



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

Valutazione delle performance di una sonda vibrazionale progettata con approccio metamateriale in condizioni operative

Evaluation of the performance of a designed
vibrational probe with metamaterial approach
under operating conditions

Candidato:
Lorenzo Gasparroni

Relatore:
Prof. Milena Martarelli

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

1	Introduzione	1
2	Stato dell'arte sulle misure di vibrazioni	3
2.1	Analisi delle vibrazioni	3
2.2	Misura delle vibrazioni	4
2.3	Metamateriale	5
3	Analisi piastra rigida	7
3.1	Introduzione	7
3.2	Catena di misura	7
3.3	Misurazioni	9
3.3.1	Accelerometro senza sonda	9
3.3.2	Accelerometro con sonda	10
3.4	Analisi dei dati	11
4	Analisi disco freno	21
4.1	Introduzione	21
4.2	Catena di misura	21
4.3	Misurazioni	24
4.3.1	Accelerometro senza sonda	24
4.3.2	Accelerometro con sonda	25
4.4	Analisi dei dati	25
5	Analisi Macchine rotanti	33
5.1	Introduzione	33
5.2	Catena di misura	33
5.3	Misurazioni	34
5.4	Analisi dei dati	35
6	Conclusioni	39
	Bibliografia	41

Capitolo 1

Introduzione

I metamateriali (MMs) costituiscono la frontiera nella tecnologia di scienza dei materiali. A differenza dei materiali naturali classici, le proprietà ottiche degli MMs possono essere facilmente adattate, se vengono opportunamente organizzate la geometria, la forma o la dimensione dei loro costituenti fondamentali. I MMs, di solito, sono fatti di unità fondamentali metallo/dielettriche profondamente subwavelength, disposte in modo periodico, che mostrano simmetria mono-, bi- o tri-dimensionale, possibilmente incorporando materiali riconfigurabili e/o materiali di guadagno, al fine di fornire loro proprietà reattive intelligenti [2].

Essendo costituiti da un unico pezzo, i metamateriali così intesi possono essere realizzati con metodi molto semplici, per esempio usando stampanti 3D monomateriali, e non richiedono assemblaggio né lubrificazione, poiché il loro movimento avviene tramite deformazione e non genera attrito. Parlando invece dei loro limiti, la struttura ottenuta sommando più celle rende l'oggetto rigido; perciò, i metamateriali possono muoversi quando su di essi sono applicate forze consistenti e non permettono movimenti rotativi. Il vantaggio dei meccanismi metamateriali è la loro semplicità: l'esempio che si trova nell'articolo [4] confronta un chiavistello tradizionale che si compone di più parti (asse, sospensioni, molle...), con il chiavistello metamateriale costituito da un unico blocco che raggruppa le celle cui è demandata la funzione meccanica. Il meccanismo è costituito da parti rigide e da parti deformabili. Entrambe sono formate da celle disposte secondo una griglia a spaziatura uniforme. Le celle deformabili, a differenza delle rigide, sono progettate per deformarsi quando viene applicata una forza di taglio [4].

I campi di applicazione dei metamateriali sono i più svariati, per esempio essi sono usati come filtri meccanici. Questa applicazione è stata studiata in questa tesi. Infatti il metamateriale è stato progettato come elemento di disaccoppiamento efficiente per una sonda di vibrazione a mano.

Con lo stesso concept usato per il metamateriale è stata progettata una sonda di vibrazione più compatta utilizzando un approccio multimateriale. La topologia della metastruttura rimane invariata. Le masse tetraedriche vengono sostituite con quelle d'acciaio. Le articolazioni adeguate sono progettate per collegare le masse tetraedriche

allo scheletro della metastruttura. Inoltre, i collegamenti obliqui sono progettati più ingombranti per essere più robusti.

In questa tesi si valutano le performance delle metastrutture utilizzate come sonde vibrazionali per misure di vibrazioni in condizioni operative reali. L'obiettivo finale è quello di dimostrare la possibilità di utilizzo dei metamateriali in ambito industriale, come può essere la verifica del prodotto in una produzione in linea.

Nella sezione 2, viene fatta una breve panoramica di come si svolge una misura di vibrazione. Quindi, viene presentata la motivazione dell'uso del metamateriale come sonda di vibrazione.

Nella sezione 3, si svolge la misurazione di vibrazioni di una piastra rigida. Viene presentata la catena di misura. Successivamente viene descritto come si svolgono le misurazioni. Quindi, viene svolta un'analisi dei dati ottenuti.

Nella sezione 4, si svolge la misurazione di vibrazione di un disco freno. Introdotta la catena di misura si descrivono le misurazioni. Quindi, viene svolta un'analisi dei dati ottenuti con a seguire un confronto generale.

Nella sezione 5, si svolge la misurazione di vibrazioni di una macchina rotante. Successivamente si passa alla presentazione della catena di misura e alla descrizione delle misurazioni. Quindi, viene fatta un'analisi dei dati ottenuti ed un confronto con la sezione precedente.

Infine, le conclusioni sono tratte nella sezione 6.

Capitolo 2

Stato dell'arte sulle misure di vibrazioni

2.1 Analisi delle vibrazioni

Si dice che un corpo vibra quando effettua un movimento oscillatorio rispetto a una posizione di riferimento. Il numero di volte in cui si ripete un ciclo di movimento completo in un secondo viene definito frequenza e si misura in hertz (Hz). I parametri di questo moto non sono in generale costanti nel tempo.

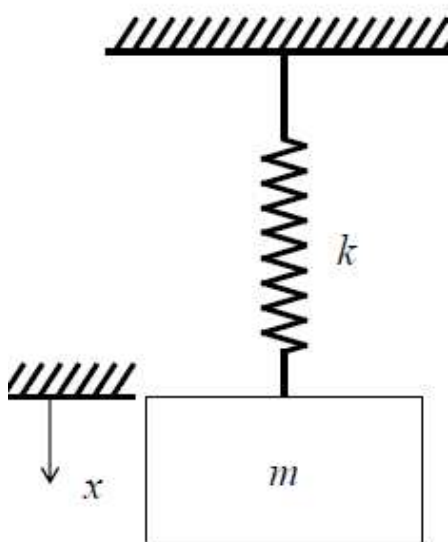


Figura 2.1: Sistema massa molla

Il più semplice sistema oscillante ha un unico grado di libertà e il suo moto può essere descritto da un'unica coordinata x . Questo sistema è costituito da una massa m , di peso W sospesa ad una molla di rigidezza k e di peso trascurabile. In assenza di forze esterne, la vibrazione libera alla sua frequenza propria avverrà quando la massa viene allontanata dalla posizione di equilibrio. Ponendo positive le quantità vettoriali dirette verso il basso, sulla massa agiranno le seguenti forze: la forza d'inerzia, verso il basso, $m\ddot{x}$; e la relazione elastica, verso l'alto kx . Il moto sarà descritto dalla seconda legge di Newton $m\ddot{x} = -kx$. Definendo la frequenza di risonanza $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ si può scrivere $\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0$ che è un'equazione differenziale omogenea del secondo ordine che ha come soluzione generale $x = X e^{i\omega_n t}$ con X costante arbitraria che

dipende dalle condizioni iniziali. Partendo da questo modello e aggiungendo forzanti, masse, molle o altri elementi, si andranno a modificare i gradi di libertà dell'elemento complicando così le equazioni. Per maggiori informazioni si può consultare il manuale [5]

2.2 Misura delle vibrazioni

Un altro metodo per trovare i parametri del moto oscillatorio è quello di andarli a misurare. Le misure di vibrazioni possono venire effettuate con modalità e scopi diversi. In questa tesi si misura la risposta di un sistema ad eccitazione nota per identificare sperimentalmente la funzione di risposta in frequenza (FRF) di un corpo e stimare le sue frequenze proprie e modi propri di vibrare. I dati ottenuti nelle misurazioni verranno analizzati attraverso l'algoritmo PolyMax.

Questa analisi si basa su un processo di curve-fitting cioè di interpolazione della FRF misurata con una espressione teorica. Il curve-fitting può essere di una parte di una FRF, di una FRF intera o di più FRF relative ad un sistema vibrante. Lo scopo del processo di curve fitting è quello di determinare i coefficienti presenti nell'espressione teorica della/e FRF che permettono di meglio interpolare la/le FRF misurate.

L'analisi modale può essere fatta su tutto il range di misura in cui possono esserci più modi oppure in un range che contiene un solo modo. In questa tesi verrà usato il metodo MDOF (Multiple Degree Of Freedom) applicato al dominio della frequenza.

Il programma calcola la somma di tutte le FRF misurate e l'operatore deve scegliere la banda di frequenza su cui effettuare l'analisi.

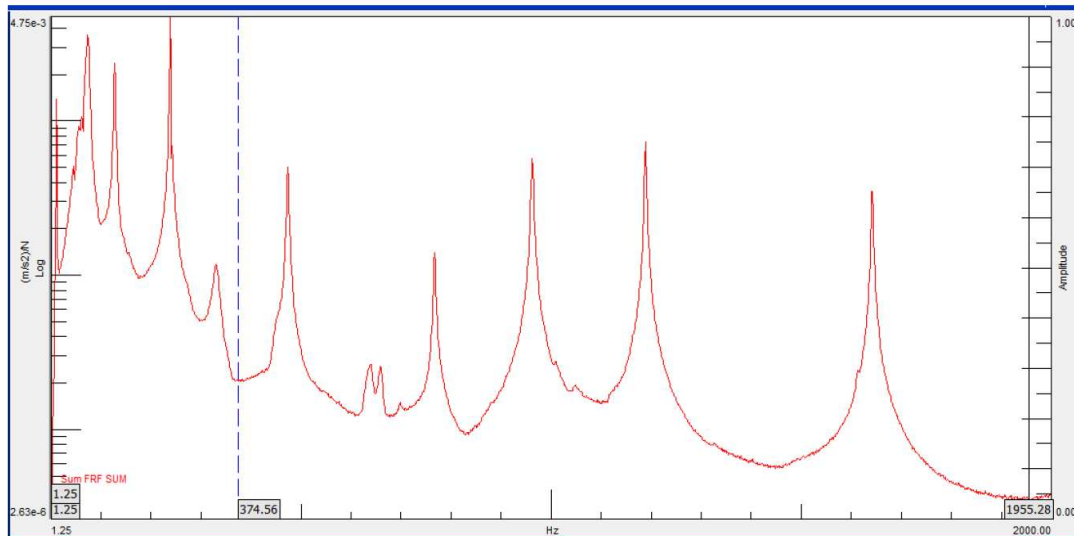


Figura 2.2: Esempio di una FRF somma calcolata da PolyMax

Si lancia il software che applica l'algoritmo PolyMax e presenta il diagramma di stabilizzazione. Il livello di stabilizzazione viene dato in termini di lettere che hanno il seguente significato: "o" indica che non è stabile, "v" indica che è stabile ma solo in termini di vettore modale, "s" indica che è stabile in termini di tutti i coefficienti modali. Osservando il diagramma si scelgono i poli del sistema cliccando sulle lettere "s" o "v" che si trovano allineate sui picchi di risonanza.

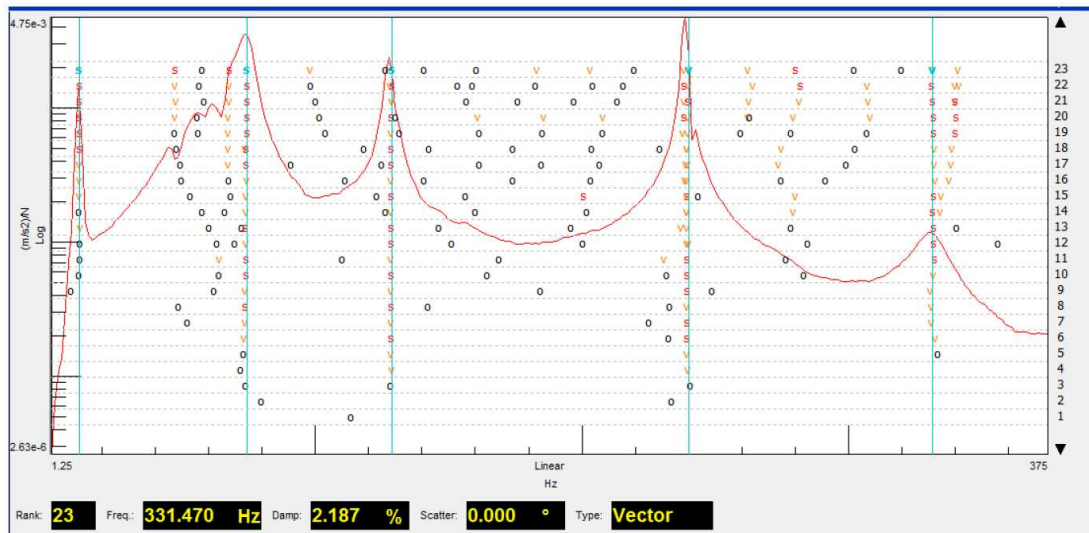


Figura 2.3: Diagramma di stabilizzazione ottenuto con software Polymax

Una volta stimati i poli, o autovalori, il software calcola gli autovettori cioè i modi propri del sistema. Per maggiori informazioni sull'analisi modale si può consultare [3].

2.3 Metamateriale

Le misurazioni di questa tesi saranno effettuate in due modi differenti: in maniera tradizionale, cioè incollando l'accelerometro sull'oggetto vibrante con della cera d'api; facendo uso di metastrutture progettate per essere usate come sonde di vibrazione manuali.

