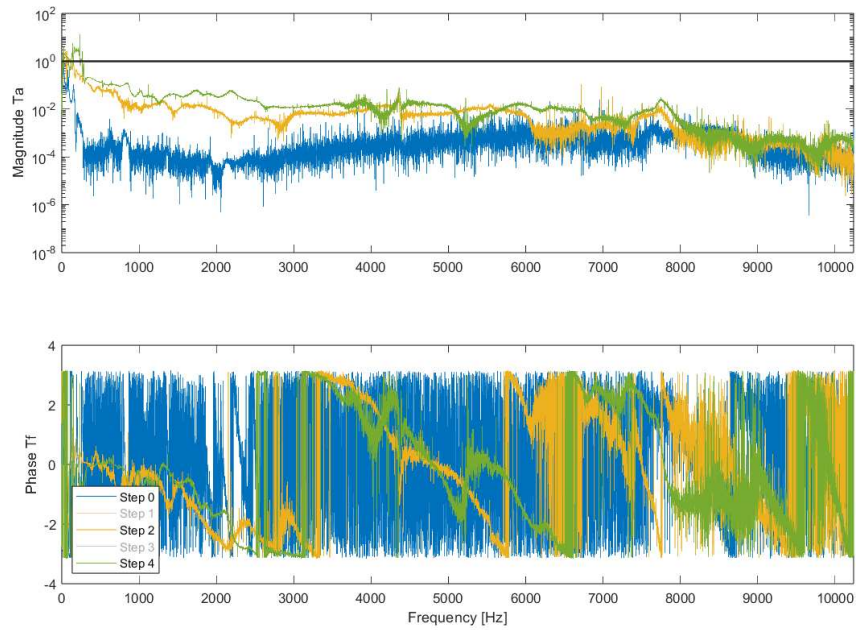


Figura 4.13: Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata sul metamateriale nudo

Tabella 4.13: Corrispondenza step e compressione Figura 4.13

Step	Compressione
0	4 mm
1	8 mm
2	12 mm
3	16 mm
4	20 mm

- Metamateriale con involucro

Infine, le prove relative all'accelerazione con l'involucro sono riportate nelle Figure 4.14 e 4.15, seguendo le stesse osservazioni e criteri di visualizzazione utilizzati per le acquisizioni precedenti.

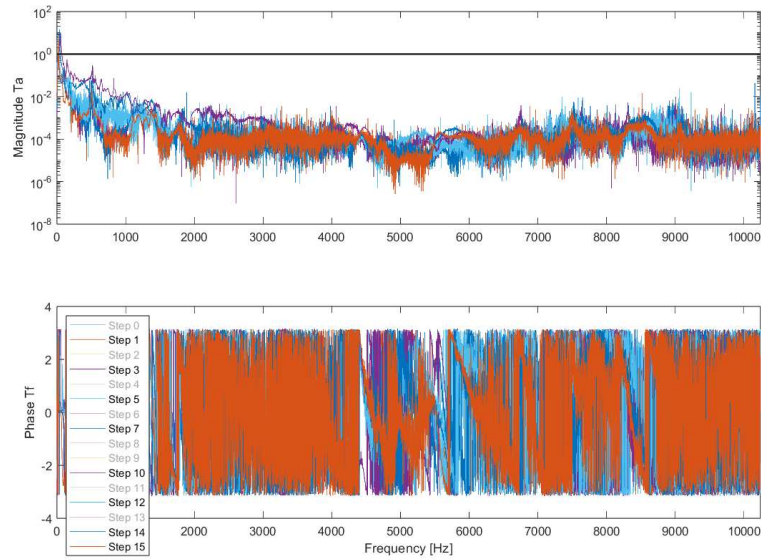


Figura 4.14: Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prima prova con involucro

Tabella 4.14: Corrispondenza step e compressione Figura 4.14

Step	Compressione
0	0 mm
1	2 mm
2	4 mm
3	6 mm
4	8 mm
5	10 mm
6	12 mm
7	14 mm
8	16 mm
9	18 mm
10	20 mm
11	16 mm
12	12 mm
13	8 mm
14	4 mm
15	0 mm

