



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Caratterizzazione sperimentale di una metastruttura realizzata in  
additive manufacturing per la misura di vibrazioni**

**Experimental characterization of metastructure realized by additive  
manufacturing for measurement of vibrations**

Candidato:

Corinne Gattafoni

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Correlatore:

Ing. Alessandro Annessi

A.A. 2020/2021



# Indice

Introduzione.....	1
Metamateriale.....	2
Stato dell'arte.....	2
Proprietà dei metamateriali.....	3
Applicazioni ed utilizzi.....	6
Metamateriale vibrazionale.....	8
Metamateriale dello studio.....	12
Motivazioni.....	15
Prove statiche.....	16
Introduzione.....	16
Prove a compressione su SI-PLAN.....	17
Prova manuale.....	20
Prova a cicli.....	23
Prova a compressione su MTS810.....	25
Prova.....	28
Confronto.....	30
Prove dinamiche.....	32
Introduzione.....	32
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina d'alluminio.....	37
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina di plastica.....	40
Prova con accelerometro cilindrico con base esagonale su piastrina di plastica.....	42
Confronto.....	43
Prove eseguite con l'aggiunta di piastrine in PLA.....	45
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina quadrata.....	47
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina quadrata con fori.....	50
Confronto.....	53
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina a croce piena.....	54
Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina a croce con fori.....	57
Confronto.....	60
All setup.....	61
Conclusioni e sviluppi futuri.....	62

Ringraziamenti.....	63
Bibliografia.....	64
Sitografia.....	65

## Introduzione

Lo studio compiuto parte dalla necessità di analizzare come il metamateriale, supporto meccanico per misure di vibrazioni a contatto di tipo accelerometrico, possa funzionare come elemento per il disaccoppiamento delle vibrazioni prodotte. La metastruttura è un dispositivo di piccole dimensioni, progettata come collegamento tra lo strumento di misura, un accelerometro per l'appunto e un altro dispositivo, quale ad esempio un manico, riuscendo a disaccoppiare la misura tra i due per un ampio campo di frequenze. Il supporto, dunque, come verrà spiegato in seguito, è un metamateriale vibrazionale, realizzato in nylon attraverso una stampa 3D e permette la soppressione delle vibrazioni a banda larga. La sua realizzazione consente di utilizzare un accelerometro miniaturizzato, ad esempio, per misure a contatto di vibrazione e superare i comuni problemi associati a questo tipo di misura quali il montaggio, con i vari metodi di fissaggio che influenzano la frequenza misurabile, la sporcizia e la lentezza della misura. Il risultato è quello di effettuare misure più veloci e affidabili dal punto di vista meccanico, abbattendo inoltre anche i costi.

All'interno di questo elaborato, nel secondo capitolo è presente una breve introduzione alla tematica "Metamateriale" con particolare interesse al metamateriale in studio, utilizzato nelle diverse prove eseguite e trattate di seguito. Sono inoltre citate anche le proprietà e le diverse applicazioni dei metamateriali che si trovano in natura.

Nel terzo capitolo si trattano le diverse prove statiche eseguite. Nello specifico, si descrivono le prove a compressione, sulla SI-PLAN e sulla MTS810: nel primo macchinario sono state eseguite due prove, manuale e a cicli, nel secondo, invece, una sola prova di compressione.

Nel quarto, e ultimo, capitolo si illustrano invece le prove dinamiche, eseguite creando un apposito setup dove il metamateriale viene attaccato e fatto vibrare attraverso l'utilizzo di un dispositivo, lo shaker. Anche in questo caso, si porta in rassegna diverse prove eseguite con diversi tipi di accelerometri, con o senza l'utilizzo di piastrine in PLA progettate.

Seguono infine conclusioni dello studio fatto.

# Metamateriale

## Stato dell'arte

Un metamateriale, termine derivante dal greco “μετά”, cioè “oltre”, e dal latino “materia”, coniato nel 1999 da Rodger M. Walser, è un materiale sintetizzato artificialmente la cui microstruttura è progettata per conferire proprietà fisiche speciali, quali elettromagnetiche, acustiche, meccaniche, non riscontrate in nessuno dei materiali compositi già esistenti in natura (J.Liu, H.Guo, & T.Wang, 2020). Elementi essenziali di un metamateriale sono la sua natura composita, in quanto è costituito da più materiali compositi assemblati, come plastica e metallo, e la sua disposizione in geometrie ripetute su scale inferiori alle lunghezze d'onda dei fenomeni che influenzano (T.J.Cui, D.R.Smith, & R.P.Liu, 2010).

I metamateriali si distinguono da quelli di base per le loro proprietà, derivanti dalle strutture che assumono: la loro forma precisa, la geometria, le dimensioni, l'orientamento e la disposizione concedono loro proprietà intelligenti capaci di manipolare le onde elettromagnetiche bloccandole, assorbendole, potenziandole o piegandole per ottenere benefici non conseguibili con i materiali convenzionali.

Le applicazioni dei metamateriali sono molteplici e possono includere filtri ottici, dispositivi medici, applicazioni aerospaziali remote, rilevamento di sensori e monitoraggio delle infrastrutture, gestione intelligente dell'energia solare e miglioramento dei sensori a ultrasuoni.

I metamateriali, inoltre, sono nati in campo elettromagnetico, partendo dallo studio di proprietà elettromagnetiche dei materiali, ma, grazie alla ricerca apportata in questo campo, ad oggi si possono distinguere diversi tipi di metamateriali come: acustici, meccanici, elastici, strutturali, non lineari e vibrazionali.

La realizzazione di un metamateriale, infine, a prescindere dalla sua natura, è semplice grazie alle recenti innovazioni nel campo dell'“additive manufacturing”, che hanno implicato un forte impulso alla progettazione dei metamateriali stessi (C.Caloz, 2009).

## Proprietà dei metamateriali

I metamateriali derivano le loro proprietà dalla loro particolare struttura, capace di manipolare le onde magnetiche.

I materiali presenti in natura possono dividersi in quattro categorie differenti (DPS, ENG, MNG, DNG) mediante le proprietà elettromagnetiche, in particolare tramite i parametri di permeabilità magnetica ( $\mu$ ) e permittività elettrica ( $\epsilon$ ), definiti come:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.1)$$

dove H è il campo magnetico e B è l'induzione magnetica;

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (2.2)$$

dove D è l'induzione elettrica ed E il campo elettrico.

La classificazione viene effettuata mediante i valori che questi parametri possono assumere (M.Esposito & F.Todisco, 2016):

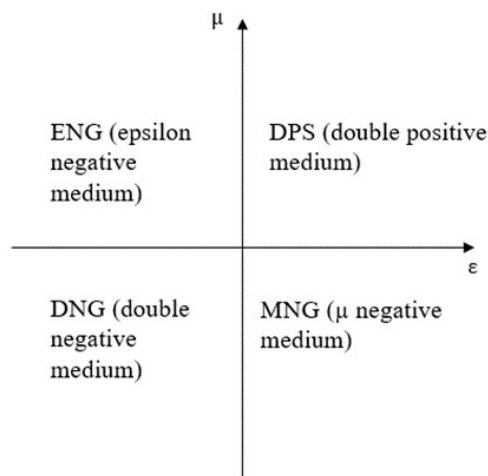


Figura 2.1: Schema rappresentante la classificazione dei materiali.



I metamateriali elettromagnetici, come è possibile notare dalla figura 2.1, si classificano all'interno dei materiali DNG, categoria caratterizzata da entrambi i parametri negativi. Si parla, dunque, di rifrazione negativa, fenomeno elettromagnetico in cui i raggi luminosi vengono rifratti in corrispondenza di un'interfaccia opposta alle loro proprietà di rifrazione positiva più comunemente osservate. A tal proposito, è possibile definire la formula dell'indice di rifrazione  $n$  attraverso le equazioni di Maxwell:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (2.3)$$

dove appunto  $\epsilon$  e  $\mu$  sono i parametri sopra citati, i quali, affinché si parli di metamateriale, devono risultare entrambi negativi e di conseguenza anche l'indice di rifrazione dei metamateriali stessi risulterà essere negativo. Quindi, tra le proprietà principali dei metamateriali è possibile citare l'indice di rifrazione negativo (M.Esposito & F.Todisco, 2016), fattore tramite cui la lunghezza d'onda e la velocità della radiazione sono ridotte rispetto ai loro valori nel vuoto, pari a  $\lambda=5 \cdot 10^{-6}m$  e  $c=2,9979 \cdot 10^8m/s$ . L'indice di rifrazione di un materiale è quindi una grandezza adimensionale che quantifica la diminuzione della velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica quando attraversa un materiale ed è definito anche attraverso la formula:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto, nonché pari a  $2,9979 \cdot 10^8m/s$ , e  $v$  è la velocità di fase della radiazione che attraversa il materiale in questione. Questo indice non è costante, ma varia in base alla frequenza della radiazione.

Altra legge che descrive la rifrazione è quella di Snell, la quale afferma che il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e rifrazione è equivalente al rapporto delle velocità di fase nei due mezzi, o equivalente al reciproco del rapporto degli indici di rifrazione, per cui risulta la formula (P.Mazzoldi, M.Nigro, & C.Voci, 2008):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

(2.5)

poiché  $n_2$  è negativo, i raggi incidenti e rifratti si trovano sullo stesso lato della superficie normale in corrispondenza di un'interfaccia di materiali di indice positivo e negativo. Riguardo i metamateriali, che, come già detto, hanno un indice negativo di rifrazione, usano questa proprietà per reindirizzare le onde nell'ambiente circostante in quanto, quando un'onda incontra un materiale con indice di rifrazione negativo, l'angolo che l'onda rifratta forma con il piano normale è superiore a quella dei materiali con indice di rifrazione positivo.

I metamateriali con  $n$  negativo hanno numerose proprietà sorprendenti, oltre alla legge di Snell:

- Il vettore di Poynting di media durata è antiparallelo alla velocità di fase; i fronti d'onda si muovono in direzione opposta al flusso di energia, a differenza dei materiali right-handed.
- L'effetto Doppler è rovesciato: una sorgente di luce muovendosi verso un osservatore sembra ridurre la sua frequenza, invece che aumentarla come accadrebbe per un normale materiale.

Ulteriore, ma non meno importante, proprietà dei metamateriali è l'invisibilità, acquisita grazie alle capacità ottiche, in quanto la lunghezza d'onda è più corta della luce visibile. I metamateriali hanno infatti un potenziale sufficiente per rendere invisibili le sostanze con cui interagiscono; ciò significa che, quando si posiziona uno strato di metamateriale su un oggetto, questo lascerà passare la luce e si vedrà solo ciò che sta dietro.

Dunque, i metamateriali derivano le loro proprietà dalla loro struttura e disposizione, per cui, affinché venga considerato efficace, deve essere considerato come materiale uniforme piuttosto che un array di celle elementari. Ciò significa che le unità che

compongono il metamateriale devono essere relativamente piccole rispetto alla lunghezza d'onda che deve essere manipolata e reindirizzata.

## Applicazioni ed utilizzi

I metamateriali comprendono tutt'oggi un'area in pieno sviluppo, che è ancora nelle sue fasi iniziali di ricerca e sviluppo e che coinvolge processi produttivi complessi basati soprattutto sulla nanotecnologia.

Gli utilizzi dei metamateriali sono molteplici e vanno dalle industrie automobilistiche alle case di moda, in quanto una delle loro proprietà principali è quella dell'invisibilità.

I metamateriali, ad esempio, possono essere utilizzati per la costruzione di antenne in quanto migliorano o aumentano le prestazioni del sistema. Infatti, i metamateriali potrebbero aumentare la potenza irradiata di un'antenna in quanto, avendo permeabilità magnetica negativa, potrebbero consentire proprietà come dimensioni dell'antenna elettricamente ridotte, un'elevata direttività e una frequenza operativa sintonizzabile. Inoltre, le antenne create attraverso l'utilizzo di metamateriali possono dimostrare prestazioni migliorate in termini di efficienza e larghezza di banda rispetto alle antenne costruite in modo convenzionale. Frequenze più ampie, infatti, si ottengono attraverso l'utilizzo di nano elementi che compongono l'antenna stessa e che permettono di sfruttare al meglio lo spazio disponibile per piccole piattaforme o spazi. Vari sistemi di antenne metamateriali possono essere impiegati per supportare sensori di sorveglianza, collegamenti di comunicazione, sistemi di navigazione, sistemi di comando e controllo (E.Shridhar & Y.Prasad, 2011).

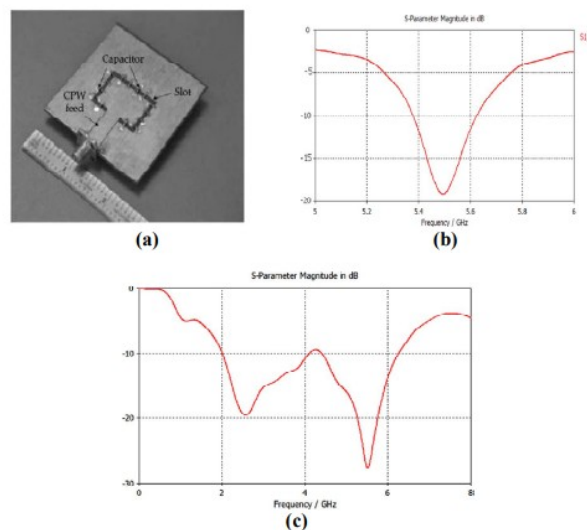


Figura 2.2: (a) Immagine 3D di un alimentatore di un'antenna; (b) Risultato in frequenza di una semplice antenna; (c) Risultato in frequenza di un'antenna metamateriale.

I metamateriali possono inoltre essere utilizzati in una super lente per ottenere una risoluzione oltre il limite di diffrazione rispetto a quello inerente a dispositivi ottici o lenti convenzionali. In particolare, nel 2005 Ramakrishna dimostrò che le super lenti ottenute tramite l'utilizzo di metamateriali vanno oltre i normali microscopi. I materiali ottici convenzionali subiscono, infatti, un limite di diffrazione perché solo i componenti propaganti vengono trasmessi da una sorgente luminosa, mentre quelli non propaganti, cioè le onde evanescenti, non vengono trasmesse. Un modo per migliorare la risoluzione è aumentare l'indice di rifrazione, che però è limitato dalla disponibilità di materiali, presenti in natura, ad alto indice. A questo proposito, si cerca di progettare una super lente attraverso l'utilizzo di metamateriali che possa costituire tutte le onde evanescenti per ottenere un'immagine perfetta (K.Gangwar, Dr.Paras, & R.P.S.Gangwar, 2014).

I metamateriali possono essere inoltre usati come sensori, in quanto forniscono strumenti per migliorare la sensibilità e la risoluzione dei sensori. Sono applicati in diversi campi, come quello agricolo, meccanico, biomedico ed informatico (K.Gangwar, Dr.Paras, & R.P.S.Gangwar, 2014).

Come è possibile leggere in letteratura, i metamateriali si utilizzano in svariati modi oltre a quelli sopracitati, come il campo acustico o sismico, utilizzi che sono ancora in via di sviluppo grazie alla ricerca compiuta negli ultimi anni su questi metamateriali.

## Metamateriale vibrazionale

I materiali, come già definito precedentemente, si dividono in diverse categorie, tra le quali si trovano i metamateriali, in particolare, oggetto dell'elaborato, quelli vibrazionali, i quali non permettono alle vibrazioni stesse di trasmettersi all'interno del materiale, garantendo cioè l'attenuazione delle vibrazioni per un ampio campo di frequenze.

Le proprietà di propagazione delle onde elastiche nei metamateriali vibrazionali sono regolabili attraverso la progettazione di apposite celle periodiche, progettate con appositi programmi *CAD* ed ottenute attraverso l'utilizzo di stampanti 3D (additive manufacturing), celle che agiscono come filtri meccanici per la propagazione delle onde stesse. La propagazione della maggior parte delle onde, quindi, avviene lungo le celle che compongono il metamateriale all'interno di specifiche bande di frequenza (*passband*), mentre altre rimangono bloccate all'interno di altre bande di frequenza (*stopband*). Gli *stopband* nel caso di metamateriali vibrazionali si trovano a frequenze più basse rispetto a quelle definite dalla legge di Bragg, la quale si può riassumere attraverso l'equazione (P.Mazzoldi, M.Nigro, & C.Voci, 2008):

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (2.6)$$

dove  $\vartheta$  è l'angolo che il fascio uscente forma con il piano cristallino,  $\lambda$  la lunghezza d'onda della radiazione,  $d$  la distanza tra due piani adiacenti e  $n$  un numero intero.

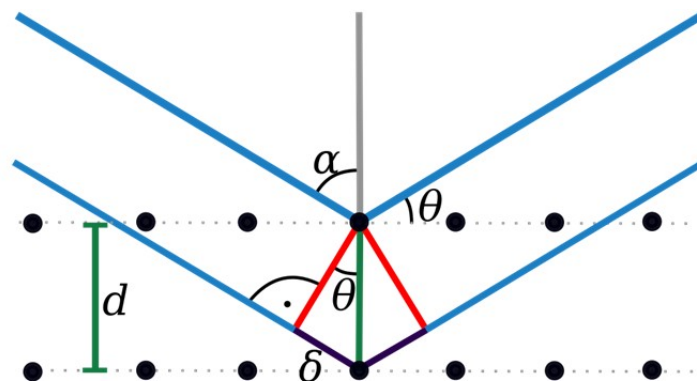


Figura 2.3: Rappresentazione legge di Bragg.