La cosiddetta sonda di vibrazione è uno strumento che permette di effettuare misurazioni spingendo l'accelerometro contro la superficie da studiare. Il componente più importante al suo interno è l'elemento di disaccoppiamento, che è necessario per accoppiare l'accelerometro alla superficie di prova in modo controllato, garantendo il contatto ed evitando vibrazioni indesiderate dovute alla manipolazione. Sfruttando nuove soluzioni di design per l'isolamento dalle vibrazioni (ad es. cristalli fononici e metamateriali), l'elemento di disaccoppiamento può essere adattato per applicazioni specifiche, consentendo un'eccellente larghezza di banda di misura. Pertanto, una soluzione più economica e affidabile per i test in linea o l'ispezione di qualità, vale a dire la sonda accelerometro a mano, è adatta al nuovo quadro industriale veloce e intelligente e può essere sfruttata in modo più economico rispetto al passato, ridurre i costi ma

non compromettere le prestazioni di misurazione e l'efficienza nel tempo. Per maggiori approfondimenti sulla metastruttura in questione consultare l'articolo [1].

Capitolo 3

Analisi piastra rigida

3.1 Introduzione

Per la prima prova è stata scelta una piastra in quanto l'analisi modale su quest'ultima è una prova standard della quale si conoscono già i risultati ed è quindi più facile verificarne la correttezza.

3.2 Catena di misura

La piastra è rettangolare e fatta di alluminio con dimensioni 200x100x5 mm. Sulla sua superficie è disegnata una griglia regolare i cui 77 punti sono vertici di rettangoli con dimensioni 18x15 mm. I punti, della figura 3.1, evidenziati in rosso, cioè 1, 11, 67 e 77, sono quelli dove le misurazioni con la sonda sono più difficoltose mentre il punto 39, evidenziato in verde, rappresenta il driving point.

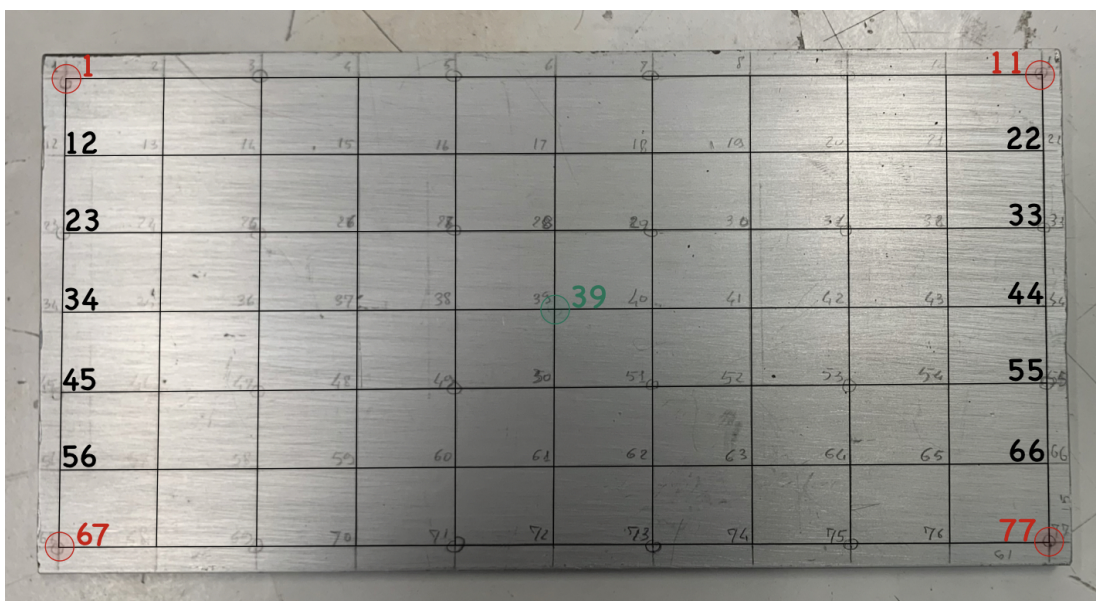


Figura 3.1: Piastra rigida di alluminio con griglia regolare usata per misure di vibrazione

Per agitare la piastra si usa uno shaker di piccole dimensioni collegato ad essa attraverso una cella di carico, che misura la forza in ingresso nel sistema, e uno stinger, utile per dare un'eccitazione verticale senza componenti a taglio o torsionali. Quest'ultimo viene incollato alla piastra utilizzando l'adesivo "x60", frequentemente utilizzato per test sperimentali, materiali porosi e prove a basse temperature.

Nello specifico la cella di carico misura la forza dinamica in ingresso nel sistema. Tipo e numero seriale dello strumento sono: 208C03 LW55241. Ha una sensibilità di 109 mV/N ed è ICP; quindi, l'amplificatore di carica è integrato nello strumento. La cella di carico rappresenta il driving point del sistema ed è posizionata sul punto 39 della griglia, sulla faccia opposta a quella dove avvengono le misurazioni con l'accelerometro.

L'accelerometro che si usa per le misurazioni è anch'esso un trasduttore ICP con una sensibilità di 5.11 mV/g. Tipo e numero seriale dello strumento sono: 352C23 114014.

Per acquisire le misure si usa la scheda di acquisizione Siemens Scadas XS.

Il segnale che riceve lo shaker viene generato da un generatore e regolato tramite un amplificatore.

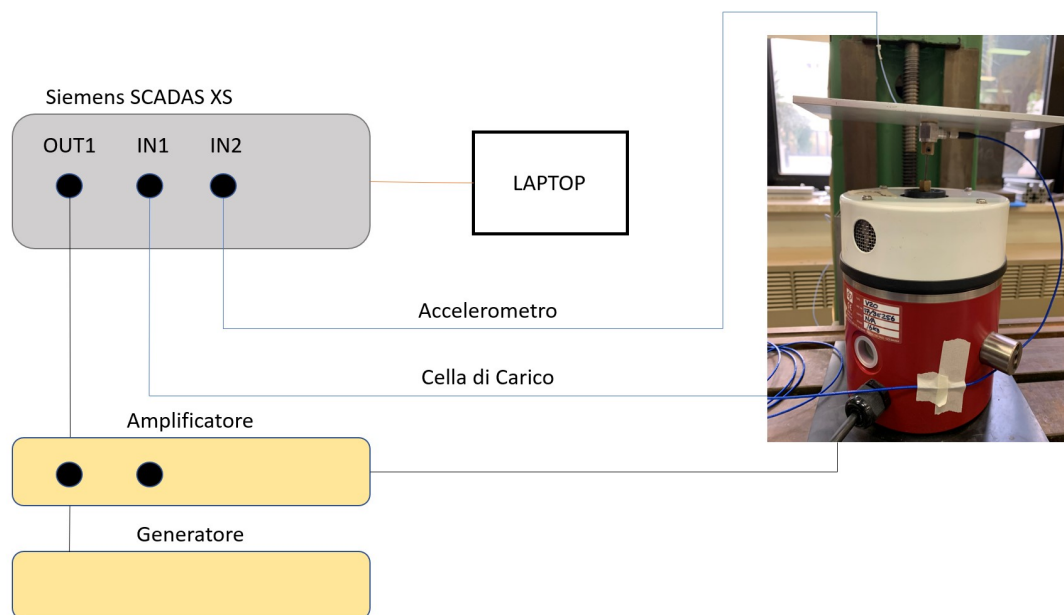


Figura 3.2: Schematizzazione catena di misura per piastra

3.3 Misurazioni

Prima di poter procedere con le misurazioni si deve creare l'apposita geometria dell'elemento vibrante sul programma d'acquisizione. Impostata la cella di carico, situata sul punto 39, come driving point del sistema e registrato l'accelerometro come input, si vanno a fare delle misurazioni di prova per regolare le impostazioni di misura quali:

Banda passante	16384 Hz
Risoluzione	1 Hz
Linee spettrali	16384

Si misurano le risposte in corrispondenza di ogni punto della griglia prima usando l'accelerometro (come viene fatto tradizionalmente) poi usando il prototipo di sonda vibrazionale. In quest'ultimo caso, prima viene usato il metamateriale di singolo materiale come elemento disaccoppiante e poi il multimateriale.

3.3.1 Accelerometro senza sonda



Figura 3.3: Set up per misure con accelerometro senza sonda

Il metodo tradizionale consiste nell'incollare l'accelerometro direttamente sulla superficie vibrante. Per incollarlo si utilizza la cera d'api. Bisogna fare attenzione che l'accelerometro abbia sempre la cera necessaria per un buon ancoraggio. Lo si posiziona sul punto da misurare, ricordando di impostarlo anche nel programma di acquisizione, e si fa partire la misurazione. La durata di acquisizione è di 32 medie e dopo aver controllato la validità della misura si può passare alla successiva. Si ripete il procedimento per tutti i punti della griglia.

3.3.2 Accelerometro con sonda

La differenza sostanziale con il metodo tradizionale è il punto di incollaggio dell'accelerometro; infatti, in questo caso esso va incollato, con la cera d'api, sulla base della metastruttura che verrà premuta sull'oggetto vibrante. Per far sì che l'elemento di disaccoppiamento funzioni al meglio, l'operatore deve tenere la sonda sull'estremità opposta rispetto a dove è posizionato l'accelerometro. L'acquisizione in questo caso ha una durata di 16 medie per agevolare le condizioni dell'operatore che deve fare attenzione al dosaggio della forza applicata sulla metastruttura per evitare uno smorzamento eccessivo delle vibrazioni o uno spostamento del trasduttore. Dopo aver controllato la validità della misura si passa alla successiva ripetendo il processo per tutti i punti della griglia.

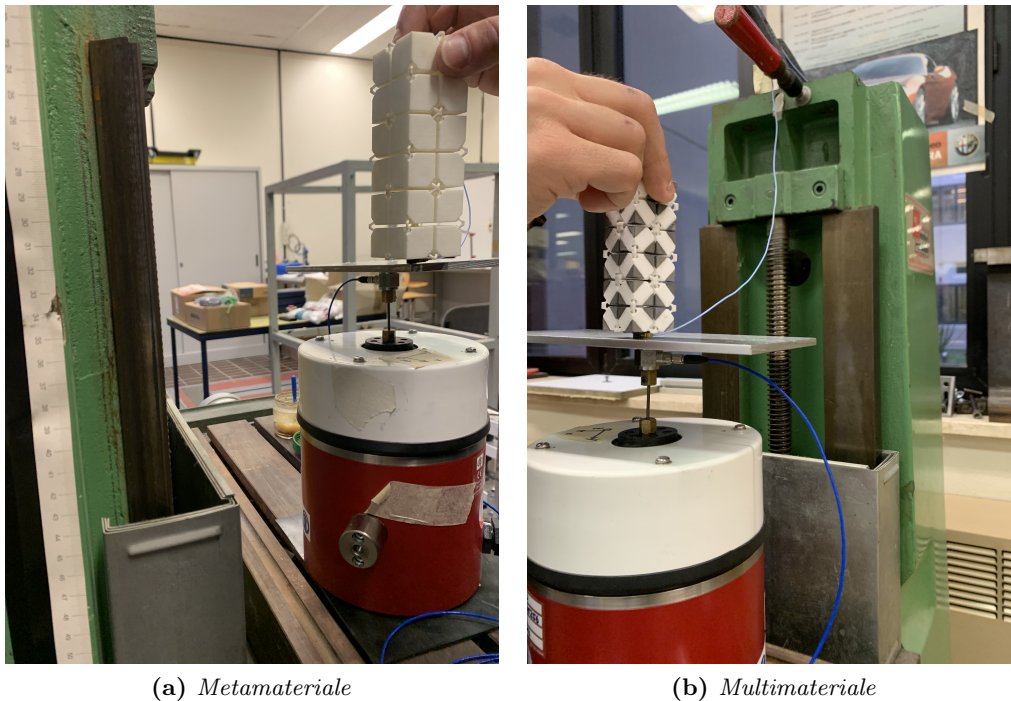


Figura 3.4: Set up per misurazioni con accelerometro incollato alle metasrttture

3.4 Analisi dei dati

Concluse le misurazioni si possono graficare, utilizzando il programma MATLAB, i dati ottenuti, così da poterli confrontare tra loro.

Confrontando le FRF somma si nota uno smorzamento delle vibrazioni della piastra quando vengono utilizzate le metastrutture. Questo smorzamento è più accentuato quando si utilizza il multimateriale per via del peso maggiore della sonda. In entrambi i casi lo smorzamento dipende, oltre che dal peso della metastruttura stessa, anche dalla forza impressa dall'operatore. Si vede inoltre una maggiore rumorosità nelle FRF delle due sonde, dovuta alla minor coerenza delle misure rispetto a quella del solo accelerometro in quanto influenzata dalla capacità dell'operatore nel tenere fermo lo strumento.

