



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Sviluppo ed ottimizzazione di banchi per misure di vibrazione con  
accelerometri**

**Development and optimization of benches for vibration measurements  
with accelerometers**

Relatore:

Prof. Milena Martarelli

Tesi di Laurea di:

Emanuele Cercaci

Correlatori:

Ing. Sara Casaccia

Ing. Gianmarco Battista

A.A. 2021 / 2022



## ABSTRACT

In this paper it is described the process of design and construction of one bench for vibrations measurements. These activities were carried out during the internship at the laboratory of Mechanical and Thermal Measurements of the Polytechnic University of Marche.

The lessons of the course of Mechanical and Thermal Measurements, in which the ways of vibrating and the modal analysis have been mentioned, were the starting point. Then, during the internship, not only the vibrations measurements and the modal analysis, but also the process of building a completely new bench was analyzed in detail and in practice. About the construction of the bench the choice of components was fundamental, always trying to find the right compromise between performance and the economic component, making the most of usable material already present in the laboratories. Another key role was played by the acquisition and data processing using application software such as Testlab and MATLAB, thank to which it was possible to draw graphs and analyze the results.

## RIASSUNTO

In questo elaborato viene descritto il processo di progettazione e poi realizzazione di un banco per misure di vibrazione. Tale attività è stata svolta nel corso del tirocinio eseguito presso il Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche dell'Università Politecnica delle Marche.

Le lezioni del corso di Misure Meccaniche e Termiche, nelle quali sono stati accennati l'analisi modale e i modi di vibrare di un elemento, sono state il punto di partenza. Successivamente, durante il tirocinio, sono state analizzate nel dettaglio e nella pratica non solo i modi di vibrare e l'analisi modale, ma anche il processo di realizzazione del banco. Per quanto riguarda la costruzione del banco è stata fondamentale la procedura di scelta dei componenti, cercando di trovare il giusto compromesso tra le prestazioni e la componente economica, cercando di valorizzare il materiale già presente ed utilizzabile nei laboratori. Un'ulteriore parte fondamentale è stata quella dell'acquisizione ed elaborazione dei dati effettuata attraverso l'ausilio di software applicativi con Testlab e MATLAB, grazie ai quali è stato possibile tracciare grafici e analizzare i risultati ottenuti.

# SOMMARIO

ABSTRACT .....	3
RIASSUNTO .....	4
INDICE FIGURE.....	6
1. INTRODUZIONE .....	9
1.1 OBIETTIVI DELLA TESI .....	9
2. MATERIALI E METODI.....	11
2.1 BANCO DI MISURA .....	11
2.1.1 SENSORE ACCELEROMETRICO.....	14
2.1.2 SOFTWARE DI ACQUISIZIONE.....	15
2.1.3 ECCITATORE ACUSTICO .....	16
2.1.4 ECCITATORE MECCANICO .....	18
2.1.5 ELEMENTO DI PROVA.....	19
2.2 MISURAZIONI .....	20
3. METODOLOGIE PER L'ANALISI DEI DATI.....	21
3.1 OBIETTIVI DEL METODO DI ELABORAZIONE DATI.....	21
3.2 PROCEDURA ELABORAZIONE DATI.....	21
3.2.1 ELABORAZIONE FREQUENCY RESPONSE FUNCTION.....	21
3.2.2 ELABORAZIONE DEI MODI DI VIBRARE.....	22
4. RISULTATI .....	23
4.1 RISULTATI READFRF.....	23
4.2 RISULTATI READMODES .....	29
4.2.1 MODI DI VIBRARE ROVING ACCELEROMETER.....	29
4.2.2 MODI DI VIBRARE ROVING HAMMER .....	34
4.3 CONFRONTO MODI DI VIBRARE .....	39
4.4 TABELLA FREQUENZE .....	44
4.5 TABELLA SMORZAMENTO .....	45
5. CONCLUSIONI .....	46
6. BIBLIOGRAFIA.....	47

## INDICE FIGURE

Figura 2.1.1 – catena di misura .....	12
Figura 2.1.2 – banco di misura .....	13
Figura 2.1.3 – accelerometro miniaturizzato .....	14
Figura 2.1.4 - rappresentazione schematica accelerometro piezoelettrico .....	14
Figura 2.1.5 - eccitatore acustico .....	17
Figura 2.1.6 – eccitatore meccanico .....	18
Figura 2.1.7 – elemento di prova .....	19
Figura 4.1.1 – grafico di tutti i punti 3 sovrapposti .....	23
Figura 4.1.2 – sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita in “Roving Hammer” .....	24
Figura 4.1.3 - sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita in “Roving Accelerometer” .....	25
Figura 4.1.4 - sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita eccitando acusticamente l’elemento .....	26
Figura 4.1.5 – andamento dei picchi ottenuti dall’eccitazione acustica .....	27
Figura 4.1.6 – andamento mediato dei picchi ottenuti dall’eccitazione acustica.....	28
Figura 4.2.1 - mode shape RA n.1 .....	29
Figura 4.2.2 – mode shape RA n.2.....	30
Figura 4.2.3 - mode shape RA n.3 .....	31
Figura 4.2.4 - mode shape RA n.4 .....	32
Figura 4.2.5 - mode shape RA n.5 .....	33
Figura 4.2.6 - mode shape RH n.1 .....	34
Figura 4.2.7 - mode shape RH n.2 .....	35
Figura 4.2.8 - - mode shape RH n.3 .....	36
Figura 4.2.9 - mode shape RH n.4 .....	37
Figura 4.2.10 - mode shape RH n.5 .....	38
Figura 4.3.1 – confronto mode shape n.1 .....	39
Figura 4.3.2 – confronto mode shape n.2 .....	40
Figura 4.3.3 – confronto mode shape n.3 .....	41
Figura 4.3.4 – confronto mode shape n.4 .....	42
Figura 4.3.5 – confronto mode shape n.5 .....	43
Figura 4.4.1 – grafico a barre della differenza tra le frequenze in RH e RA .....	44
Figura 4.5.1 - grafico a barre della differenza tra lo smorzamento in RH e RA.....	45

## INDICE TABELLE

Tabella 1 – proprietà accelerometro.....	14
Tabella 2 – proprietà eccitatore meccanico.....	18
Tabella 3 – frequenze .....	44
Tabella 4 – smorzamento .....	45





# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 OBIETTIVI DELLA TESI

Questa tesi ha come obiettivo quello di progettare e costruire un banco di misura da utilizzare a scopi didattici per effettuare misurazioni di vibrazione su strutture dinamiche. L'interesse della ricerca si focalizza sull'analizzare i modi di vibrare dell'elemento di prova preso in considerazione, nello specifico una barra di alluminio, andando ad effettuare delle sollecitazioni acustiche e meccaniche e misurando la risposta attraverso sensori accelerometrici. Sono già stati usati sensori accelerometrici per l'analisi di vibrazione di strutture civili come ponti eccitati dal passaggio delle autovetture o per analizzare le vibrazioni a cui è sottoposta un'abitazione domestica in caso di terremoto.<sup>1</sup>

Il banco da progettare e costruire doveva essere "all-in-one", funzionante in autonomia, inoltre dovevano essere ottimizzati gli spazi, favorita la trasportabilità e l'intuitività dello stesso. Prima che fossero eseguite le misurazioni c'è stata una fase di progettazione e realizzazione del banco: andava creata una struttura che vincolasse l'elemento di prova ma che non ne avrebbe modificato la risposta ai vari impulsi che gli venivano forniti. La soluzione a cui si è giunti è stata quella di vincolare l'elemento preso in esame alla struttura costruita sul banchetto mediante quattro elastici. La struttura è solidale al banco per agevolare la sua maneggevolezza e trasportabilità, a tale scopo si è anche scelto di aggiungere delle maniglie. Una volta individuata e costruita la configurazione più adatta all'obiettivo finale si è passati alla scelta dell'elemento di prova. Sono state considerate barre di due diversi materiali: alluminio e fibra di carbonio. Dopo alcune valutazioni la scelta è ricaduta sulla barra di alluminio perché possedeva caratteristiche meccaniche più adatte alla prova a cui doveva essere sottoposta. Per quanto riguarda la scelta del sensore accelerometrico inizialmente si era valutato l'uso di un accelerometro comune ma la sua massa e il suo ingombro influivano troppo sulle misurazioni da eseguire, per tali motivi si è scelto di usare un accelerometro miniaturizzato piezoelettrico. Per quanto concerne il software di acquisizione è stato usato il software SIEMENS "Simcenter Testlab".

Un altro obiettivo era quello di analizzare i dati e interpretare i segnali ottenuti, nello specifico è stata effettuata un'analisi modale mediante il software Testlab e i risultati ottenuti sono stati visualizzati e confrontati mediante un codice realizzato in MATLAB. L'analisi modale è stata fatta includendo l'analisi tramite "Roving Hammer" e "Roving Accelerometer", due metodi solitamente utilizzati per eseguire questo tipo di analisi. La prova "Roving Hammer" è così usata e diffusa da essere stato studiato un sistema automatizzato in grado di colpire in modo autonomo e con una forza costante<sup>2</sup>. Il test definito "Roving Hammer" consiste nel fissare in un punto l'accelerometro e cambiare il luogo dove viene fornita l'eccitazione meccanica, mentre la prova "Roving Accelerometer" consiste nel mantenere fisso il punto dove viene impressa l'eccitazione meccanica ma cambiando la posizione dell'accelerometro. La terza ed ultima prova eseguita sull'elemento di prova, quella definita "Sound", consisteva nel posizionare un eccitatore acustico, che riproduceva rumore bianco, ad una distanza ben definita dall'elemento di prova ed isolato dal banco, in modo tale che le vibrazioni generate dall'eccitatore stesso non influissero sui modi di vibrare della barra di alluminio.

L'analisi dei dati ottenuti ha fornito i modi di vibrare della barra di alluminio <sup>3</sup>, mostrando inoltre come il diverso modo di eseguire la misurazione, in "Roving Hammer" o in "Roving Accelerometer", influisce sui modi di vibrare. Queste differenze sono dovute al posizionamento, fisso in un caso e mobile nell'altro, del sensore accelerometrico. Il test eseguito con l'eccitatore acustico ha reso possibile vedere le differenze tra i modi di vibrare dell'elemento di prova sottoposto ad una eccitazione meccanica e sottoposto ad una eccitazione acustica.

## 2. MATERIALI E METODI

È stato sviluppato un banco di misura con delle caratteristiche specifiche. In primo luogo è stato scelto l'elemento di prova, una barra in alluminio per le sue caratteristiche meccaniche e dinamiche. In secondo luogo sono stati scelti due strumenti per l'eccitazione: una cassa acustica ed un martello strumentato, in modo da poter analizzare la risposta dell'elemento di prova sia ad una eccitazione acustica che ad una eccitazione meccanica. In terzo luogo è stato scelto lo strumento per l'acquisizione del segnale, l'accelerometro. Inizialmente si pensava di utilizzare un accelerometro standard, successivamente la scelta è ricaduta su un sensore accelerometrico miniaturizzato perché meno impattante sulle misurazioni da effettuare. In quarto, ed ultimo, luogo è stato scelto il software con il quale acquisire le misurazioni: "Testlab". Uno dei software più avanzati in commercio che era in grado di acquisire sia eccitazioni acustiche che meccaniche.

### 2.1 BANCO DI MISURA

In Figura 2.1.1 viene mostrata la catena di misura con i componenti fondamentali per la realizzazione e l'uso del banco:

- Elemento di prova;
- Eccitatore acustico (speaker);
- Eccitatore meccanico (martello strumentato);
- Accelerometro miniaturizzato PCB modello n.352C23;
- Sistema di acquisizione (Digital-to-Analog Converter DAQ) SCADAS
- Pc collegato via ethernet allo SCADAS;
- Software di acquisizione ed elaborazione dati (per analisi modale) Testlab;

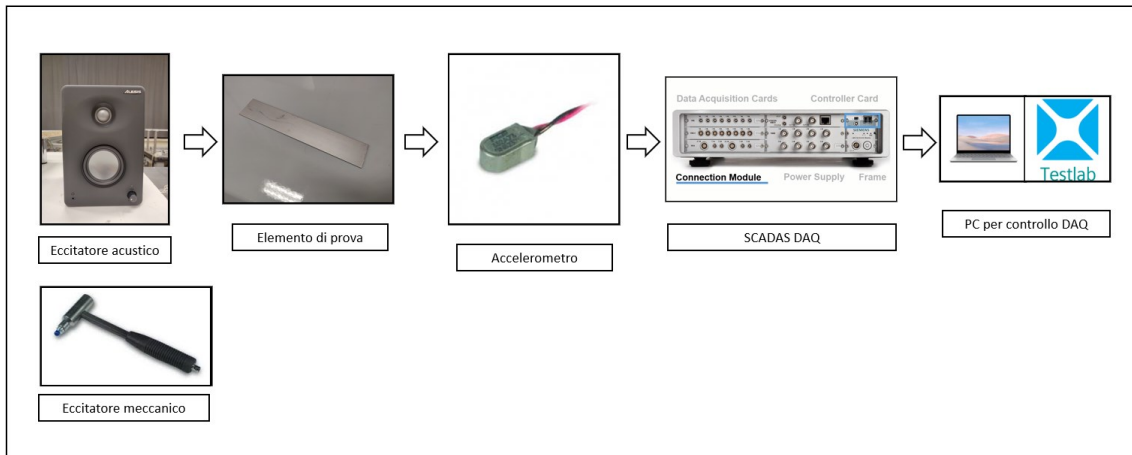


Figura 2.1.1 – catena di misura

L'accelerometro miniaturizzato può essere definito come il componente cardine del sistema. È stato scelto viste le dimensioni dell'elemento di prova, circa 20x5 cm, tra i sensori accelerometrici disponibili era il meno impattante sulle misure che dovevano essere effettuate.

Un ulteriore elemento fondamentale del banco di prova è il software di acquisizione Testlab. Attraverso una grafica semplice ed intuitiva si può inserire la geometria dell'elemento di prova e i punti di misura in modo tale da mostrare, terminate le misurazioni, una simulazione dei modi di vibrare dell'elemento preso in esame. Il software è molto avanzato ed è in grado di acquisire sia misurazioni di vibrazioni generate meccanicamente sia misurazioni di vibrazioni generate acusticamente, questa abilità del software ha permesso di usare lo stesso programma per entrambe le prove.

Inoltre attraverso il pc dove è installato il software di acquisizione veniva effettuata una prima valutazione della misura attraverso i parametri di coerenza e di conseguenza si sceglieva se ripetere o mantenere la misurazione.

Per la prova definita "Sound" viene usato come eccitatore acustico una cassa, che riproduce "white noise" e va ad eccitare l'elemento di prova. La cassa viene posta a 5 cm dall'elemento di prova, isolata dal banco in modo tale da non influire sul modo di vibrare della barra. Invece l'eccitazione meccanica viene ottenuta tramite il martello strumentato, il quale viste le modeste dimensioni dell'elemento in esame è dotato di una punta in gomma ed è di dimensioni molto limitate.