Avendo, dunque, una struttura periodica, il metamateriale vibrazionale presenta un *bandgap*, cioè un intervallo di energia, ampio e completo, utile a garantire un'importante attenuazione delle onde intorno ad una certa frequenza. Come studiato da D'Alessandro nel 2016 (L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, A.Corigliano, & F.Braghin, "Modeling and experimental verification of an ultra-wide bandgap in 3d phononic crystal", 2016) per avere migliori effetti di attenuazione delle vibrazioni, la struttura deve essere organizzata in maniera tale che tutti i modi caratterizzati da grandi masse modali confinino nel primo *passband*, mentre i successivi *passband* sono caratterizzati da modi con piccole masse modali, cioè modi locali della struttura. Si parla dunque di separazione dei modi, locali e globali.

La struttura periodica presentata da D'Alessandro (L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, F.Braghin, & A.Corigliano, "Mechanical low-frequency filter via modes separation in 3d periodic structures", 2017) è caratterizzata da sfere che, se eccitate ad una certa frequenza, si muovono come corpi rigidi e connessioni a scheletro cubico che sfruttano la rigidità flessionale delle travi. Le dimensioni caratteristiche della cella, riportata in figura 2.4, sono definite in funzione del parametro  $a$  pari a  $0.05\text{m}$ , con  $r=0.33a$ ,  $w_1=0.04a$ ,  $w_2=0.05a$  ed  $l=1.05(a-2r)$ .

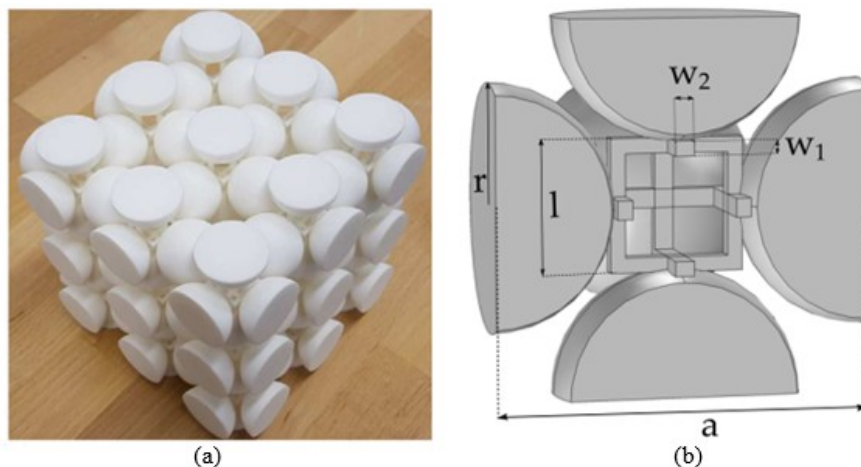


Figura 2.4: Cella elementare d'Alessandro, (a) Prototipo in Nylon con dimensioni  $0.150\text{m} \times 0.150\text{m} \times 0.150\text{m}$  della struttura periodica analizzata; (b) Sezione trasversale della cella elementare per definire i parametri struttura.

D'Alessandro, attraverso uno studio approfondito di tale cella, dimostrò che il modo di apertura del *bandgap* principale coinvolge l'intera cella (modo globale), in quanto le sfere possono essere viste come masse concentrate che si muovono di moto rigido, mentre il modo di chiusura, o modo locale, è caratterizzato dalla deformazione dello scheletro quadratico di dimensione "l" posto al centro, con le sfere che non si muovono poiché non partecipano al modo considerato. Il modo globale solitamente si manifesta a bassa frequenza a causa della grande massa modale presente, mentre il modo locale si manifesta ad alta frequenza, a causa invece della ridotta massa presente (L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, F.Braghin, & A.Corigliano, "Mechanical low-frequency filter via modes separation in 3d periodic structures", 2017). Si riporta in seguito un'analisi *FEM* di come la cella d'Alessandro si comporta ad alta e bassa frequenza:

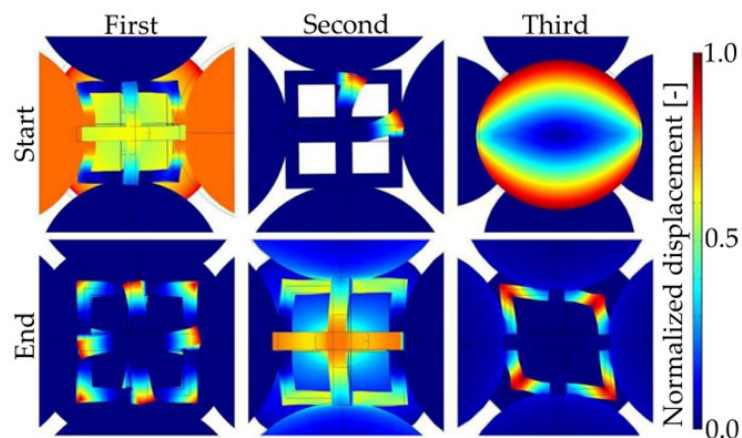


Figura 2.5: Modo di apertura globale, proprio dell'intera struttura e modo di chiusura locale, relativo allo scheletro quadratico di dimensione "l".

La struttura, dunque, si comporta come un filtro meccanico capace di attenuare le onde attorno ad una certa frequenza. Ciò si nota anche dall'analisi di trasmissibilità, compiuta da D'Alessandro, in cui, creato il grafico, il primo ampio *bandgap* che si viene a formare si trova tra 2.5Hz e i 14.5Hz (L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, F.Braghin, & A.Corigliano, "Mechanical low-frequency filter via modes separation in 3d periodic structures", 2017):



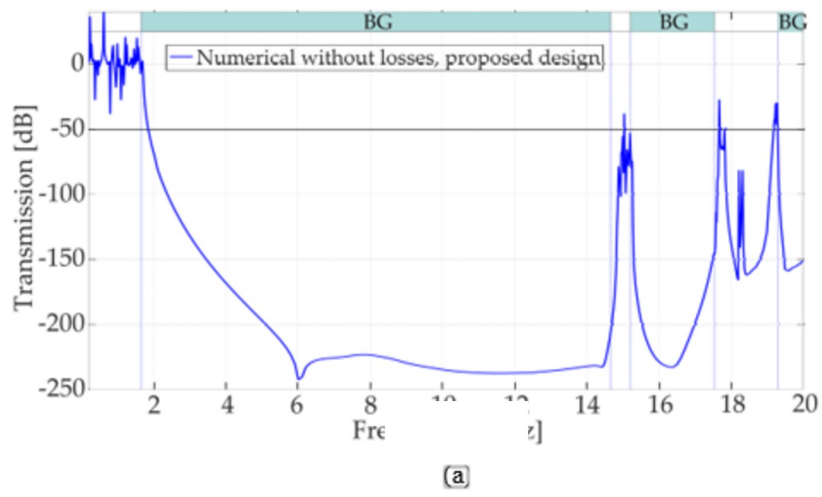


Figura 2.6: Analisi di trasmissibilità nella cella di D'Alessandro.

## Metamateriale dello studio

Motivo di studio è il supporto per la misura accelerometrica attraverso l'utilizzo di un metamateriale vibrazionale, il quale verrà utilizzato come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni. Si è scelto di realizzare questo filtro con frequenza inferiore più bassa possibile e con una geometria in cui la massa sia distribuita interamente all'intero del volume della cella realizzando delle molle cedevoli in modo da raggiungere le basse frequenze. Infatti, questo elemento dovrebbe fornire un ampio range di frequenze in cui non è consentita la propagazione delle onde, cioè un *bandgap* di circa 10kHz, una bassa apertura del *bandgap* (vicino a 1kHz), una struttura compatta, leggera ed una forza adeguata rispetto all'applicazione.

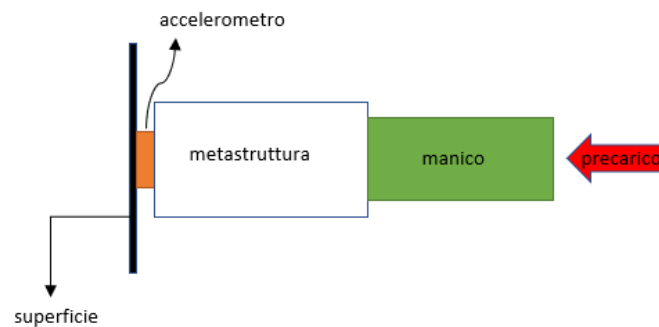


Figura 2.7: Schematizzazione dell'utilizzo del metamateriale in studio.

Come è possibile notare dalla figura 2.7, il metamateriale opportunamente realizzato viene interposto tra l'accelerometro, attaccato alla superficie per mezzo di cera o biadesivi, ed il manico, dove si applica una forza. L'obiettivo, dunque, è quello di avere una separazione dei modi tra quelli locali e globali della struttura, utilizzando masse rigide e travi flessibili opportunamente sintonizzate.

Per il metamateriale si sceglie una struttura periodica, realizzata attraverso sinterizzazione selettiva con laser (SLS) in poliammide PA 2200, in cui una singola cella, di forma cubica, ha dimensione contenuta con  $a=40\text{mm}$  per sfruttare la tecnica della *mode separation*, proposta da D'Alessandro (L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, A.Corigliano, & F.Braghin, "Modeling and experimental verification of an ultra-wide

bandgap in 3d phononic crystal", 2016), affinché si ottenga un *bandgap* ampio per garantire un'attenuazione delle onde intorno ad una certa frequenza. Per *mode separation* si intende progettare, infatti, la geometria della cella elementare periodica in modo che l'energia meccanica della struttura sia delimitata da bande di frequenza ben separate. Questo garantisce alla struttura il comportamento di un filtro meccanico passo basso, con l'attenuazione delle onde che inizia in corrispondenza della frequenza di apertura del *bandgap* e procede oltre la frequenza di chiusura o limite superiore.

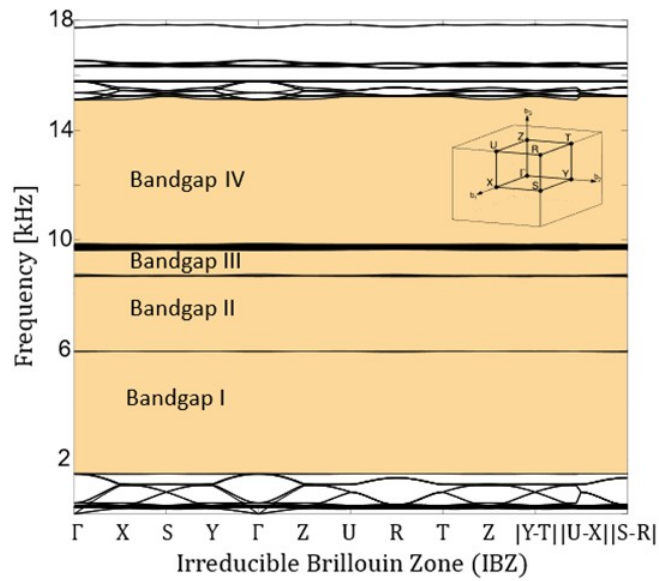


Figura 2.8: Diagramma di dispersione.

La figura soprastante riporta il diagramma di dispersione ottenuto mediante un'analisi *FEM* utilizzando le condizioni al contorno di Floquet-Bloch per calcolare le curve di dispersione di varie onde con efficienza variabili (C.Hakoda, J.Rose, P.Shokouhi, & C.Lissenden, 2018). Per un'onda guida infinita si applicano le condizioni di Floquet descritte attraverso l'equazione:

$$\mathbf{u}_{dst} = \sum_{\mathbf{k}_F} \mathbf{u}_{src} e^{-i\mathbf{k}_F \cdot (\mathbf{r}_{dst} - \mathbf{r}_{src})} \quad (2.6)$$

dove  $\mathbf{k}_F$  è il numero d'onda di Floquet, definito dall'utente, con i pedici *dst* e *src* che stanno ad indicare rispettivamente la destinazione e la sorgente;  $\mathbf{u}$  è il campo di spostamento e  $\mathbf{r}$  sono le coordinate spaziali degli estremi dove vengono applicate le

condizioni di Floquet. Nel caso in studio, essendo la cella unitaria, tali condizioni al contorno sono applicate alle relative facce parallele di essa.

Il metamateriale è quindi composto da tre celle unitarie identiche disposte lungo la direzione z e le sue prestazioni vibrazionali sono valutate nelle frequenze di interesse con approccio sia numerico che sperimentale. L'onda in ingresso è applicata sulla superficie inferiore, mentre quella d'uscita è valutata sulla superficie superiore.

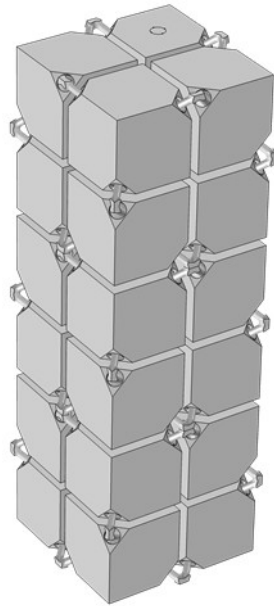


Figura 2.9: Prototipo del metamateriale in studio.

## Motivazioni

Di seguito si riportano alcune prove effettuate, con l'utilizzo di diversi macchinari, sul metamateriale stesso in quanto l'obiettivo è quello di capire se il materiale si rilassa dato un certo valore di precarico, il valore ottimale di precarico che si ritroverà nella curva, approssimabile ad una bilineare, delle prove statiche e le frequenze alle quali il metamateriale lavora in modo ideale, nonché come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni.

Sono state eseguite due tipologie di prove: statiche, con l'utilizzo della "SI-PLAN", macchinario a compressione, e prove dinamiche, effettuate tramite un setup rigido creato appositamente per lo studio in corso.

In particolare, le prove statiche sono prove a compressione eseguite per valutare la forza massima (o le caratteristiche specifiche di un prodotto) tra la forza e la deformazione quando si applica una forza di compressione. Consiste nel sottoporre ad una forza di compressione crescente la provetta, nel caso in studio il metamateriale, valutandone le caratteristiche comportamentali. Tale prova solitamente viene eseguita fino a rottura del materiale in esame (M.Callegari, P.Fanghella, & F.Pellicano, 2017), ma, in questo caso, volendo valutare il carico ottimale, non si arriverà mai a tale punto. Infatti, il valore limite sarà il valore in corrispondenza del quale il metamateriale si troverà a pacco, completamente compresso. Inoltre, le prove statiche eseguite e trattate di seguito sono di due tipologie: prova statica manuale e prova statica a cicli.

Altra tipologia di prova esposta è la prova dinamica, svolta diverse volte in modi differenti per verificare gli intervalli di frequenza nei quali il metamateriale lavora come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni, lavoro per il quale è stato appositamente progettato. Come già detto in precedenza, il setup delle prove dinamiche è stato creato appositamente con l'impiego di due accelerometri e di uno shaker elettrodinamico, il quale è un eccitatore di misura, in questo caso, compatto, ideale per prove di vibrazioni e analisi modali sperimentali.

## Prove statiche

### Introduzione

Come già definito in precedenza, una delle prove eseguite sul metamateriale per vedere il suo comportamento è la prova statica. Si tratta di una semplice prova a compressione, in cui si sottopone il metamateriale ad una forza di compressione crescente, valutandone le caratteristiche comportamentali. Solitamente, per eseguire una prova statica più accurata possibile, si applica una forza tale da portare a rottura il materiale stesso.

Nel caso in studio, il metamateriale verrà compresso fino ad arrivare completamente a pacco, cioè completamente compresso, per poi essere scaricato, in quanto non si è interessati a capire il valore della forza al quale il metamateriale cede. Infatti, obiettivo di tale prova, è capire il valore ottimo di precarico e quello in cui il metamateriale si trova a pacco, plottando un grafico dove vi è lo spostamento in funzione della forza applicata. In tale grafico, come specificato in seguito, in un primo momento si avrà una curva crescente, nella quale si nota che, aumentando lo spostamento del pistone che comprime il metamateriale, la forza cresce linearmente, finché non si arriva ad un valore dello spostamento in cui il metamateriale risulta quasi a pacco e il valore della forza cambia decisamente, crescendo di diversi Newton. Si noterà, infatti, soprattutto grazie a prove dinamiche, che aumentando il precarico il metamateriale svolge al meglio la funzione di elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni.

Le prove descritte in seguito sono eseguite tramite l'utilizzo di appositi macchinari a compressione-trazione quali: SI-PLAN, dove si sono svolte la prova manuale e la prova a cicli, e la MTS810, in cui è stata effettuata un'unica prova controllata attraverso un laptop. Si è scelto di compiere queste prove con macchinari differenti in quanto, andando ad eseguire le misure su un oggetto di piccole dimensioni, quale appunto il metamateriale, ed avendo i macchinari stessi un fondo scala molto elevato, si potrebbe incorrere in un errore di risoluzione, cioè la capacità, nell'esecuzione di una misura, di rilevare piccole variazioni della grandezza fisica in esame, che avrebbe lo strumento nelle condizioni ottimali d'utilizzo.

## Prove a compressione su SI-PLAN

Le prime prove statiche a compressione sono state effettuate attraverso l'utilizzo di un macchinario, definito SI-PLAN, macchina appunto servo-idraulica per prove di fatica.



Figura 3.1: SI-PLAN, macchina a compressione-trazione.

Come si nota dalla figura soprastante (figura 3.1), la macchina è composta da una struttura ben salda, con sistema da banco dai 5kN ai 25kN di tensione e compressione, da una traversa inferiore fissa, mentre quella superiore è mobile, in modo tale da poter essere spostata per ogni particolare esigenza.