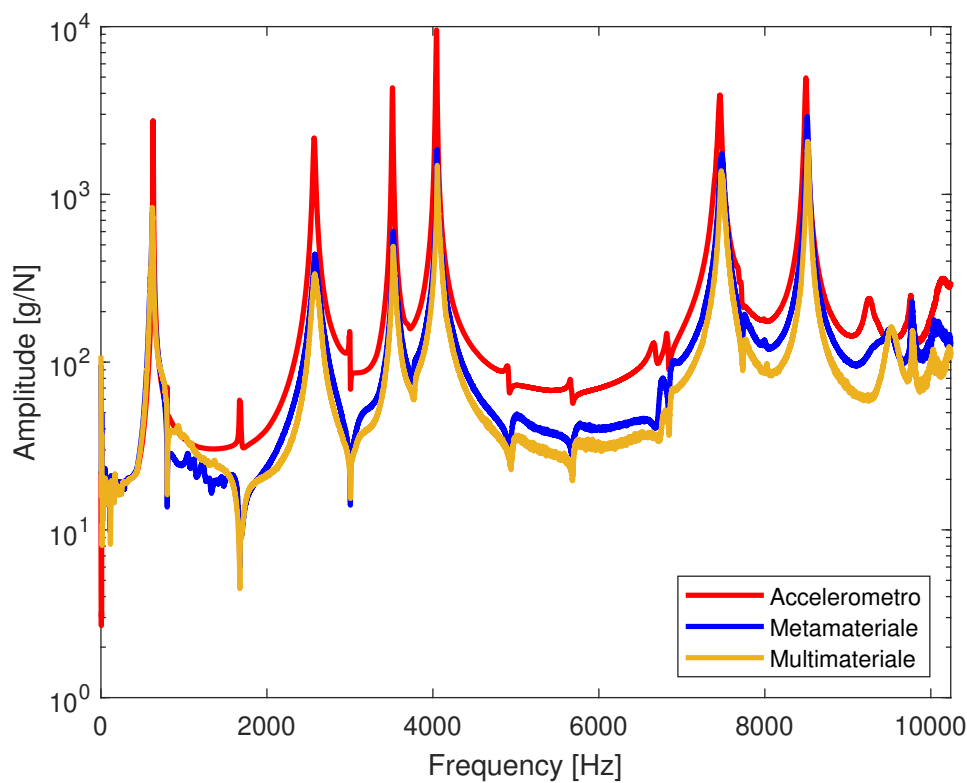


Figura 3.5: Confronto FRF somma delle 3 tipologie di misurazioni. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale.

Utilizzando l'algoritmo PolyMax, si vanno ad estrapolare i modi di vibrare del sistema. Tali modi si individuano alle frequenze scritte nella seguente tabella, dove ω_n = frequenza naturale e ζ = rapporto di smorzamento.

Modo	Accelerometro senza sostegno		Accelerometro con sostegno metamateriale			Accelerometro con sostegno multimateriale		
	ω_n [Hz]	ζ [%]	ω_n [Hz]	ζ [%]	$\Delta\omega$ [%]	ω_n [Hz]	ζ [%]	$\Delta\omega$ [%]
1	628	0.11	586	2.34	-6,69	592	1.06	-5,73
2	796	0.05	710	4.27	-10,8	755	1.09	-5,15
3	2569	0.34	2551	0.77	-0,7	2577	0.77	0,31
4	2996	0.08	3104	1.59	3,6	3087	1.25	3,04
5	3513	0.10	3524	0.24	0,31	3536	0.55	0,65
6	4043	0.06	4052	0.16	0,22	4058	0.12	0,37
7	7441	0.12	7477	0.19	0,48	7484	0.19	0,58
8	8491	0.07	8511	0.09	0,24	8520	0.10	0,34
9	9231	0.02	9504	0.50	2,96	9515	0.48	3,08

Si nota che le frequenze alle quali si trovano i modi di vibrare variano in base al metodo di misura utilizzato. Questo avviene a causa dello smorzamento del sistema che, se troppo eccessivo comporta un cambiamento della struttura stessa. Nella figura 3.6 si graficano alcuni dei dati presenti nella tabella precedente quali: le frequenze proprie ω_n misurate con i tre metodi di misura e il $\Delta\omega$.

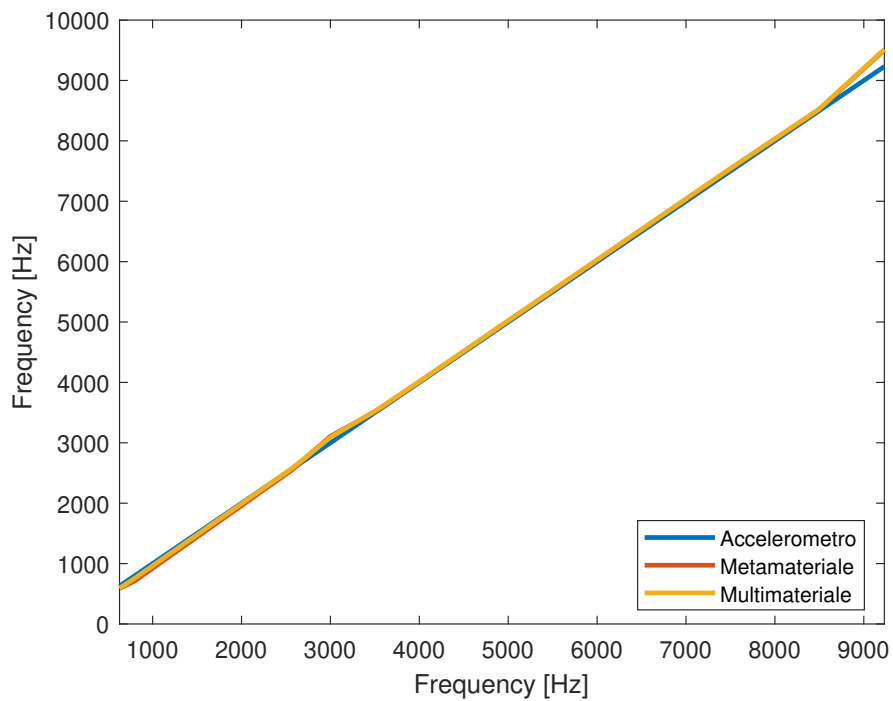
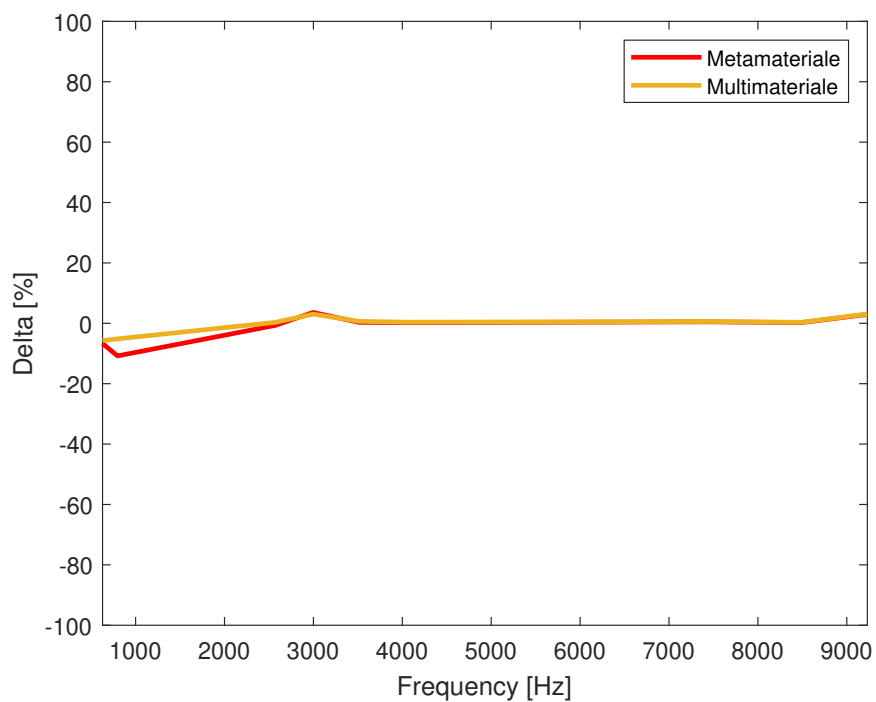
(a) ω_n (b) $\Delta\omega$

Figura 3.6: Nel primo grafico si mettono a confronto le frequenze proprie della piastra misurate con i tre metodi di misura. Il secondo grafico mostra il delta in percentuale tra le frequenze proprie misurate con accelerometro e quelle misurate con metastrutture.

Analizzando i grafici che mostrano le singole FRF dei 77 punti, si vede come nelle misurazioni fatte con i prototipi di sonda avviene un fenomeno di shift dei picchi che causa una minore stabilizzazione nel diagramma di PolyMax.

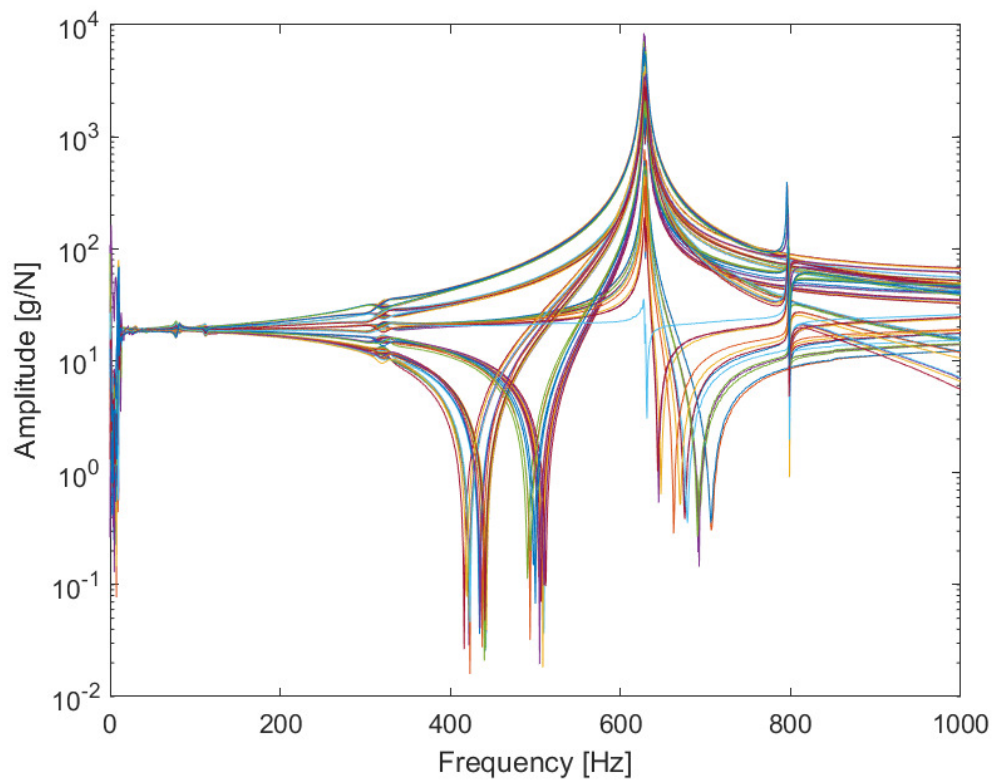


Figura 3.7: Zoom sul grafico delle FRF dei 77 punti misurati con solo accelerometro.

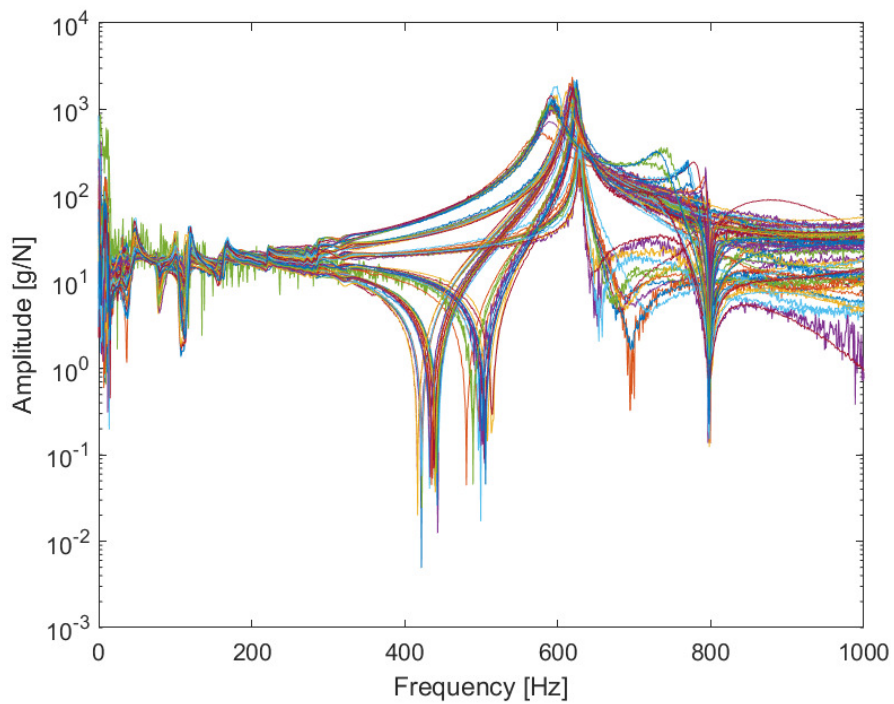
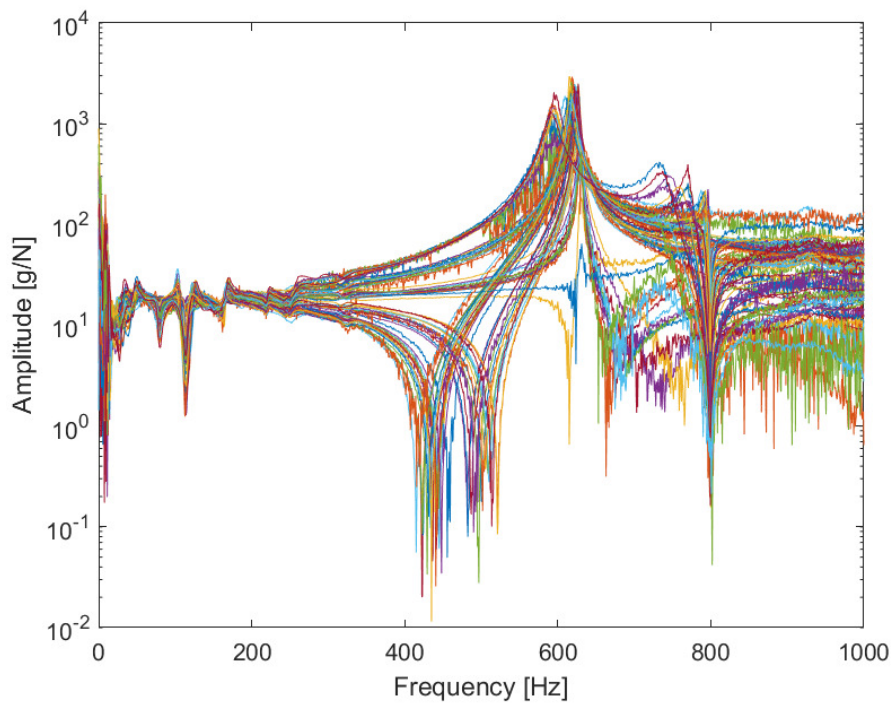
(a) *Metmateriale*(b) *Multimateriale*

Figura 3.8: Zoom sul grafico delle FRF dei 77 punti misurati con i prototipi di sonda. Lo zoom serve ad evidenziare il fenomeno di shift.