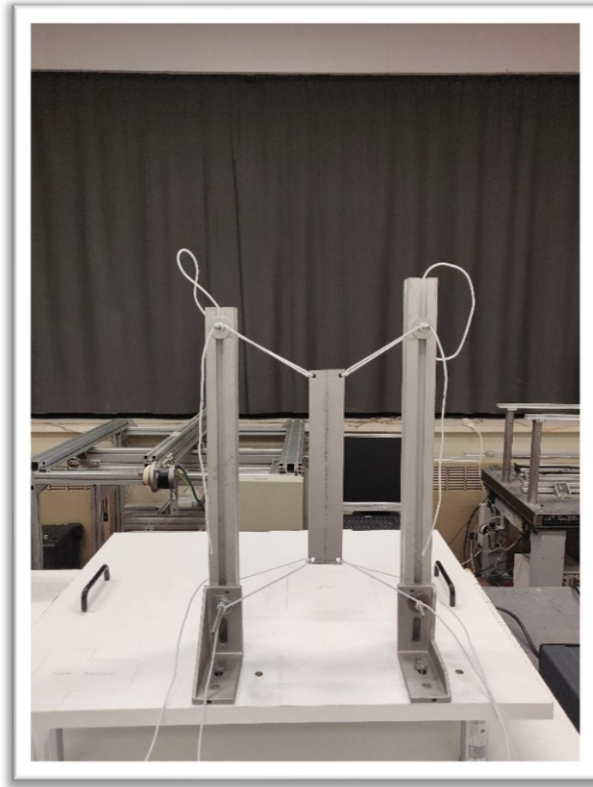
L'elemento di prova era un parallelepipedo di alluminio con uno spessore di 3 mm, su entrambe le facce è stata disegnata una griglia di 20 punti equidistanti. Questi ultimi, in una faccia dell'elemento di prova, indicano i punti dove dovrà essere posizionato l'accelerometro mentre nell'altra dove dovrà colpire il martello strumentato. L'elemento di prova è stato poi forato ai quattro vertici per permettere il fissaggio attraverso l'uso di quattro elastici alla struttura a sua volta fissata in modo solidale con il banco.

I rispettivi cavi hanno la funzione di collegamento tra i vari componenti. I cavi, molto delicati, dell'accelerometro e del martello strumentato dovevano essere collegati al software di acquisizione mentre per la prova definita "Sound" i cavi della cassa dovevano essere connessi ad un PC su cui era salvata la traccia audio di rumore bianco.

Dopo aver studiato varie configurazioni per il banco si è scelto di utilizzare questa perché era la migliore per utilità e scopo. Inizialmente era stato preso in considerazione di poggiare l'elemento di prova su un piano di gomma piuma in modo da poter approssimare la barra come libera, questa configurazione però peggiorava di molto la trasportabilità. La struttura

creata permette di vincolare saldamente l'elemento di prova attraverso gli elastici ma allo stesso tempo lo lascia libero di vibrare.

In Figura 2.1.2 viene mostrato il banco con l'elemento di prova in alluminio fissato, una volta posizionato l'accelerometro si può procedere con le misurazioni.



*Figura 2.1.2 – banco di misura*

### 2.1.1 SENSORE ACCELEROMETRICO

L'accelerometro usato è prodotto dalla "PCB Piezotronics" è il modello numero 352C23, mostrato in Figura 2.1.3. La Tabella 1 riporta tutte le proprietà del sensore accelerometrico usato per eseguire le prove. L'accelerometro fa parte del grande gruppo degli accelerometri piezoelettrici, in questo caso il materiale usato per l'elemento sensibile è la ceramica ma in commercio esistono anche accelerometri che hanno come elemento sensibile una lamina di quarzo. La ceramica come il quarzo è un materiale piezoelettrico: se sollecitato lungo l'asse elettrico si creano cariche di segno opposto sulle due facce proporzionali alla forza applicata. La funzione di trasferimento operativa del sensore è una combinazione del sistema massa-molla-smorzatore e dell'elemento piezoelettrico di trasduzione, che traduce l'accelerazione in tensione. La Figura 2.1.4 mostra una schematizzazione di come è costruito un accelerometro piezoelettrico, differisce leggermente da quello usato nella prova per via della filettatura di fissaggio che lo collega solidalmente con l'elemento mentre per le misurazioni effettuate sull'elemento di prova di alluminio è stata usata la cera d'api per il fissaggio.



Figura 2.1.3 – accelerometro miniaturizzato

Proprietà accelerometro <sup>4</sup>	
Sensibilità	$5 \frac{mV}{g}$
Range di misura	$\pm 1000 g$
Risoluzione	$0.003 g$
Range di frequenza	$2.0 - 10000 Hz$
Massa	$0.2 g$

Tabella 1 – proprietà accelerometro

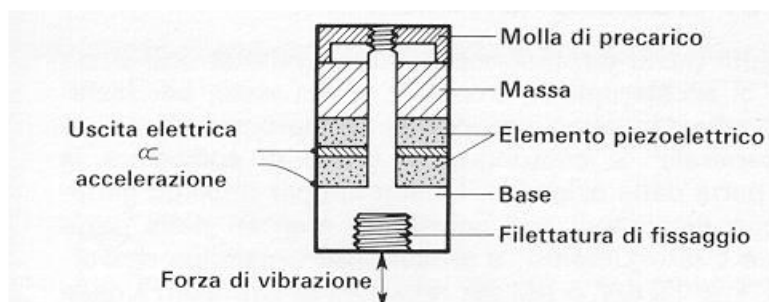


Figura 2.1.4 - rappresentazione schematica accelerometro piezoelettrici

### 2.1.2 SOFTWARE DI ACQUISIZIONE

Il software usato per effettuare le misure è “Testlab” un programma progettato e sviluppato da SIEMENS, in precedenza era noto come “LMS Test.Lab”. Permette di acquisire sia eccitazioni meccaniche sia eccitazioni acustiche, questa caratteristica è fondamentale e ha permesso l’uso dello stesso software per entrambe le prove effettuate. L’uso di due software diversi per le due eccitazioni avrebbe introdotto molta più variabilità e incertezza nei risultati ottenuti. Una volta collegati tutti i sensori e aperto il programma si sceglie il tipo di eccitazione. Viene sempre richiesta la geometria dell’elemento di prova e i punti di misura in modo tale che il software è in grado di ricavar un modello virtuale dell’elemento preso in esame e mostrare all’utente una simulazione dei modi di vibrare. Durante le prove l’interfaccia è semplice e intuitiva, permette di vedere i risultati in anteprima e scegliere se mantenere o scartare la misurazione effettuata. I dati ottenuti dalle prove sono facilmente esportabili in vari formati, tra cui “universal file” file .mat e molti altri, la scelta del tipo di file è a discrezione dell’utente anche in base al software che userà per l’interpretazione degli stessi.

### 2.1.3 ECCITATORE ACUSTICO

In Figura 2.1.5 viene mostrato la faccia anteriore e posteriore dell'eccitatore acustico usato per stimolare acusticamente l'elemento di prova attraverso "white noise". Dispone di diversi input: USB e connettori RCA, dalle porte presenti è di facile intuizione la possibilità di accoppiarla con un'ulteriore cassa. Lo speaker ha un cavo di alimentazione proprietario da collegare nella porta "power". La potenza massima fornita è di 20 W, è stata scelta una cassa con questa potenza perché è da una parte in grado di eccitare l'elemento di prova e dall'altra non è troppo ingombrante, la maneggevolezza e la trasportabilità sono requisiti fondamentali per la progettazione e la costruzione del banco. La cassa ha dimensioni 37.8 x 25.3 x 31.4 cm. Durante lo svolgimento della prova è posizionata a 5 cm dall'elemento di prova e su di un supporto che la isola dal banco. È stata presa la scelta di non posizionare la cassa direttamente sul banco perché in questo modo si è in grado di indirizzare il flusso acustico nel centro dell'elemento di prova, in aggiunta motivazione di maggiore importanza, le vibrazioni della cassa non vanno ad influire sulle vibrazioni dell'elemento preso in esame. Un'ulteriore caratteristica richiesta in fase di scelta dello speaker era che fosse Plug&Play, era fondamentale che non necessitasse della presenza di alcun applicativo sul PC a cui è collegata per poter funzionare; questa caratteristica permette di collegarla a qualunque computer e potenzialmente farle riprodurre un numero infinito di suoni.





Figura 2.1.5 - eccitatore acustico

#### 2.1.4 ECCITATORE MECCANICO

In Figura 2.1.6 viene mostrato il martello strumentato, modello 086E80 della “PCB Piezotronics”, usato per stimolare meccanicamente l’elemento di prova. Anche il martello strumentato, come dice il nome, è dotato di un sensore per la misura della forza fornita in ingresso. Proprio misurando la forza fornita in ingresso è possibile misurare le FRF che sono gli input per l’algoritmo di analisi modale. Viste le dimensioni e la massa, entrambe molto modeste, dell’elemento in esame anche il martello strumentato è molto compatto e va maneggiato con molta cura a causa della sua fragilità. Inoltre è dotato di una puntina in plastica, intercambiabile a seconda del materiale, che permette di smorzare il colpo e cerca di prevenire la creazioni di doppi colpi.



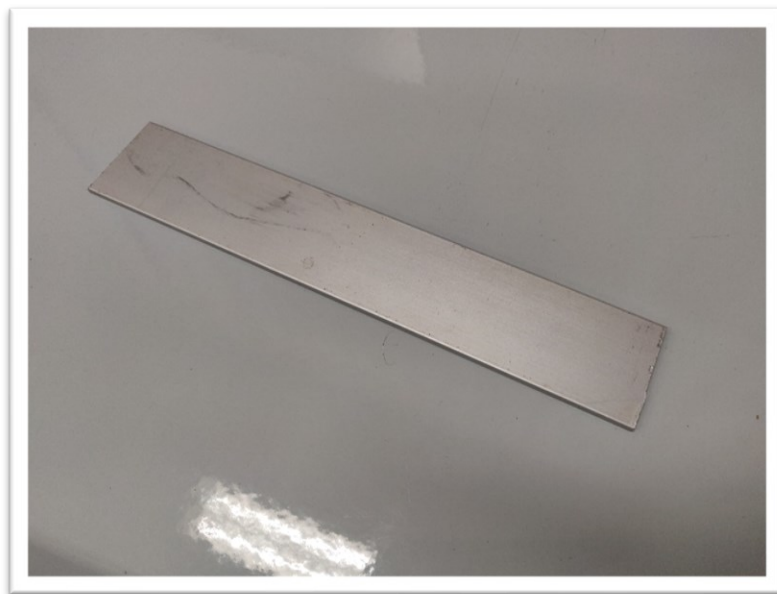
Figura 2.1.6 – eccitatore meccanico

Proprietà eccitatore meccanico <sup>5</sup>	
Sensibilità	$22.5 \frac{mV}{N}$
Range di misura	$222 N$
Massa	$4.8 g$
Frequenza di risonanza	$\geq 100 KHz$
Elemento sensibile	Quarzo

Tabella 2 – proprietà eccitatore meccanico

### 2.1.5 ELEMENTO DI PROVA

In Figura 2.1.7 è mostrato l'elemento di prova usato per effettuare le prove: una barra di alluminio di 200 x 50 x 3 mm e con una massa di circa 230 g. Queste dimensioni e massa così modeste hanno generato alcune difficoltà sia nella scelta dell'accelerometro sia durante le misurazioni, infatti era molto semplice saturare l'accelerometro o generare un doppio colpo con il martello strumentato. Per facilitare e favorire il posizionamento dell'accelerometro e il luogo preciso dove colpire con il martello strumentato è stata disegnata, su ambo, le facce una griglia di 20 punti equidistanti. Il fissaggio dell'elemento di prova alla struttura è dovuto ai dei fori praticati nelle vicinanze dei quattro vertici. L'ancoraggio avviene tramite l'uso di quattro elastici: permettono un facile montaggio e smontaggio dell'elemento di prova dalla struttura. Per fissare saldamente la barra di alluminio era stato valutato anche l'uso del filo da pesca ma risultavano inutilmente complicate e lunghe le fasi di montaggio e smontaggio. Prima di iniziare la prova è necessario valutare se l'elemento preso in esame è posizionato al centro della struttura, questo garantisce che i quattro elastici siano in tensione e con tensioni paragonabili.



*Figura 2.1.7 – elemento di prova*

## 2.2 MISURAZIONI

Una volta scelta e costruita la struttura di sostegno per l'elemento di prova si è proceduto con il collegamento dei sensori e la configurazione del software di acquisizione e del PC che li gestiva. Per quanto riguarda la scelta del sensore accelerometrico si è valutata la possibilità di usare un accelerometro comune, di dimensioni maggiori, esso avrebbe richiesto la riduzione dei punti di misura, da 20 a 10, inoltre avrebbe generato una notevole differenza di massa dell'elemento di prova influenzando notevolmente le misurazioni. Scelto l'accelerometro miniaturizzato viene collegato al sistema di acquisizione nel canale 1 mentre nel canale 2 viene collegato il martello strumentato.

Sull'elemento di prova viene poi disegnata una griglia di 20 punti equidistanti ambo i lati, viene poi fissato alla struttura attraverso 4 elastici ben tesi in modo da renderlo ben vincolato alla struttura ma allo stesso tempo libero di vibrare.

Per comprendere l'effetto dell'accelerometro sull'elemento in esame sono state effettuate due tipi di prove diverse, una in cui veniva spostato l'accelerometro, definita "Roving Accelerometer", e una in cui veniva cambiato il punto dove veniva impressa l'eccitazione meccanica, definita "Roving Hammer". Infine è stata fatta la prova con l'eccitatore acustico posto a 5 cm che riproduceva "white noise", definita "Sound".

La prova definita "Roving Accelerometer" consisteva nel posizionare l'accelerometro nel primo punto della scala disegnata sull'elemento di prova e dare l'impulso meccanico con il martello strumentato sempre nello stesso punto per 5 volte diverse. Con l'ausilio del software di acquisizione Testlab si era in grado di capire se l'eccitazione meccanica fornita era nei limiti oppure se non era stato saturato il sensore o se non era avvenuto il doppio colpo, qualora queste condizioni fossero state verificate si procedeva con il salvare la misura. Questo processo veniva ripetuto per altre quattro volte. Ottenute le 5 misurazioni l'accelerometro veniva spostato nel punto numero 2 e si ripeteva il procedimento fino al punto numero 20.

La prova definita "Roving Hammer" consisteva nel posizionare l'accelerometro in un punto fisso, il numero 3 della scala, e colpire nei 20 punti con il martello strumentato. Il modo di procedere è analogo al caso precedente. Attraverso il software si era in grado di capire se la misura andava scartata, nel caso fosse avvenuto un doppio colpo o fosse stato saturato il sensore, o se andava tenuta. Per ogni punto dovevano essere ottenute 5 misure diverse per poi passare al successivo.

Infine la prova definita "Sound" consisteva nel porre la barra di alluminio a 5 cm dall'eccitatore acustico che riproduceva "white noise". Alla scheda di acquisizione era collegato solamente l'accelerometro nel canale 1. Attraverso il software venivano acquisiti 27 secondi durante i quali la cassa riproduceva rumore bianco, si ripeteva l'acquisizione per ognuno dei 20 punti segnati nell'elemento di prova.

## 3. METODOLOGIE PER L'ANALISI DEI DATI

### 3.1 OBIETTIVI DEL METODO DI ELABORAZIONE DATI

L'analisi dei segnali accelerometrici ottenuti è stata effettuata attraverso due codici MATLAB :

- Elaborazione delle Frequency Response Functions (FRFs) o funzioni di risposta in frequenza;
- Elaborazione dei modi di vibrare.

Il primo programma, "readFRF" ha lo scopo di ottenere 4 grafici, 3 grafici dove vengono sovrapposte tutte le FRF delle prove effettuate in "Roving Hammer" "Roving Accelerometer" e "Sound"; infine un grafico dove vengono sovrapposte solamente le FRF misurate in corrispondenza del driving point (punto in cui la misura della risposta coincide con il punto di applicazione della forza) per le tre prove. In seguito nel codice c'è una sezione in cui viene individuato l'andamento dei picchi delle tre prove sovrapposte e successivamente generato un grafico.

Il secondo programma, "readModes", è stato scritto per visualizzare singolarmente e poi sovrapposti i modi di vibrare dei casi "Roving Hammer" e "Roving Accelerometer" in modo tale da poter eseguire un confronto, inoltre genera anche dei bar plot per la frequenza e per lo smorzamento.