Nel caso in studio, la traversa superiore è stata posizionata in modo tale che tra il pistone, spinto in una sola direzione dell'attuatore, meccanismo in cui entra l'aria, e il metamateriale, fissato all'estremità inferiore ad una piastrina di acciaio, non ci sia attrito, cioè il pistone e il metamateriale distano solo di qualche millimetro; questo sarà il punto di inizio di entrambe le prove: manuale ed a cicli. Oltre alla struttura di base, la SI-PLAN è formata da una servo-valvola, dispositivo che regola il flusso d'olio in risposta a un comando o a un segnale elettrico in ingresso al fine di controllare

posizione, velocità, pressione o forza in alcuni tipi di macchine o dispositivi, da una cella di carico, trasduttore che misura la forza applicata su un oggetto grazie ad un segnale elettrico che varia al variare della deformazione che la forza in questione produce sul componente stesso, e da un trasduttore di spostamento integrato nell'attuatore stesso, che lavora direttamente sull'estremità posteriore dell'asta dell'attuatore. Essendo la SI-PLAN un macchinario di nuova generazione, ha un sistema di controllo digitale e di acquisizione dati, il quale permette di aver accesso all'algoritmo di controllo tramite l'interfaccia del laptop da parte dell'utente che compie la prova stessa [1] [2].

Nel caso in studio, il setup creato è riportato nella figura seguente (figura 3.2):

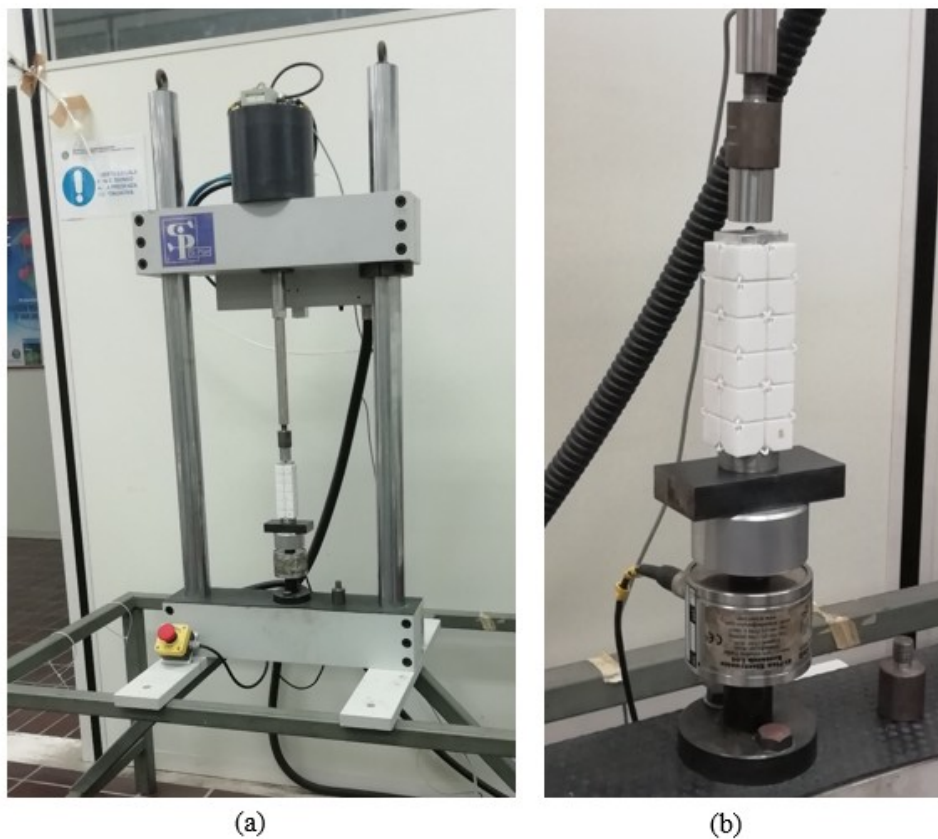


Figura 3.2: (a) Setup completo con metamateriale su macchina a compressione SI-PLAN; (b) Ingrandimento sul metamateriale nella macchina a compressione SI-PLAN.

In particolare, dalla figura 3.2b. è possibile notare come sia stato posizionato il metamateriale nella macchina stessa: partendo dalla base, vi è la cella di carico,



impiegata per misurare la forza applicata sul metamateriale in questione, due supporti in acciaio, utili per alzare il metamateriale affinché il pistone possa esercitare la compressione su di esso, il metamateriale e alla sommità si trova una piccola piastrina di alluminio con una sfera al centro, adottata in quanto si vuole applicare la forza in un unico punto.

Questo setup è direttamente collegato all'interfaccia del laptop, gestito dall'utente, e proprio da questo si può impostare lo spostamento che il pistone dovrà compiere. Infatti, grazie a questo collegamento, si possono ottenere tutti i dati, importati poi su *Excel* e studiati in *Matlab*, e si possono eseguire, nel caso in studio, due prove, manuale e a cicli, attraverso comandi specifici.

In seguito, si tratterà nello specifico di queste prove eseguite sul metamateriale in studio.

## Prova manuale

La prima prova svolta sulla SI-PLAN è stata eseguita manualmente dall'utente attraverso appositi comandi sul laptop.

Prima di iniziare la prova stessa, è bene capire a quale livello posizionare il pistone, il quale, inizialmente, non deve essere a contatto con il metamateriale, ma si deve avvicinare il più possibile ad esso. Verificato ciò attraverso un foglio di carta A4, manualmente si sceglie lo spostamento che il pistone deve compiere: nel caso in studio si parte da 8.7mm rispetto allo zero del pistone e si scende di 1mm, fino ad arrivare ad 1mm, dove il metamateriale inizia a comprimersi notevolmente, per poi compiere spostamenti di 0.10mm fino a 0.5mm, dove è a pacco. Ogni volta che si cambia intervallo, si lascia passare almeno 10s per avere una condizione stazionaria e poter analizzare i dati in quelle condizioni. Raggiunto quindi il valore in cui il metamateriale si trova a pacco, completamente compresso, si procede a ritroso fino ad arrivare al valore in cui il metamateriale non era compresso.

Terminato lo studio sulla SI-PLAN, si prosegue importando i dati su *Excel* e poi in *Matlab*, programma attraverso il quale si creeranno grafici per studiare nel dettaglio il comportamento della struttura.

In particolare, dopo aver importato tutti i dati ottenuti dalla prova, si plotta il grafico forza-spostamento in cui, creata la curva approssimabile ad una bilineare con evidente isteresi, si notano dei picchi, presenti a causa del rumore:

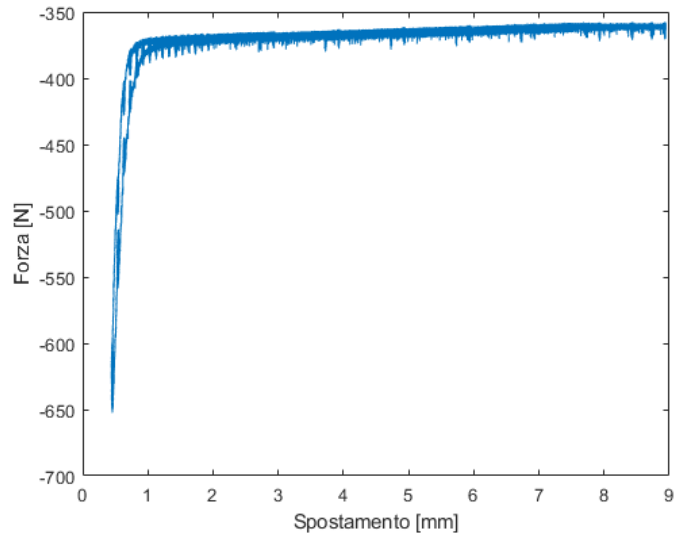


Figura 3.3: Curva forza-spostamento.

Per eliminare tale rumore e ottenere un dato più attendibile, si crea in *Matlab* il grafico dello spostamento reale, compiuto dal pistone che comprime il metamateriale, grafico che sarà formato da tanti intervalli di carico e scarico in cui si è in condizioni stazionarie. Una volta selezionati tali intervalli, attraverso un *ciclo for* si esegue la media negli stessi per estrarre dati puliti da eventuale rumore:

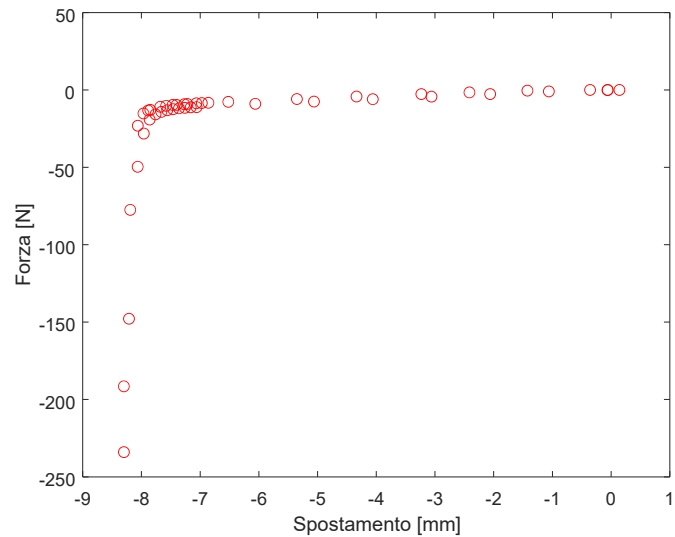


Figura 3.4: Curva forza-spostamento ottenuta tramite tot step di spostamento in condizioni stazionarie.

Come si nota, si ottiene una curva con isteresi in cui, aumentando lo spostamento del pistone che porterà dunque il metamateriale a pacco, si ha un aumento notevole della forza stessa, motivo per il quale più il metamateriale verrà compresso, più lavorerà in modo ottimale come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni.

Grazie dunque a questa prova, si comprende quanto il metamateriale può essere compresso fino ad andare a pacco, senza rompersi, e di quanto la forza applicata varia aumentando lo spostamento stesso.

## Prova a cicli

Altra prova eseguita sulla macchina a compressione SI-PLAN è una prova a cicli, in cui l'utente imposta, attraverso un apposito programma nel laptop, i cicli di carico e scarico, che deve compiere il pistone per comprimere il metamateriale stesso. Ovviamente il setup della prova stessa risulta essere il medesimo della prova manuale, sopra riportata.

Nel caso in studio, si è deciso di impostare dieci cicli di carico e scarico del pistone, svolti in un tempo di quindici minuti circa in cui la macchina opera autonomamente tra un valore massimo e un valore minimo di spostamento stabiliti dall'utente stesso. Anche in questo caso si decide di partire da un'altezza del pistone a 8.9mm rispetto allo zero del macchinario fino a 0.5mm, compiendo dunque una compressione di 8.4mm circa, quando il metamateriale risulterà completamente a pacco. Di nuovo, lo zero stabilito (8.4mm) nel caso in studio si riferisce alla posizione in cui il metamateriale e il pistone sono quasi a contatto.

Una volta svolta la prova, si importano tutti i dati su *Excel* per approfondire lo studio e capire se i risultati acquisiti corrispondono esattamente a quelli ottenuti con la prova manuale. Avendo plottato il grafico ed avendo notato la presenza del rumore, si preferisce utilizzare in *Excel* una funzione, *medfilt1*, in grado di rendere il segnale più definito possibile facendone la media, per poi selezionare i picchi e farne la differenza in modo tale da trovare il numero di cicli massimo e minimo di ogni punto selezionato.

Si prosegue poi, spezzato il segnale in un numero di segmenti pari al numero di cicli di carico e scarico compiuti dal pistone ed eseguito un ricampionamento in questi nove segmenti ottenuti, creando il grafico forza-spostamento attraverso il quale trarre delle conclusioni.

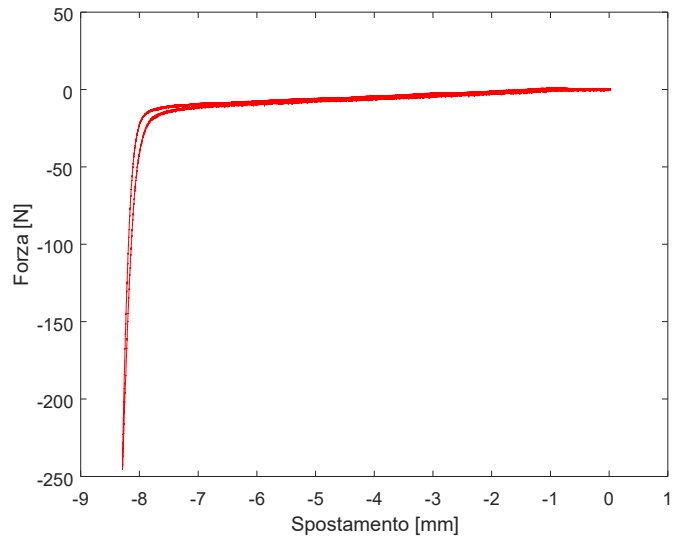


Figura 3.5: Curva forza-spostamento.

Il grafico, riportato in figura 3.3, è lo stesso ottenuto dalla prova eseguita manualmente, figura 3.2. Quindi, anche in questo caso, avendo ottenuto una curva approssimabile ad una bilineare con isteresi, più si aumenta lo spostamento del pistone, più il materiale andrà a pacco e si nota un aumento notevole della forza motivo per cui il metamateriale lavorerà in modo ottimale come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni.

## Prova a compressione su MTS810

Oltre alla macchina a compressione SI-PLAN, le prove statiche a compressione sono state effettuate con la MTS810, *Material testing systems*, sistema di prova servo-idraulico utilizzato appunto per prove statiche e dinamiche di vario tipo: dalla trazione alla fatica ad alto numero di cicli, alla meccanica della frattura e alla durata dei componenti (ISO).

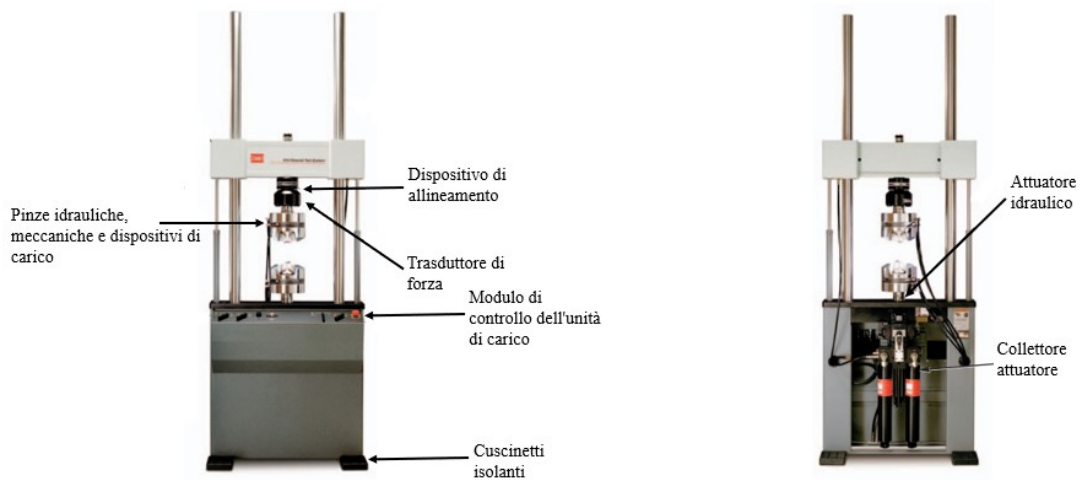


Figura 3.6: MTS810, macchina a compressione-trazione.

Come si nota dalla figura 3.6 soprastante, il macchinario è composto da un ampio telaio, da un attuatore, dispositivo che converte il movimento rotatorio di un motore in movimento lineare, da una cella di carico, che misura la forza applicata, e da una servo-valvola, la quale regola il flusso d'olio in risposta a un comando o a un segnale elettrico in ingresso al fine di controllare posizione, velocità, pressione o forza.

A differenza della SI-PLAN la forza che può esercitare questo macchinario oscilla tra i 25kN e i 500kN, permettendo dunque di testare materiali di varia resistenza, dalla plastica all'alluminio, ai compositi e all'acciaio, e di varie dimensioni, standard, medie e grandi.

Analizzando i particolari tecnici del macchinario, si può evidenziare che il telaio, montato a pavimento, ha un'elevata rigidità assiale e laterale, le quali permettono di

migliorare la precisione dei test e le prestazioni del sistema. Tale telaio è disponibile in una varietà di dimensioni e può essere facilmente configurato per molte applicazioni diverse, già definite in precedenza.

Altri elementi fondamentali sono la cella di carico, la quale, montata sulla traversa, fornisce una lettura accurata della forza per la misurazione e il controllo, e l'attuatore idraulico, montato integralmente nella piastra di base per accorciare il treno di forza per una maggiore rigidità, una migliore capacità di carico laterale e risultati dei test più accurati. Quest'ultimo inoltre include anche un trasduttore di spostamento montato coassialmente per il controllo e la misurazione dello spostamento di precisione. Infine, alla base di tutta la struttura, vi è un collettore (o più), il quale fornisce il montaggio per un massimo di due servo-valvole di dimensioni uguali o diverse. Quest'ultimo è montato sull'attuatore per la massima risposta possibile e il controllo del test più accurato. È disponibile con accumulatori monoblocco che aiutano a ridurre al minimo le fluttuazioni della pressione idraulica per un migliore controllo del test e precisione dei dati (ISO).