L'algoritmo PolyMax, oltre a far vedere le frequenze dei modi mostra anche il loro andamento. Le immagini dei modi sono state prese nei punti di massima ampiezza. Di seguito si hanno alcuni dei modi sopra citati:

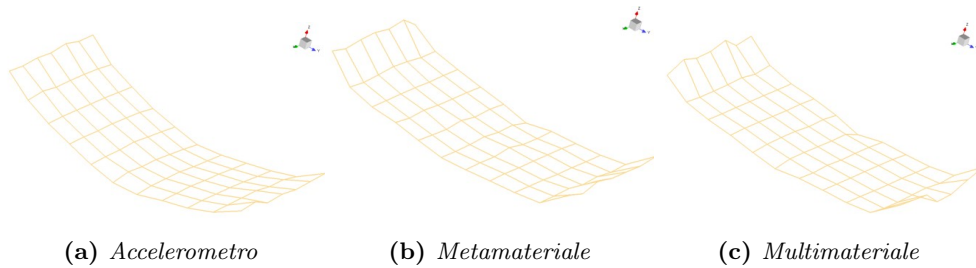


Figura 3.9: Modo 1 per ogni metodo di misura utilizzato.

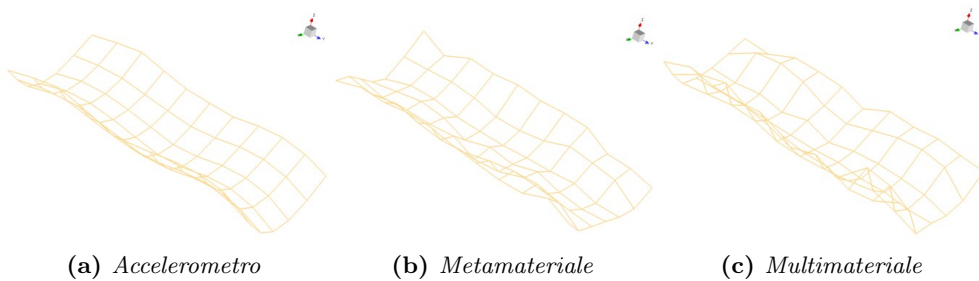


Figura 3.10: Modo 3 per ogni metodo di misura utilizzato.

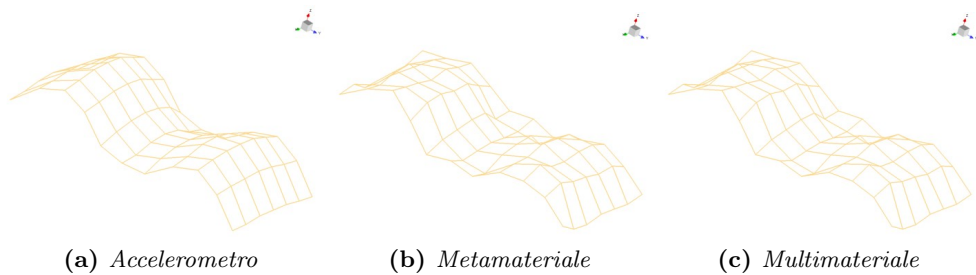


Figura 3.11: Modo 5 per ogni metodo di misura utilizzato.

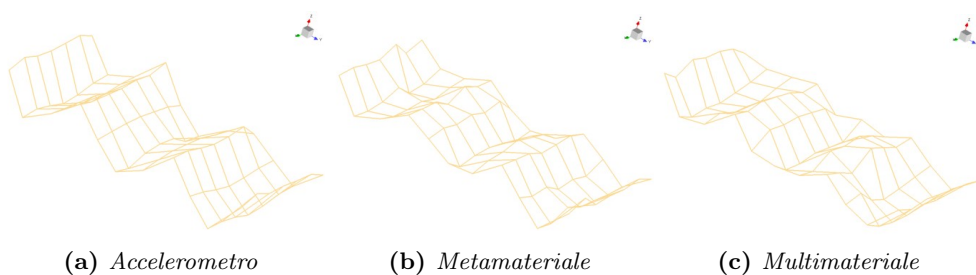
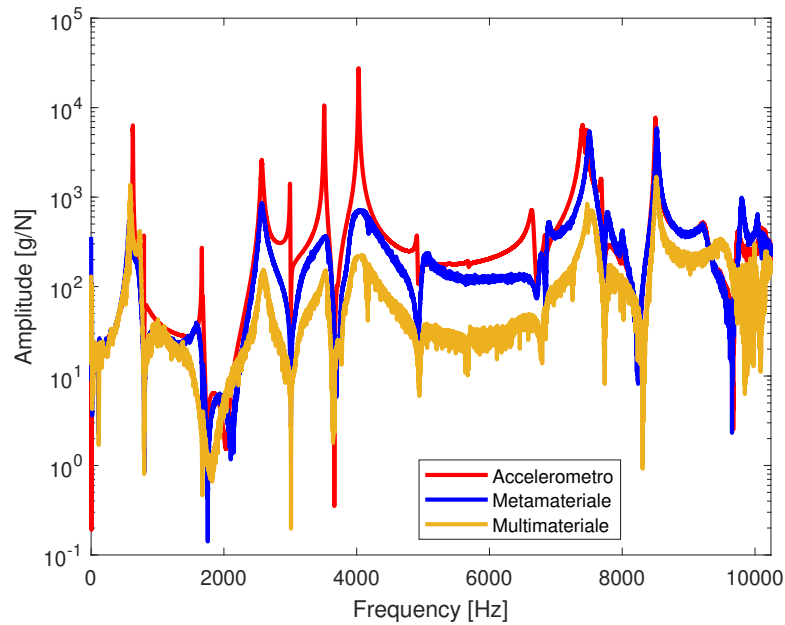
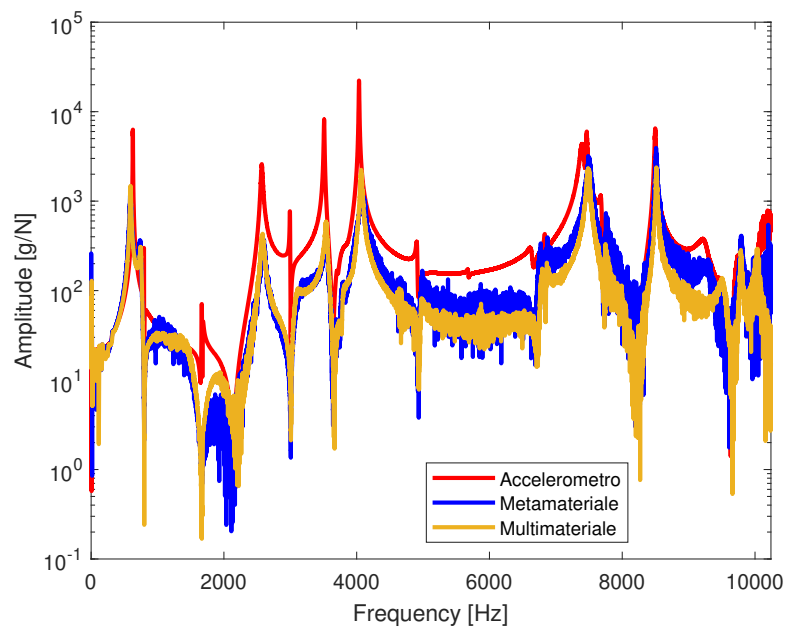


Figura 3.12: Modo 8 per ogni metodo di misura utilizzato.

I punti più sfavorevoli per le misurazioni con sonda sono quelli sui bordi della piastra ed è proprio qui che nasce il problema dello shift delle frequenze. Queste misure sono più smorzate della media e più rumorose.



(a) *FRF Transfer 1*



(b) *FRF Transfer 11*

Figura 3.13: Confronto delle FRF delle misure effettuate sui punti sfavorevoli per le sonde, che si ricordano essere quelli evidenziati in rosso sulla griglia della piastra. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale.

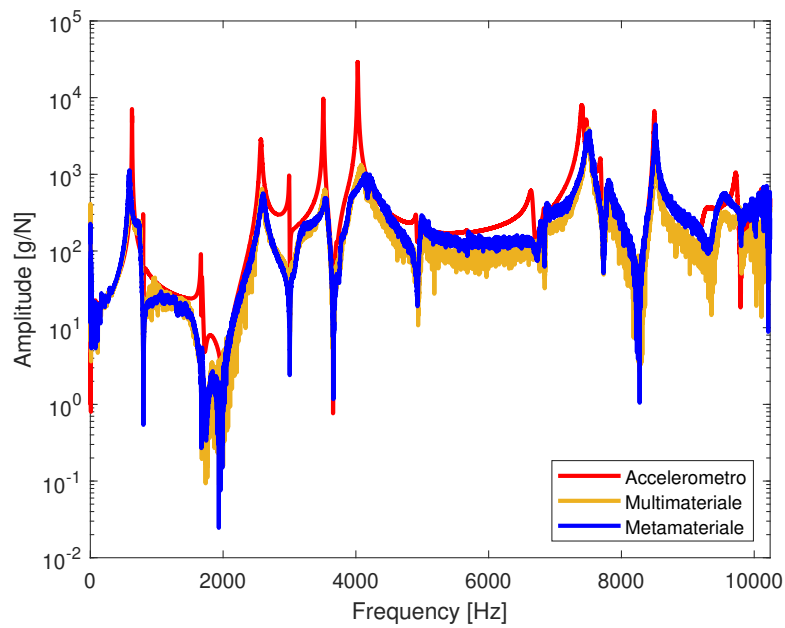
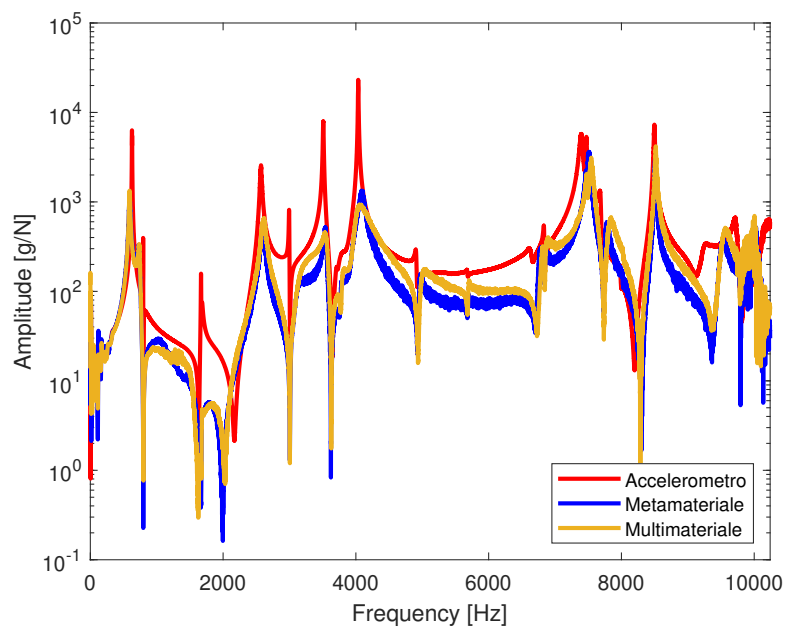
(a) *FRF Transfer 67*(b) *FRF Transfer 77*

Figura 3.14: Confronto delle FRF delle misure effettuate sui punti sfavorevoli per le sonde, che si ricordano essere quelli evidenziati in rosso sulla griglia della piastra. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale.

Ma le misure fatte ai bordi sono dei casi estremi; infatti, se si vanno a confrontare le misure fatte in altri punti si vede come l'utilizzo delle sonde non comprometta la misura. L'esempio migliore sono le misure fatte sul driving point dove, a parte un leggero smorzamento, si sovrappongono in maniera ottimale l'una sull'altra.