### 3.2 PROCEDURA ELABORAZIONE DATI

#### 3.2.1 ELABORAZIONE FREQUENCY RESPONSE FUNCTION

Una volta eseguite le misurazioni inizia la fase di interpretazioni dei dati ottenuti, inizialmente il codice attraverso le funzioni implementate in MATLAB permette di caricare i files .mat esportati dal software di acquisizione "Testlab". I files importati sono suddivisi in 20 punti, uno per ogni punto della griglia disegnata sulla barra di alluminio, il primo grafico che si ottiene mediante il lancio di questo codice sovrappone il punto numero 3 di ogni prova effettuata. Si è scelto il punto numero 3 perché costituisce il "Driving Point" dell'elemento di prova. Materialmente la scelta di questo punto nel codice è stata ottenuta attraverso l'introduzione di una variabile, "n", a cui è stato assegnato il valore 3. Si è adottata questa tecnica perché risulta formalmente più corretta dal punto di vista di pulizia del codice ed inoltre permette una facile e rapidissima modifica. Gli altri tre grafici prodotti dal programma consistono nella sovrapposizione di tutti e 20 i punti delle singole prove. Nella parte finale del codice viene introdotto l'uso del cursore, manualmente devono essere individuati i sei picchi in modo da plottarne l'andamento. Come è facilmente intuibile il posizionamento manuale del cursore potrebbe risultare impreciso per questo motivo è stata introdotta la funzione "mean" che esegue una media tra le 5 linee precedenti e successive del picco, in modo da rendere più preciso e veritiero il posizionamento del cursore.

### 3.2.2 ELABORAZIONE DEI MODI DI VIBRARE

Per analizzare i modi di vibrare si è preferito scrivere un nuovo codice così da essere più chiaro anche per un eventuale fruitore successivo. Attraverso l'uso di opportune funzioni, è possibile caricare i files .mat esportati dal software di acquisizione "Testlab". I files vengono aperti e vengono estrapolate le frequenze gli smorzamenti e i modi di vibrare sia per il caso "Roving Accelerometer" sia per il caso "Roving Hammer". Il codice procede con il graficare i cinque modi di vibrare sia per il caso "Roving Accelerometer" sia per il caso "Roving Hammer", questi grafici permettono di visualizzare singolarmente ogni modo. Solamente dopo aver controllato che tutti e cinque i modi di vibrare per ognuno dei due casi siano plausibili si procede con il sovrapporre i rispettivi grafici, in modo da valutare le differenze derivanti dai due diversi tipi di prova. Per rendere ancora più di semplice e chiara intuizione l'andamento della differenza delle frequenze e dello smorzamento, precedentemente calcolate, nei due casi è stato usato un grafico a barre generato con la funzione "bar".

## 4. RISULTATI

### 4.1 RISULTATI READFRF

La Figura 4.1.1 mostra due grafici, entrambi hanno sull'asse delle ascisse la frequenza in hertz mentre nel grafico superiore sull'asse delle ordinate c'è l'ampiezza della FRF in grammi su newton e l'ampiezza della FFT in grammi invece in quello inferiore la fase in radianti. Questi due grafici mostrano la sovrapposizione di tutti i punti 3 delle tre diverse prove effettuate. La scelta di mostrare la sovrapposizione dei risultati delle prove nel punto 3 è dettata dal fatto che questo punto è il "Driving Point" del sistema.

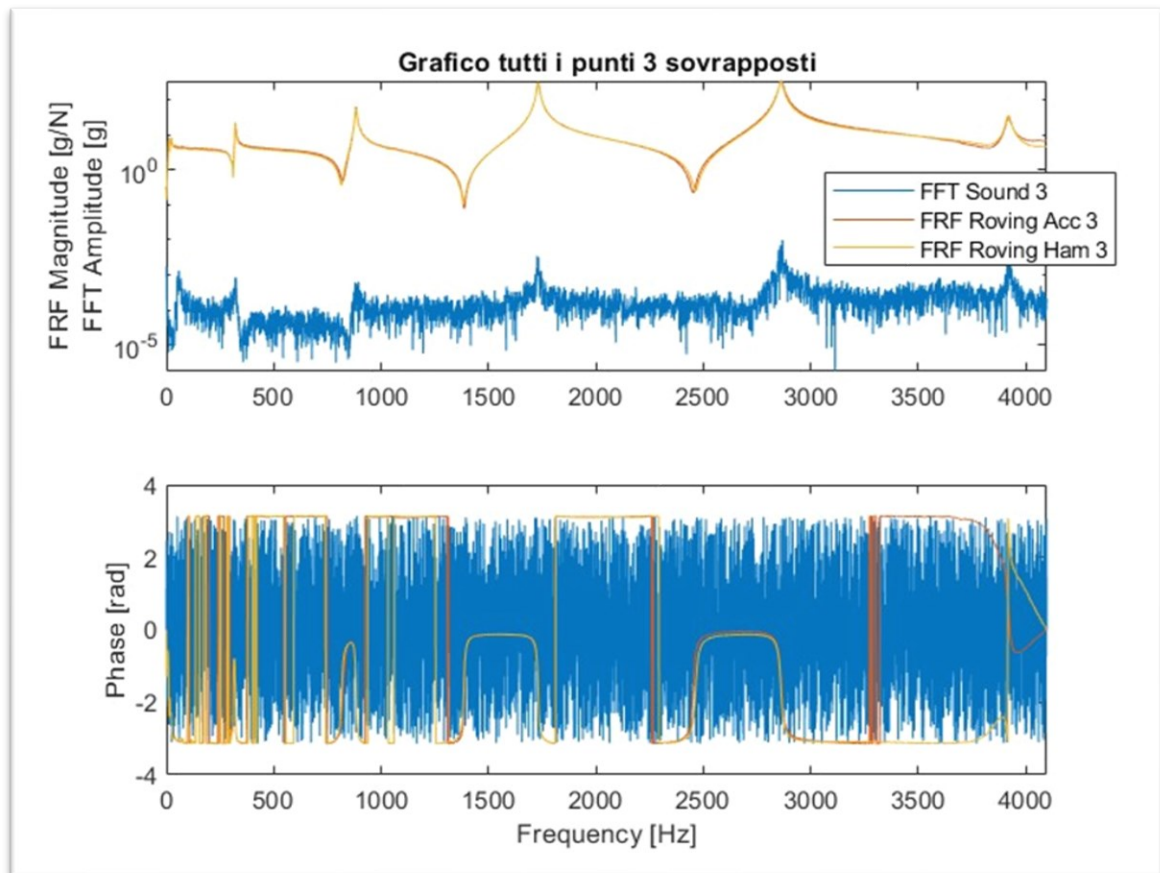


Figura 4.1.1 – grafico di tutti i punti 3 sovrapposti

La Figura 4.1.2 mostra due grafici, entrambi hanno sull'asse delle ascisse la frequenza in hertz mentre nel grafico superiore sull'asse delle ordinate c'è l'ampiezza del FRF in grammi su newton invece in quello inferiore la fase in radianti. Nel grafico vengono sovrapposti tutti i risultati della prova "Roving Hammer". Si può notare che tutti i punti tendono ad avere 5 picchi in comune.

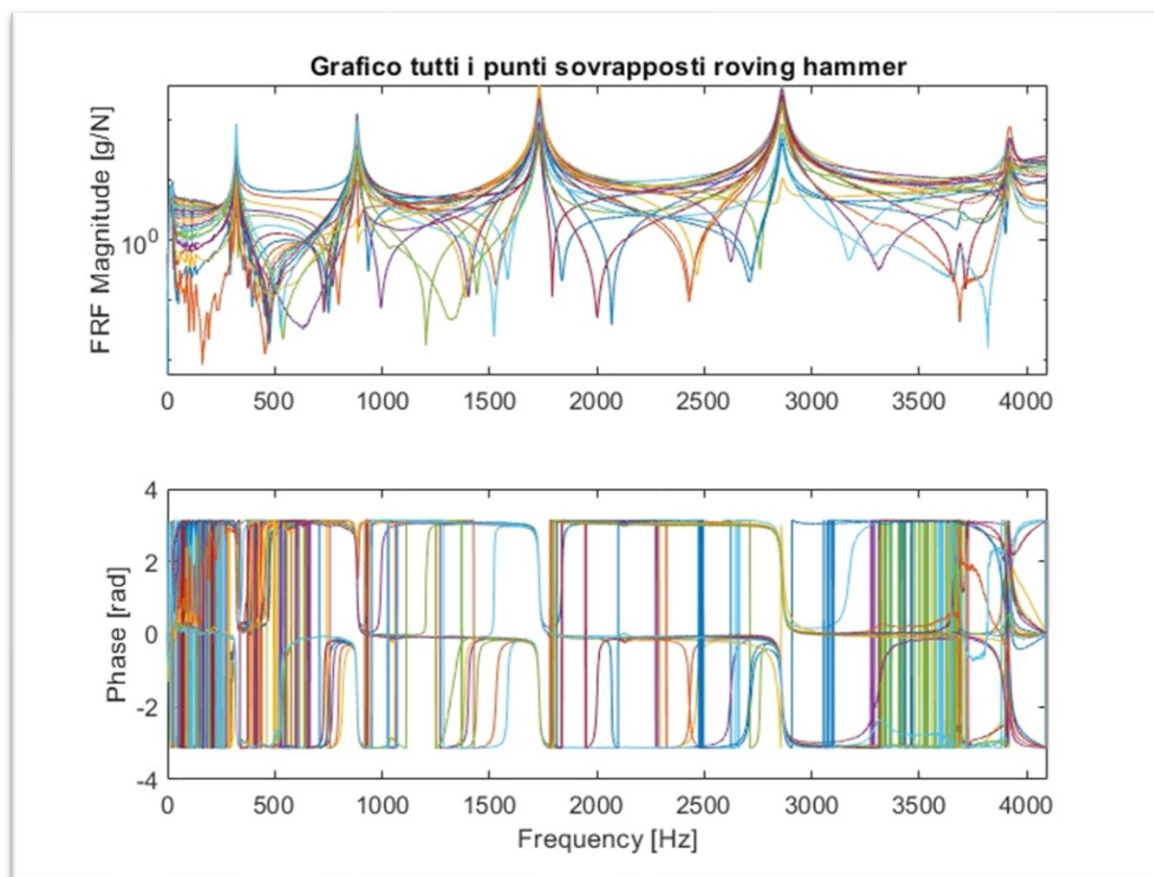


Figura 4.1.2 – sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita in "Roving Hammer"



La Figura 4.1.3 mostra due grafici, le etichette e le unità di misura sugli assi sono le stesse della figura Figura 4.1.2. Nel grafico vengono sovrapposti tutti i risultati della prova "Roving Accelerometer". Anche questa figura mostra in alto l'ampiezza dei segnali ed in basso la fase, come nel caso precedente si possono notare i 5 picchi in comune tra tutti i punti. Come è possibile notare tra le FRF misurate con il test "Roving Hammer" e le FRF misurate con il test "Roving Accelerometer" non si notano differenze evidenti.

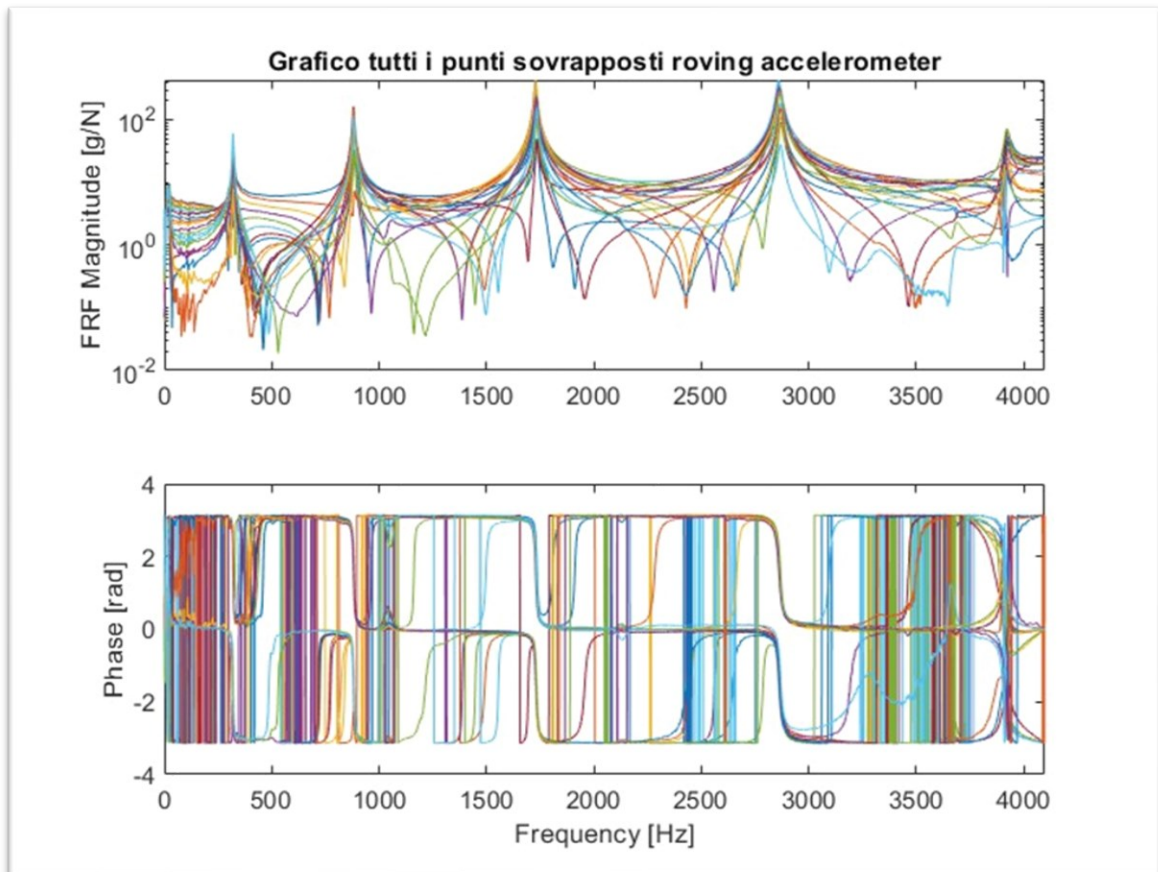


Figura 4.1.3 - sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita in "Roving Accelerometer"

La Figura 4.1.4 mostra due grafici, entrambi hanno sull'asse delle ascisse la frequenza in hertz mentre nel grafico superiore sull'asse delle ordinate c'è l'ampiezza della FFT in grammi invece in quello inferiore la fase in radianti. Il grafico mostra la sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita sottoponendo l'elemento di prova al white noise per 27 secondi. Questo grafico è necessario per individuare i picchi che poi verranno marcati e il loro andamento mostrato in altri due grafici, Figura 4.1.5 e Figura 4.1.6. Come è visibile dalla comparazione dei grafici, Figura 4.1.2 Figura 4.1.3 Figura 4.1.4, nel test effettuato con eccitazione acustica le FFT della risposta mostrano dei picchi risonanza affogati nel rumore in quanto l'energia fornita alla struttura è molto limitata.