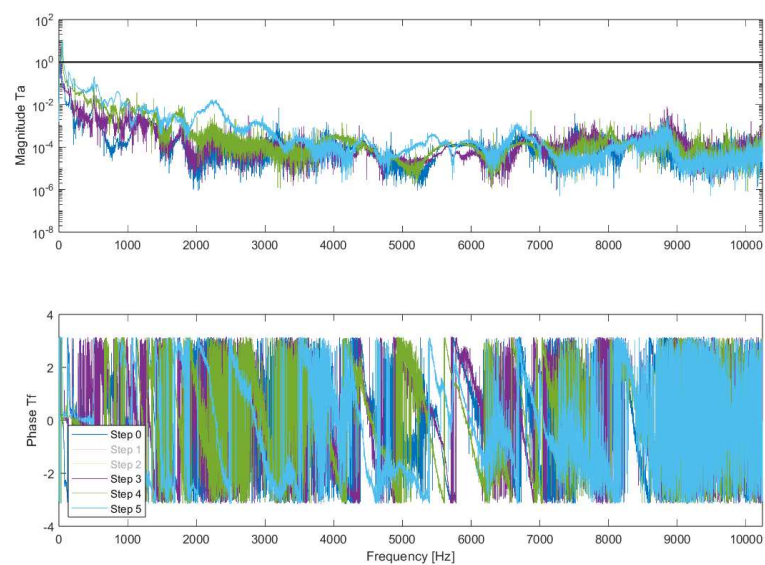


Figura 4.15: Funzioni di trasmissibilità in termini di accelerazione, in termini di modulo e fase, ottenute mediante la prova amplificata con involucro

Tabella 4.15: Corrispondenza step e compressione Figura 4.15

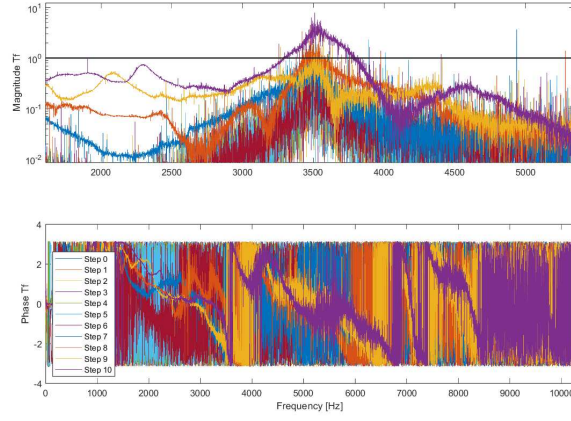
Step	Compressione
0	0 mm
1	4 mm
2	8 mm
3	12 mm
4	16 mm
5	20 mm

Capitolo 5

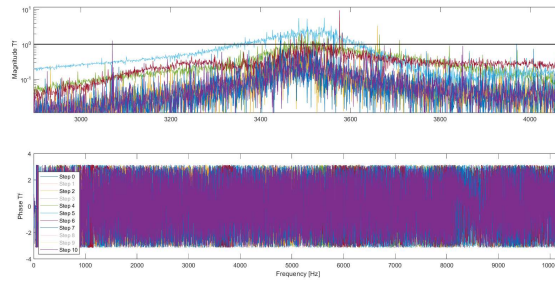
Discussione dei risultati

5.1 Risultati con metamateriale nudo

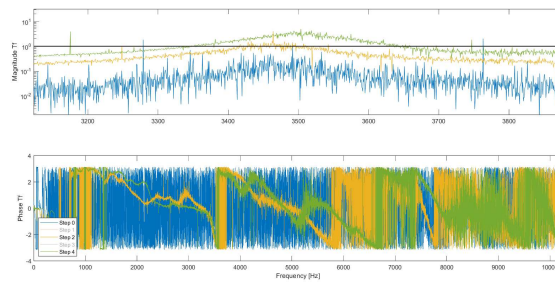
Per quanto riguarda la forza, l'esame delle curve del modulo (mostrate nelle Figure 4.6, 4.7 e 4.8) indica una risonanza principale collocata tra i 3 e i 4 kHz, riscontrabile in tutte le prove condotte. Gli ingrandimenti presentati in Figura 5.1 forniscono una visione più chiara di quest'area dello spettro, evidenziando come la compressione del metamateriale influisca sia sull'ampiezza che sulla posizione della risonanza. In particolare, in Figura 5.1(a) si può notare che un incremento nella compressione porta a un aumento della rigidità equivalente del sistema. Questa variazione provoca un cambiamento nella frequenza di risonanza: le curve relative alla risonanza si associano alle condizioni di compressione più elevate, ovvero agli step finali, come indicato dai dati presenti nella Tabella 4.6. Un andamento simile è osservabile anche nei test successivi illustrati in Figura 5.1(b) e (c). Inoltre, si rileva che il metamateriale mostra una notevole ripetibilità. In particolare, come evidenziato in Figura 5.1(b), le curve tendono a tornare al di sotto della linea di riferimento ($10^0 = 1 \leftrightarrow 0$ dB) dopo aver raggiunto il livello massimo di compressione, dimostrando così la stabilità e l'affidabilità del sistema nel tempo.