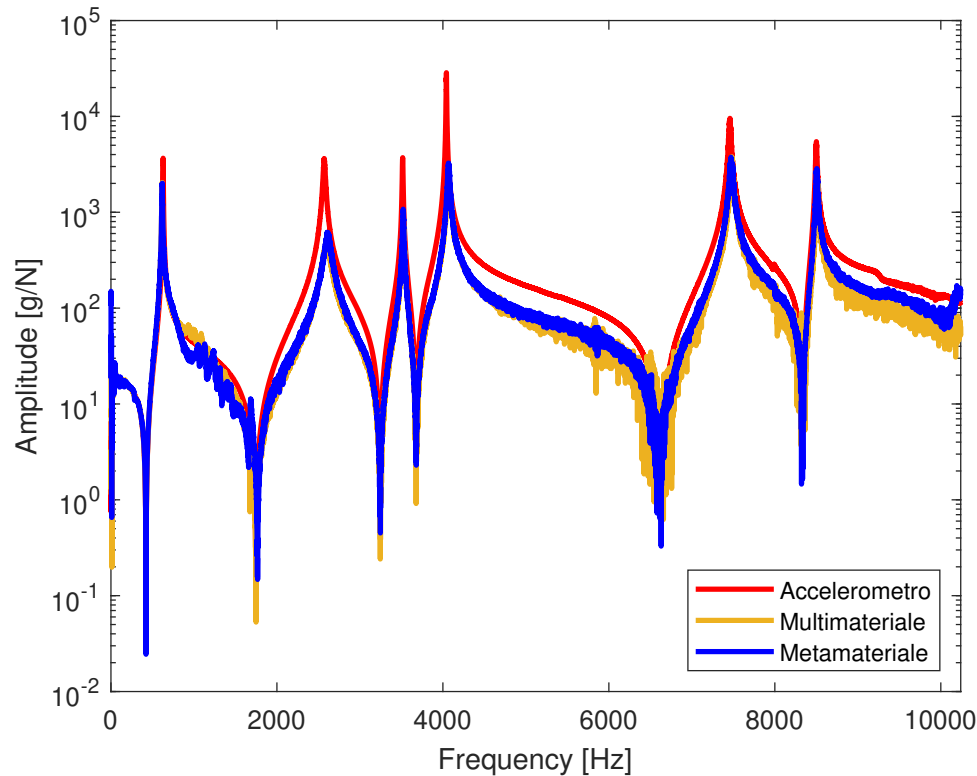


Figura 3.15: Confronto delle FRF per le misurazioni fatte sul driving point del sistema, cioè il punto 39 della griglia disegnata sulla piastrella. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale.

In questa prima prova si è visto come la labilità del sistema possa compromettere le misure fatte usando le sonde di vibrazioni. Sui punti 1, 11, 67 e 77 del sistema lo smorzamento delle vibrazioni è molto alto ed è causato, sia dal peso proprio della metastruttura, che dalla capacità dell'operatore di effettuare la misurazione. Inoltre sempre a causa della labilità del sistema si ha anche un fenomeno di shift dei picchi. Fatta eccezione di questi punti le misure fatte con le sonde non si discostano da quelle fatte con il metodo tradizionale.

Capitolo 4

Analisi disco freno

4.1 Introduzione

In questo capitolo si andrà a vedere come si comportano le sonde di vibrazione con le misure di oggetti in verticale. Verrà fatta l'analisi modale di un disco freno utilizzando i metodi che caratterizzano questa tesi.

4.2 Catena di misura

Per agitare il disco si usa uno shaker di piccole dimensioni collegato ad esso attraverso una cella di carico, che misura la forza in ingresso nel sistema, e uno stinger, utile per dare un'eccitazione verticale senza componenti a taglio o torsionali. Quest'ultimo viene incollato al disco utilizzando l'adesivo "x60". I trasduttori utilizzati in questa prova sono gli stessi del capitolo tre. Entrambi trasduttori ICP hanno le seguenti caratteristiche:

	Cella di Carico	Accelerometro
Tipo	208C03	352C23
Numero Seriale	LW55241	114014
Sensibilità	109 mV/N	5.11 mV/g

La scheda di acquisizione utilizzata è la Siemens Scadas XS, la stessa del terzo capitolo.

Il sistema di alimentazione dello shaker è identico a quello del capitolo tre; quindi, si avranno un generatore per generare il segnale e un amplificatore per regolarlo.

Il disco freno in questione è stato fissato su un blocco di cemento con l'utilizzo di tre viti M8; ha un diametro di 290 mm e uno spessore di 4.55 mm. Il disco è di alluminio fino al diametro di 190 mm, dopodiché è d'acciaio. Sulla sua superficie sono stati segnati 120 punti suddivisi su 4 circonferenze concentriche. I raggi delle quattro circonferenze sono: 87, 115, 130 e 142 mm. Ogni circonferenza ha 30 punti spazati con i seguenti angoli:

Punto	Punto	Punto	Punto	Angolo [0°]
1	31	61	91	0
2	32	62	92	10
3	33	63	93	23
4	34	64	94	36
5	35	65	95	50
6	36	66	96	60
7	37	67	97	70
8	38	68	98	80
9	39	69	99	93
10	40	70	100	106
11	41	71	101	125
12	42	72	102	135
13	43	73	103	145
14	44	74	104	155
15	45	75	105	168
16	46	76	106	181
17	47	77	107	195
18	48	78	108	205
19	49	79	109	215
20	50	80	110	225
21	51	81	111	238
22	52	82	112	251
23	53	83	113	265
24	54	84	114	275
25	55	85	115	285
26	56	86	116	295
27	57	87	117	308
28	58	88	118	321
29	59	89	119	335
30	60	90	120	345

Il punto evidenziato in verde, cioè il 90, è il driving point del sistema. Sulla sua superficie sono presenti anche dei fori che hanno causato la non regolarità del distanziamento dei punti delle circonferenze.



Figura 4.1: Disco freno usato per misure di vibrazione

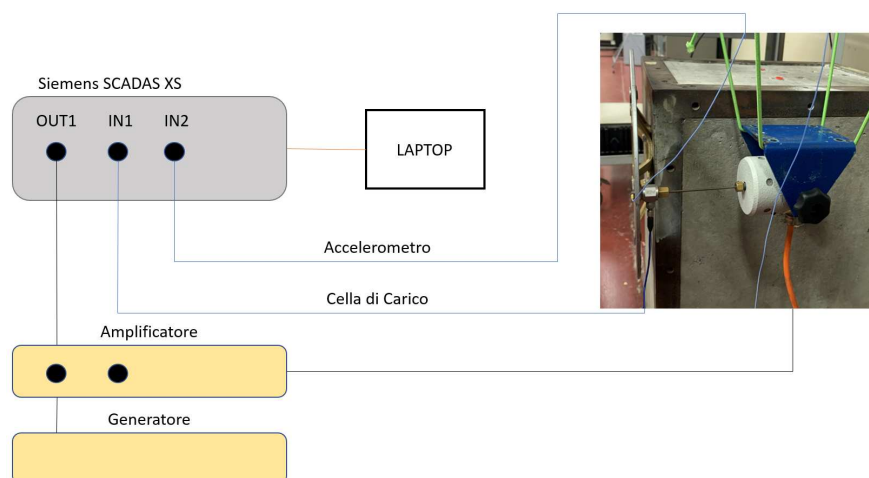


Figura 4.2: Schematizzazione catena di misura per disco freno

4.3 Misurazioni

Per poter procedere con le misurazioni si deve prima creare la geometria del disco. La geometria in questo caso sarà identificata dalle quattro circonferenze presenti sulla superficie del disco, e dai 120 punti situati su di esse.

Impostata la cella di carico, situata sul punto 90, come driving point del sistema e registrato l'accelerometro come input, si vanno a fare delle misurazioni di prova per regolare le impostazioni di misura quali:

Banda passante	4096 Hz
Risoluzione	1 Hz
Linee spettrali	4096

Fatto ciò, si può passare alle misurazioni di ogni punto delle circonferenze prima usando l'accelerometro, come viene fatto tradizionalmente, poi usando i prototipi di sonda vibrazionale.

4.3.1 Accelerometro senza sonda

In questa prima misurazione si procede in maniera tradizionale. Come nel capitolo tre, bisogna fare attenzione alla condizione di incollaggio dell'accelerometro facendo molta attenzione affinché il cavo del trasduttore non tocchi il disco in vibrazione. La misura si ripete per i 120 punti con una durata di 16 medie.

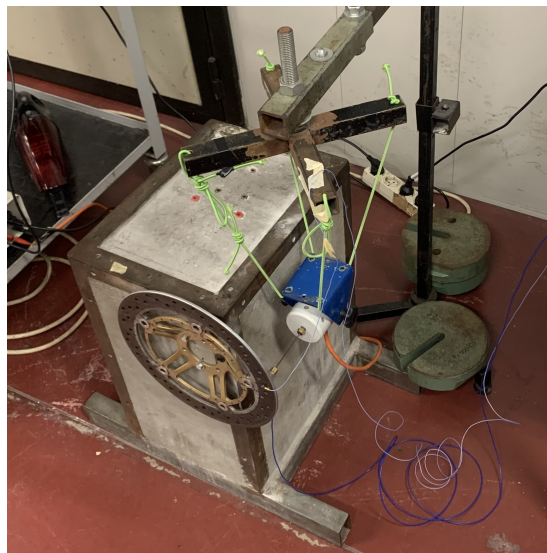


Figura 4.3: Set up per misure con accelerometro senza sonda

4.3.2 Accelerometro con sonda

Per la prima volta si utilizza la sonda per misurare le vibrazioni di un oggetto in posizione verticale. Dopo aver incollato l'accelerometro sulla base della metastruttura si procede con le misurazioni premendo la sonda sul disco agitato. Durante le misurazioni fatte utilizzando la sonda con il multimateriale, ricontrollando le misure si nota che il modo con cui si tiene la metastruttura varia il risultato delle misure. Notato ciò e terminate le misurazioni dei 120 punti si è deciso di provare a fare delle misurazioni usando diverse impugnature per vedere quale fosse quella che porta maggiori vantaggi. I risultati di queste prove si studieranno nel paragrafo di analisi dei dati. Per queste misure la differenza di peso delle due metastrutture si sente maggiormente; infatti, tenere il multimateriale premuto contro il disco evitando una sua flessione eccessiva è più difficile che per il metamateriale.

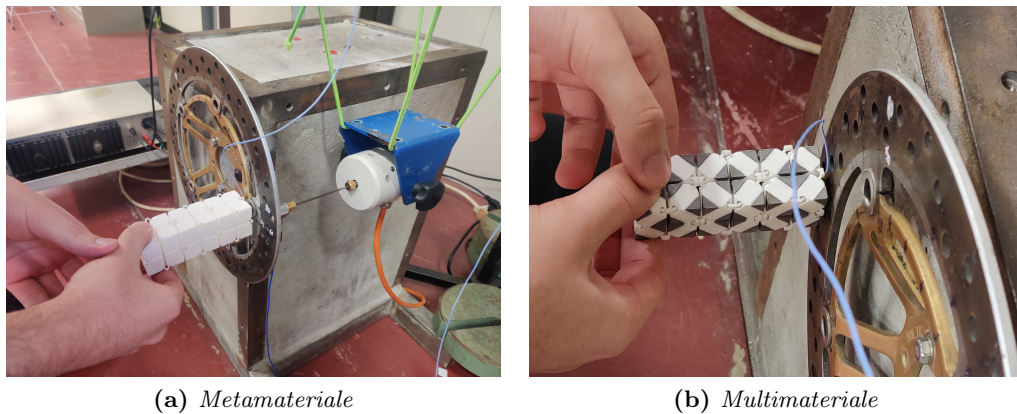
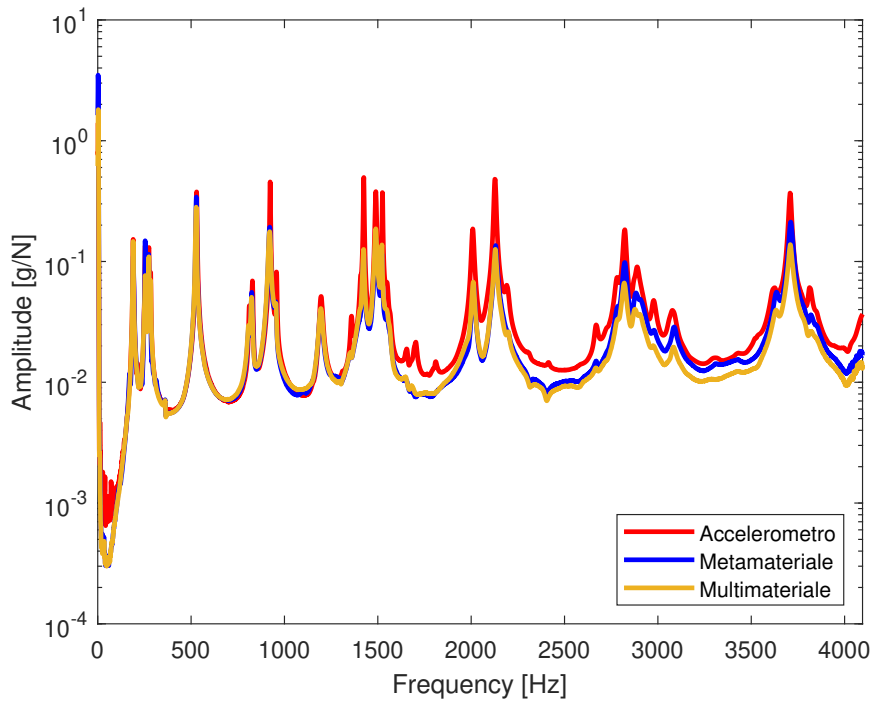