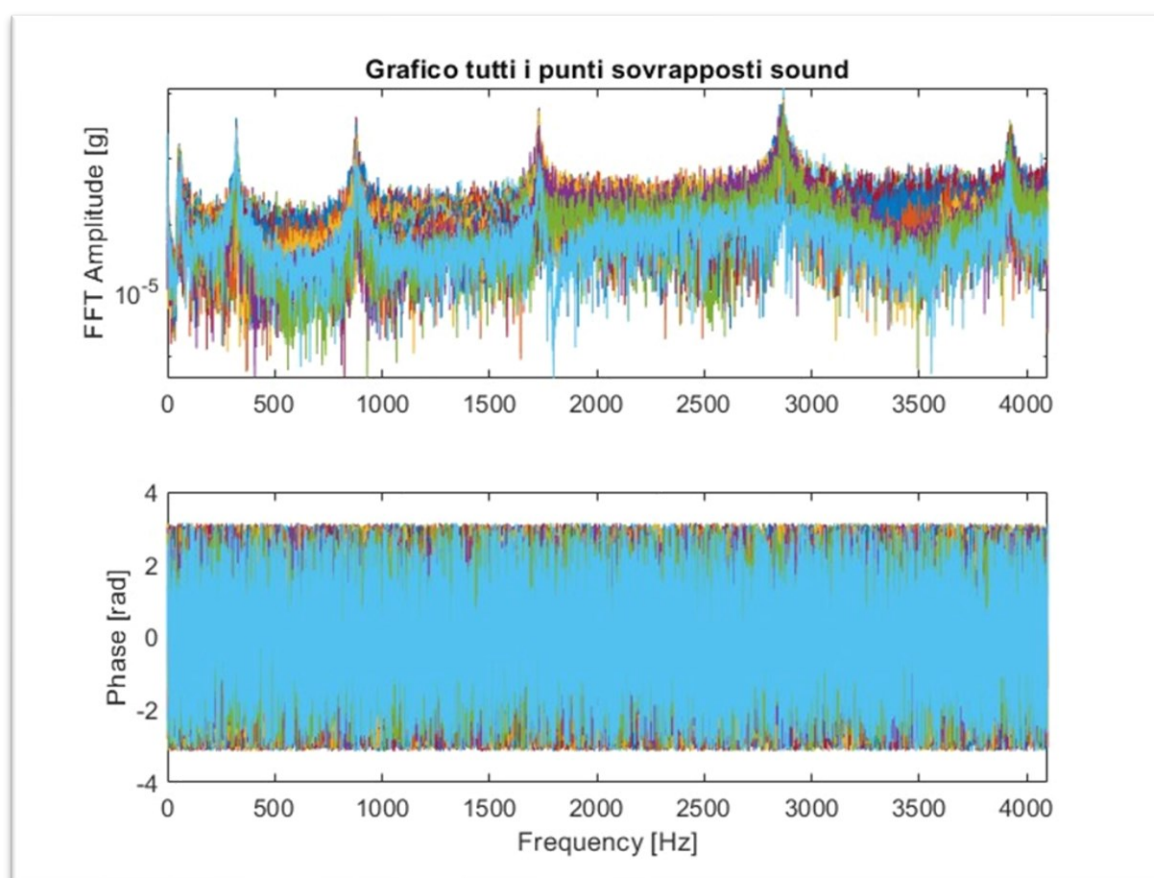


Figura 4.1.4 - sovrapposizione di tutti i punti della prova eseguita eccitando acusticamente l'elemento

Dopo aver ottenuti il grafico in Figura 4.1.4 per una più chiara comprensione dell'andamento dei picchi si è deciso di graficarli singolarmente. Dei sei picchi visibili in Figura 4.1.4 sono stati scelti solamente i primi 3 che sono i più puliti. La scelta dei 3 picchi viene fatta manualmente posizionando il cursore, come è facilmente intuibile questo modo operandi potrebbe essere molto impreciso; per tale motivazione si è deciso di graficare l'andamento non mediato alla Figura 4.1.5 e alla Figura 4.1.6 l'andamento mediato. Quest'ultimo, una volta posizionato il cursore nel picco, è ottenuto dopo aver eseguito una media con le cinque linee spettrali precedenti e successive.

La Figura 4.1.5 ha nell'asse dell'ascisse i 20 punti di misura presenti sull'elemento di prova mentre sull'asse delle ordinate l'ampiezza in grammi su Newton.

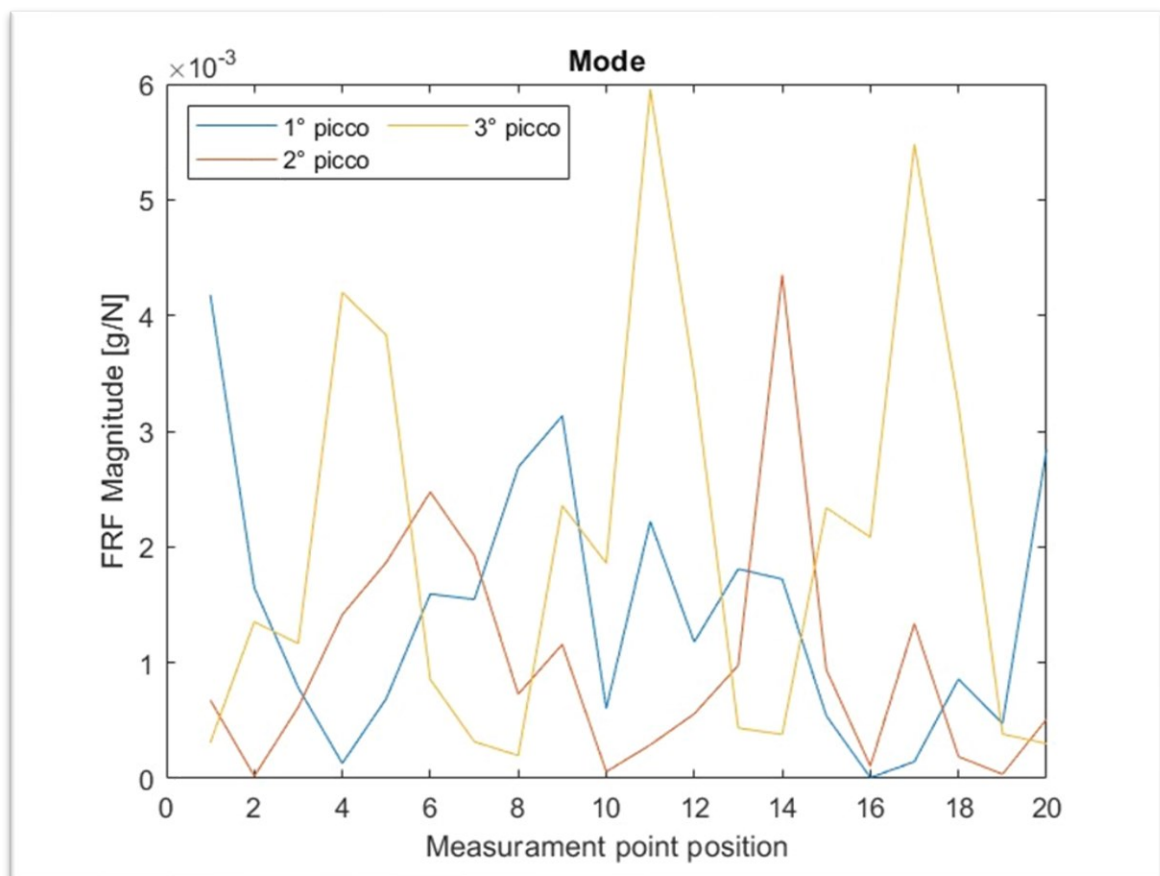


Figura 4.1.5 – andamento dei picchi ottenuti dall'eccitazione acustica

La Figura 4.1.6 ha nell'asse dell'ascisse i 20 punti di misura presenti sull'elemento di prova mentre sull'asse delle ordinate l'ampiezza in grammi su Newton.

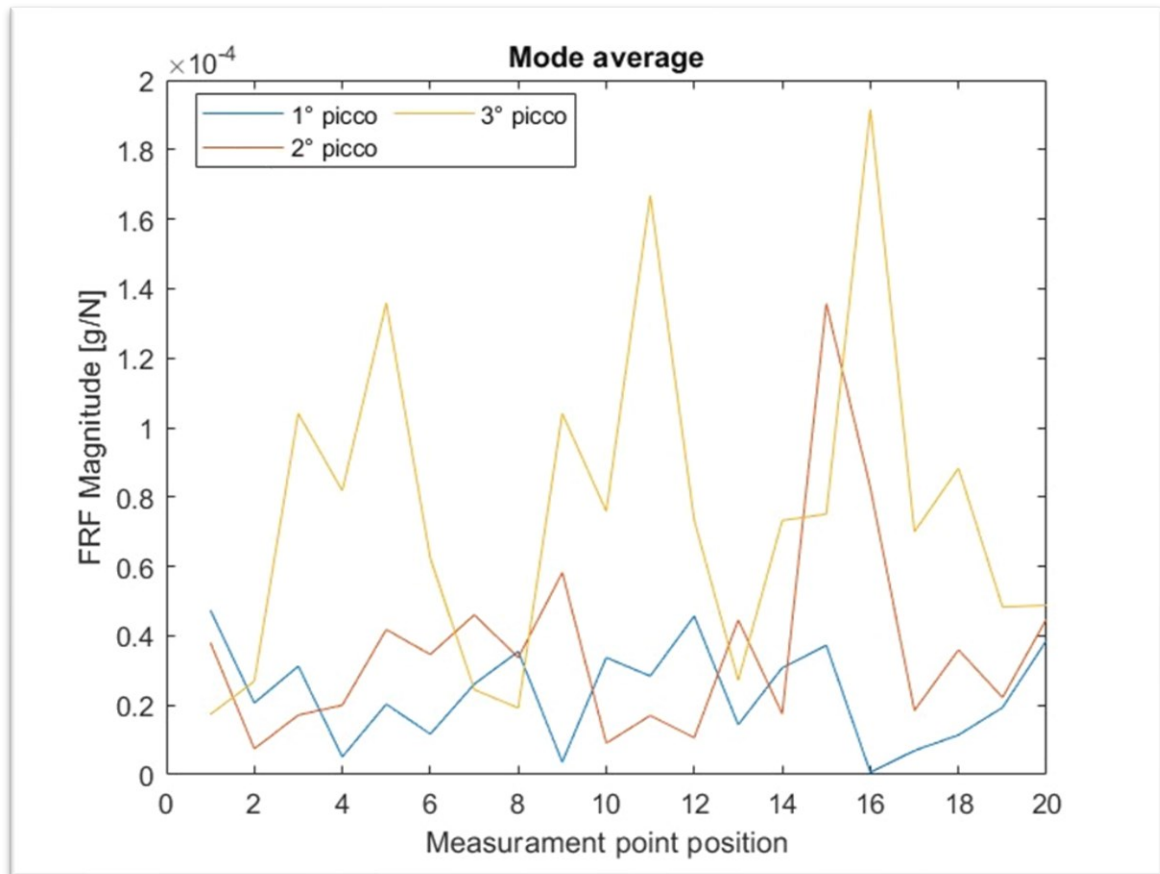


Figura 4.1.6 – andamento mediato dei picchi ottenuti dall'eccitazione acustica

## 4.2 RISULTATI READMODES

### 4.2.1 MODI DI VIBRARE ROVING ACCELEROMETER

La Figura 4.2.1 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Nel grafico viene mostrato il primo modo di vibrare della barra di alluminio nel caso del "Roving Accelerometer". Nonostante in alcuni punti, l'8 e il 14, la curva non risulti continua il risultato ottenuto rispecchia la aspettative. Il primo modo di vibrare è metà della funzione  $\sin(x)$ .

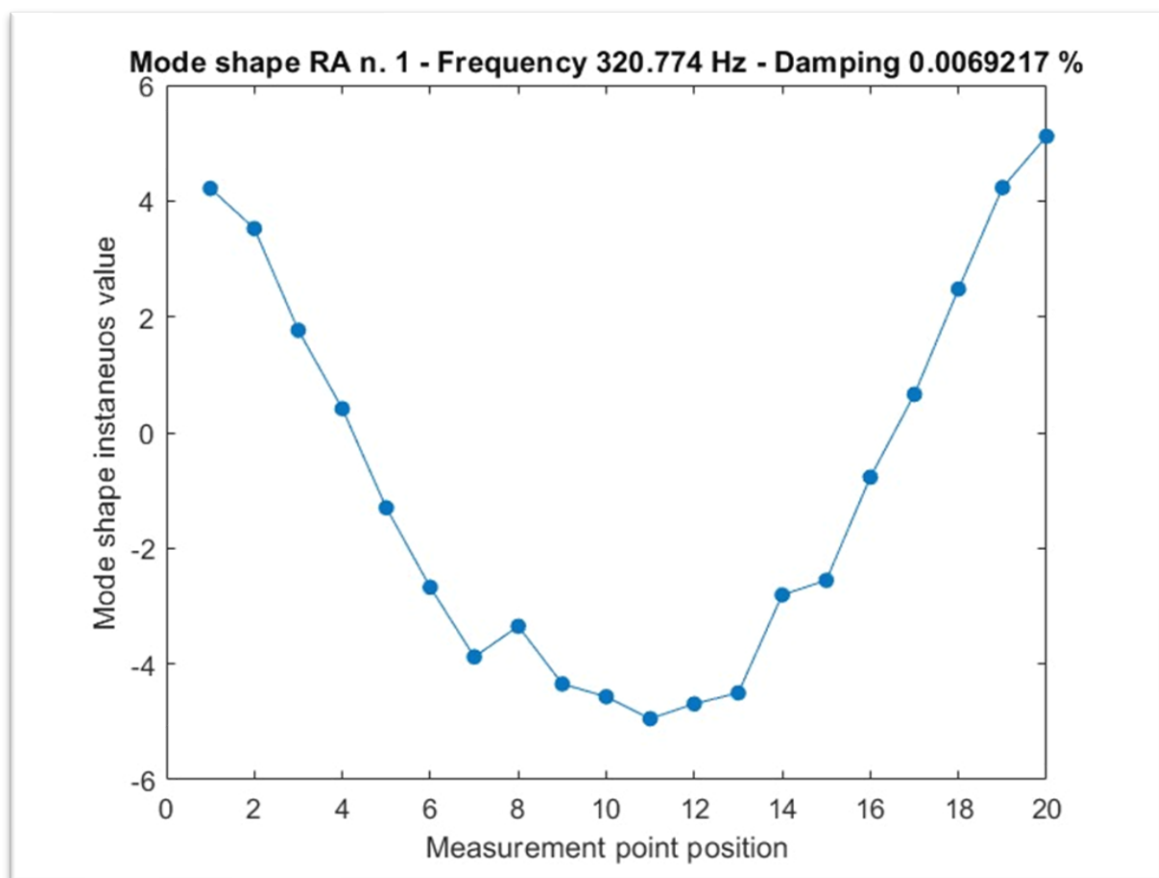


Figura 4.2.1 - mode shape RA n.1

La Figura 4.2.2 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il modo di vibrare numero 2 della barra di alluminio si può ancora definire "pulito" in quanto sono facilmente visibili le due pance tipiche della funzione  $\sin(x)$  che lo regola; sebbene nei punti numero 6, 7 e 15 si possono notare delle incongruenze. Quest'ultime possono essere state causate dall'imperizia dell'operatore che dava la martellata o dal vincolo a cui era collegato la barra di alluminio o dal tipo di prova eseguita.

