



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

**Caratterizzazione e validazione di un sistema di misura low-cost per il
monitoraggio strutturale**

**Characterisation and validation of a low-cost measurement system for
structural monitoring**

Relatore:

Prof.ssa Casaccia Sara

Tesi di Laurea di:

Prenna Giovanni

Correlatore:

Ing. Sartini Gianluca

A.A. 2025/2026

Sommario

1 Introduzione	3
1.1 Stato dell'arte	5
1.2 Scopo del lavoro.....	7
Capitolo 2 Materiali e metodi	8
2.1 Banco di misura strutturale	8
2.1.1. Configurazione della trave a sbalzo	8
2.2. Strumentazione per il monitoraggio	10
2.2.1. Sensore per la cinematica globale: accelerometro MEMS	10
2.2.2 Sensore per la dinamica locale: Estensimetro a foglio resistivo	12
2.2.3 Strumentazione per l'eccitazione impulsiva: Martello Strumentato.....	13
2.2.4 Complementarità dell'approccio multi-sensore.....	15
2.3. Acquisizione dei dati	15
2.3.1. Software di acquisizione e hardware di interfacciamento	15
2.3.2. Protocollo sperimentale per prove di vibrazione libera	16
2.3.3. Protocollo sperimentale per eccitazione impulsiva	20
2.4 Metodologia di analisi dei dati e fondamenti teorici	23
2.4.1 Dinamica lineare: Modello dell'oscillatore semplice	23
2.4.2 Dinamica non lineare: Fenomeni di Hardening e Softening.....	24
2.4.3. Elaborazione dei segnali	25
2.4.4. Sintesi procedurale: schemi a blocchi	26
Capitolo 3 Risultati sperimentali e discussioni	28
3.1. Risultati dei test con vibrazione libera	29
3.1.1 Risultati del test con rilascio di carichi statici	29
3.1.2. Risultati del test a deflessione iniziale imposta	31
3.2 Risultati per l'eccitazione impulsiva.....	33
3.2.1. Risultati del test con martello strumentato	33
4 Conclusioni	35
5 Bibliografia	37

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito delle misure, con particolare applicazione allo Structural Health Monitoring (SHM) e si pone l'obiettivo di validare un sistema di misura low-cost, in alternativa alle tradizionali e onerose strumentazioni di laboratorio. Lo studio, propone un approccio multi-sensore, che affianca un sensore di natura commerciale, (accelerometro MEMS integrato in uno smartphone) per il tracciamento della cinematica globale, ad un trasduttore industriale (estensimetro a foglio resistivo) per l'analisi della dinamica locale. Le campagne sperimentali sono state condotte su un banco di prova costituito da una trave a sbalzo in acciaio ancorata tramite un incastro reale costituito da un morsetto. Sono stati eseguiti test in vibrazione libera mediante il rilascio di masse sospese e deflessioni iniziali imposte e prove di eccitazione impulsiva quantificate tramite l'utilizzo di un martello strumentato. I risultati elaborati, (tramite analisi nel dominio della frequenza e analisi nel dominio nel tempo), dimostrano che lo smartphone possiede una sensibilità tale da rilevare variazioni microscopiche della frequenza naturale, tracciando in modo chiaro il calo di frequenza indotto dall'effetto di Mass Loading. L'acquisizione ha inoltre rilevato complessi comportamenti non lineari (Hardening e Softening) all'interfaccia del vincolo, causati da micro-scorrimenti e micro-compattazioni che sarebbero risultati invisibili affidandosi a un singolo punto di osservazione. In conclusione, la ricerca conferma l'affidabilità della sensoristica low-cost per l'identificazione strutturale e apre la strada a future applicazioni wireless per il monitoraggio delle infrastrutture e l'individuazione di difetti in connessione critiche.

1 Introduzione

Nell'ambito dell'ingegneria edile, la disciplina delle misure riveste un ruolo di fondamentale importanza per la progettazione, il collaudo e la salvaguardia delle opere civili. L'acquisizione di dati sperimentali sia sul campo che in laboratorio, permette infatti di caratterizzare la risposta meccanica dei materiali, di verificare il comportamento reale della struttura e i modelli teorici di calcolo, e di monitorarne l'evoluzione nel tempo sotto l'azione di carichi. Affidarsi a misurazioni accurate garantisce la sicurezza, l'efficienza e la corretta manutenzione delle infrastrutture durante l'intero ciclo di vita dell'opera. E' proprio nell'ambito della disciplina delle misure meccaniche e termiche che si inserisce il presente lavoro, focalizzandosi sulla determinazione della risposta dinamica in termini di spostamento; un aspetto fondamentale per il monitoraggio dello stato di salute delle strutture ingegneristiche, (Structural Health Monitoring- SHM) specialmente per le travi. Questo vasto settore di ricerca si pone l'obiettivo di valutare lo stato di salute e l'integrità delle infrastrutture civili, meccaniche ed aerospaziali, consentendo il passaggio da una manutenzione basata sul tempo a logiche basate sulle reali condizioni dell'opera. L'implementazione di sistemi di monitoraggio di strumentazione industriale tradizionale, come gli accelerometri piezoelettrici ad altissima precisione, comporta spesso notevole difficoltà logistiche legate all'installazione [6]. Tali sistemi richiedono infatti cablaggi complessi, moduli di acquisizione dati ingombranti e reti di alimentazione dedicate, oltre alla necessità di riferimenti fissi che sono spesso di difficile ripetibilità in un ambiente operativo reale. Per superare queste limitazioni strutturali e favorire applicazione su larga scala, il mercato nel campo delle misure si sta orientando in modo sempre più marcato verso soluzioni meno costose e più agili. Nell'ultimo decennio, infatti, la