(a) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.6, relativo all'intervallo di frequenza 2–5 kHz.



(b) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.7, relativo all'intervallo di frequenza 3–4 kHz.

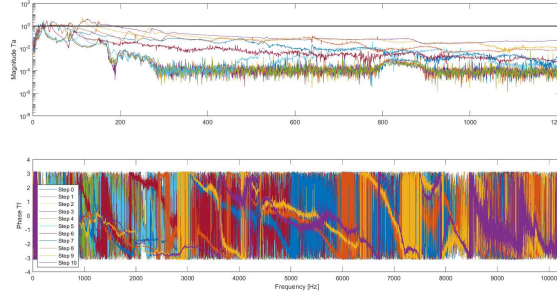


(c) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.8, relativo all'intervallo di frequenza 3–4 kHz.

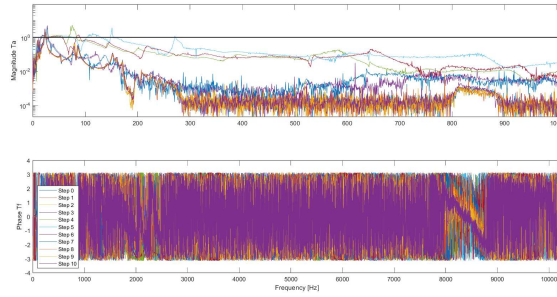
Figura 5.1: Confronto tra le tre prove sperimentali con metamateriale nudo, in termini di forza

Analizzando l'accelerazione, l'osservazione delle curve del modulo (Figure 4.11, 4.12 e 4.13) evidenzia come i picchi massimi della funzione di trasferimento siano prevalentemente concentrati alle basse frequenze (0-200 Hz). In questa zona, le curve superano la linea di riferimento (10^0), con il segnale che appare più rumoroso. Questo comportamento è particolarmente evidente ingrandendo la sezione delle basse frequenze, come mostrato nella Figura 5.2.

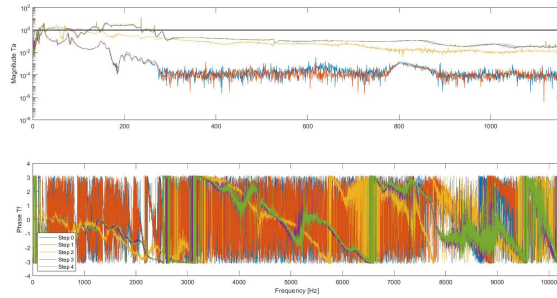
Con l'aumentare della frequenza, si osserva una riduzione drastica dell'ampiezza, senza però la comparsa di picchi di risonanza di intensità paragonabile a quelli riscontrati durante l'analisi basata sulla forza. Nella banda delle frequenze intermedie si rilevano soltanto lievi oscillazioni locali nell'ampiezza, le quali rimangono comunque inferiori ai valori iniziali. Nonostante ciò, l'effetto della compressione del metamateriale risulta ancora evidente: le curve relative ai diversi step presentano variazioni sia in termini di ampiezza che nella loro distribuzione lungo l'asse delle frequenze. Infine, il confronto tra le tre prove evidenzia una buona coerenza qualitativa del comportamento globale.



(a) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.11, relativo alle basse frequenze.



(b) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.12, relativo alle basse frequenze.



(c) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.13, relativo alle basse frequenze.

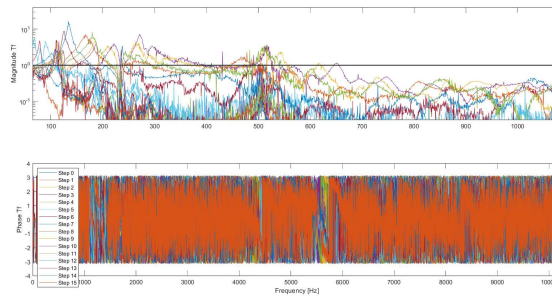
Figura 5.2: Confronto tra le tre prove sperimentali con metamateriale nudo, in termini di accelerazione