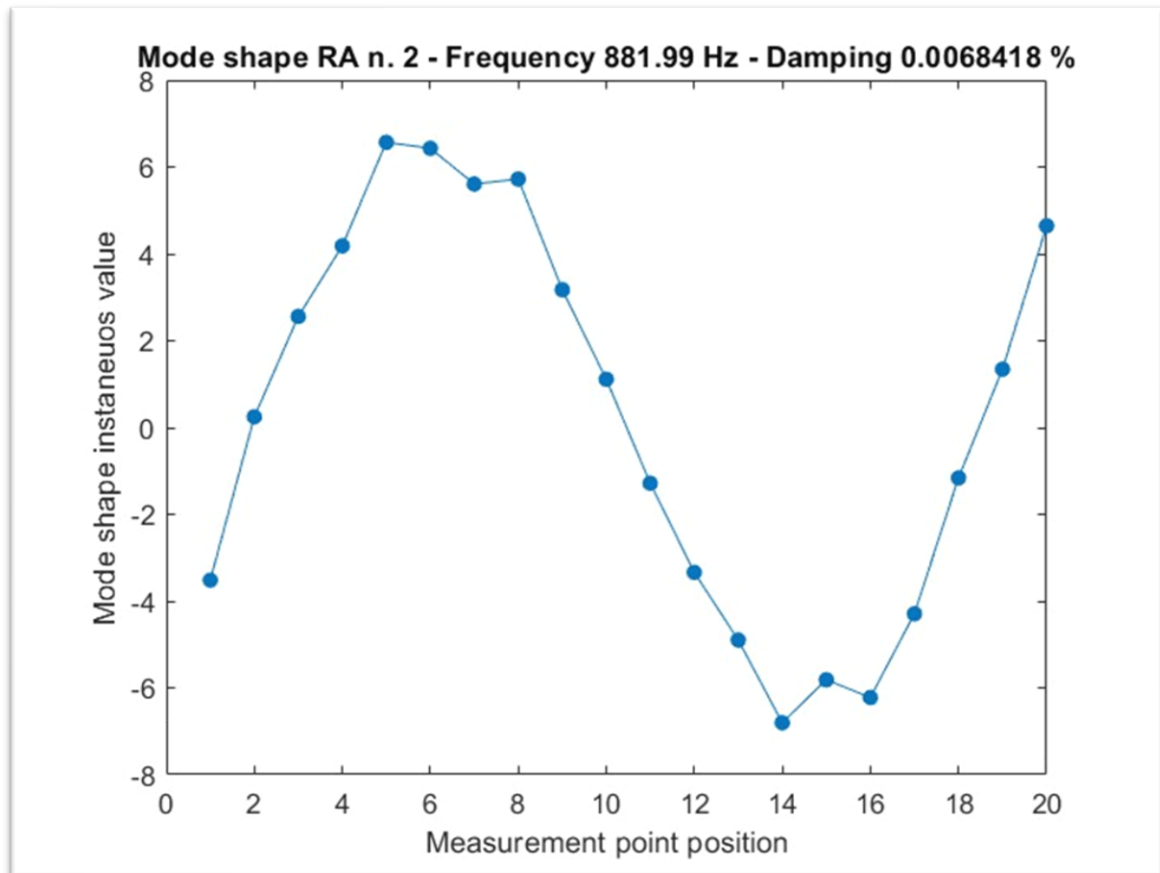


Figura 4.2.2 – mode shape RA n.2

La Figura 4.2.3 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il grafico del terzo modo di vibrare risulta accettabile visto che risultano ancora visibili le tre pance della funzione  $\sin(x)$ . Si può facilmente notare che con l'aumentare dei modi diminuisce la pulizia dei grafici, la curva risulta sempre di più una retta spezzata che collega vari punti.

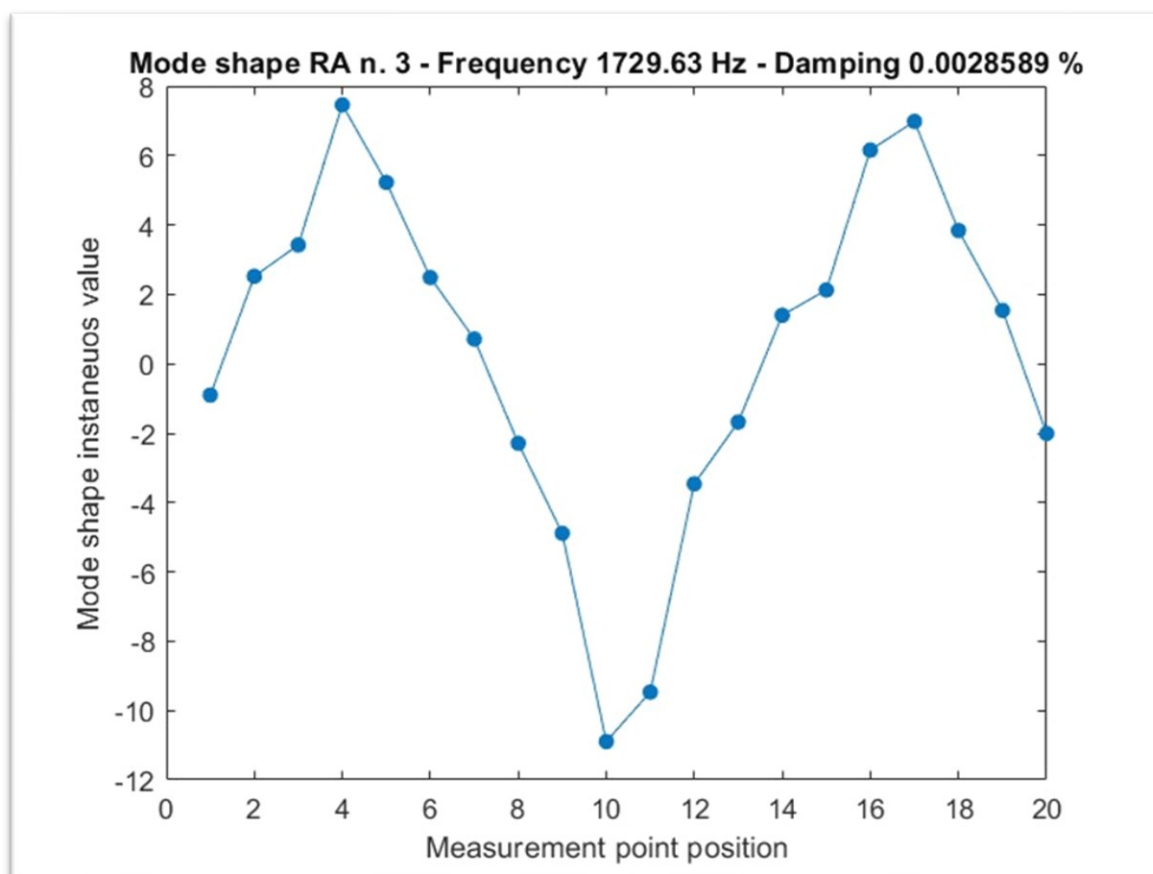


Figura 4.2.3 - mode shape RA n.3

La Figura 4.2.4 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il modo numero 4 è molto lontano da ciò che ci si può aspettare, risulta difficile notare i vari massimi e minimi della funzione  $\sin(x)$  questo è dovuto, come in precedenza, alle caratteristiche intrinseche della prova. Sebbene l'accelerometro abbia una massa molto minore rispetto a quella dell'elemento preso in esame non è trascurabile, la prova "Roving Accelerometer" prevede di spostarlo di punto in punto e questo genera una grande variabilità della massa della barra di alluminio è come se ogni punto in cui è poggiato l'accelerometro abbia una densità diversa rispetto al resto dell'elemento di prova questo influisce molto sui risultati.

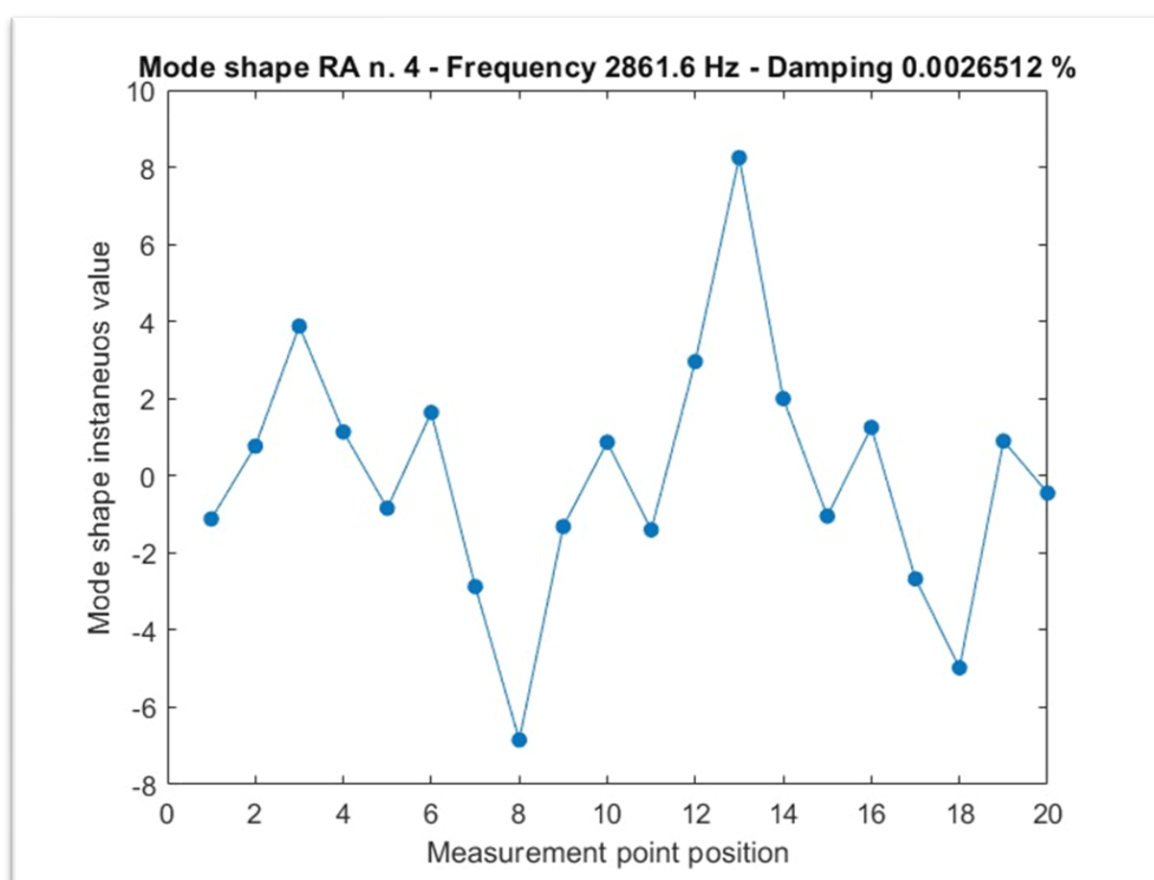


Figura 4.2.4 - mode shape RA n.4



La Figura 4.2.5 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il modo numero 5 è il più "sporco" si può solamente approssimare il modo di vibrare.

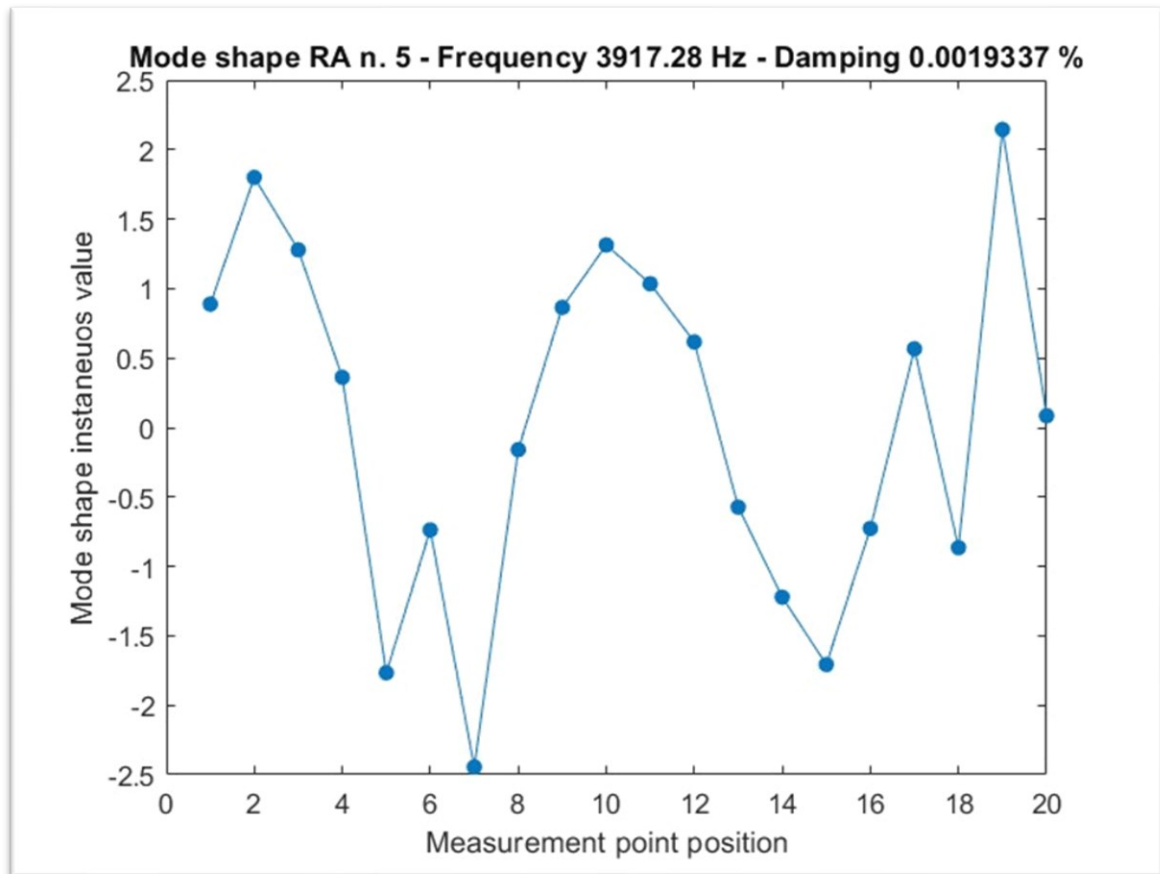


Figura 4.2.5 - mode shape RA n.5

#### 4.2.2 MODI DI VIBRARE ROVING HAMMER

La Figura 4.2.6 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

In questo grafico viene mostrato il modo di vibrare numero 1 della barra di alluminio ma nel caso "Roving Hammer", si è ritenuto necessario svolgere anche questo tipo di prova data l'incongruenza dei risultati nella prova "Roving Accelerometer". I grafici e quindi i risultati ottenuti sono molto migliori e chiari, questo è dovuto al tipo di prova. Posizionando in modo fisso l'accelerometro e cambiando solamente il punto dove si martellava si è resa la prova molto meno variabile, l'elemento di prova presentava un punto con un materiale di densità diversa rispetto al resto del corpo nel punto 3, dove era posto l'accelerometro, ma questo punto era fisso e non variava ad ogni misurazione.