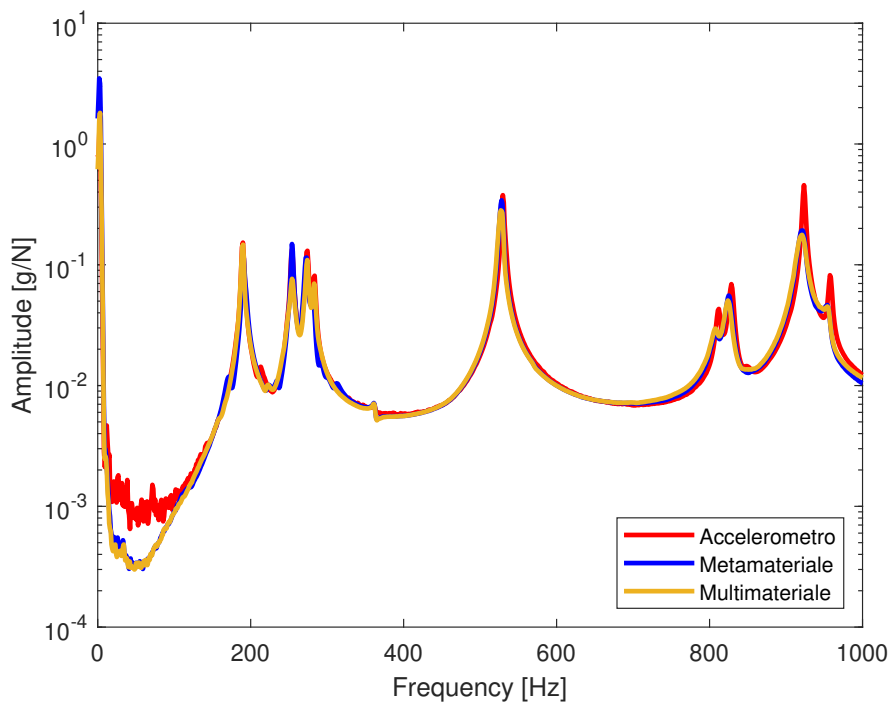
Figura 4.4: Set up per misurazioni con accelerometro incollato alle metasrtutture

4.4 Analisi dei dati

Come per la piastra anche qui è stata fatta un'analisi modale. La prima caratteristica che si guarda quando si va ad avviare l'algoritmo PolyMax è la qualità delle FRF somma. Si inizia quindi confrontando le tre FRF somma ottenute con i tre diversi metodi di misura rappresentate in figura 4.5. Si nota subito come il vincolo migliore di quest'ultimo sistema abbia influito positivamente sulle misurazioni fatte con i prototipi di sonda. Si ha infatti una sovrapposizione delle tre FRF fino ad una frequenza di circa 1000 Hz, dopodiché per le misure fatte con le metastrutture si nota uno smorzamento delle ampiezze che caratterizza le alte frequenze, causato dalla forza impressa dall'operatore per mantenere l'accelerometro in contatto con il disco.



(a) 0-4096 Hz



(b) 0-1000 Hz

Figura 4.5: Confronto FRF somma delle tre tipologie di misurazioni. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale. Il secondo grafico mostra come fino alla frequenza di 1000 Hz le tre FRF sono sovrapponibili.

Viste le FRF somma si vanno ad estrapolare i modi di vibrare del sistema utilizzando l'algoritmo PolyMax. Tali modi si individuano alle frequenze elencate nella seguente tabella, dove ω_n = frequenza naturale e ζ = rapporto di smorzamento.

Modo	Accelerometro senza sostegno		Accelerometro con sostegno metamateriale			Accelerometro con sostegno multimateriale		
	ω_n [Hz]	ζ [%]	ω_n [Hz]	ζ [%]	$\Delta\omega$ [%]	ω_n [Hz]	ζ [%]	$\Delta\omega$ [%]
1	189	0.37	190	0.63	0,53	189	0.66	0,00
2	253	0.44	254	0.37	0,40	253	0.76	0,00
3	273	0.18	272	0.31	-0,37	273	0.49	0,00
4	283	0.21	281	0.43	-0,71	283	0.56	0,00
5	529	0.14	526	0.10	-0,57	527	0.14	-0,38
6	812	0.30	803	0.34	-1,11	812	0.17	0,00
7	829	0.31	824	0.29	-0,60	823	0.41	-0,72
8	923	0.11	920	0.08	-0,33	920	0.11	-0,33
9	958	0.17	953	0.09	-0,52	954	0.13	-0,42
10	1191	0.42	1188	0.47	-0,25	1191	0.40	0,00
11	1307	0.28	1351	0.40	3,37	1352	0.40	3,44
12	1424	0.06	1422	0.10	-0,14	1418	0.08	-0,42
13	1490	0.15	1488	0.13	-0,13	1483	0.16	-0,47
14	1524	0.08	1522	0.13	-0,13	1521	0.12	-0,20
15	1550	0.34	1555	0.50	0,32	1551	0.58	0,06
16	1654	0.43	1649	0.42	-0,30	1648	0.59	-0,36

Si nota come le frequenze dei modi propri del sistema trovate con i tre diversi metodi di misura hanno uno scarto molto minore rispetto a quello che era per la piastra. Questo grazie alla quasi assenza dello shift delle frequenze il quale però si è mantenuto in alcuni punti per le alte frequenze. Tutto ciò si può vedere meglio dai due grafici in figura 4.5 che rappresentano le frequenze proprie del disco misurate con i tre diversi metodi di misura e, lo scostamento delle frequenze misurate con accelerometro e metasrttuture da quelle misurate con il metodo tradizionale.

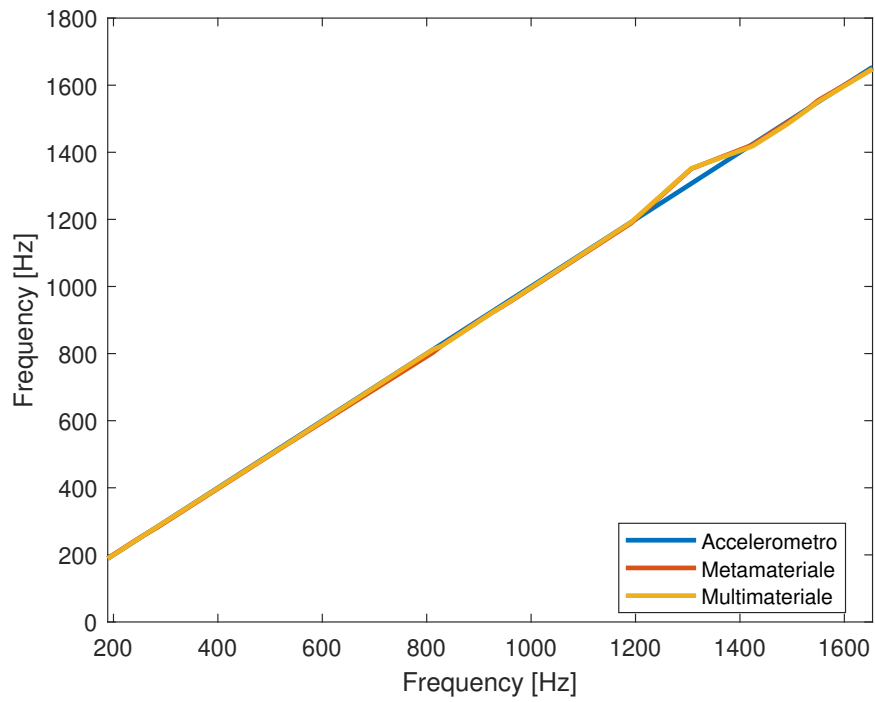
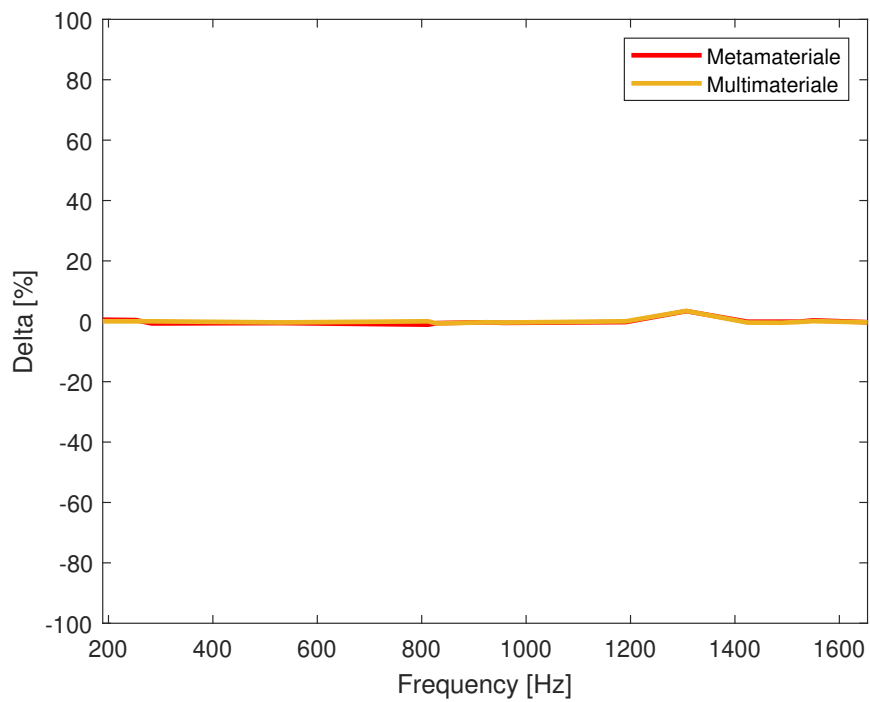
(a) ω_n (b) $\Delta\omega$

Figura 4.6: Nel primo grafico si mettono a confronto le frequenze proprie del disco misurate con i tre metodi di misura. Il secondo grafico mostra il delta in percentuale tra le frequenze proprie misurate con accelerometro e quelle misurate con metasrtutture.

Com'è stato fatto in precedenza si illustrano alcuni dei modi di vibrare del sistema:

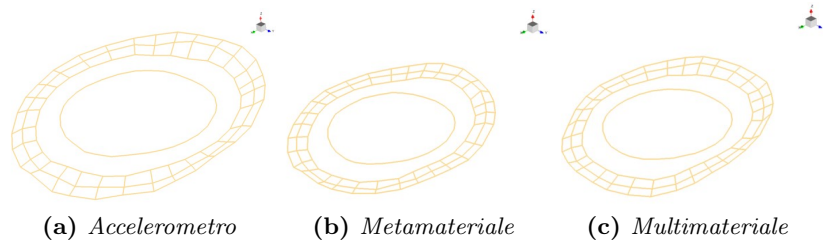


Figura 4.7: Modo 1 per ogni metodo di misura utilizzato.

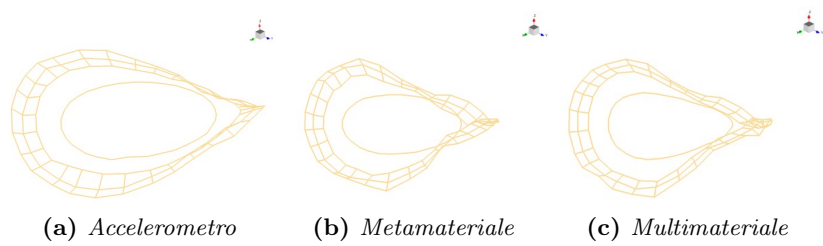


Figura 4.8: Modo 3 per ogni metodo di misura utilizzato.

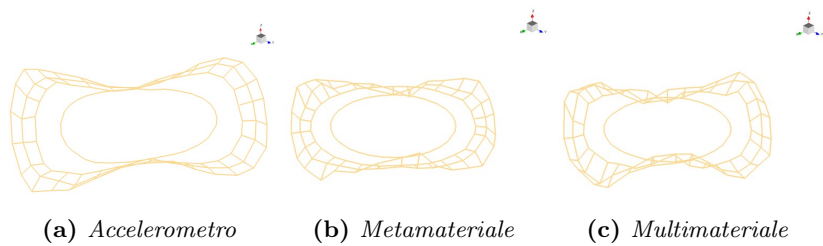


Figura 4.9: Modo 5 per ogni metodo di misura utilizzato.

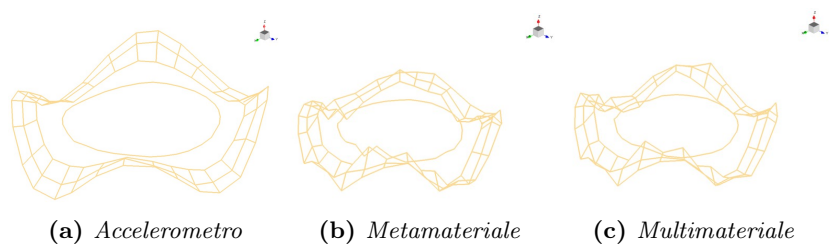
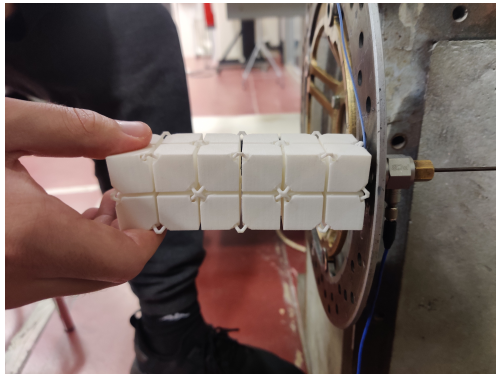
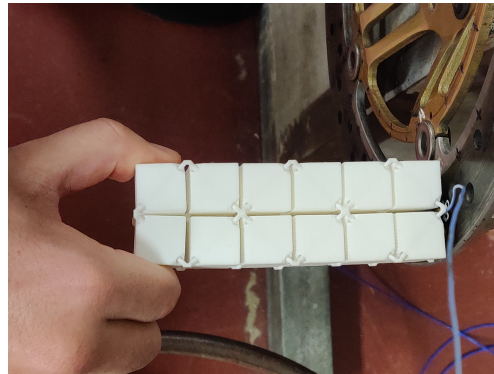


Figura 4.10: Modo 8 per ogni metodo di misura utilizzato.