Nel caso in studio, essendo oggetto il metamateriale, lo si fissa all'interno della macchina stessa, creando un setup riportato nella figura sottostante (figura 3.7):



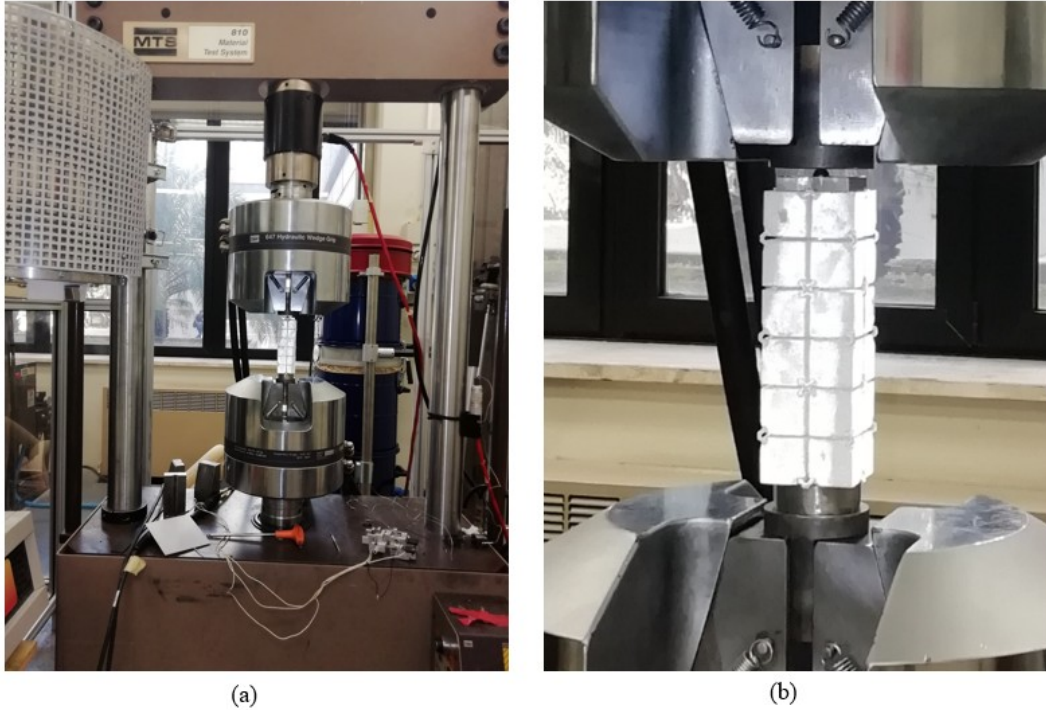


Figura 3.7: (a) Setup completo nella macchina MTS810; (b) Ingrandimento del setup sul metamateriale.

In particolare, dalla figura 3.7b è possibile notare che, anche in questo caso, si utilizzano dei piccoli supporti sopra e sotto al metamateriale, con sfera di acciaio annessa, utili per alzare il metamateriale affinché il pistone possa esercitare una forza di compressione su di esso.

Il setup, inoltre, è direttamente collegato all'interfaccia del laptop, gestito dall'utente, il quale, una volta terminata la prova, può visualizzare i dati ottenuti su *Excel* ed importarli in *Matlab* per approfondire lo studio.

In seguito, si tratterà nello specifico di questa prova eseguita sul metamateriale.

## Prova

Attraverso l'utilizzo del macchinario MTS810 si esegue un'unica prova statica di compressione per valutare come il metamateriale lavora essendo sottoposto a fatica.

Pur trattandosi di una prova di compressione, non si arriverà a portare il metamateriale a rottura in quanto è sufficiente studiare il suo comportamento quando viene totalmente compresso, nonché quando si trova a pacco.

La prova inizia scegliendo un'altezza opportuna del pistone che comprimerà il metamateriale stesso, altezza alla quale non si notano fenomeni di attrito tra pistone e metamateriale, nonostante la loro vicinanza, ed impostando una frequenza di 5Hz del macchinario stesso. Una volta avviato, il macchinario lavora autonomamente, sorvegliato da diversi utenti che compiono la prova, finché non si arresta ed elabora i dati nel laptop.

Si prosegue importando i dati in *Excel* e poi in *Matlab*, dove si crea il grafico forza-spostamento, in cui la curva questa volta risulta essere lineare:

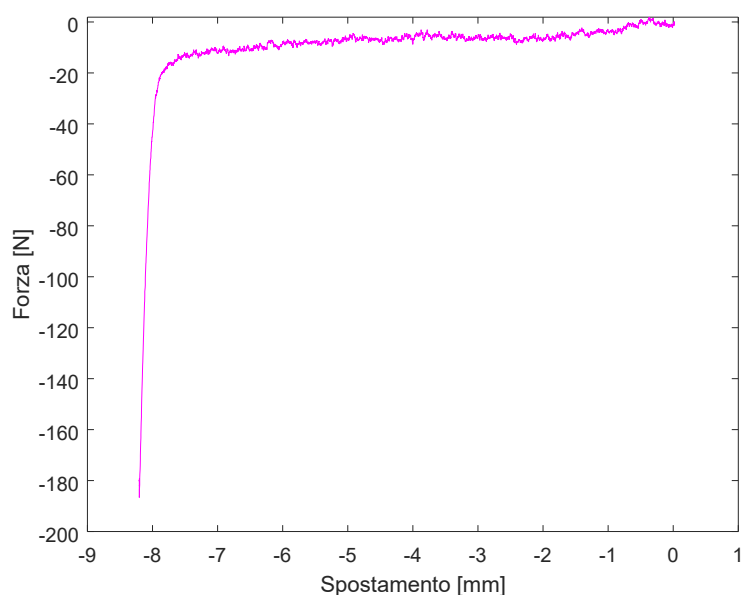


Figura 3.8: Curva lineare della prova su MTS810.

Come si nota dalla figura 3.8, più si aumenta lo spostamento del pistone, e quindi più il materiale andrà a pacco, in quanto aumenta la forza di compressione, e più la forza applicata varia notevolmente.

Risulta, anche in questo caso, le medesime conclusioni ottenute dalle prove precedenti.

## Confronto

Da come risulta dalle diverse prove trattate precedentemente, quando il metamateriale viene compresso, la forza applicata varia di diversi Newton soprattutto nel momento in cui il metamateriale stesso è a pacco. In genere, la corsa del pistone corrispondente alla compressione del metamateriale è di 8.5mm circa.

Inoltre, con altre prove eseguite, si constaterà che, essendo il metamateriale creato in primis come elemento per il disaccoppiamento di vibrazioni, più si trova a pacco, più svolge al meglio il compito per il quale è stato realizzato.

Riprendendo in considerazione i tre grafici delle diverse prove (figura 3.4, figura 3.5 e figura 3.8), attraverso il programma *Matlab*, si ricrea un unico grafico che permette di confrontare le tre prove eseguite nei due diversi macchinari:

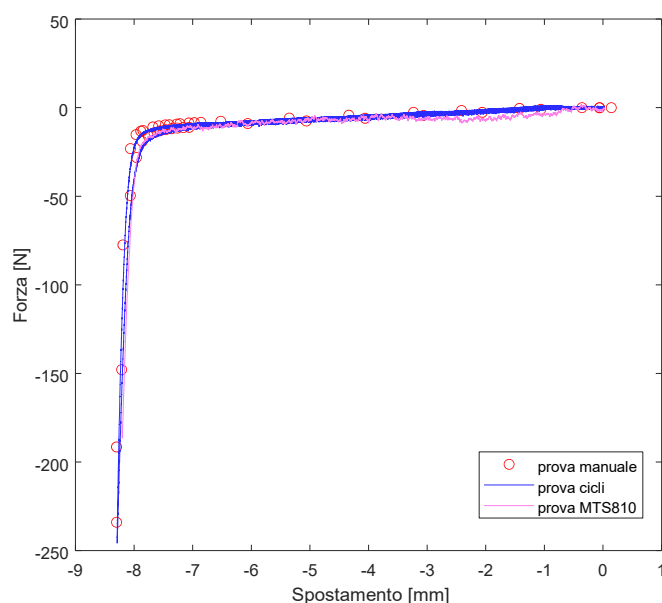


Figura 3.9: Grafico delle prove manuale, cicli, MTS810.

Si nota che i tre grafici, perfettamente sovrapponibili l'uno sull'altro, il che dimostra l'esatta esecuzione delle tre prove, si differenziano sia per il fatto che le prove sulla SI-PLAN attestano la presenza di isteresi essendo il grafico una curva approssimabile ad una bilineare, mentre la prova svolta sulla MTS810 riporta una curva lineare, che per il

carico applicato. Infatti, mentre nelle prove eseguite attraverso la SI-PLAN si carica il metamateriale fino a 24.50kg, con la MTS810 si arresta l'esecuzione a 19kg di carico.

## Prove dinamiche

### Introduzione

Le prove meccaniche consistono, oltre in prove statiche, in prove dinamiche, condotte esponendo il metamateriale a ripetuti cicli di alterazione. Nelle prove dinamiche, in generale, i carichi vengono applicati in tempi molto brevi nell'ordine dei millisecondi, durante i quali nel materiale si manifestano effetti dinamici, cioè forze di inerzia dovute all'accelerazione delle masse e forze di natura viscoelastica proporzionali alla velocità di deformazione. Le prove dinamiche più eseguite sono quelle di "impatto", come quella di Charpy e di Izod, ma ulteriori prove sono eseguite utilizzando procedure uguali a quelle delle prove statiche sopracitate con appropriate velocità di applicazione del carico. In particolare, nella prova Charpy e in quella di Izod, sul provino viene applicato un intaglio dal quale si origina la frattura nel corso della prova e il carico è applicato mediante un pendolo oscillante. La differenza tra le due prove è la zona d'impatto, in quanto nella prova Charpy il provino è appoggiato alle estremità e viene impattato nella zona centrale, mentre nella prova di Izod il provino è incastrato ad una estremità e l'impatto avviene proprio in quella libera (G.Petrucci) (M.Callegari, P.Fanghella, & F.Pellicano, 2017).

La caratterizzazione dinamica è solitamente condotta impiegando l'analisi modale sperimentale nel caso di input noto, sollecitando la struttura in un punto e valutando la risposta, in termini di accelerazione in un altro punto. Si ottiene così una funzione complessa, nel dominio delle frequenze, che rappresenta la funzione di risposta in frequenza (FRF) nel punto, la quale è espressa dal rapporto tra la trasformata di Fourier della risposta del sistema  $U(\Omega)$  e la trasformata di Fourier dell'eccitazione  $P(\Omega)$ .

Ripetendo le misurazioni in vari punti della struttura si ottiene la matrice di risposta in frequenza da cui è possibile ricavare il comportamento dinamico della struttura testata. Per consentire l'estrazione dei parametri modali, inoltre, si ricorre all'uso di tecniche di analisi *Fast Fourier Transform* (FFT) dei segnali, che vengono convertiti dal dominio del tempo (in cui si effettuano le registrazioni) a quello della frequenza [3].

Componente fondamentale della sperimentazione è la strumentazione di misura. I trasduttori di misura possono essere di tipo elettrico, cioè l'elemento sensibile dello strumento è impiegato come componente del circuito elettrico di misura, o di tipo meccanico, i quali però attualmente sono poco utilizzati. Nelle indagini dinamiche con vibrodina vengono tipicamente utilizzate diverse tipologie di trasduttori: accelerometri, sismometri, estensimetri o trasduttori di spostamento (P.Panzeri & C.Algeri, 2006).

Nel caso in studio si parla di prove dinamiche in quanto vengono generate delle vibrazioni da parte di uno shaker elettrodinamico, ma più propriamente è una verifica della trasmissibilità, si estrae cioè non una FRF, ma un rapporto tra i due accelerometri impiegati, ponendone uno sulla superficie inferiore del metamateriale e l'altro sulla superficie dello shaker, che eccita con un segnale casuale la struttura.

Si parte creando un setup rigido riportato nella figura seguente (figura 4.1):

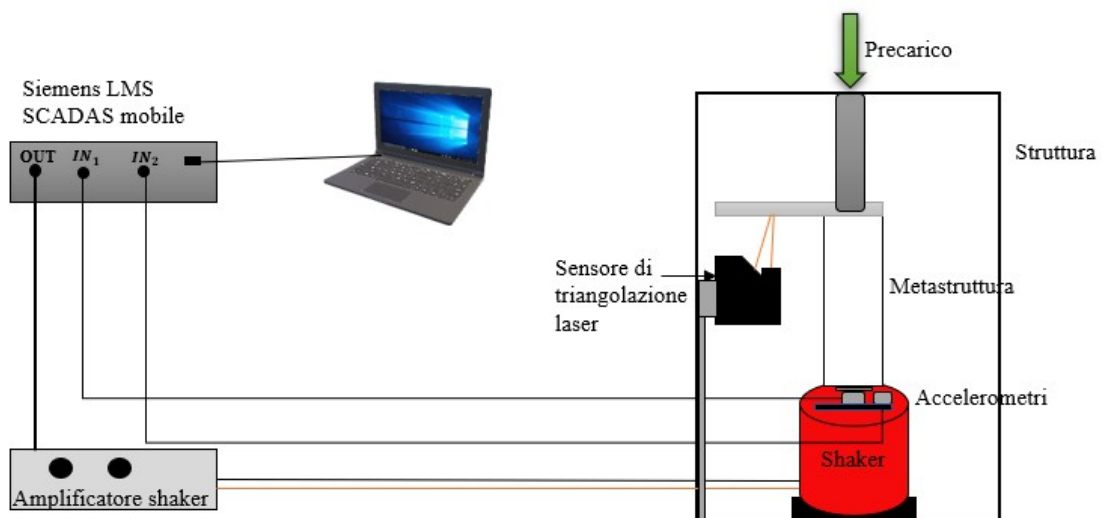


Figura 4.1: Setup creato.

Da come si nota dalla figura, la configurazione deve essere ben isolata per ridurre al minimo i disturbi esterni e deve essere progettata per garantire la riduzione delle frequenze di risonanza. Si utilizzerà dunque un piccolo torchio in ferro, che sarà la struttura esterna, dove viene appoggiato uno shaker. Quest'ultimo, direttamente collegato al suo amplificatore di potenza, è un eccitatore, posizionato alla base della

struttura, utile per generare vibrazioni. Le prestazioni di uno shaker elettrodinamico sono fortemente influenzate dai modi di vibrazione e dalle caratteristiche di tensione e corrente dell'amplificatore di potenza che lo pilota. Altri fattori di limitazione sono la corsa e la massa della tavola mobile, la massa totale dello shaker, di diversi kg, il limite di potenza termica della bobina, posizionata alla base dello shaker stesso, e il massimo stress dell'armatura (BPS).

Di notevole importanza, inoltre, sono i due accelerometri presenti in tale configurazione. Un primo accelerometro è direttamente attaccato con della cera sulla superficie dello shaker, mentre l'altro è posizionato sulla superficie inferiore del metamateriale. Gli accelerometri utilizzati durante la prova sono di diverso tipo, ma, come verrà spiegato in seguito, si preferisce utilizzare degli accelerometri miniaturizzati, in modo tale da non gravare con la massa sull'esecuzione della prova, in quanto, come poi spiegato in seguito, usando un accelerometro di dimensioni maggiori, si ha uno squilibrio del sistema. Questi poi, attraverso dei cavi, sono collegati ad un hardware di acquisizione dati (*Siemens SCADAS mobile*), il quale registra i dati acquisiti impiegando il programma *Simecenter testlab* installato in un laptop.

La prova dinamica viene eseguita deformando manualmente il metamateriale girando la vite senza fine presente nel torchio, fino ad arrivare a pacco, con una corsa della vite pari a 8mm circa. Per misurare lo spostamento compiuto si utilizza un sensore a triangolazione laser, sensore di spostamento e distanza senza-contatto che non grava sulla struttura stessa. Il sensore a triangolazione laser utilizzato presenta dunque un corpo compatto contenente l'elettronica di funzionamento ed un cavo di collegamento al controller dove è visualizzato il dato di spostamento. Un fascio di luce laser viene proiettato dal diodo e viene riflesso dalla superficie del target, piastrina in cui è attaccato con del biadesivo il metamateriale, in varie direzioni e parte dei raggi riflessi vengono indirizzati, attraverso una serie di lenti, verso il ricevitore. In funzione della distanza tra il sensore e la superficie, i raggi riflessi vengono proiettati in un punto preciso del ricevitore. In questo modo è possibile calcolare, attraverso il principio matematico della triangolazione, la distanza tra il sensore e il target [4].



In seguito, si riporteranno le diverse prove dinamiche eseguite con o senza l'aggiunta di piastrine di diversa forma (figura 4.2), attaccate con biadesivo o cera al metamateriale. Queste piastrine attenuano le risonanze e sono la base dove viene posizionato l'accelerometro di misura.

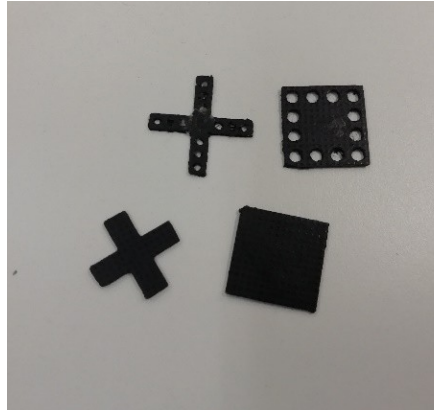


Figura 4.2: Piastrine in PLA.

Dopo aver eseguito ogni prova, inoltre, si procede importando i dati e calcolando l'*interfering effect* (IE), per valutare le prestazioni vibrazionali della struttura in termini di trasmissibilità nel range di frequenze di interesse. L'*interfering effect* è definita come il rapporto tra l'accelerometro di riposta e quello di controllo, utile in termini di area per plottare il grafico facendo la differenza tra l'area sottesa alle risposte misurate a vari precarichi e il sensore ideale con risposta unitaria, calcolandone poi la media e la deviazione standard in modo tale da trovare la curva del grafico che possa rispecchiare esattamente come potrebbe comportarsi il metamateriale a tali frequenze. L'IE, valore adimensionale [-], è definita attraverso la formula:

$$IE = \frac{a_r(\omega)}{a_c(\omega)}$$

(4.1)

Infine, per valutare la curva che rappresenta la condizione ottima per la misura di precarico, si sono svolti, in ciascuna prova, uno studio statistico ed una valutazione sull'area, o più precisamente una valutazione energetica. Nello specifico, ottenuti i

grafici di trasmissibilità, per una valutazione di tipo statistica si calcolano deviazione standard e media ricreando i grafici e ottenendo il dato che si avvicina alla condizione ottimale, dunque quello avente valore più piccolo. Per una valutazione energetica, invece, si è fatta la differenza, in termini di area di trapezi sottesi alla curva dello spettro, tra l'energia dell'accelerometro posto sulla superficie del metamateriale e quello posto sulla piastrina dello shaker. Fatto ciò, se l'area sottesa è la stessa, la differenza risulta nulla e dunque si ottiene il dato relativo ad una buona performance della struttura, nonché si estrae dal grafico la curva più lineare, quasi ideale.