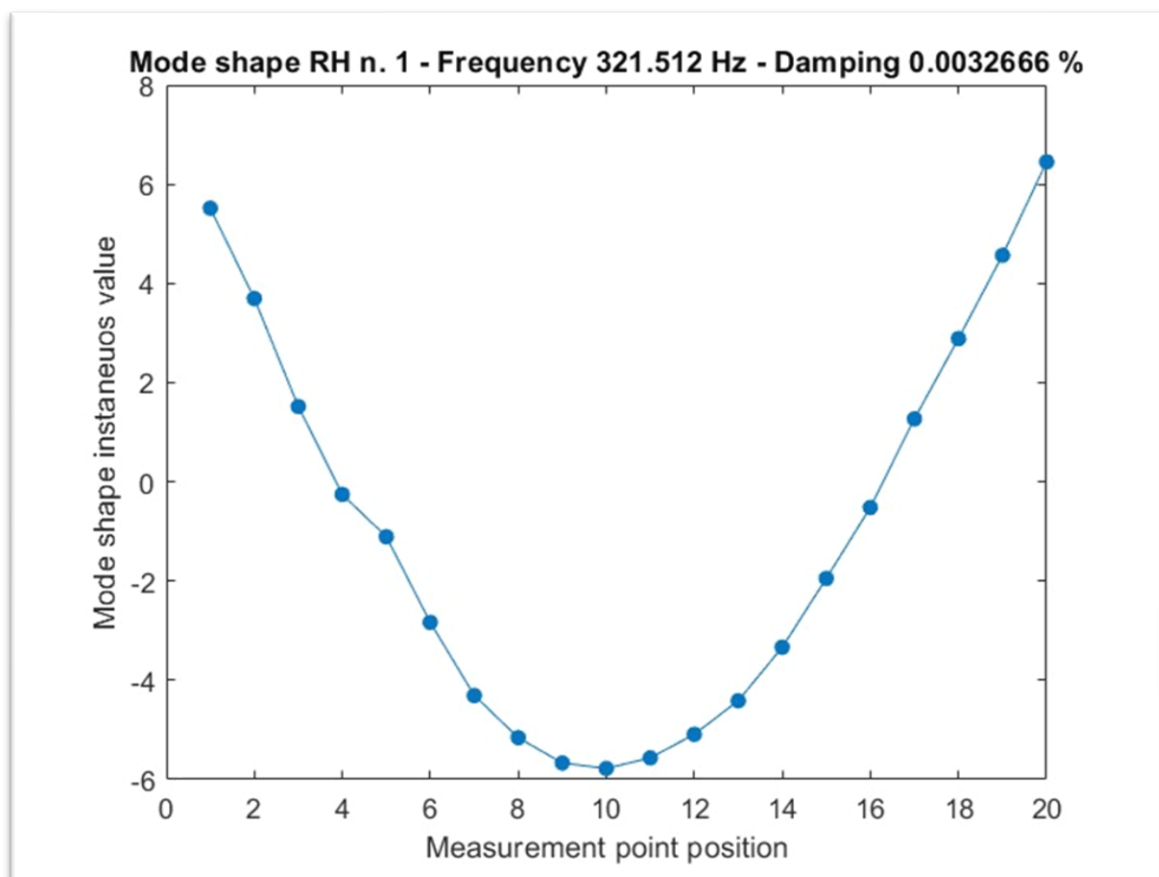


Figura 4.2.6 - mode shape RH n.1

La Figura 4.2.7 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il modo di vibrare numero 2 risulta molto chiaro, è come ci si aspetta.

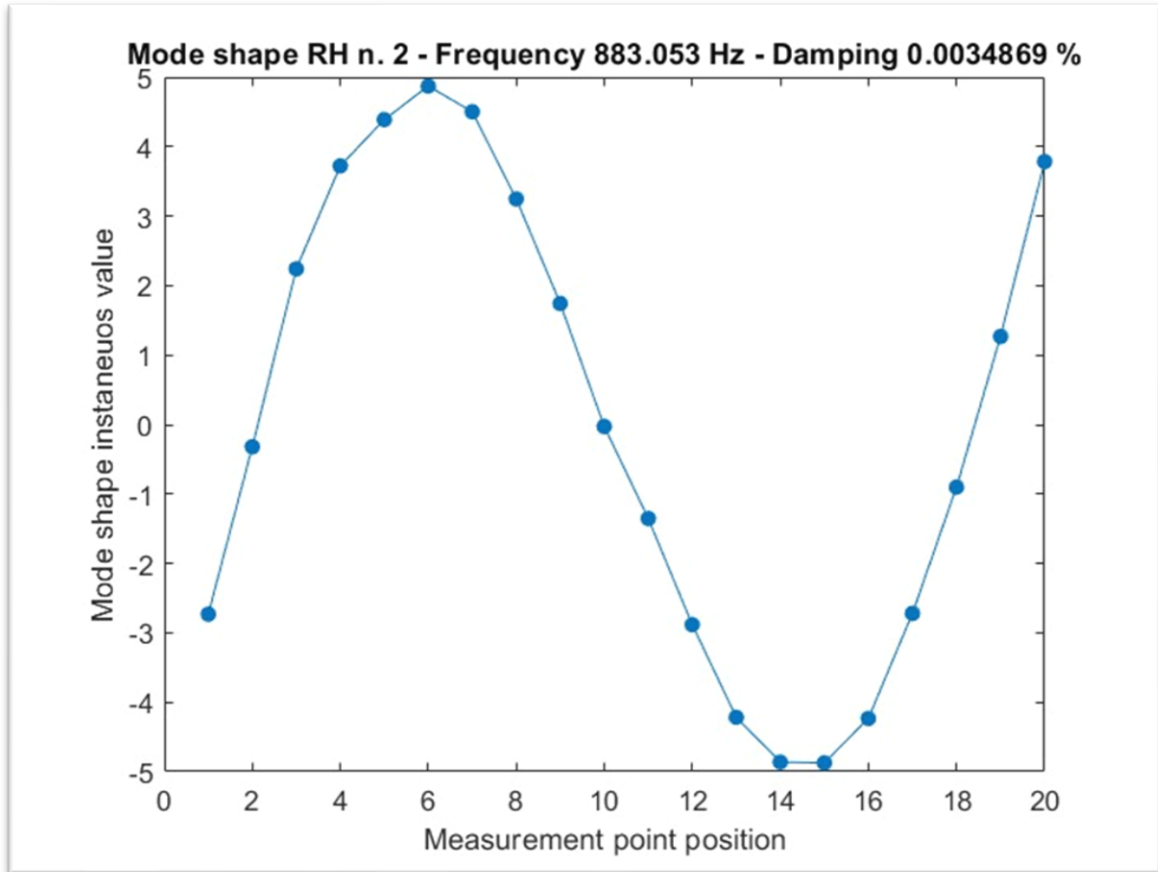


Figura 4.2.7 - mode shape RH n.2

La Figura 4.2.8 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il grafico del terzo modo di vibrare è ancora chiaro, si possono notare i massimi e minimi tipici della funzione  $\sin(x)$  che lo regola.

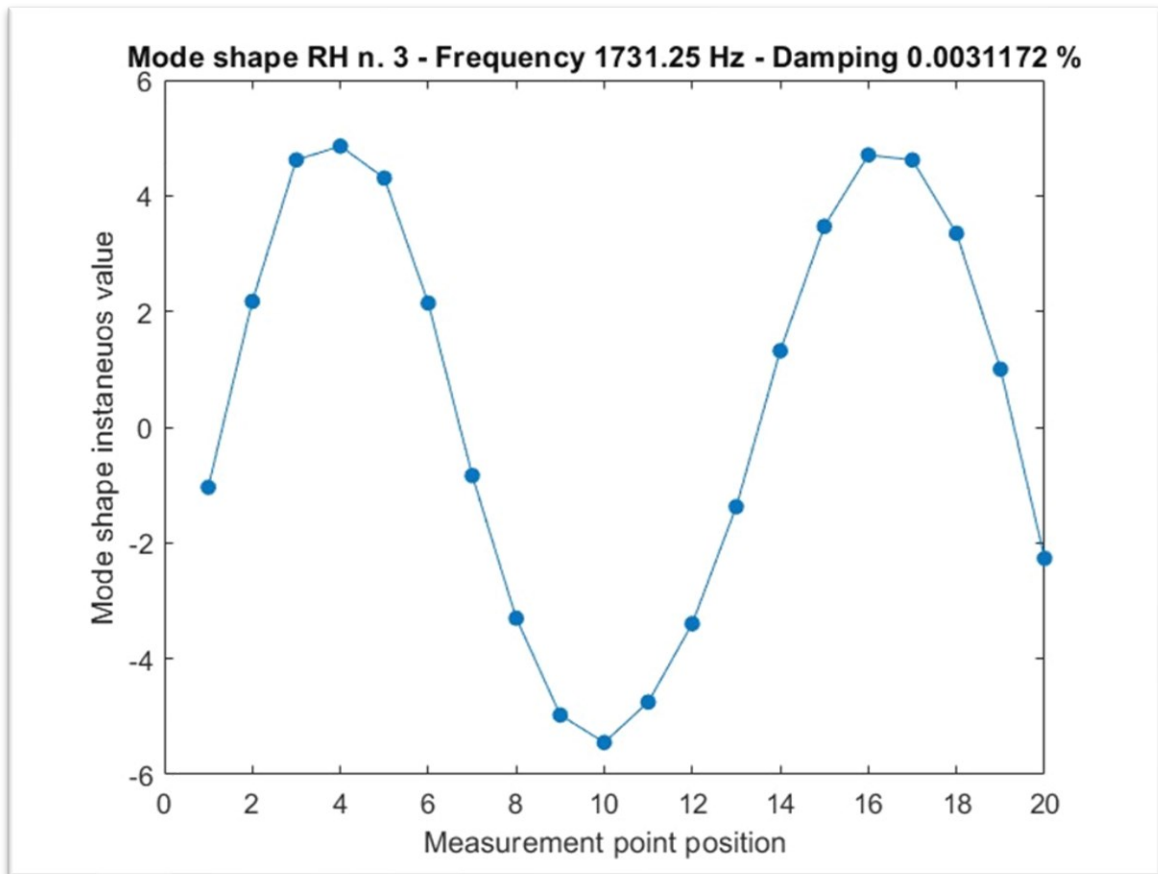


Figura 4.2.8 - - mode shape RH n.3

La Figura 4.2.9 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Sebbene il quarto modo di vibrare risulti un po' meno pulito dei precedenti è ancora comprensibile e simile ad un risultato che ci si può aspettare.

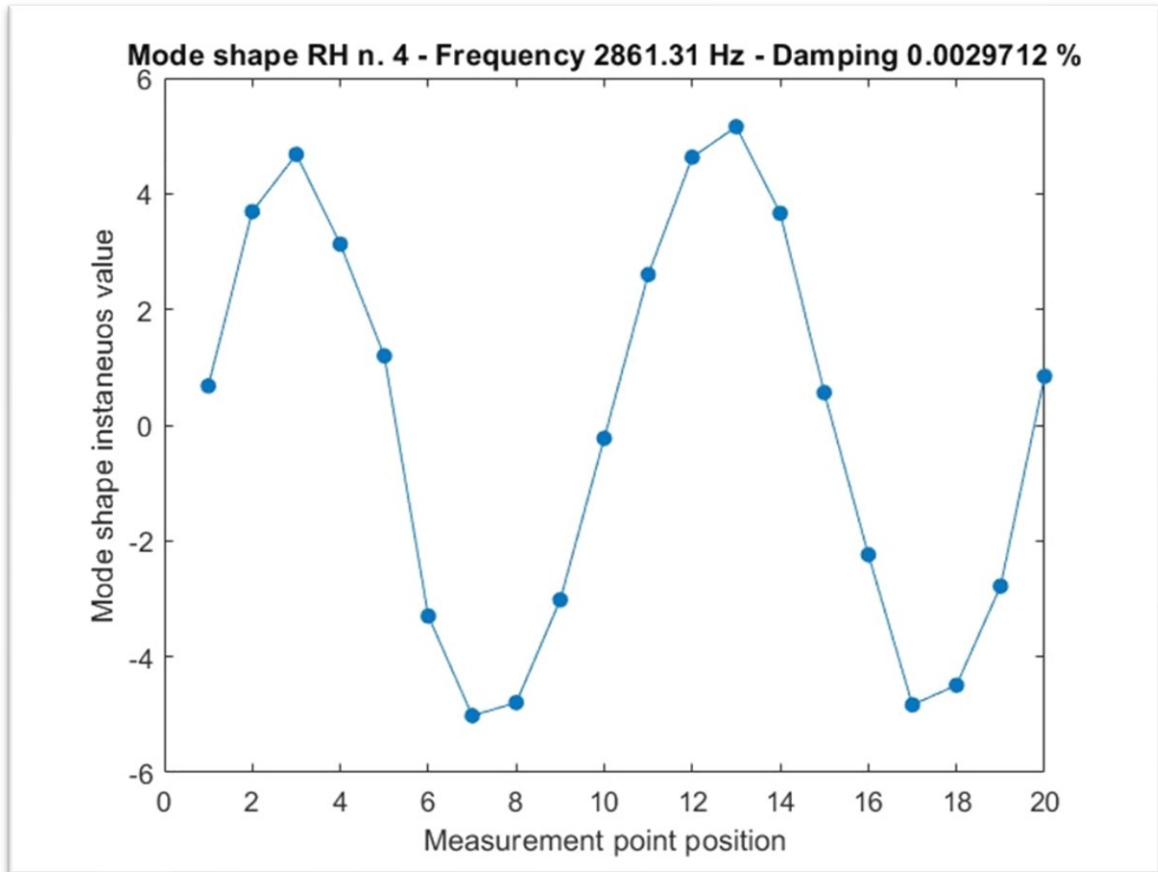


Figura 4.2.9 - mode shape RH n.4

La Figura 4.2.10 ha nell'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Il quinto modo di vibrare della barra di alluminio risulta molto "sporco" e non di facile interpretazione, nonostante questo risulta molto più pulito del quinto modo di vibrare ottenuto dalla prova "Roving Accelerometer" a dimostrazione del fatto che per l'elemento preso in esame che ha una massa così modesta e con questo tipo di accelerometro la prova da eseguire per ottenere risultati migliori è la prova "Roving Hammer".

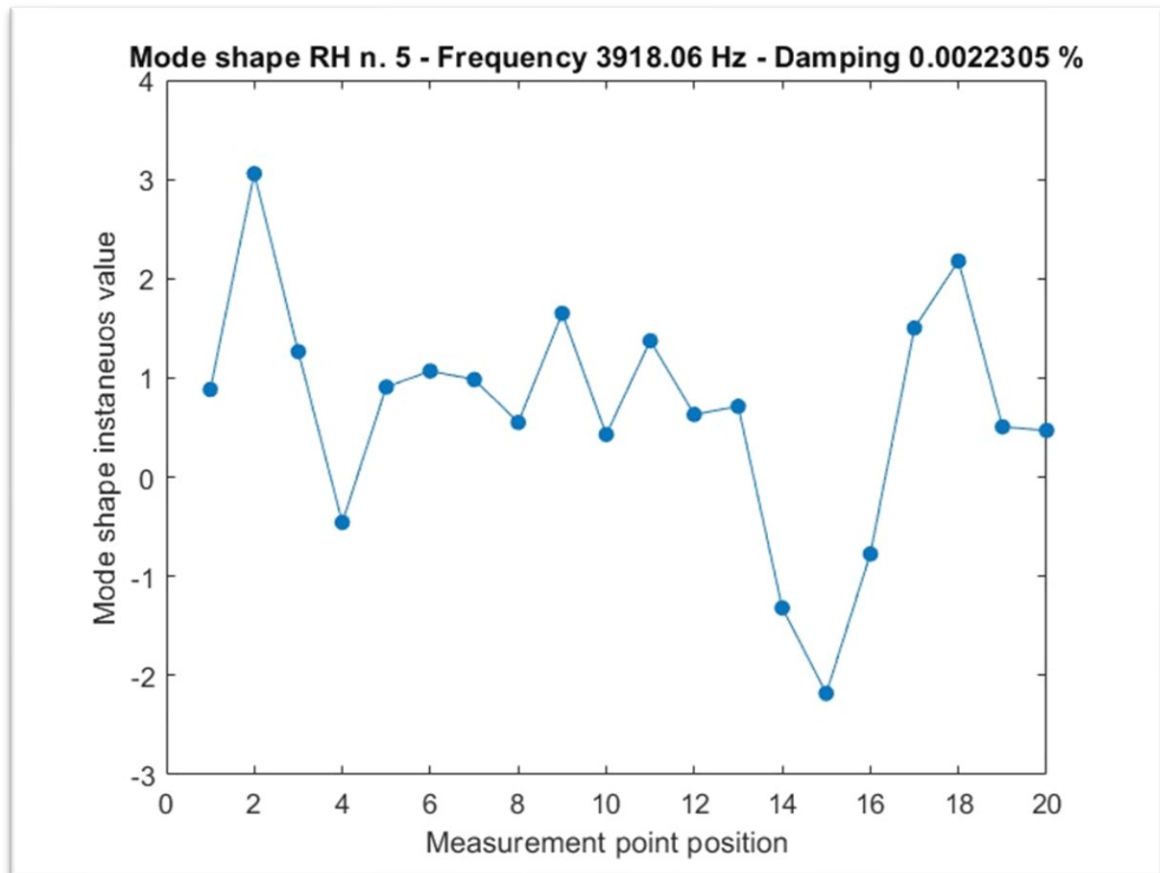


Figura 4.2.10 - mode shape RH n.5

### 4.3 CONFRONTO MODI DI VIBRARE

La Figura 4.3.1 ha lungo l'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Per avere una più chiara visioni dei risultati e delle eventuali differenze tra le due prove si è deciso di sovrapporre i modi di vibrare corrispondenti. Il modo di vibrare ottenuto dalla prova "Roving Hammer" risulta molto più coerente con quanto ci si aspetta, l'altro modo di vibrare è molto meno coerente nei punti 8-12.