5.2 Risultati con metamateriale rivestito

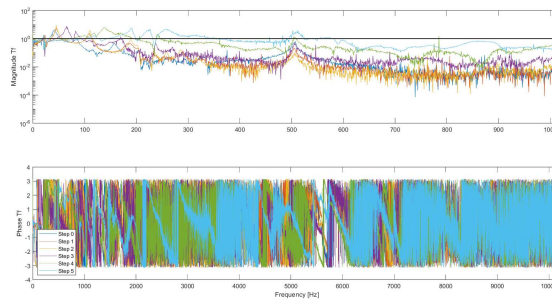
I risultati ottenuti con il metamateriale rivestito mostrano, in termini di forza, una risposta distribuita in modo più omogeneo su tutto il range di frequenze. Come si può vedere in Figura 5.3, all'inizio si nota un rapido calo nelle basse frequenze, seguito da valori che si mantengono relativamente costanti e uniformi fino alle frequenze più elevate.

In particolare, nelle basse frequenze, le curve raggiungono valori simili o superiori a quelli di riferimento, seguiti da un veloce abbassamento dell'ampiezza. In seguito, il modulo si stabilizza, senza mostrare una risonanza predominante.

Tuttavia, si possono rintracciare alcune aree dello spettro, soprattutto fra 5 e 7 kHz e attorno ai 9 kHz (come mostrano le Figure 4.9 e 4.10, relative alla prima prova con ciclo di compressione e decompressione e alla prova amplificata), dove si osservano incrementi locali dell'ampiezza. Nonostante ciò, queste sono meno accentuate e diffuse rispetto ai picchi riscontrati nel caso senza rivestimento, presentandosi come fenomeni più omogenei.



(a) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.9, relativo alle basse frequenze.



(b) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.10, relativo alle basse frequenze.

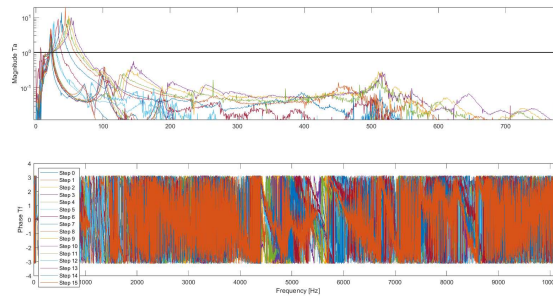
Figura 5.3: Confronto tra le prove sperimentali con metamateriale rivestito, in termini di forza

Analizzando il comportamento del metamateriale rivestito in relazione all'accelerazione, si osserva che la reazione del sistema appare globalmente più uniforme lungo tutto l'intervallo di frequenze esaminato. Nello specifico, le curve mostrano picchi che superano il valore di riferimento di 10^0 solo nella fase iniziale, compresa tra 0 e 100 Hz, come illustrato nella Figura 5.4. Questa area, contraddistinta da basse frequenze, mostra ancora una certa variabilità del segnale a causa della maggiore sensibilità del sistema alle sollecitazioni iniziali.

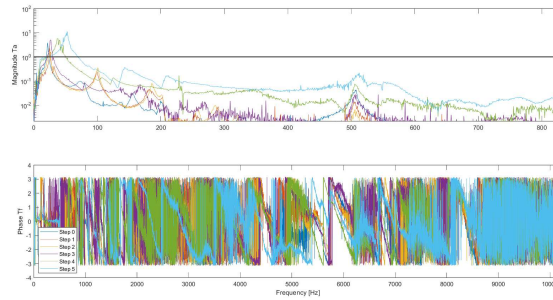
Con l'aumento della frequenza, il comportamento del sistema evidenzia un cambiamento significativo. Le curve tendono a stabilizzarsi, rimanendo costantemente al di sotto della linea di riferimento. Questo comportamento, facilmente osservabile nelle Figure 4.14 e 4.15 relative alle due prove effettuate con il metamateriale rivestito, evidenzia una riduzione dell'ampiezza della risposta e una maggiore capacità del sistema di attenuare le sollecitazioni dinamiche.

Nelle bande di frequenza intermedie e alte non si registrano picchi di risonanza significativi; al contrario, si nota un andamento regolare con oscillazioni di limitata ampiezza. Questo dimostra che l'involucro ricopre un ruolo fondamentale nel ridurre le oscillazioni più accentuate, rendendo la risposta complessiva più controllata rispetto al caso del metamateriale non rivestito.

Infine, il confronto tra le varie prove mette in luce una buona ripetibilità del comportamento: le curve risultano coerenti sia in termini di ampiezza sia nella distribuzione lungo l'asse delle frequenze.