Si riporta di seguito l'immagine reale del setup creato per tali prove:

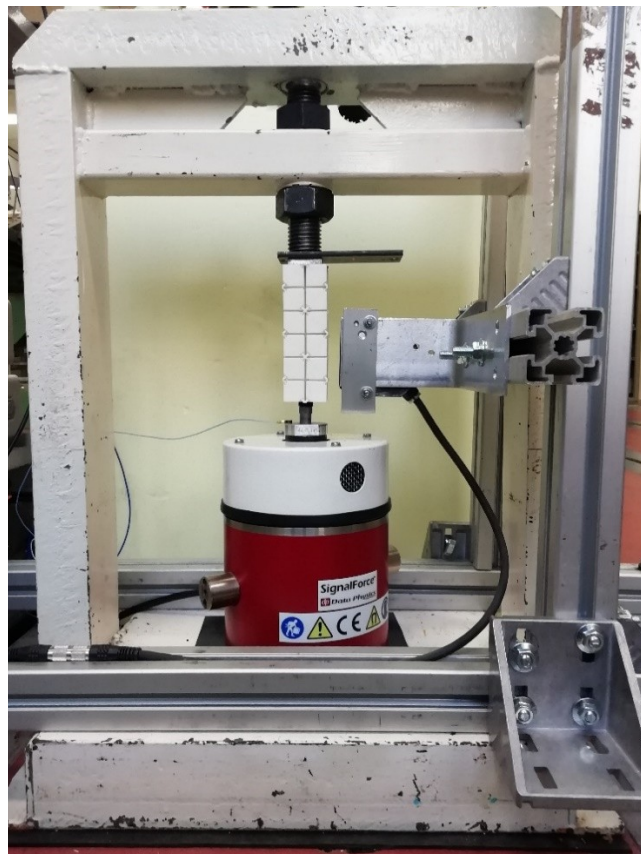


Figura 4.3: Setup per prove dinamiche.

## Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina d'alluminio

La prima prova dinamica è stata eseguita utilizzando un accelerometro miniaturizzato piezoelettrico, con range di frequenza fino a 10kHz, attaccato con della cera direttamente sulla piastrina d'alluminio, incollata a sua volta sulla superficie inferiore del metamateriale. La piastrina ha una propria massa e si adatta perfettamente al metamateriale in quanto, essendo poco più piccola della superficie del metamateriale stesso, non intralcia la funzione delle "molle cedevoli" che permettono alla struttura di essere compressa.

La prova, come già brevemente spiegato, viene eseguita manualmente abbassando la vite del torchio, dove è attaccato il metamateriale, di 0.50mm rispetto allo zero, trovato precedentemente, e segnando il valore in modo tale da importare poi i dati della forza su *Matlab* con i corrispondenti valori dello spostamento. Il setup riportato in figura 4.3 è il medesimo che viene utilizzato in questo caso, con la sola particolarità dell'accelerometro, attaccato appunto alla piastrina di alluminio, e il collegamento con il driver, il quale evita che il sistema vada in risonanza portando quindi a rottura il sistema di eccitazione. Importati i dati, si calcola l'*interfering effect* (IE), la media e la deviazione standard in modo tale da trovare la curva migliore del grafico che possa rispecchiare esattamente come potrebbe comportarsi il metamateriale a tali frequenze, in questo caso fino a 10kHz.

A tal proposito si riporta il grafico in cui vengono plottati la frequenza e l'IE, nonché il rapporto tra l'accelerometro di riposta e quello di controllo, valore adimensionale [-]:

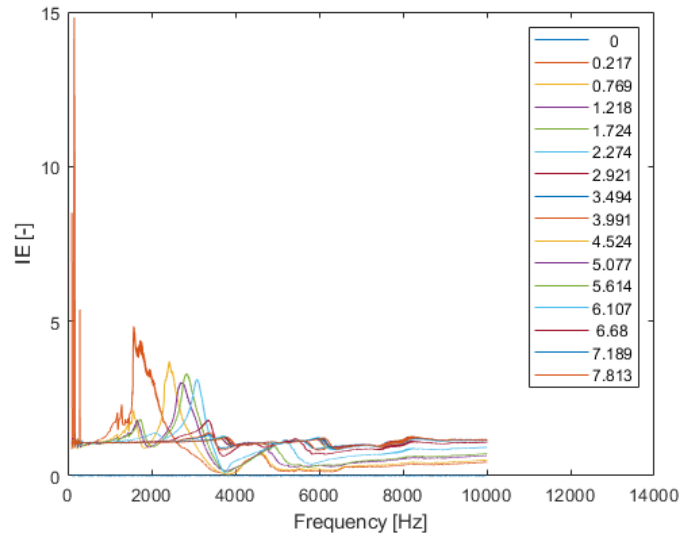


Figura 4.4: Grafico PCB miniaturizzato 10kHz.

Come è possibile notare dal grafico, aumentando il precarico, il disaccoppiamento meccanico è più efficiente; infatti, si nota un abbattimento dei picchi di risonanza inizialmente presenti per piccoli precarichi. Inoltre, per valutare la curva che rappresenta la condizione ottima per la misura di precarico, si sono svolti uno studio statistico ed una valutazione energetica ed in questo caso, si può constatare (figura 4.5a) che la deviazione standard più piccola è relativa all'ottavo valore di spostamento, ciò significa che la curva da prendere in considerazione è relativa al precarico che apporta una compressione pari a 3.494mm. Tale ragionamento è confermato da un ulteriore grafico (figura 4.5b) in cui si valuta l'area IE e si evince che il dato migliore sembra essere, di nuovo, l'ottavo:

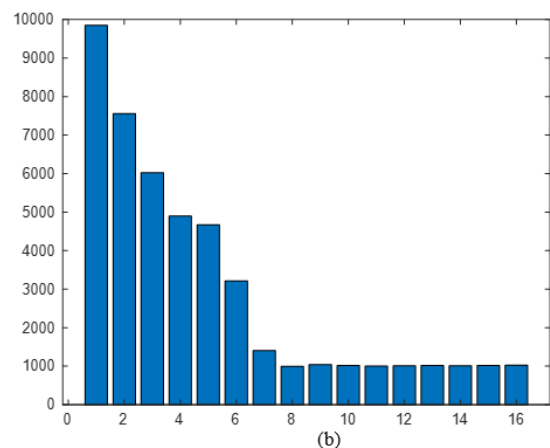
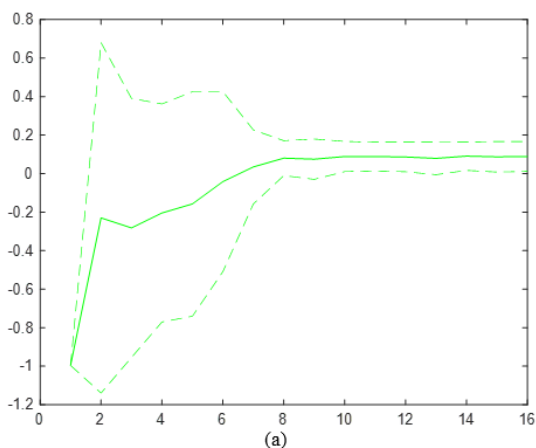


Figura 4.5: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

Dunque, la curva migliore, che verrà poi confrontata con altre soluzioni, è:

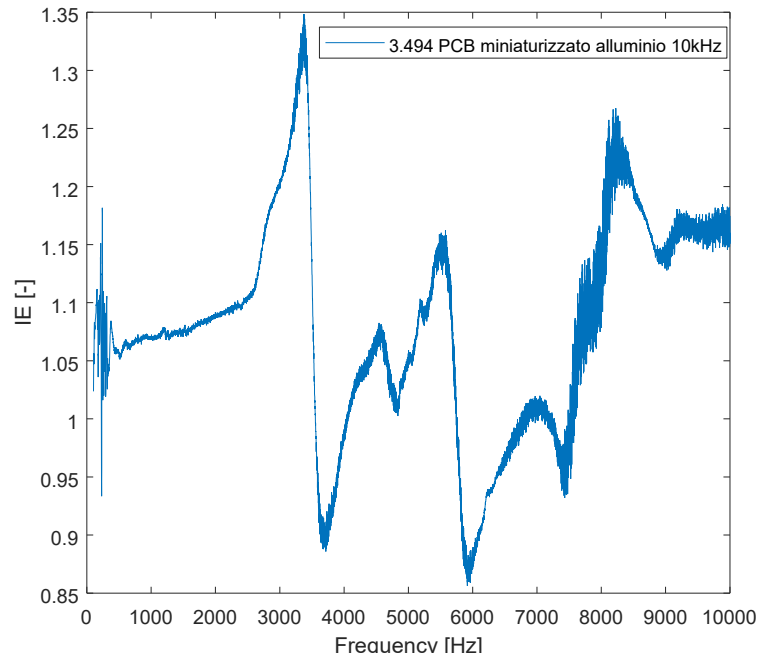


Figura 4.6: Grafico PCB miniaturizzato con piastrina di alluminio.

## Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina di plastica

La stessa prova descritta precedentemente viene eseguita con un altro accelerometro, il quale può arrivare fino ad una frequenza di 14kHz ed è attaccato con della cera su una piastrina di plastica trovata in laboratorio. Lo scopo infatti è capire se la massa della piastrina di alluminio possa gravare sulla risposta ottenuta dallo studio precedente e se, aggiungendo una piastrina di plastica, la struttura presentasse nel grafico finale meno picchi dovuti alla risonanza.

Una volta sistemato il nuovo setup con la piastrina, si procede con l'esecuzione della prova, importando poi i dati in *Matlab*. Qui, una volta eseguiti nuovamente i passaggi precedenti, compresi lo studio statistico e la valutazione energetica spiegata precedentemente, si possono plottare diversi grafici:

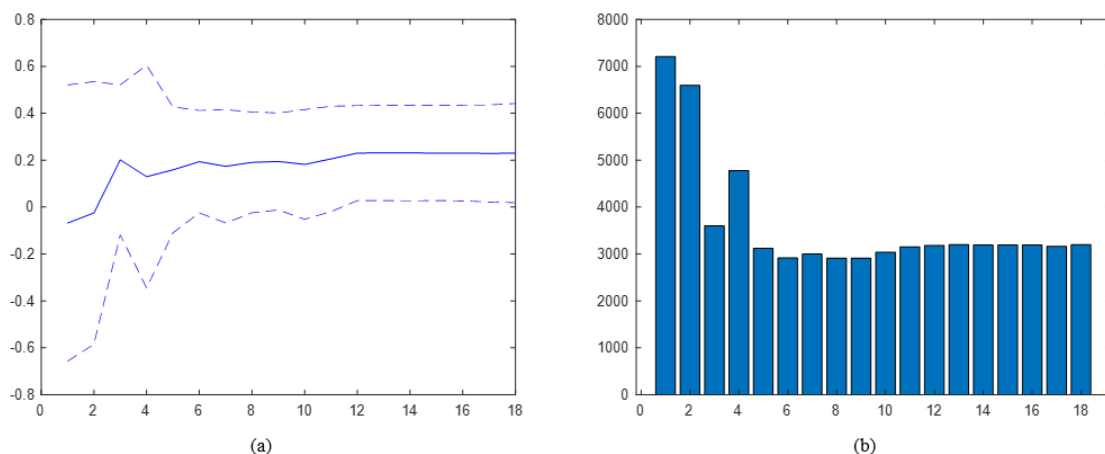


Figura 4.6: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

In questo caso per la deviazione standard risulta che il valore relativo al quindicesimo spostamento sia il migliore, mentre se si considerasse il grafico (figura 4.6b) ottenendo valutando le aree sottese alle curve del grafico in figura 4.7a, il valore sarebbe il nono, in quanto minore è l'area, più lineare sarà la curva.

Dunque, le due curve da prendere in considerazione sono (figura 4.7b):

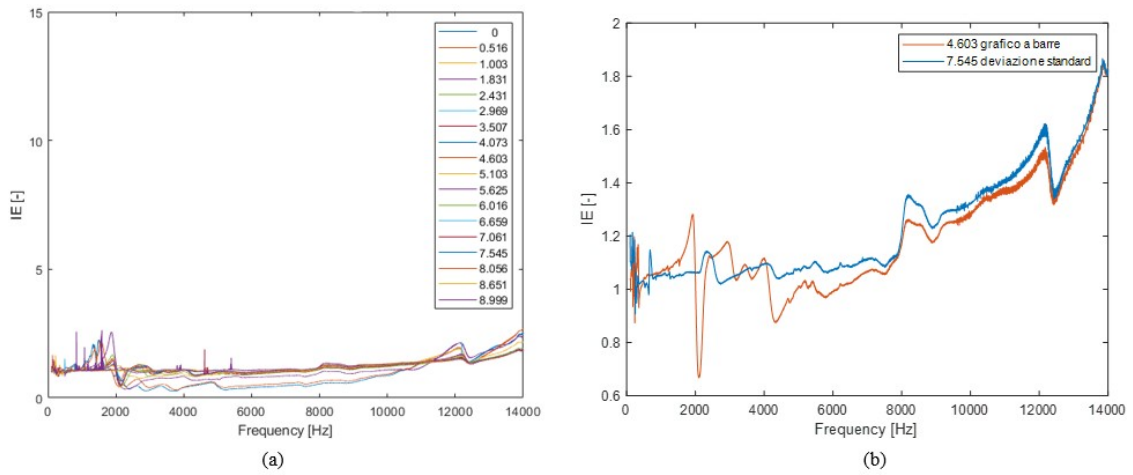


Figura 4.7: (a) Grafico PCB miniaturizzato; (b) Grafico valore migliore.

Da come si evince dal grafico della figura 4.7a anche in questo caso aumentando il precarico si nota che diminuiscono i picchi dovuti alla risonanza e dunque come la metastruttura riesca a disaccoppiare in modo ottimale le vibrazioni. Dallo studio apportato, inoltre, considerando che il calcolo della deviazione standard è molto più attendibile rispetto al ragionamento eseguito valutando le aree, si può considerare migliore e più lineare, nonostante i picchi relativi al rumore, la curva derivante dal dato di spostamento pari a 7.545mm, in cui il metamateriale si trova quasi a pacco. Di seguito se ne riporta la figura:

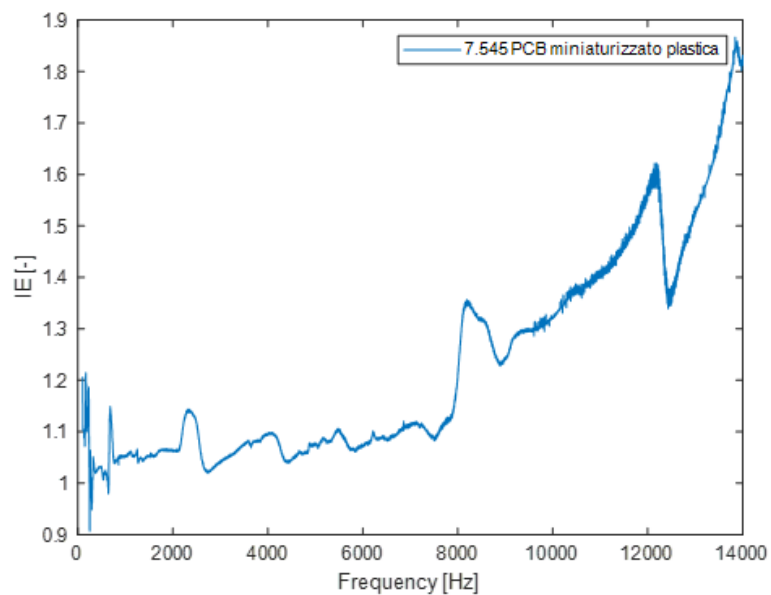


Figura 4.8: Grafico PCB miniaturizzato plastica.

## Prova con accelerometro cilindrico con base esagonale su piastrina di plastica

Altro tipo di accelerometro utilizzato è un accelerometro cilindrico con base esagonale ed una massa nettamente superiore rispetto agli accelerometri miniaturizzati utilizzati precedentemente. Si è deciso di utilizzare tale accelerometro per valutare come la massa e la geometria dell'accelerometro stesso possano gravare sulla metastruttura e apportare modifiche sul grafico finale. Infatti, eseguita la prova esattamente come sopra riportato, si importano i dati in *Matlab* e si creano i diversi grafici per trarre delle conclusioni:

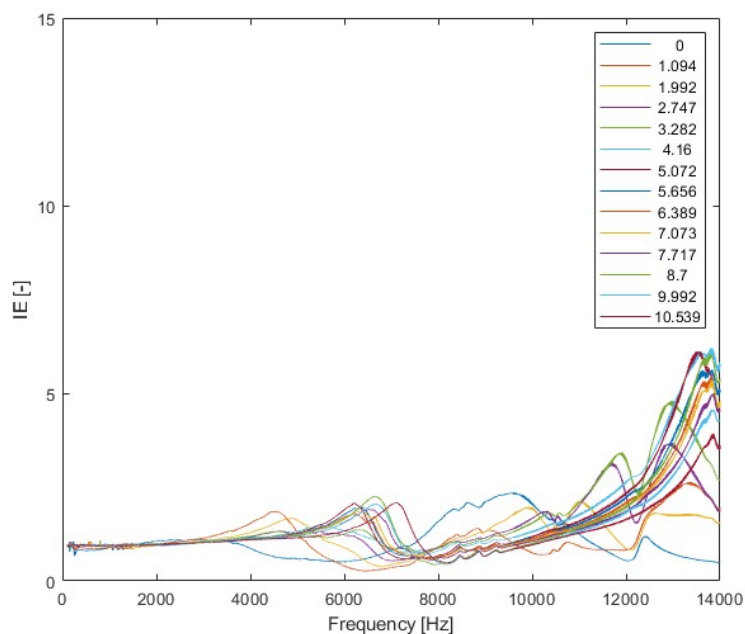


Figura 4.9: Grafico PCB cilindrico.