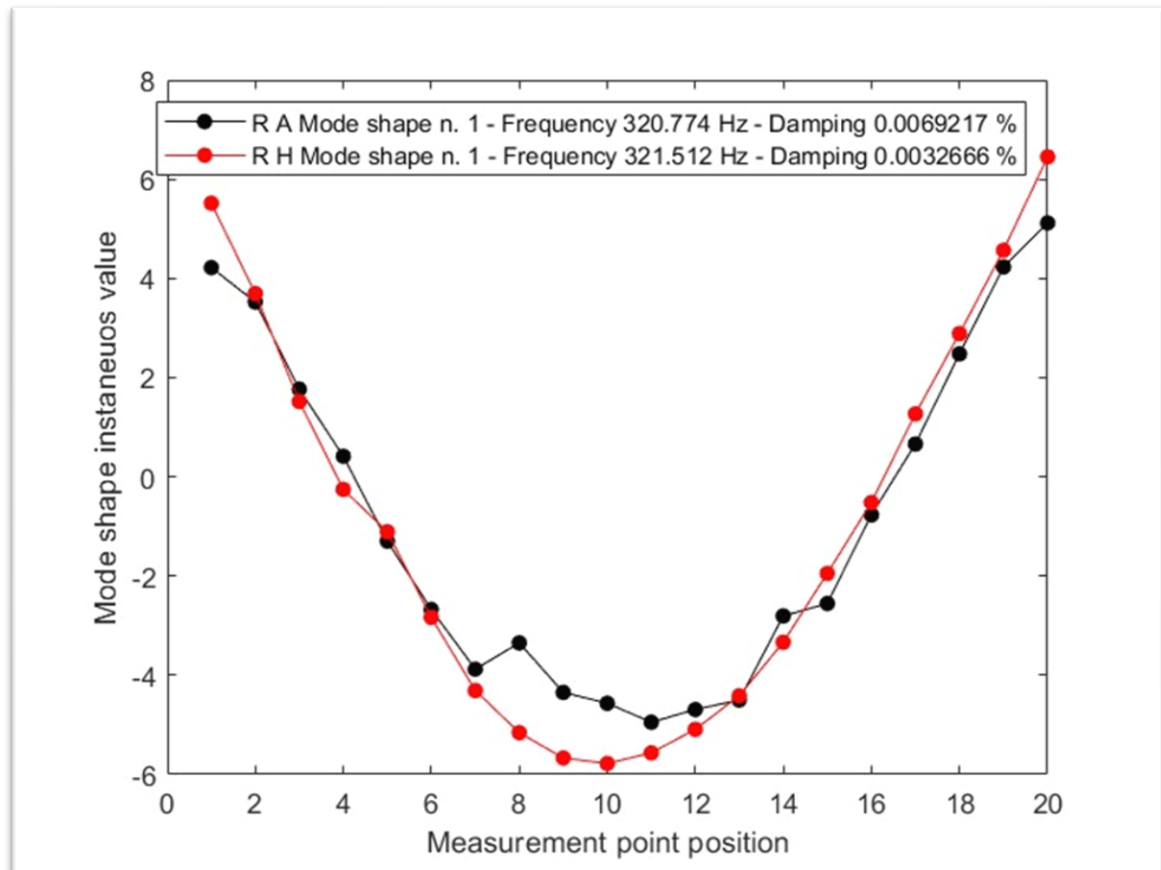


Figura 4.3.1 – confronto mode shape n.1

La Figura 4.3.2 ha lungo l'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

In questa sovrapposizione è visibile ancora una volta la migliore pulizia del modo di vibrare ottenuto dalla prova "Roving Hammer", la prova "Roving Accelerometer" si discosta molto nei punti di massimo e minimo della funzione rispettivamente i punti 5-7 e 14-16.

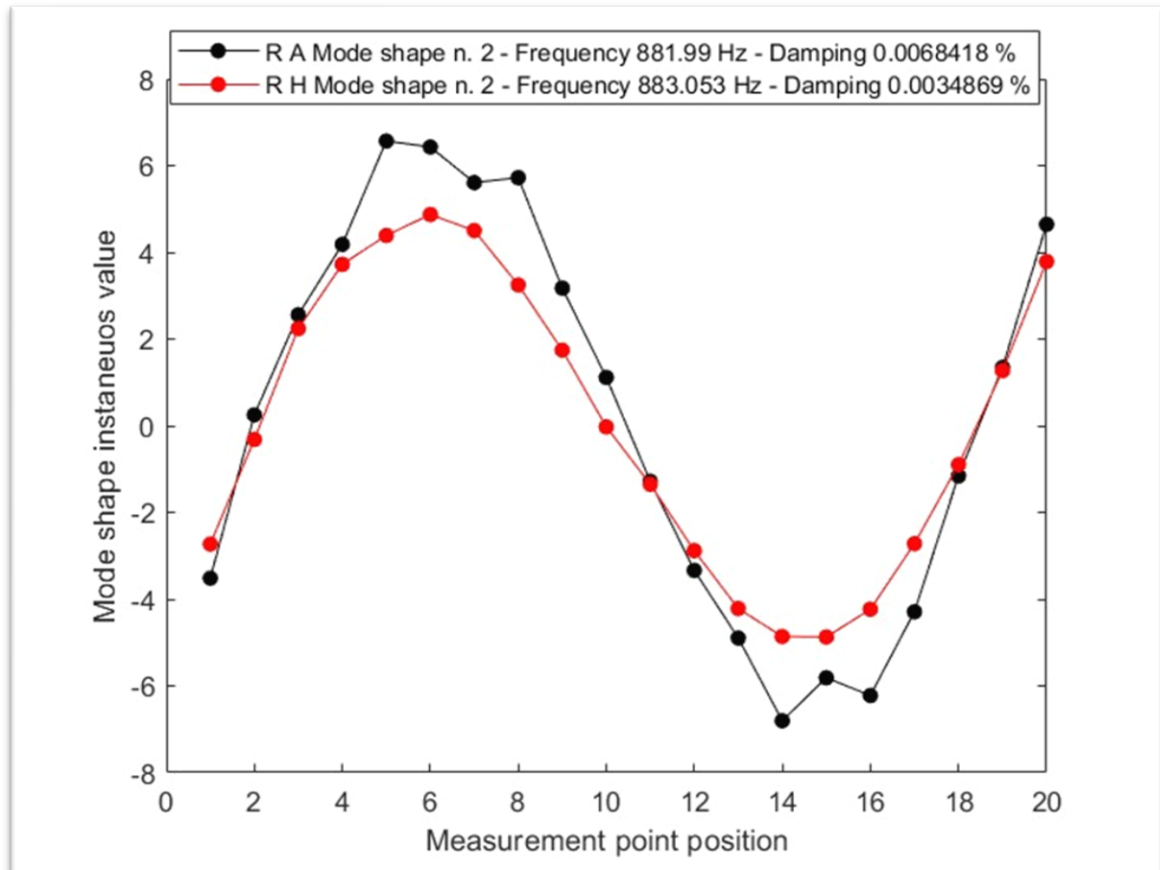


Figura 4.3.2 – confronto mode shape n.2



La Figura 4.3.3 ha lungo l'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Anche in questo grafico di si può notare l'ampio discostamento della prova "Roving Accelerometer" nei 2 massimi della funzione i punti 5 e 17, nel minimo nei punti 10 e 11.

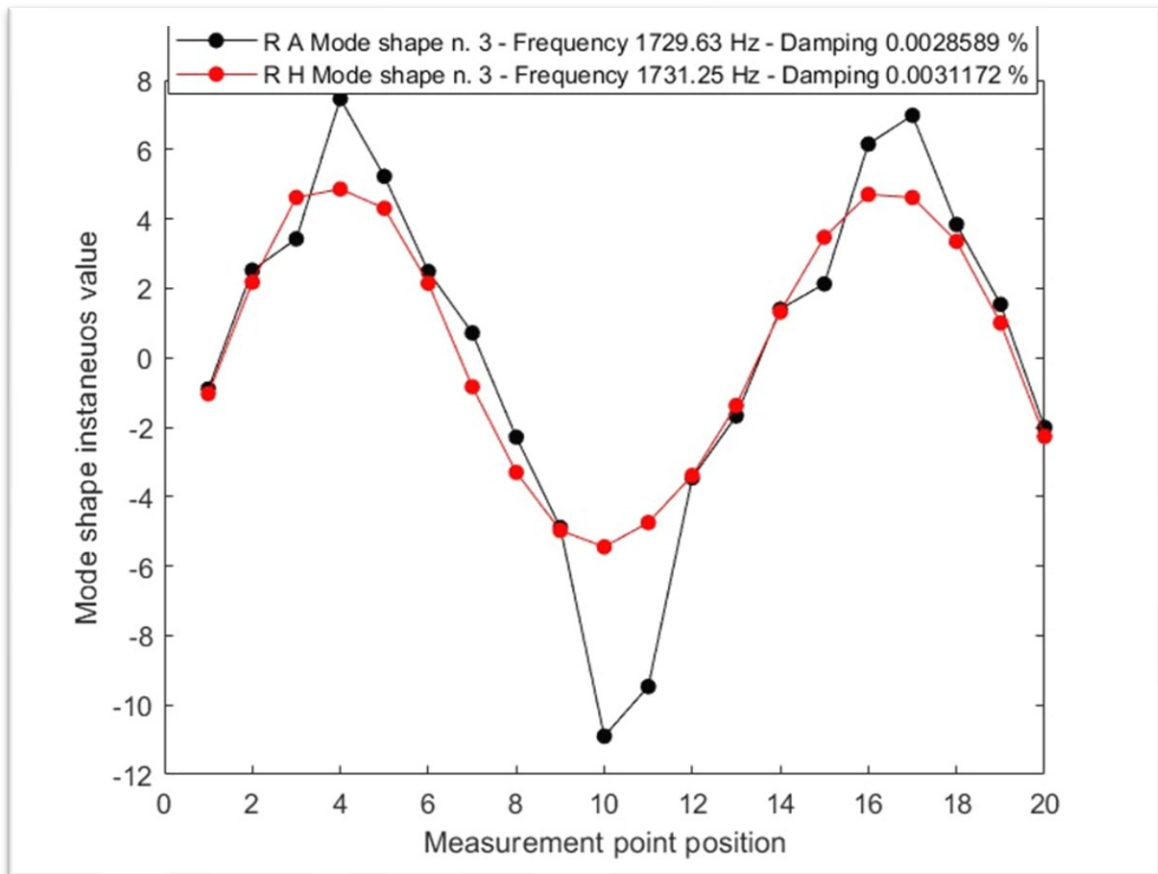


Figura 4.3.3 – confronto mode shape n.3

La Figura 4.3.4 ha lungo l'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

Sebbene il quarto modo di vibrare ottenuto con la prova "Roving Accelerometer" risulti poco pulito è abbastanza sovrapponibile al quarto modo di vibrare ottenuto con la prova "Roving Hammer".

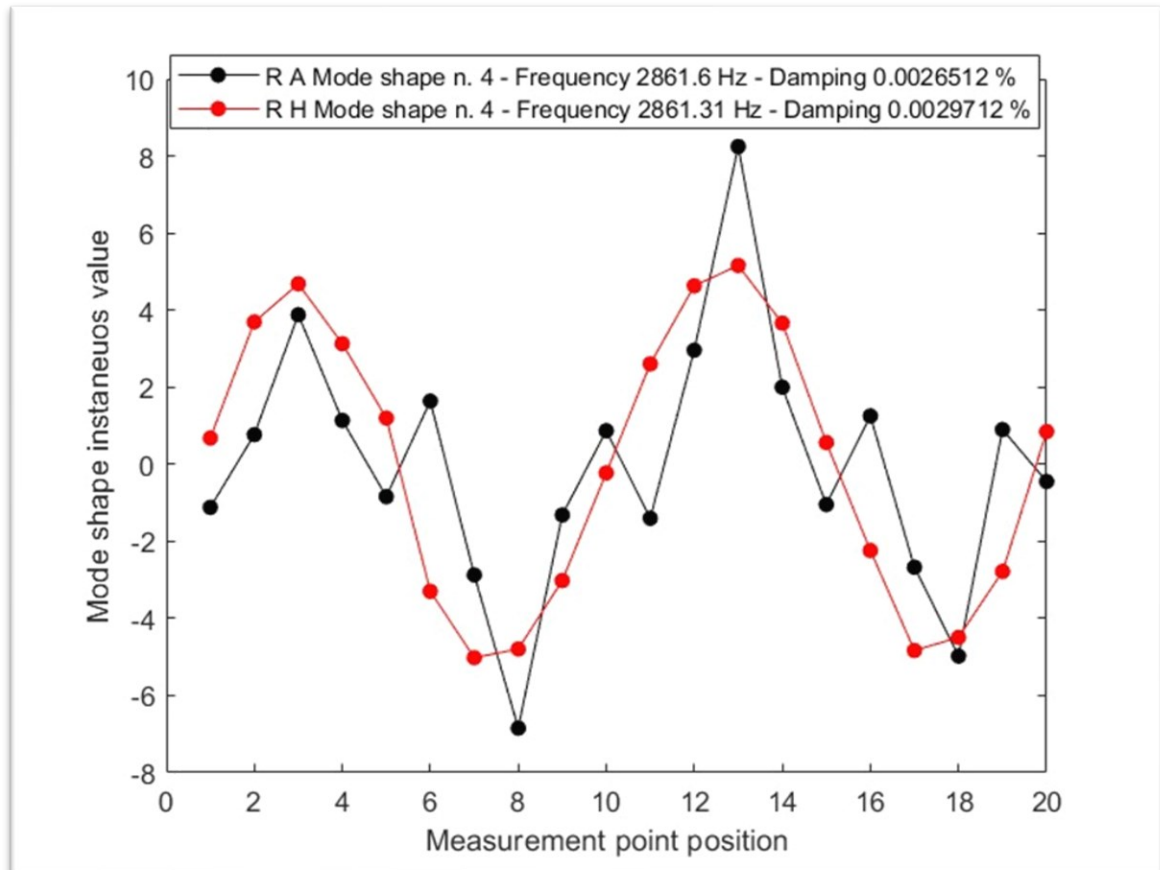


Figura 4.3.4 – confronto mode shape n.4

La Figura 4.3.5 ha lungo l'asse delle ascisse i 20 punti di misura, gli stessi segnati sull'elemento di prova, mentre lungo l'asse delle ordinate i valore istantaneo del modo di vibrare.

I due modi di vibrare sovrapposti risultano essere poco chiari, ma con alcune nozioni teoriche si possono definire confrontabili.