(a) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.14, relativo alle basse frequenze.



(b) Dettaglio della funzione di trasferimento mostrata in Figura 4.15, relativo alle basse frequenze.

Figura 5.4: Confronto tra le prove sperimentali con metamateriale rivestito, in termini di accelerazione

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Efficacia banco di prova

Nel presente elaborato di tesi si è proceduto all'analisi di un dispositivo ideato per testare la trasmissibilità di un metamateriale. Nei capitoli precedenti, in particolare nei Capitoli 3 e 4, è stata dettagliata la configurazione del banco di prova utilizzato, la quale è rappresentata in Figura 3.6 nella sua impostazione ottimale.

Al termine del lavoro svolto, è possibile affermare che il sistema ha permesso di realizzare le prove sperimentali programmate, facilitando la raccolta dei dati necessari per l'analisi. Il banco di prova ha dimostrato di essere appropriato per l'esecuzione dei vari test, fornendo condizioni operative abbastanza stabili e una buona ripetibilità nelle misurazioni.

L'efficacia del sistema si rivela quindi principalmente nella sua capacità di funzionare senza significative problematiche nel corso delle prove condotte, offrendo dati coerenti e utili per le fasi successive di elaborazione.

In sintesi, i risultati conseguiti suggeriscono che il banco di prova si configura come uno strumento adeguato per la realizzazione di attività sperimentali simili. Tuttavia, rimane plausibile identificare spazi di miglioramento del sistema, con l'obiettivo di ampliare ulteriormente le sue potenzialità e la sua applicabilità a configurazioni sperimentali più vaste.

6.2 Performance metamateriale

Riguardo al metamateriale oggetto di studio, il lavoro di tesi si conclude con un'analisi delle sue prestazioni in termini di trasmissibilità e affidabilità. Il dispositivo è stato illustrato nei capitoli precedenti, insieme alle prove sperimentali condotte.

L'analisi dei risultati ottenuti evidenzia come il metamateriale abbia dimostrato un comportamento pienamente rispondente alla sua funzione di isolatore di vibrazioni, mostrando una significativa riduzione della trasmissione nelle condizioni di test considerate. Tale comportamento è stato confermato dai dati sperimentali raccolti durante le prove.

Inoltre, i test hanno rivelato che il sistema mantiene un'elevata efficacia sia nella configurazione "nuda" sia in quella con involucro, con prestazioni leggermente migliori nel secondo caso.

Pur non raggiungendo risultati del tutto ideali, le prestazioni osservate sono nel complesso soddisfacenti e comprovano il corretto funzionamento del sistema nelle configurazioni analizzate.

In conclusione, questo lavoro rappresenta una base per la caratterizzazione del sistema studiato e pone le premesse per futuri sviluppi.

Bibliografia

[1] Balachandran, B., Magrab, E. B. (2018). *Vibrations*. Cambridge University Press.

[2] Maia¹, NMM, Urgueira, APV, and Almeida, RAB (2011). *Why and how of transmissibility. Vibration analysis and control: new trends and developments*, 197

[3] ISO 10846-1:2008, Acoustics and vibration – Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements. International Organization for Standardization.

[4] Harris, C. M., Piersol, A. G., Harris' Shock and Vibration Handbook, 6th Edition, McGraw-Hill, 2010.

[5] The MathWorks. (2025). *FFT (Fast Fourier Transform)*. MATLAB Documentation. Consultato il 26 novembre 2025, da <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>

[6] Martarelli, M., Candelaresi, D., Paolini, G.G., *Relazione sul progetto del banco per la caratterizzazione dinamica, prototipo realizzato*, Deliverable 3.1, Progetto MetaBlock – Programma PoC VALUE, Università Politecnica delle Marche, 30 ottobre 2024.

[7] UNI EN ISO 10846-3:2005 - UNI Ente Italiano di Normazione. Consultato il 28 novembre 2025. Disponibile online su: <https://store.uni.com/uni-en-iso-10846-3-2005>

[8] Caloz, C. (2009). *Prospettive sui metamateriali EM. Materials Today*, 12-20.

[9] D'Alessandro, L., Belloni, E., Ardito, R., Braghin, F., Corigliano, A. (2017). *Mechanical low-frequency filter via modes separation in 3D periodic structures*. Applied Physics Letters.

[10] Calamita, C. (2024). *Verifica delle performance di isolatori di tipo metamateriale per l'isolamento di vibrazioni in condizioni operative* (Tesi di laurea triennale, Università Politecnica delle Marche).