Si nota dal grafico sopra riportato che la massa dell'accelerometro e la sua geometria hanno una loro importanza, in quanto il grafico risulta essere meno lineare rispetto a quelli ottenuti precedentemente non solo a bassa frequenza ma anche a frequenze maggiori, essendo presenti diversi picchi di risonanza. Dunque, utilizzare un accelerometro di dimensioni maggiori comporta uno squilibrio totale del sistema. Tale ragionamento porta ad abbandonare l'idea di utilizzare un accelerometro cilindrico e di continuare a svolgere le diverse prove con accelerometri miniaturizzati.



## Confronto

Di seguito si riporta il grafico contenente le curve ottenute dall'analisi vibrazionale con accelerometri miniaturizzati ed esagonali:

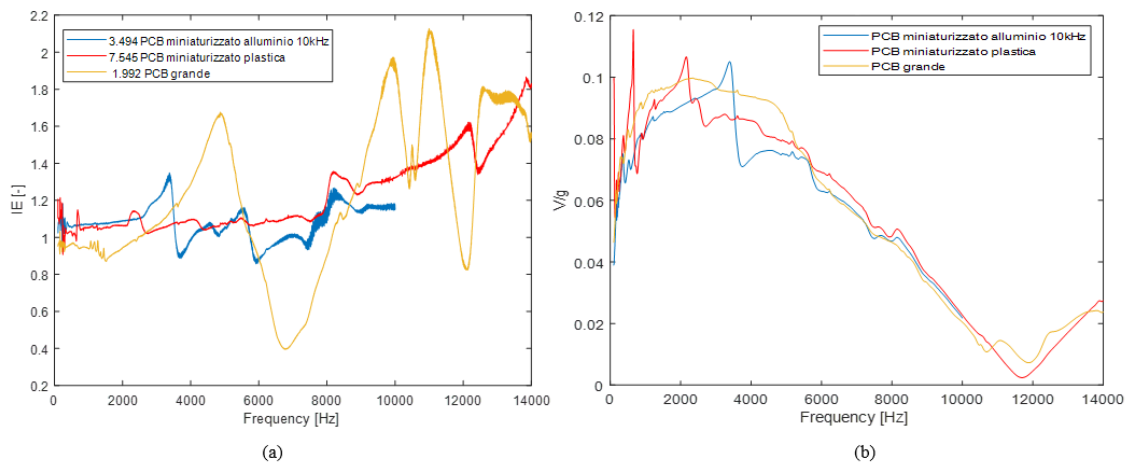


Figura 4.10: (a) Grafico PCB; (b) Grafico driver.

Tra i grafici ottenuti, la soluzione che si preferisce è quella in cui il setup è composto, oltre che dalla struttura esterna, dal metamateriale in cui l'accelerometro è attaccato con della cera su una piastrina di alluminio. Sembra la soluzione migliore, nonostante l'accelerometro misuri fino a 10kHz, in quanto il grafico in figura 4.10a risulta essere più lineare rispetto agli altri non presentando notevoli frequenze di risonanza; ciò però non può essere confermato dal grafico in figura 4.10b realizzato in *Matlab* dove si plotta la frequenza e la risposta del driver, dispositivo che permette di abbassare la frequenza quando si arriva a risonanza. Infatti, il driver altera la misura dell'accelerometro perché compensa la risonanza della struttura ed in questo caso, tra i due accelerometri miniaturizzati, la soluzione migliore sembra essere quella con l'accelerometro attaccato sulla piastrina di plastica, essendo il grafico del driver più lineare rispetto agli altri casi in cui si notano dei picchi. Per capire dunque quale sia effettivamente la soluzione migliore, si dovrebbe studiare di quanto il driver ha agito per non avere una curva alterata.

Ulteriore osservazione, inoltre, deve essere fatta sui valori dei precarichi: si nota che utilizzando un accelerometro di piccole dimensioni, il precarico esercitato, valutato in

termini di spostamento della superficie superiore della metastruttura, è alto. Infatti, la metastruttura è prossima alla condizione di pacco. Ciò non accade utilizzando un accelerometro di dimensioni maggiori in quanto il valore è molto più piccolo e dunque sembrerebbe che il metamateriale sia più adatto ad essere utilizzato per frequenze minori.

## Prove eseguite con l'aggiunta di piastrine in PLA

Avendo ottenuto come risultato dalle prove precedenti dei grafici i quali, comparati, attestano il fatto che, aggiungendo delle piastrine, il metamateriale, sottoposto a vibrazione dallo shaker, abbia un comportamento migliore come elemento per il disaccoppiamento delle vibrazioni tra i due oggetti in cui verrà posizionato, in questo caso tra un accelerometro e un supporto meccanico, si è deciso di creare delle piastrine di diverse dimensioni con le quali fare diverse prove dinamiche.

In primis le piastrine sono state progettate attraverso il programma *Solidworks*, in cui si disegnano le diverse geometrie e dimensioni che si vogliono ottenere. In particolare, si creano quattro piastrine, alcune presentano dei fori, realizzati proprio per alleggerire la massa. Una volta ideate, si impostano i diversi dati sulla stampante 3D che in pochi minuti realizza queste piastrine in PLA, cioè acido polilattico, polimero prodotto da diverse risorse rinnovabili ed il più usato nella realizzazione di prodotti mediante l'utilizzo di macchine di prototipazione rapida.

Di seguito si riporta un'immagine delle piastrine realizzate e che verranno poi attaccate, con biadesivo, alla superficie inferiore del metamateriale:

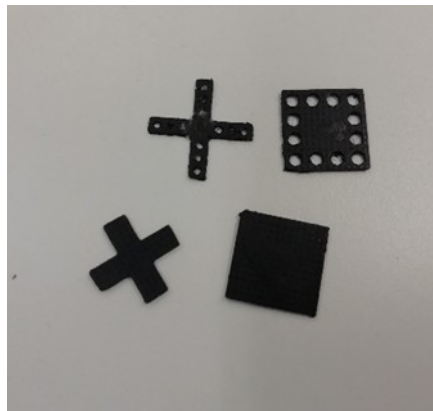


Figura 4.11: Piastrine in PLA.

Come si nota dalla figura soprastante, le piastrine create sono quattro: due a forma di croce e due di forma quadrata. Verranno descritte in seguito le diverse prove eseguite utilizzando tali piastrine, mentre qui sarà sufficiente descriverle nel dettaglio.

Le prime due prove spiegate successivamente sono quelle in cui si utilizzano le piastrine di forma quadrata; in particolare una prova è stata eseguita incollando al metamateriale una piastrina quadrata piena di dimensioni  $16\text{ mm} \cdot 16\text{ mm}$  con uno spessore di poco inferiore ad 1mm, mentre nella seconda prova si utilizza una piastrina quadrata  $16\text{ mm} \cdot 16\text{ mm}$ , la quale presenta però 12 fori, aventi diametro di 3mm.

Altre due prove, inoltre, sono state eseguite con l'aggiunta di piastrine con una forma a croce, anche questa volta una forata ed una piena. La piastrina in PLA a croce piena ha dimensioni  $4\text{ mm} \cdot 16\text{ mm}$ , mentre l'altra da  $3\text{ mm} \cdot 38\text{ mm}$  presenta 12 fori di diametro 2mm.

In tutte le prove citate, si creerà un setup come quello descritto in precedenza, con la particolarità che al metamateriale, nella superficie inferiore, verrà attaccata una di queste piastrine con nastro biadesivo e sopra di essa verrà posizionato con della cera l'accelerometro miniaturizzato, dispositivo che misurerà l'accelerazione del metamateriale stesso.

## Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina quadrata

Tra le diverse piastrine realizzate in PLA con stampante 3D, vi è quella di forma quadrata, avente dimensioni  $16\text{ mm} \cdot 16\text{ mm}$  con uno spessore di appena  $1\text{ mm}$ .

Anche in questo caso, è usato il medesimo setup impiegato nelle altre prove. La piastrina viene incollata con del biadesivo sulla superficie inferiore del metamateriale e sopra di essa si disporrà un accelerometro miniaturizzato con della cera. Di seguito si riporta il sistema ottenuto:

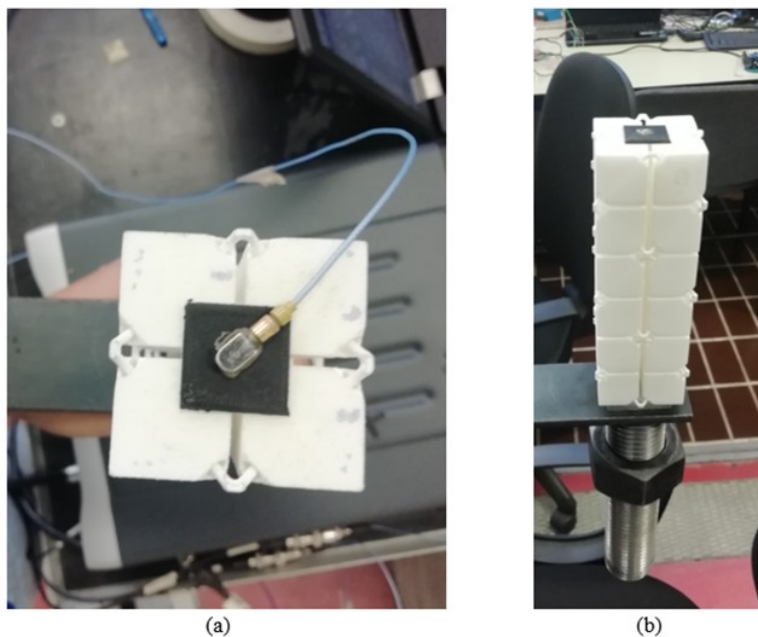


Figura 4.12: (a) Metamateriale con piastrina in PLA quadrata e accelerometro;  
(b) Piastrina su metamateriale attaccata alla vite del torchio con biadesivo.

Come già definito in precedenza, avendo svolto una prova con una piastrina di plastica rigida di forma non perfetta e avendo notato che il grafico ottenuto (IE-frequenza) era migliore in quanto più lineare rispetto alle altre prove eseguite, si è scelto di progettare queste piastrine per valutare altri risultati e capire se, in futuro, realizzare il metamateriale comprendente appunto tali piastrine.

La prova si svolge andando in primis a trovare lo zero, dove cioè l'accelerometro del metamateriale e la superficie dello shaker non sono a contatto, in questo caso a

-2.179mm rispetto al sensore a triangolazione laser, per poi iniziare a spostare, girando la vite del torchio, il metamateriale che, di conseguenza, entrerà a contatto con lo shaker andando infine a pacco. La prova viene ripetuta con step in spostamento pari a 0.5mm circa fino a raggiungere la condizione di pacco del metamateriale. Per ogni misurazione vengono salvati, oltre al valore di precarico fornito in spostamento, lo spettro dei due accelerometri e la curva di controllo per driver. Si procede quindi importando tutto in *Matlab*.

Si prosegue con il medesimo procedimento definito per le altre prove e, dopo le valutazioni fatte, in entrambi i casi, si ritrova che il dato migliore sia il diciannovesimo, che corrisponde ad una compressione del metamateriale quasi a pacco; seguono i grafici:

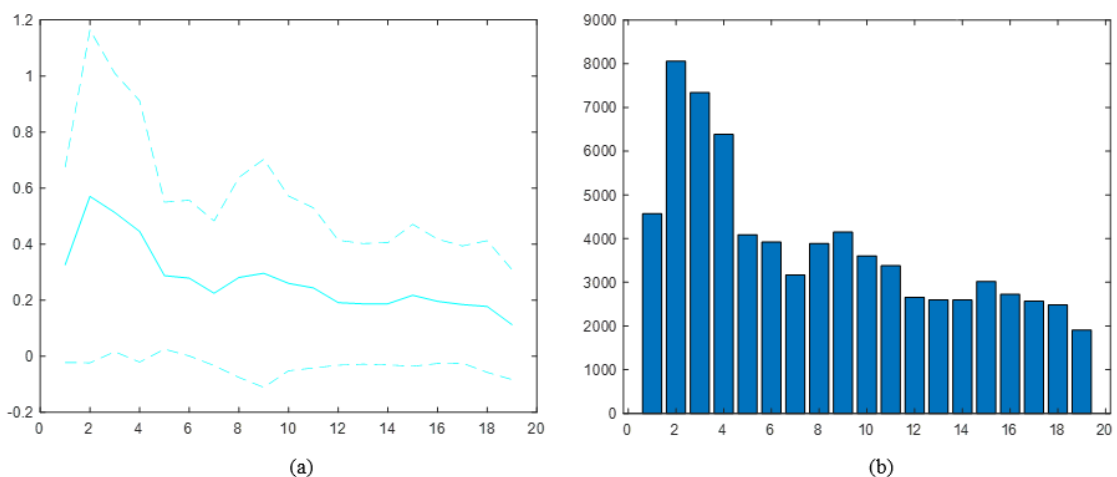


Figura 4.13: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

I valori della deviazione standard, come può notarsi dal grafico in figura 4.12a, si discostano di molto dalla curva non tratteggiata, nonché la curva reale, ed il dato con valore di deviazione standard minore risulta essere appunto il diciannovesimo, verificato anche con la valutazione delle aree nel grafico di figura 4.13b dove l'area minore sembra essere proprio quella in corrispondenza di tale dato.

Di seguito, dunque, si riportano i grafici ottenuti valutando la frequenza, che anche in questo caso arriva a 14kHz, e l'*interfering effect*, misura adimensionale essendo il rapporto tra i due accelerometri utilizzati:

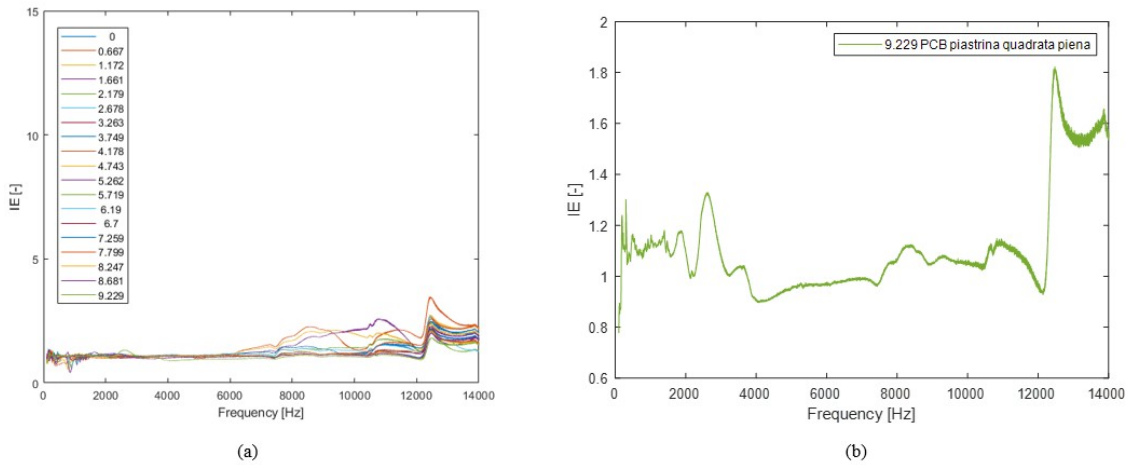


Figura 4.14: (a) Grafico PCB miniaturizzato piastrina quadrata piena; (b) Grafico valore migliore.

Come si può notare dalla figura 4.14b, ciò che si ottiene dalla prova eseguita è un grafico, per lo più lineare, dove il valore dello spostamento compiuto è molto elevato, il che significa che il metamateriale è molto compresso e di conseguenza sta andando a pacco. Di nuovo, si nota che aumentando il precarico, si aumenta il disaccoppiamento delle vibrazioni e, come avveniva nelle prove precedenti, il metamateriale risulta lavorare in modo ottimale se molto precaricato, quindi quando è quasi a pacco.

## Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina quadrata con fori

Si esegue la prova dinamica con l'utilizzo di una piastrina quadrata con 12 fori, tre per ogni lato con un diametro di 3mm. Lo spessore della piastrina e le dimensioni dei lati restano le medesime riportate precedentemente.

Si opta per l'utilizzo della piastrina con fori, nella quale l'accelerometro si posizionerà nel mezzo, in quanto, avendo notato che la massa in qualche modo altera il sistema studiato, si vuole creare dei grafici migliori rispetto a quelli delle prove precedenti. L'unica differenza con la prova precedentemente eseguita è il valore dello zero, nonché primo dato acquisito, che in questo caso è -3.120mm rispetto al sensore di triangolazione.