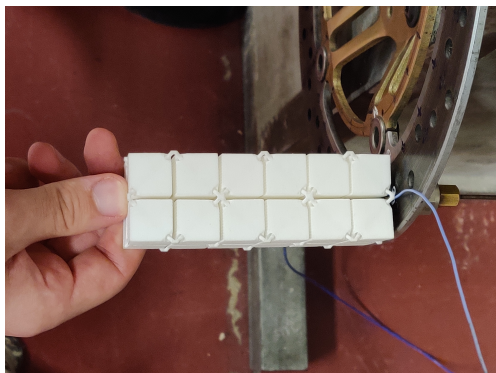
Durante le misurazioni con l'accelerometro e il multimateriale si è notata una differenza nelle misure in base al modo in cui si tiene la sonda. Per questo motivo sono state fatte cinque misurazioni di prova con cinque impugnature differenti sia usando il multimateriale che il metamateriale.



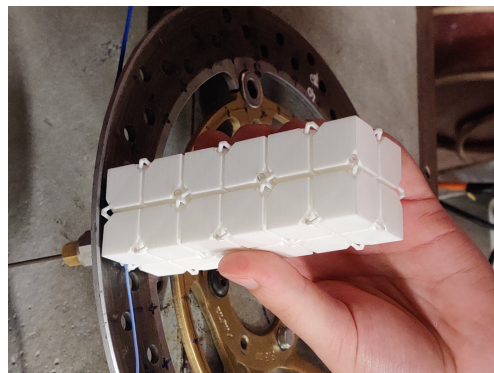
(a) *Impugnatura 1*



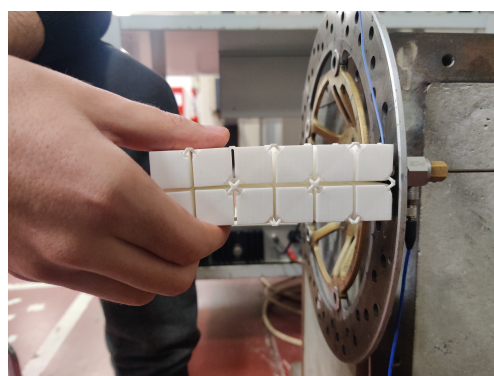
(b) *Impugnatura 2*



(c) *Impugnatura 3*



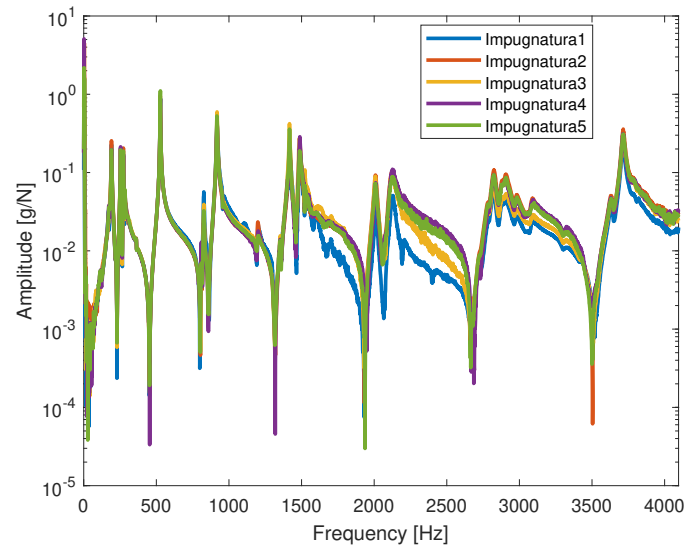
(d) *Impugnatura 4*



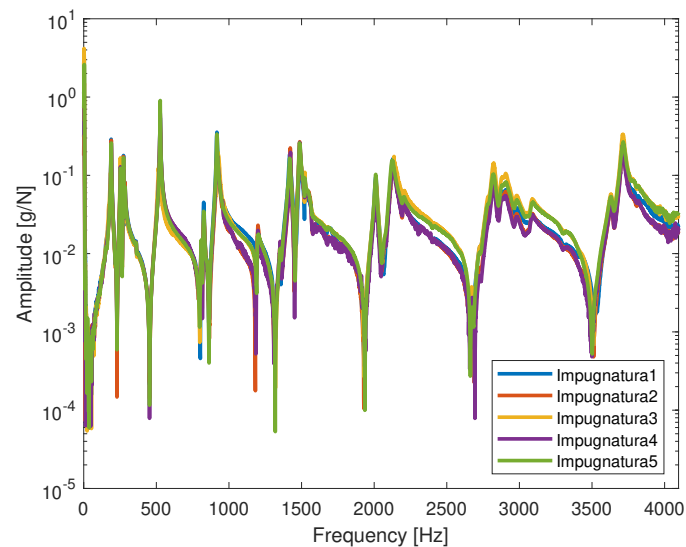
(e) *Impugnatura 5*

Figura 4.11: Impugnature testate durante le misurazioni del disco freno. La prima impugnatura consiste nel tenere la sonda alla estremità premendo sulle due facce opposte della sonda parallele al pavimento. La seconda è simile alla prima ma le facce premute sono quelle perpendicolari al pavimento. La terza consiste nel premere la sonda contro l'oggetto da misurare. Nella quarta si tiene la sonda al centro. Nella quinta si tiene la sonda sugli ultimi quattro scacchi della metastruttura.

Quello che è stato notato durante le misurazioni è stato confermato analizzando i dati ottenuti dalle misurazioni di prova con le diverse impugnature. Si vede dai grafici come, in base a quale impugnatura si utilizza la misura può venire più o meno smorzata e rumorosa. Allo stesso tempo si nota che con tutti i tipi di impugnatura si riescono a cogliere i picchi d'interesse.



(a) *Metamateriale*



(b) *Multimateriale*

Figura 4.12: Grafici delle impugnature testate durante le misurazioni del disco freno. La prima impugnatura è evidenziata in blu, la seconda in arancione, la terza in giallo, la quarta in viola e la quinta in verde.

Le misure svolte con le sonde in questo capitolo dimostrano che le metastrutture, se usate per misurazioni di sistemi rigidi e stabili, portano vantaggi in termini di tempistiche e comodità dell'operatore senza compromettere la qualità delle misure.

Capitolo 5

Analisi Macchine rotanti

5.1 Introduzione

L'analisi delle vibrazioni delle macchine rotanti è una parte importante della manutenzione e gestione della disponibilità delle attrezzature. Le vibrazioni delle macchine rotanti sono il movimento oscillatorio non intenzionale di una macchina rotante. Possono essere causate da problemi meccanici all'interno della macchina, come l'usura dei cuscinetti o l'equilibratura non corretta delle masse rotanti. Pertanto, monitorare e analizzare le vibrazioni delle macchine rotanti è importante per identificare eventuali problemi e intervenire tempestivamente per risolverli.

In questo capitolo si andranno a misurare le vibrazioni di una ventola, la quale è considerata come prova standard per le macchine rotanti.

5.2 Catena di misura

La tipologia di ventola è quella che si utilizza per il sistema di aerazione di un computer fisso. Il corpo rotante è composto da cinque pale contenute nell'involucro di plastica ancorato ad una piastra d'alluminio con quattro viti, una per ogni angolo.



Figura 5.1: Ventola usata per misure di vibrazione

Per misurare le vibrazioni in questa prova si utilizzano due accelerometri: uno viene utilizzato senza sonda come riferimento, mentre l'altro si utilizza assieme ai due prototipi di sonda.

L'accelerometro usato come riferimento collegato al canale uno della scheda di acquisizione è un trasduttore ICP con una sensibilità di 5 mV/g. Tipo e numero seriale dello strumento sono: 352C23 LW245617.

L'accelerometro incollato alle metastrutture è lo stesso utilizzato nel capitolo precedente ed è collegato al canale due della scheda di acquisizione. Tipo e numero seriale dello strumento sono: 352C23 114014. Il trasduttore è ICP con una sensibilità di 5.11 mV/g.

Essendo le vibrazioni da misurare molto minori di quelle della piastra, la scheda di acquisizione è stata cambiata con una più sensibile. La scheda in questione è la Siemens Scadas Mobile.

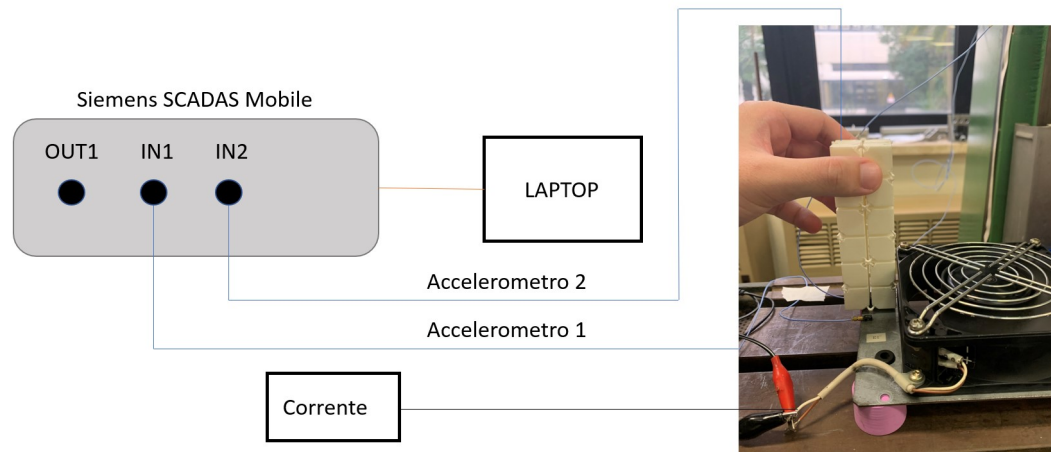


Figura 5.2: Schematizzazione catena di misura per ventola

5.3 Misurazioni

In questa prova non è stata fatta l'analisi modale della ventola, ma sono state misurate le vibrazioni, con la ventola in funzione, utilizzando contemporaneamente gli accelerometri con e senza metastruttura.

La misurazione con la sonda non è stata difficoltosa come lo era per la piastra di alluminio dato la maggiore rigidità del sistema vibrante e la sua maggiore stabilità, ricordando che la piastra era incollata ad uno stinger. Date le migliori condizioni dell'operatore si vedrà, dai dati, una migliore accuratezza e precisione delle misure effettuate.

Come nel capitolo precedente prima di iniziare bisogna fare delle misurazioni di prova per regolare le impostazioni di misura, quali:

Banda passante	8192 Hz
Risoluzione	1 Hz
Linee spettrali	8192

Le misurazioni con e senza sonda sono state fatte cercando di mantenere la distanza minima tra i due punti di interesse.

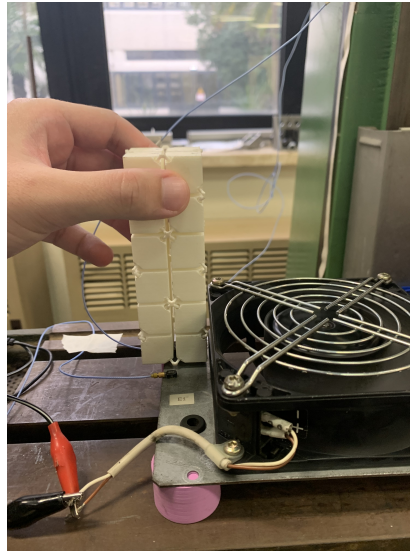


Figura 5.3: Set up per misurazioni su ventola

5.4 Analisi dei dati

Concluse le misurazioni si vanno a confrontare i dati ottenuti graficandoli con MATLAB.

Il primo confronto che si studia è quello delle FRF. Nella figura 5.3 si nota che sull'asse delle ascisse si ha un'unità di misura adimensionale; questo avviene perché a differenza del capitolo precedente, dove il confronto era tra cella di carico e accelerometro, in questo caso si hanno due accelerometri. Se le funzioni sono prossime alla linea orizzontale di funzione $y = 10^0$ allora le misure con e senza sonda sono simili e quindi possiamo ritenere le misurazioni fatte con la sonda affidabili. Come si vede dal grafico è proprio quello che avviene, in maggior modo all'interno nel range di misura dello strumento 0-1000 Hz.