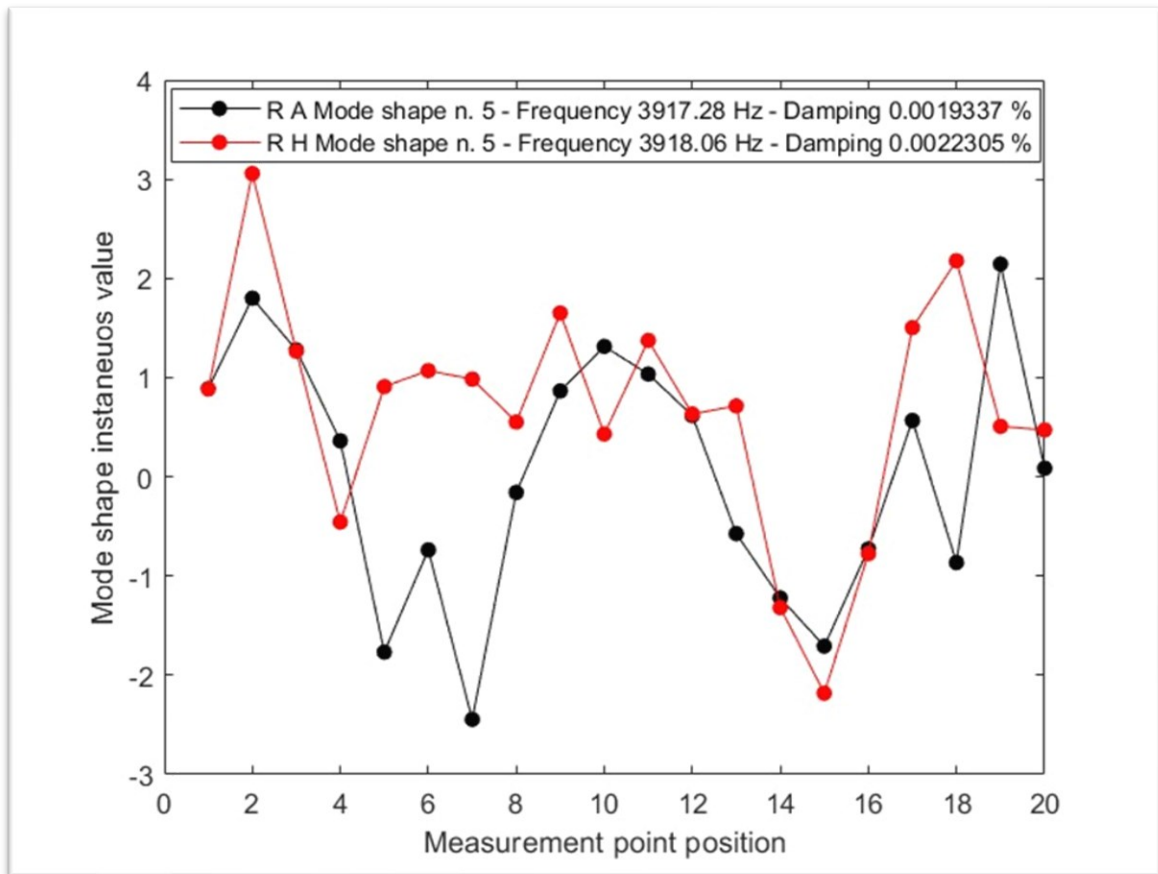


Figura 4.3.5 – confronto mode shape n.5

#### 4.4 TABELLA FREQUENZE

	FREQUENZE RH [HZ]	FREQUENZE RA [HZ]	DIFFERENZA FREQUENZE RH- RA [HZ]	DIFFERENZA FREQUENZE [%]
<b>MODE 1</b>	321.51	320.77	0.74	0.23
<b>MODE 2</b>	883.05	881.99	1.06	0.12
<b>MODE 3</b>	1731.25	1729.63	1.62	0.093
<b>MODE 4</b>	2861.31	2861.69	-0.38	-0.0102
<b>MODE 5</b>	3918.06	3917.28	0.78	0.02

Tabella 3 – frequenze

La Tabella 3 mostra le frequenze per i 5 modi di vibrare nelle due configurazioni, “Roving Hammer” e “Roving Accelerometer”, viene mostrata inoltre la differenza semplice e la differenza percentuale tra le frequenze. Si può notare che al crescere della differenza pura tende a crescere anche lo scostamento delle due curve nei grafici sovrapposti mostrati in precedenza, la presenza di un valore negativo nella differenza del quarto modo può essere dovuta a qualche errore effettuato durante la misurazione.

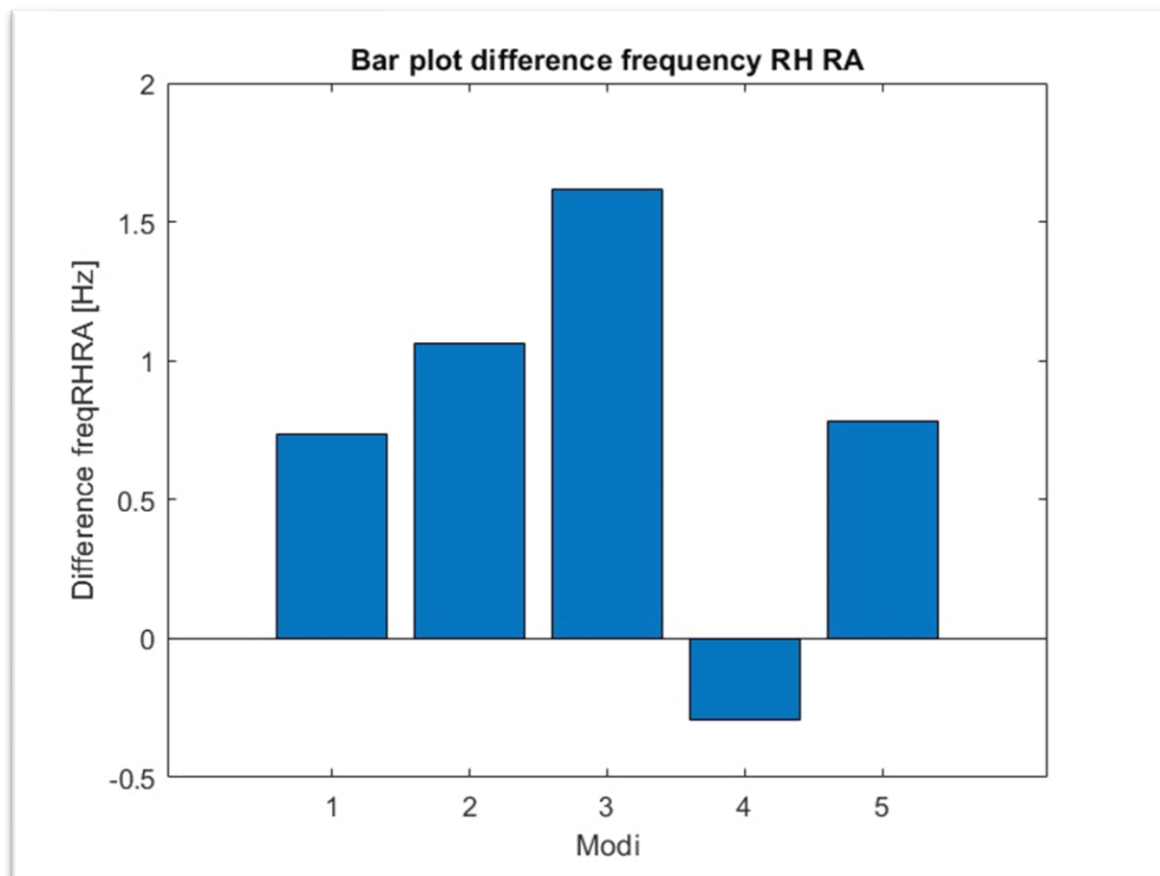


Figura 4.4.1 – grafico a barre della differenza tra le frequenze in RH e RA

#### 4.5 TABELLA SMORZAMENTO

	SMORZAMENTO RH	SMORZAMENTO RA	DIFFERENZA SMORZAMENTO RH-RA	DIFFERENZA SMORZAMENTO [%]
<b>MODE 1</b>	0.0033	0.0069	-0.0036	-111.89
<b>MODE 2</b>	0.0035	0.0068	-0.0033	-96.21
<b>MODE 3</b>	0.0031	0.0029	0.0002	-8.29
<b>MODE 4</b>	0.0030	0.0027	0.0003	10.77
<b>MODE 5</b>	0.0022	0.0019	0.0003	13.31

Tabella 4 – smorzamento

La Tabella 4 mostra lo smorzamento per i 5 modi di vibrare nelle due configurazioni, “Roving Hammer” e “Roving Accelerometer”, viene mostrata inoltre la differenza semplice e la differenza percentuale tra lo smorzamento. La differenza semplice risulta molto vicina allo zero, questo dimostra che lo smorzamento tra i due casi non varia di molto.

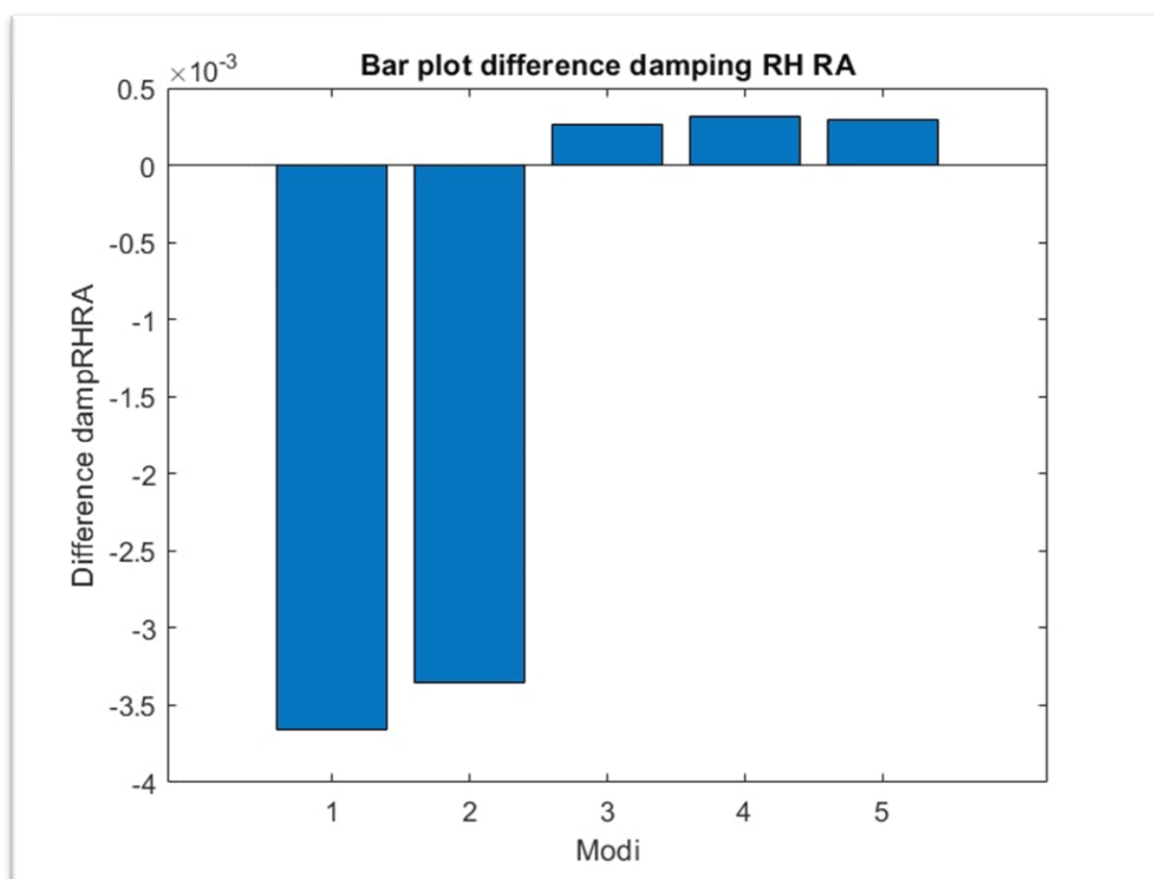


Figura 4.5.1 - grafico a barre della differenza tra lo smorzamento in RH e RA

## 5. CONCLUSIONI

Dopo aver svolto le misurazioni e scritto due codici MATLAB per analizzare i risultati ottenuti è possibile trarre le seguenti conclusioni. I risultati prodotti dalle due prove eseguite, definite “Roving Hammer” e “Roving Accelerometer”, mostrano modi di vibrare molto diversi. Questa diversità è intrinseca nelle prove stesse. La prova “Roving Hammer” mantiene la posizione dell’accelerometro fissa nel “Driving Point” dell’elemento di prova mentre cambia la posizione dove viene data la sollecitazione meccanica attraverso il martello strumentato, invece la prova “Roving Accelerometer” una volta fissato il punto della sollecitazione meccanica fa variare la posizione del sensore accelerometrico lungo i 20 punti equidistanti sulla faccia dell’elemento preso in esame. La differenza tra le due prove sta nella posizione, in una fissa e nell’altra mobile, dell’accelerometro. Sebbene l’accelerometro piezoelettrico usato sia miniaturizzato ha una massa non trascurabile rispetto a quella dell’elemento di prova. La presenza di questo sensore cambia la massa dell’elemento preso in esame. Se il sensore viene posizionato in un punto e poi vengono eseguite tutte le misurazioni il sistema risulta meno variabile e di conseguenza si ottengono dei risultati più coerenti a quanto ci si aspetterebbe. Dall’altra parte se la posizione dell’accelerometro viene cambiata ogni cinque misure eseguite per venti punti aumentano di molto le variabili in gioco nel sistema; le probabilità di un posizionamento errato del sensore o di cambiare la tensione degli elastici che fissano l’elemento di prova alla struttura sono molto elevate per tali motivi i risultati ottenuti da questa prova sono diversi da quanto ci si aspetterebbe. Un’ulteriore spiegazione, molto più importante, riguardo la differenza dei risultati ottenuti è la seguente: il punto dove è fissato l’accelerometro nella prova “Roving Hammer” è come se cambiasse la densità dell’elemento preso in esame e quindi il suo modo di vibrare. Non essendo più spostato l’accelerometro durante tutta l’esecuzione della prova l’elemento di prova rimane costante, ciò non avviene con la il test in “Roving Accelerometer” dove il sensore cambia posizione quindi si va a generare un elemento di prova diverso ogni volta, che avrà quindi modi di vibrare diversi dall’elemento di prova iniziale. I grafici dei rispettivi modi delle due prove sono stati sovrapposti per dimostrare proprio quanto la scelta della prova influisse sui risultati stessi e poter notare quali siano i punti in cui si riscontrassero maggiormente queste differenze.

La prova eseguita usando una sollecitazione acustica sull’elemento di prova, rumore bianco, mostra come nonostante la posizione dell’accelerometro variasse, tutti i punti dell’elemento in esame seguano lo stesso andamento convergendo verso i sei picchi presenti. Inoltre fa vedere come lo stesso elemento di prova eccitato in modi diversi, meccanicamente ed acusticamente, risponda in modo diverso.

## 6. BIBLIOGRAFIA

R. Peter, M. Michel, L. Baumann, A. Fischerauer and G. Fischerauer, *Structural Health Monitoring of Bridges using both local vibrations and structure-borne acoustic waves*, Sensors and Measuring Systems; 21th ITG/GMA-Symposium, 2022, pp. 1-5.

Gervais, Owen S., *Design of an Acoustic Instrument Automated Roving Impact Hammer CNC Platform*, Tufts University ProQuest Dissertations Publishing, 2022

D.J.Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press LTD, 2000

PCB Piezoelectronics, <https://www.pcb.com/>, <https://www.pcb.com/products?m=352C23>

PCB Piezoelectronics, <https://www.pcb.com/>, <https://www.pcb.com/products?m=086e80>