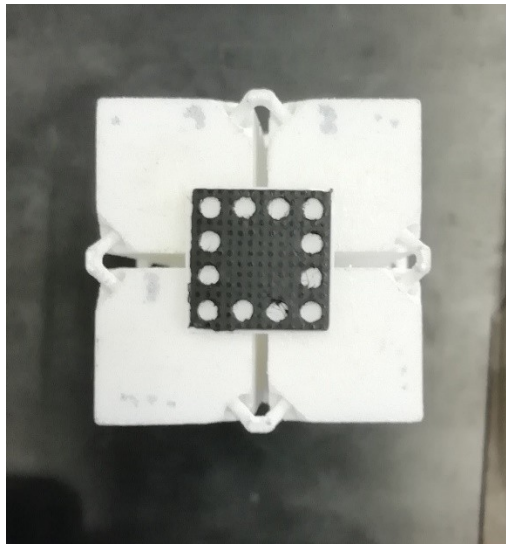


Figura 4.15: Metamateriale con piastrina quadrata a fori.

Avendo calcolato media, deviazione standard e grafico con le rispettive aree sottese alla curva (figura 4.17a), si nota che la curva migliore, seguendo la valutazione statistica, risulta derivare dal dato diciannovesimo, mentre da una valutazione, meno accurata, sull'area dal terzo. Per capire, poi, quale dei due dati prendere effettivamente in considerazione si dovrebbe studiare di quanto effettivamente il driver modifica la curva, bloccando le risonanze che possono originarsi durante la prova.



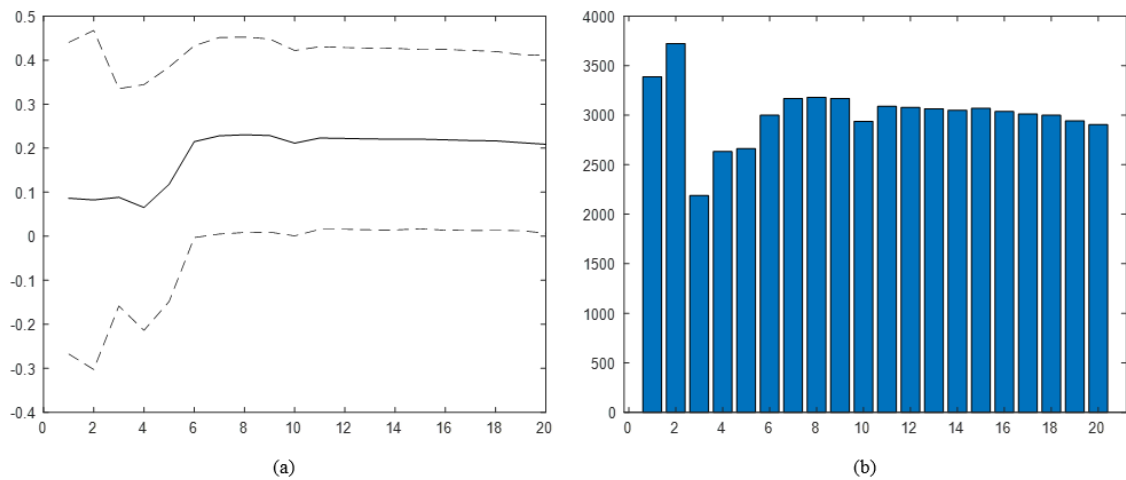


Figura 4.16: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

Oltre a tali grafici, si plotta la frequenza e l'interfering effect con i dati relativi allo spostamento per verificare l'andamento delle curve e si ottengono:

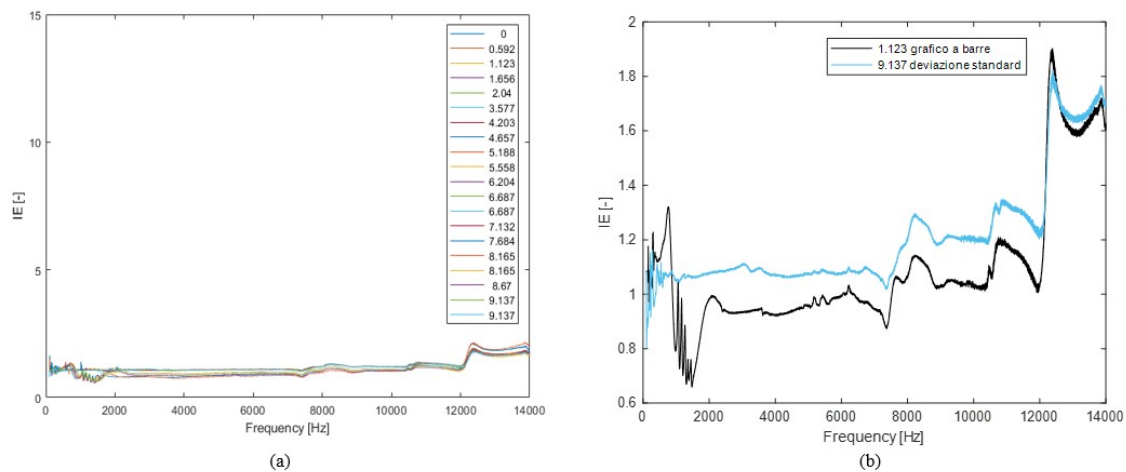


Figura 4.17: (a) Grafico PCB miniaturizzato piastrina quadrata fori; (b) Grafico valore migliore.

Come si nota dalla figura 4.17b, il grafico ottenuto presenta due curve in quanto una è relativa al dato trovato dalla deviazione standard, mentre l'altra è dovuta al valore ottenuto dal grafico in cui sono valutate le aree sottese alle curve. Entrambi non sono molto lineari; presentano, infatti, numerosi picchi nonostante l'utilizzo di una piastrina ugualmente quadrata ma con dei fori e, per un confronto finale, si deve valutare il grafico relativo al driver, grafico che deve essere più lineare possibile.

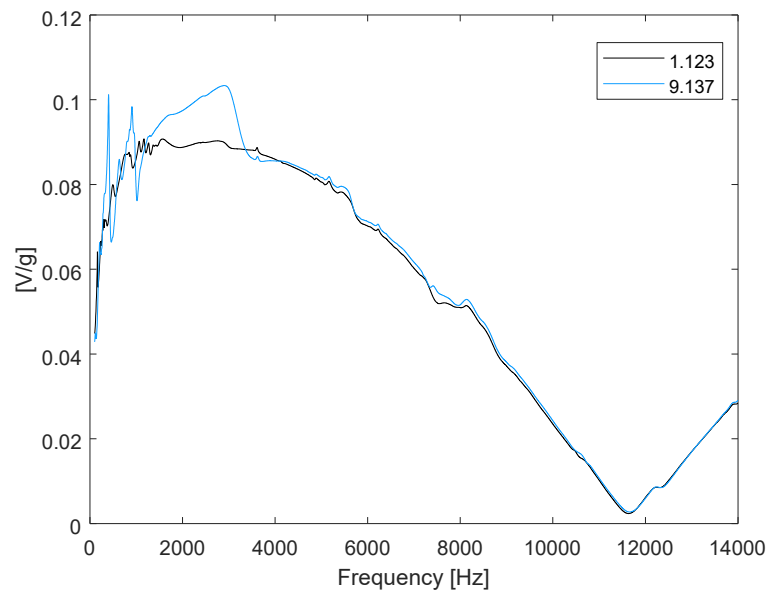


Figura 4.18: Grafico driver.

Come si può notare, tra le due curve sembra essere nettamente più lineare quella corrispondente al precarico 1.123mm, dato ottenuto tramite la valutazione delle aree.

Quindi, anche in questo caso, la soluzione sembra essere doppia in quanto applicando un precarico elevato, il metamateriale oltre ad andare a pacco lavorerà in modo ottimale sia a basse che ad elevate frequenze, come si evince dalla figura 4.17b in cui la linea blu sembra essere del tutto priva di picchi rispetto a quella ottenuta con un precarico minore, mentre invece, considerando il driver, si avrà il viceversa.

## Confronto

Di seguito si riporta il grafico contenente le curve ottenute dall'analisi vibrazionale con accelerometri miniaturizzati e l'aggiunta di piastrine quadrate, forata e non:

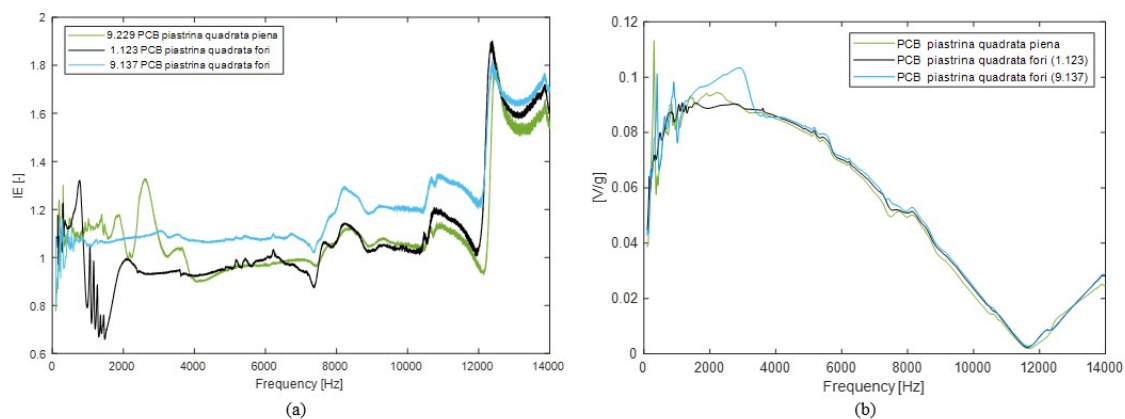


Figura 4.19 (a) Grafico PCB piastrina quadrata; (b) Grafico driver piastrina quadrata.

Dal confronto delle tre curve ottenute, si può concludere che utilizzando una piastrina quadrata piena come base dove attaccare con della cera l'accelerometro miniaturizzato sia la situazione ideale affinché si abbia minori picchi di risonanza possibili. Infatti, valutando i grafici in figura 4.19a e 4.19b, la curva, ottenuta dalla prova dinamica eseguita con la piastrina quadrata piena, sembra essere molto lineare, soprattutto nel grafico del driver.

Infine, come notato dalle prove dinamiche riportate in precedenza, aumentando il precarico sembra che il metamateriale riesca a lavorare in modo ottimale. Impiegando un precarico pari a 9.229mm, il metamateriale ha un comportamento quasi lineare a basse ed alte frequenze.

### Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina a croce piena

Oltre alle piastrine di forma quadrata, si opta ad eseguire la prova dinamica con piastrine a croce, piena e non. A tal proposito, si progetta due tipi di croce e, nel caso di croce piena, si imposta uno spessore di quasi 1mm, con 4mm di larghezza e 12mm di altezza.

Di nuovo, come in precedenza, si attacca con del nastro biadesivo al metamateriale la piastrina, sopra la quale verrà posizionato nel mezzo con della cera l'accelerometro miniaturizzato per poi eseguire la prova dinamica come già descritto.

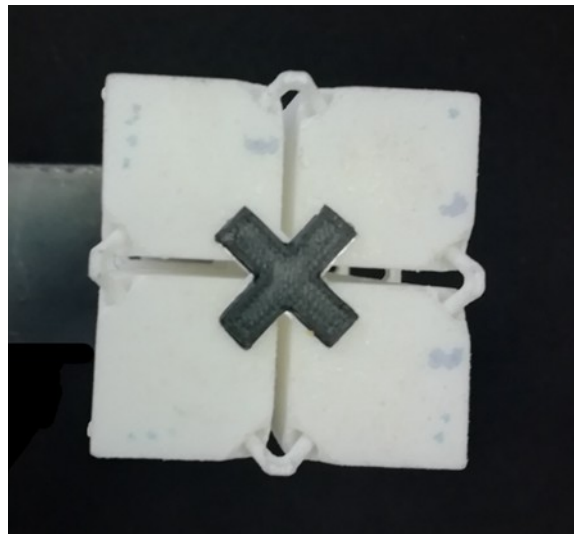


Figura 4.20: Metamateriale con piastrina quadrata a fori.

Installato il nuovo setup, si esegue la prova per poi importare i dati su *Matlab*. Anche in questo caso si calcolano la media, la deviazione standard e l'IE, in modo tale da ricavare tutti i grafici citati nelle prove precedenti. In particolare, si ottiene:

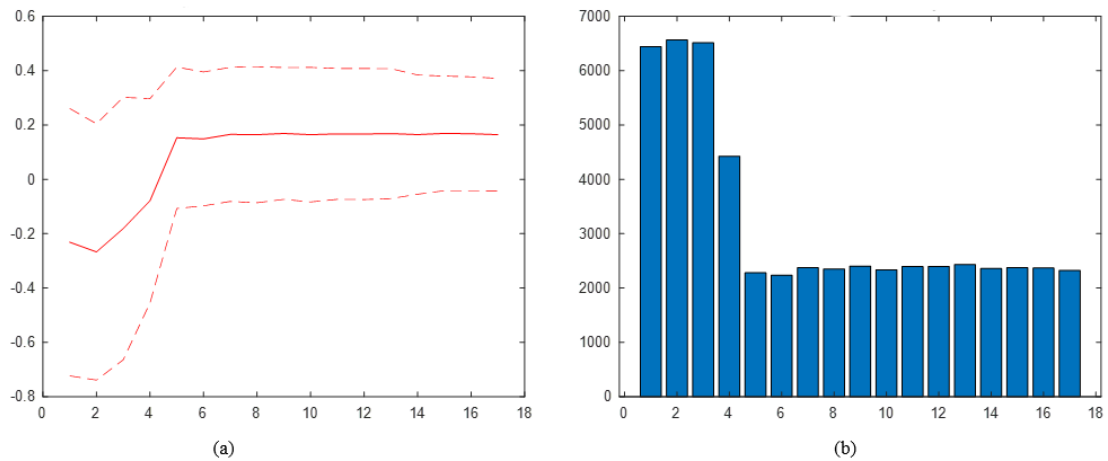


Figura 4.21: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

In questa prova, dai dati elaborati in *Matlab*, risulta che, dopo aver plottato il grafico in figura 4.22a, facendo una valutazione statistica attraverso il calcolo della deviazione standard, il diciassettesimo spostamento compiuto a partire dallo zero rispetto al sensore a triangolazione laser, cioè -2.143mm, è il giusto compromesso per ottenere una curva con minor picchi, mentre invece, determinando le aree dei trapezi, figura 4.22b, sottesi alle curve, si nota che lo spostamento da prendere in considerazione è il sesto in quanto l'area della curva relativa ad esso è minore. Si riportano i grafici contenenti i valori derivati da una valutazione statistica e da quella sull'aree:

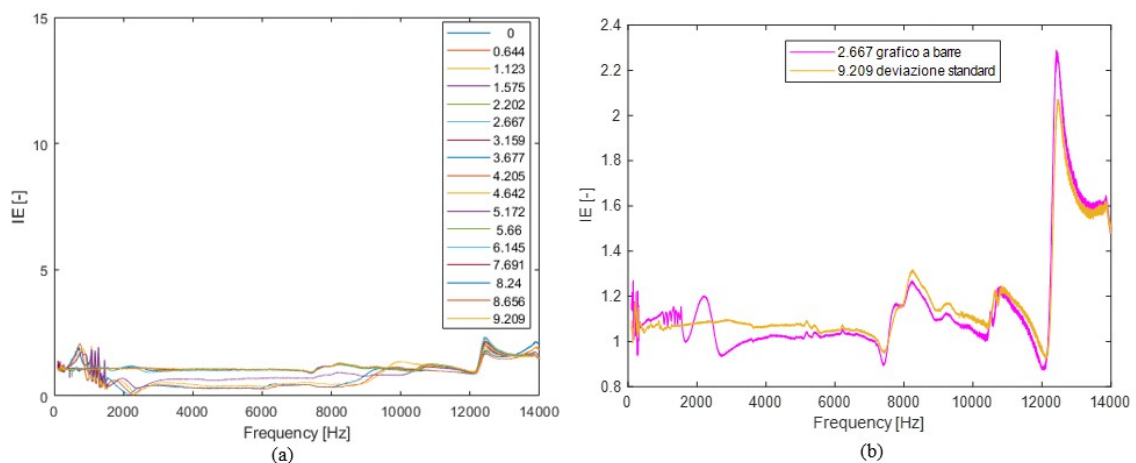


Figura 4.22: (a) Grafico PCB miniaturizzato piastrina croce piena; (b) Grafico valore migliore.

Come si nota dalla figura 4.22b, il grafico ottenuto presenta due curve in quanto una è relativa al dato trovato dalla deviazione standard, mentre l'altra è dovuta al valore ottenuto dal grafico in cui sono valutate le aree. Entrambi non risultano essere molto lineari; presentano, infatti, numerosi picchi e, per un confronto finale, si deve valutare il grafico riguardante il driver, grafico che deve essere più lineare possibile. Si riporta di seguito:

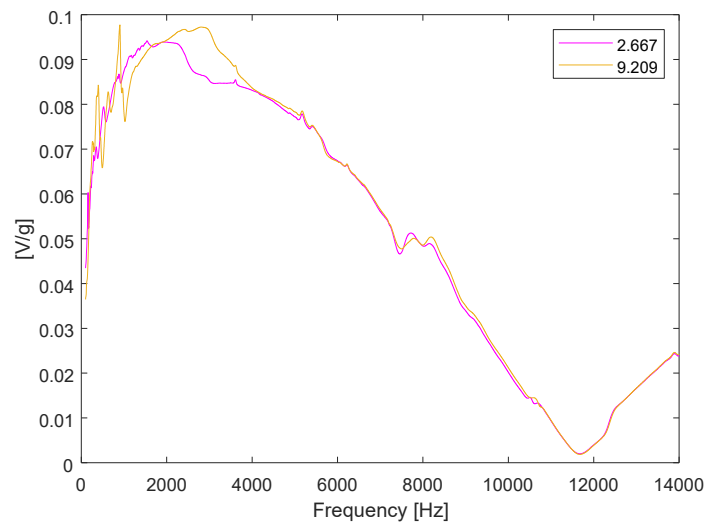


Figura 4.23: Grafico driver.