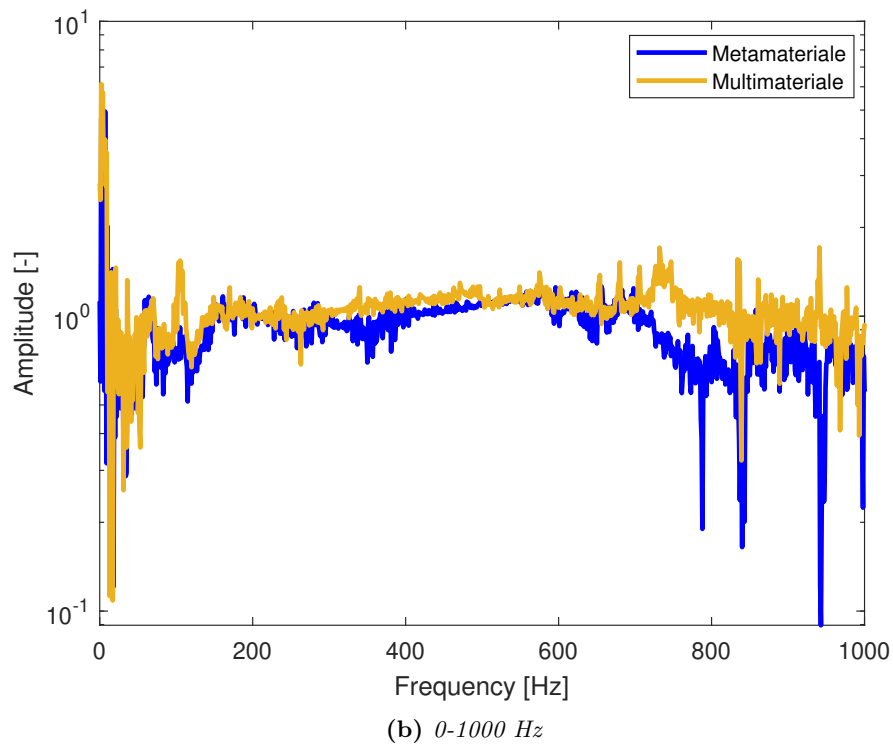
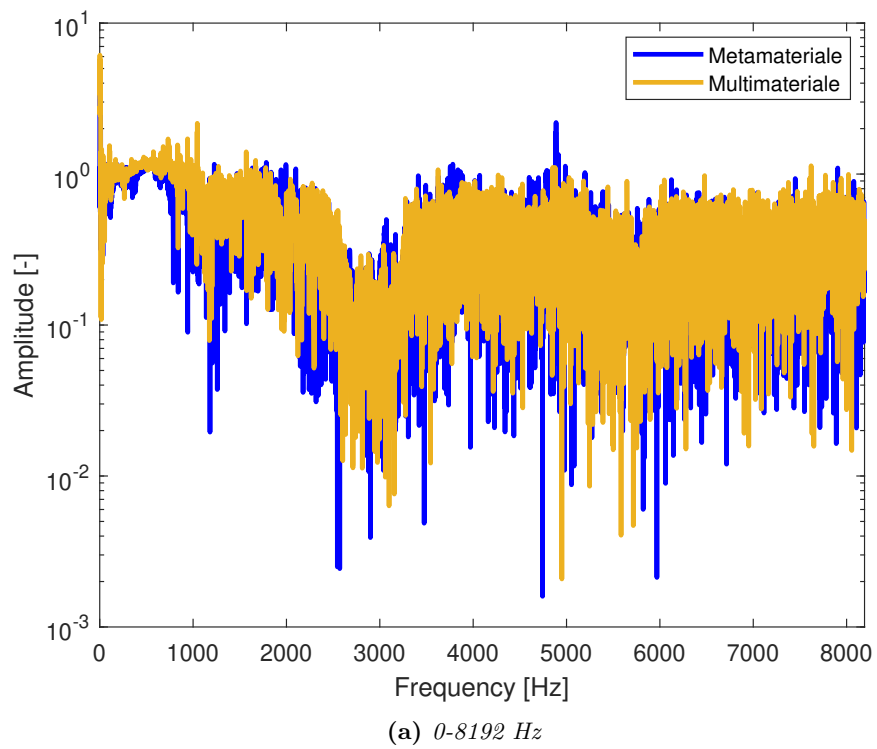
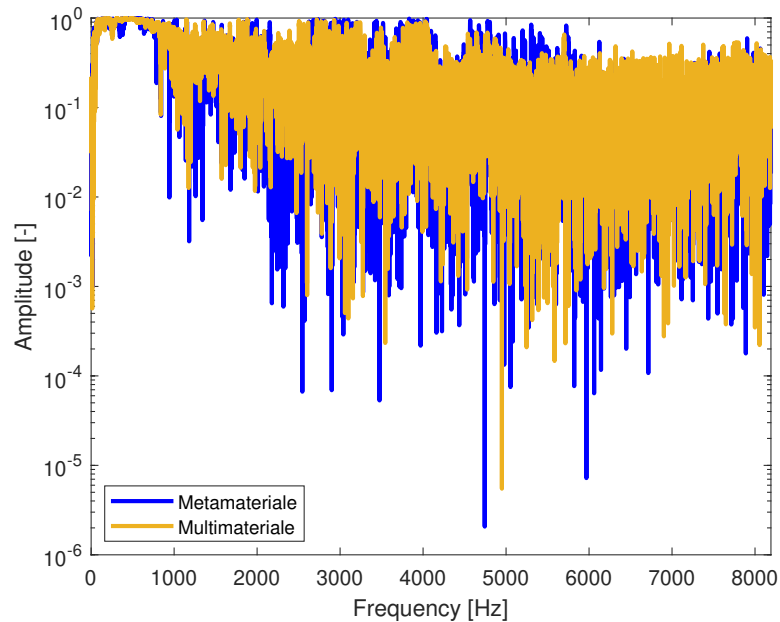
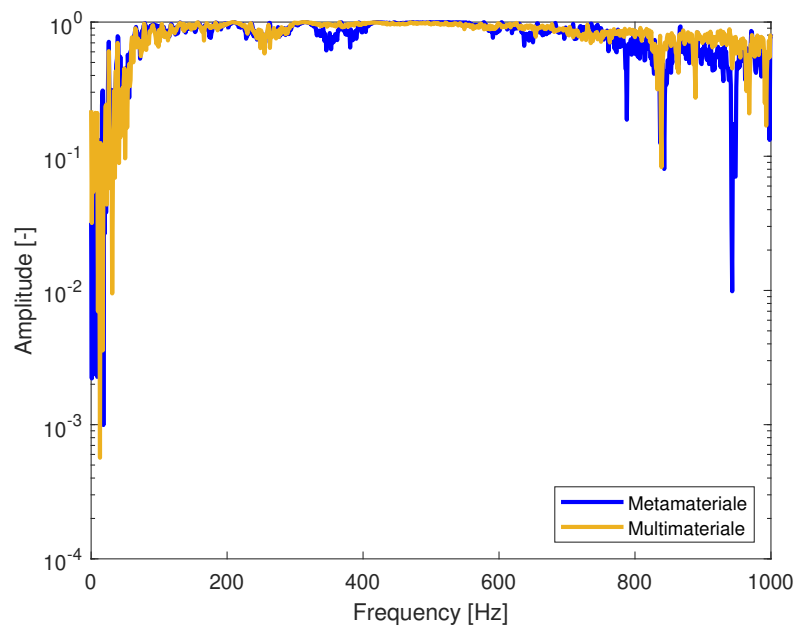


Figura 5.4: Confronto delle FRF con grafici aventi sull'ascisse il rapporto tra i due accelerometri. Il colore blu rappresenta il rapporto tra le FFT fatte usando l'accelerometro e l'accelerometro con il metamateriale, mentre il giallo quelle con accelerometro e accelerometro incollato al multimateriale.

Anche per la coerenza si ha il rapporto tra i due accelerometri sull'asse delle ascisse; quindi, l'affidabilità della sonda si verificherà allo stesso modo. Dal grafico si vede che le due funzioni sono prossime alla linea orizzontale $y = 10^0$ e quindi le coerenze con e senza sonda combaciano, soprattutto all'interno del campo di misura dello strumento.



(a) 0-8192 Hz

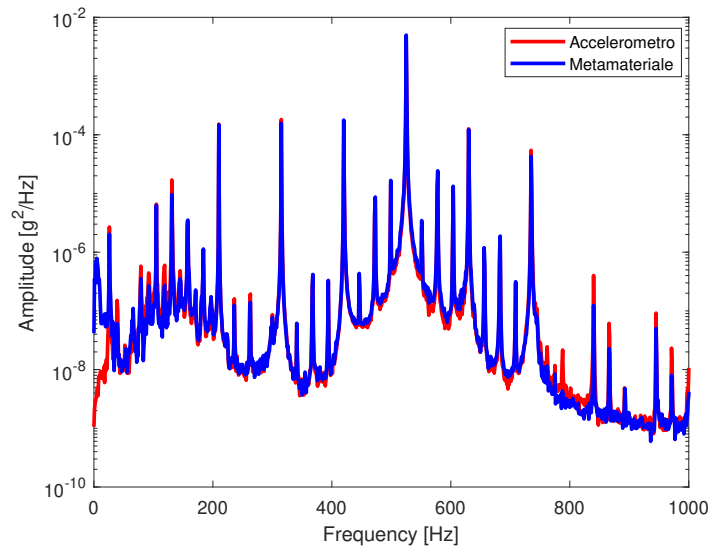


(b) 0-1000 Hz

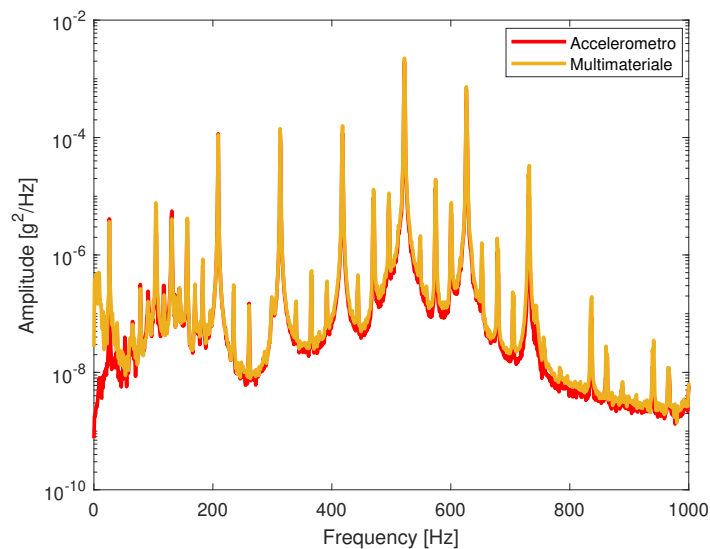
Figura 5.5: Confronto delle coerenze con grafici aventi sull'ascisse il rapporto tra i due accelerometri. Il colore blu rappresenta le misure fatte usando l'accelerometro con il metamateriale mentre il giallo quelle fatte con accelerometro incollato al multimateriale.

L'ultimo dato che si va a confrontare è la densità spettrale di potenza. I grafici riportati sono solamente quelli riguardanti il range di misura dello strumento.

Con entrambe le sonde di vibrazione si riesce ad acquisire in maniera ottimale la densità spettrale di potenza come si può vedere dalla sovrapposizione dei grafici accelerometro-sonda.



(a) *Metamateriale*



(b) *Multimateriale*

Figura 5.6: Confronto delle densità spettrali di potenza. Il rosso rappresenta le misurazioni fatte con solo accelerometro, il blu quelle con accelerometro incollato al metamateriale e il giallo quelle con accelerometro incollato al multimateriale.

Da quest'ultima analisi si vede con la sonda di vibrazione riesce a misurare al meglio oggetti rigidi e ben vincolati.

Capitolo 6

Conclusioni

In questa tesi, è stata fatta un'analisi comparativa con un metodo di misura tradizionale ed una proposta innovativa di metastruttura progettata come manico di sonda di vibrazione che ospita un accelerometro.

Nel terzo capitolo di questa tesi si è svolta l'analisi modale di una piastra con un vincolo molto labile, cioè lo stinger. Qui si sono visti i limiti delle sonde, le quali nelle misurazioni di alcuni punti hanno compromesso le misure causando alcuni shift di frequenza rispetto alle misure con metodo tradizionale che vanno a compromettere lo studio dei parametri modali fatto con l'algoritmo PolyMax.

Nel quarto capitolo si è svolta l'analisi modale di un disco freno posizionato in verticale e vincolato su un blocco di cemento. Grazie al vincolo più stabile la qualità delle misure fatte con le sonde è elevata. Inoltre il tempo impiegato per fare le prove con le sonde è stato minore di quello impiegato per le misurazioni con metodo tradizionale.

Nel quinto capitolo sono state fatte delle misurazioni di vibrazione su una ventola. La maggiore rigidità del sistema va a premiare l'utilizzo delle sonde, le quali misure sono coerenti con quelle fatte utilizzando un metodo tradizionale. In questo tipo di misurazioni il vantaggio di mobilità apportato dalle sonde non viene nullificato dalla qualità delle misure.

Si può evincere da questa tesi che per misure di oggetti ben vincolati e rigidi, le sonde apportino vantaggi in termini di tempo e semplicità di metodo non andando a diminuire la qualità della misura.

Si è quindi dimostrata la possibilità di utilizzare i metamateriali in ambito industriale, come ad esempio per la verifica del prodotto in una produzione in linea.

Bibliografia

- [1] A. Annessi et al. An innovative wide and low-frequency bandgap metastructure for vibration isolation. *Journal of Applied Physics*, 2022.
- [2] Adriana Passaseo et al. Metamateriali. *CNRNANOTEC Institute of Nanotechnology*, 2014.
- [3] D. J. Ewins. *Modal Testing: Theory, Praticce and Application*. Research Studies Press LTD, 2000.
- [4] Hasso Pratt Istitute. Metamateriali: macchine o materiali? *Plastix*, 2017.
- [5] Carlo Tomasello Luigi Caligaris, Stefano Fava. *Manuale di Meccanica*, seconda edition, 2017.