Da tale grafico si può concludere che le due curve del driver variano di poco, se non per i picchi iniziali; dunque, la curva probabilmente da considerare è relativa al precarico provocante uno spostamento pari a 9.209mm, valore in cui il metamateriale è quasi a pacco.

## Prova con accelerometro miniaturizzato su piastrina a croce con fori

Ultima prova dinamica eseguita è quella in cui, piuttosto che impiegare una piastrina in PLA a croce piena, si utilizza una piastrina a croce con dodici fori di diametro 3mm cadauno.

La piastrina è realizzata in PLA, esattamente come le altre descritte, ma ha una lunghezza di 38mm, una larghezza di 3mm per ogni parte della croce e uno spessore di quasi 1mm. La tecnica per porla sulla superficie inferiore del metamateriale è esattamente la stessa descritta precedentemente; si riporta una immagine raffigurante tale piastrina (figura 4.24):



Figura 4.24: Metamateriale con piastrina a croce con fori.

Come nella prova precedentemente descritta, si attacca ad “X” con del nastro biadesivo la piastrina al metamateriale, sopra la quale, con della cera, verrà posto l’accelerometro. L’unica differenza, inoltre, con le altre prove è lo zero iniziale, che in questo caso si prende a -2.058mm rispetto il sensore a triangolazione laser.

La prova si esegue come le altre già elencate e, una volta terminata, si importano tutti i dati in *Matlab* per creare i grafici relativi a tale prova e, dopo aver plottato la figura 4.25a, facendo le diverse valutazioni, statistica ed energetica.

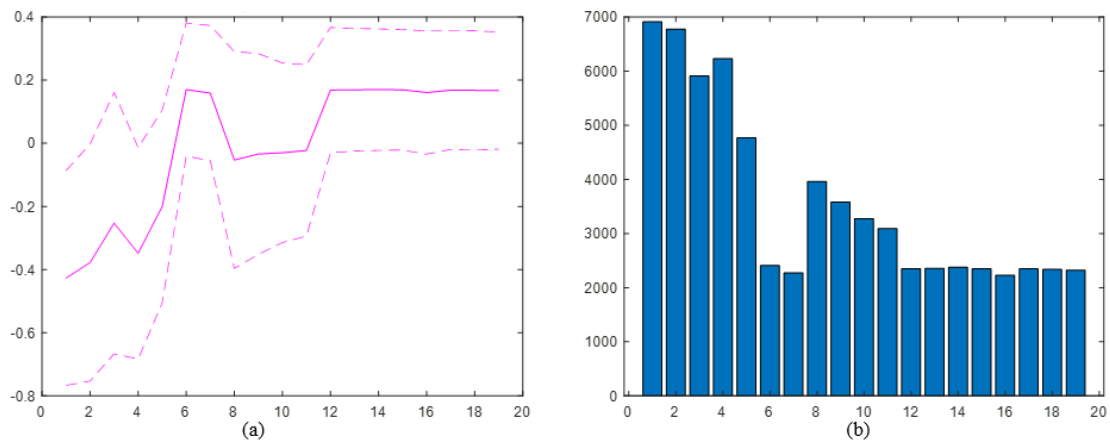


Figura 4.25: (a) Grafico deviazione standard; (b) Grafico andamento aree IE.

Dai diversi ragionamenti e valutazioni fatte, notando i grafici in figura 4.25, si riscontra che il dato derivante dalla deviazione standard in corrispondenza del quale si ottiene una curva quasi priva di picchi è il diciannovesimo, corrispondente ad un precarico pari a 8.562mm. Seguendo la valutazione energetica, sembra avere minor area, dunque minor picchi, il sedicesimo dato, pari ad una compressione di 7.09mm. Di seguito se ne riportano le curve:

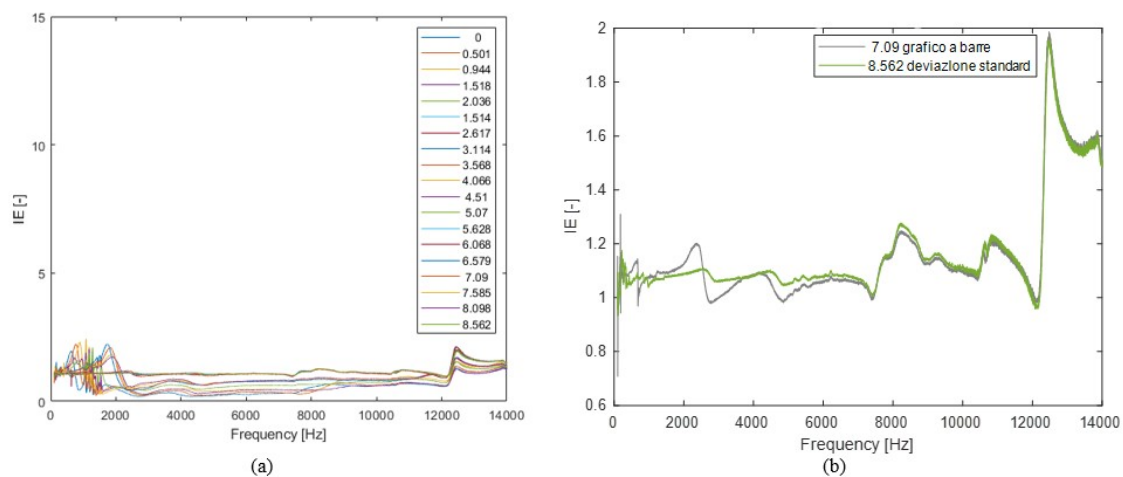


Figura 4.26: (a) Grafico PCB miniaturizzato piastrina croce fori; (b) Grafico valore migliore.

Come si nota dal grafico in figura 4.26b, le due curve estratte sono molto simili tra di loro, cambia solamente che la curva ottenuta quando il metamateriale è a pacco; dunque, quella risultante dal dato valutato statisticamente, è più lineare e pulita da



eventuale rumore. Prima di scegliere questa curva per confrontarla con le altre, si plotta il grafico del driver per un'ulteriore conferma di quanto già detto:

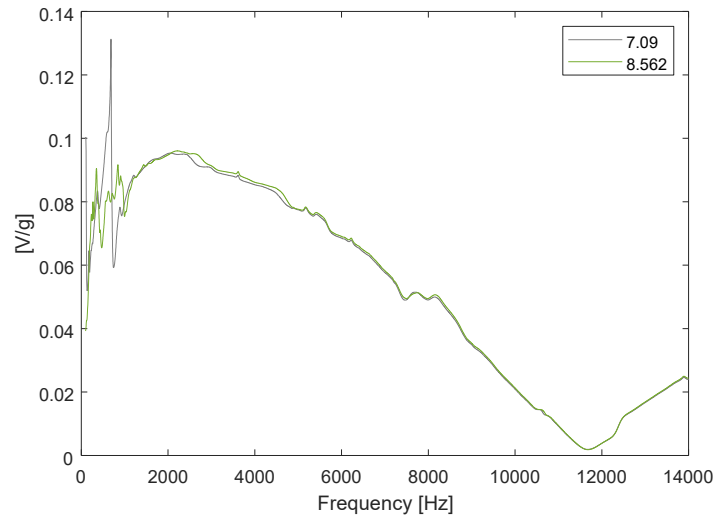


Figura 4.27: Grafico driver.

Come si può notare, la curva del driver relativa a 8.562mm di compressione del metamateriale è molto più lineare rispetto all'altra, dove invece sono presenti numerosi picchi soprattutto a basse frequenze. Quindi, per concludere, si terrà conto per un confronto finale della curva ottenuta quando il metamateriale è a pacco.

## Confronto

Di seguito si riporta il grafico contenente le curve ottenute dall'analisi vibrazionale con accelerometri miniaturizzati e l'aggiunta di piastrine a croce, forata e non:

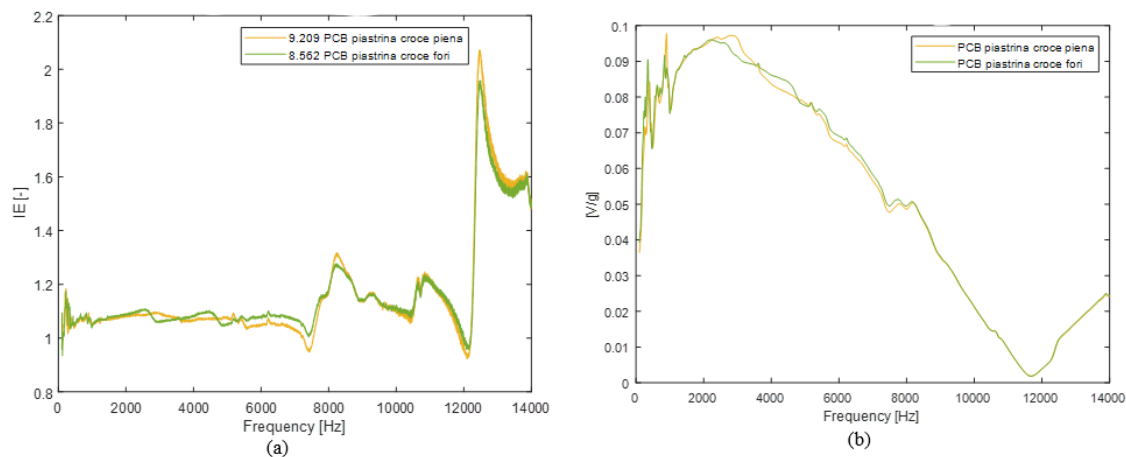


Figura 4.28 (a) Grafico PCB piastrina a croce; (b) Grafico driver piastrina a croce.

Dal confronto di questi due grafici ottenuti, si nota che tra le due soluzioni proposte la differenza è minima, in entrambi i casi, infatti, si ottiene un grafico perlopiù costante a bassa frequenza, mentre ad alta frequenza, dopo i 10kHz, il sistema sembra andare in risonanza. Ulteriore prova del fatto che le due soluzioni proposte sono simili è il grafico di figura 4.28b in cui si plotta la risposta del driver; il grafico, dunque, riporta due curve quasi lineari, con la presenza di picchi a basse frequenze.

Quindi, per concludere, per attenuare ed eliminare i picchi di risonanza che potrebbero nascere durante la prova dinamica si potrebbero utilizzare indifferentemente o una piastrina a croce piena o a croce con fori attaccate al metamateriale, in quanto in condizioni operative restituiscono il medesimo risultato.

## All setup

Terminate tutte le prove dinamiche con le diverse piastrine, si procede creando un grafico (figura 4.29) in cui si plottano tutti i dati, derivati dalle valutazioni, statistica e sull'aree, fatte, ottenendo:

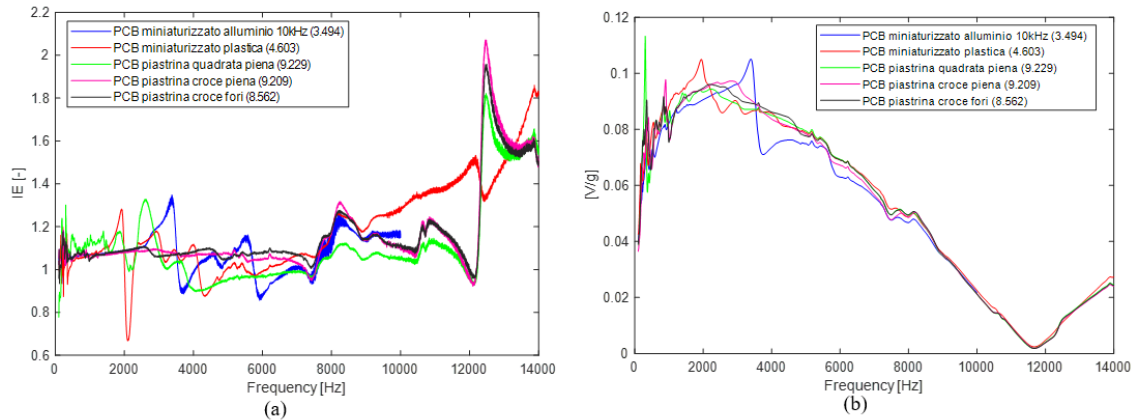


Figura 4.29: (a) All setup; (b) All setup driver.

Prendendo in considerazione il grafico in figura 4.29a, si nota che, tra le tante riportate, la curva, che sembra avere un andamento più piatto delle altre, è quella ottenuta impiegando la piastrina a croce piena. Ciò è anche confermato dal grafico in figura 4.29b dove la curva generata dal driver è molto lineare, il che attesta che una piastrina a croce piena può essere progettata assieme al metamateriale, il quale verrà utilizzato come elemento per il disaccoppiamento delle vibrazioni.

Infine, come si nota da tutti i grafici riportati nella figura soprastante, il metamateriale sembra essere nella condizione ideale in condizioni operative quando si trova a pacco, quando cioè viene sottoposto ad un precarico elevato, il quale lo comprime quasi totalmente non arrivando a rottura. È proprio in questo caso che viene effettuata una separazione dei modi tra quelli locali e globali della struttura.

## Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio apportato dunque mostra come il metamateriale progettato possa essere impiegato come elemento per il disaccoppiamento delle vibrazioni. Quando il metamateriale si trova vicino alla condizione di pacco, dopo che è stato sottoposto ad un precarico elevato, sembra offrire le performance migliori.

Dalle differenti prove eseguite, si riscontra che aggiungendo delle piccole piastrine in PLA le curve ottenute hanno un andamento molto piatto ed è per questo che si opterà in futuro per una progettazione di un metamateriale annesso di piastrina. Tra le diverse piastrine progettate, la miglior soluzione sembra esser data da quella a croce piena in quanto i grafici risultanti mostrano delle curve molto lineari. Il grafico, inoltre, è ottenuto utilizzando nella prova stessa un precarico molto elevato che provoca una compressione notevole del metamateriale, il quale appunto andrà a pacco.

Infatti, il metamateriale si trova ad operare in modo ottimale quando si trova a pacco. Questo porta a constatare che, se lo si volesse utilizzare come elemento per il disaccoppiamento delle vibrazioni, lo si dovrebbe comprimere con un precarico elevato.

Infine, ipotizzando sviluppi futuri, si prevede, oltre a diminuirne le dimensioni rendendolo più leggero e maneggevole, di progettare e stampare in 3D il metamateriale in studio, utilizzando non solo Nylon, ma anche diversi tipi di materiali, valutandone poi la resistenza ed elasticità. Facendo ciò, si ritiene, inoltre, opportuno realizzare il metamateriale con piastrina annessa, in modo tale da non dover adoperare biadesivo.

## Ringraziamenti

A fine di questo percorso, è doveroso da parte mia ringraziare il professore Castellini Paolo, nonché relatore, il quale non solo, dopo aver seguito diversi corsi da Lui tenuti, mi ha coinvolta nelle Sue materie, ma mi ha anche permesso lo sviluppo e l'elaborazione di questa tesi rendendosi sempre disponibile.

Inoltre, un ringraziamento speciale lo devo all'ing. Alessandro Annessi, con il quale ho lavorato durante l'ultimo periodo di tale percorso. Essendo la mia una tesi sperimentale, mi ha guidata indicandomi come distaccarmi da un approccio teorico più universitario per usarne uno più pratico, insegnandomi molte nozioni che mi resteranno utili.

## Bibliografia

- BPS. (s.d.). "Capire la fisica delle prestazioni di uno shaker elettrodinamico".
- C.Caloz. (2009). "Perspectives on EM metamaterials". *Materialstoday* 12.
- C.Hakoda, J.Rose, P.Shokouhi, & C.Lissenden. (2018). "Using Floquet periodicity to easily calculate dispersion curves and wave structures of homogeneous waveguides".
- E.Shridhar, & Y.Prasad. (2011). "Metamaterial properties and applications". *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 85-89.
- G.Petrucci. (s.d.). "Lezioni di costruzioni di macchine, proprietà dei materiali e prove meccaniche".
- ISO. (s.d.). "MTS 810 & 858 Material Testing Systems". *ISO 9001*.
- J.Liu, H.Guo, & T.Wang. (2020). "A Review of Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals". *Crystals*.
- K.Gangwar, Dr.Paras, & R.P.S.Gangwar. (2014). "Metamaterials: Characteristics, Process and Applications".
- L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, A.Corigliano, & F.Braghin. (2016). "Modeling and experimental verification of an ultra-wide bandgap in 3d phononic crystal". *Applied Physics Letters*.
- L.D'Alessandro, E.Belloni, R.Ardito, F.Braghin, & A.Corigliano. (2017). "Mechanical low-frequency filter via modes separation in 3d periodic structures". *Applied Physics Letters*.
- M.Callegari, P.Fanghella, & F.Pellicano. (2017). "*Meccanica applicata alle macchine*". UTET.
- M.Esposito, & F.Todisco. (2016). "I Metamateriali: Invisibilità e Rifrazione Negativa in Mezzi Nanochirali". *Ithaca: Viaggio nella Scienza VII*.
- P.Mazzoldi, M.Nigro, & C.Voci. (2008). "*Elementi di fisica*". Edises.
- P.Panzeri, & C.Algeri. (2006). "Prove di caratterizzazione ed esperienze di monitoraggio in campo dinamico". "*Metodi dinamici per il monitoraggio delle strutture dell'ingegneria civile*".
- T.J.Cui, D.R.Smith, & R.P.Liu. (2010). "Metamaterials: Theory, Design, and Applications".

## Sitografia

[1]<https://si-plan.com/machine/servo-hydraulic-fatigue-test-machine-5-25kn-bench-top-system/>

[2]<https://si-plan.com/control-data-acquisition/>

[3]<https://dismat.it/ambiti-operativi/prove-di-caratterizzazione-dinamica/prove-di-caratterizzazione-dinamiche-su-strutture/1864807,1067784>

[4]<https://www.luchsinger.it/it/note-tecniche/principio-misura-sensori-laser-triangolazione/>