ricerca ingegneristica si è spostata verso l'impiego e la validazione di sensori low-cost [6]. Dispositivi commerciali di uso quotidiano, come gli smartphone di ultima generazione, integrano al loro interno sensori Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) le cui prestazioni sono in costante miglioramento [2]. L'utilizzo di questi dispositivi, affiancato a metodi di trasduzione economici come gli estensimetri a foglio resistivo [3], si propone di rendere più accessibile lo SHM, rendendolo inoltre wireless e facilmente dispiegabile. Tuttavia, l'utilizzo di sensoristica low-cost introduce sfide ingegneristiche significative. Le principali criticità riguardano la minore accuratezza dei componenti commerciali, l'elevato rumore di fondo e i limiti dovuti alla frequenza di campionamento, che spesso non permettono di catturare i fenomeni ad alta frequenza a causa del limite imposto dal teorema di Nyquist-Shannon [8]. Per superare tali criticità, è necessario sfruttare la complementarità tra le diverse sorgenti informative; le misure di accelerazione forniscono infatti una risoluzione ottimale per la ricostruzione della cinematica globale, mentre i dati di deformazione risultano estremamente accurati per determinare le dinamiche locali e le componenti a bassa frequenza. L'impiego parallelo e comparato di queste tecnologie apre nuove prospettive per il monitoraggio civile, [4] permettendo di ottenere una conoscenza della dinamica della struttura molto più approfondita rispetto a quella che si avrebbe utilizzando un singolo sensore. Tale integrazione richiede però un protocollo di indagine e validazione rigoroso per dimostrare che l'affidabilità di tali sensori low-cost possa equiparare gli standard industriali consolidati. A tal fine, emerge, una problematica fondamentale legata all'interazione meccanica tra lo strumento di misura e la struttura stessa. Quando un corpo dotato di massa propria viene vincolato ad una struttura leggera e flessibile, si innesca il problema noto in letteratura come Mass Loading [10]. Nella configurazione oggetto di studio ovvero una trave a sbalzo, la collocazione di una massa in corrispondenza dell'estremità libera massimizza questo effetto. L'incremento dell'inerzia complessiva del sistema, infatti, altera il bilancio dinamico originale traducendosi in una inevitabile riduzione della frequenza naturale di vibrazione [7]. Il fenomeno del Mass Loading costituisce un evento imprescindibile per il presente lavoro. Fin dal primo test sperimentale, la presenza dello smartphone e l'aggiunta di ulteriori carichi statici, provocano un visibile e prevedibile rallentamento della dinamica strutturale, che i sensori devono essere in grado di quantificare in modo preciso. Al contempo, indurre flessioni elevate o shock impulsivi, forza il vincolo reale verso comportamenti non lineari rispetto al modello ideale [1].

La validazione di un sistema low-cost impone inoltre, l'adozione di un rigoroso metodo deterministico per l'analisi dei segnali [9]. In accordo con la letteratura riguardante le statistiche e le frequenze naturali nelle travi, i risultati non possono basarsi su singole letture deterministiche. Al fine di garantire il massimo rigore scientifico, i segnali estratti dalle acquisizioni ripetute vengono aggregati per ciascuna condizione sperimentale. La frequenza naturale viene rappresentata mediante il valore medio, mentre la dispersione è quantificata tramite la deviazione standard [9]. Come effettuato in indagini sperimentali analoghe, la deviazione viene adottata come errore e rappresentata visivamente sotto forma di barre in tutti i diagrammi a dispersione. È stata adottata questa scelta metodologica in quanto è l'unica che consente di mostrare simultaneamente sia la reale tendenza fisica del sistema che la ripetibilità dell'esperimento.

1.1 Stato dell'arte

L'evoluzione dello Structural Health Monitoring (SHM) e la transizione al low-cost e al wireless, rappresenta un requisito fondamentale per la diagnostica e la manutenzione predittiva delle infrastrutture civili ed industriali. Come evidenziato in diversi studi di riferimento, tra cui il lavoro di Abruzzese [6], le architetture di monitoraggio tradizionali richiedono l'impiego di accelerometri piezoelettrici ad alta precisione, i quali devono essere affiancati da sistemi di cablaggio e dispositivi di acquisizione dati (DAQ). Per superare queste scomode limitazioni, la ricerca si è orientata verso l'implementazione dei sensori Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) integrati nei dispositivi commerciali, come gli smartphone. Studi come quello svolto da Martinelli e Racic [2], hanno ampiamente validato l'efficacia degli smartphone per le applicazioni svolte a soddisfare lo SHM. Tali studi, infatti, hanno dimostrato che, sebbene la tecnologia capacitiva triassiale dei MEMS presenti un rumore di fondo superiore rispetto agli accelerometri industriali, risulta avere risoluzione e sensibilità pienamente idonee per l'estrazione dei parametri modali a bassa frequenza. Per quanto riguarda l'estrazione dei parametri modali, recenti indagini come quella svolta da Rashidi [5], confermano la possibilità di utilizzo e di validazione di applicazioni open-source, come Phyphox, nell'acquisizione diretta dei segnali grezzi del sensore, evitando alterazioni software del campionamento che inquinerebbero il dato. Al fine di evitare le limitazioni indotte dall'utilizzo di un singolo sensore, la diagnostica strutturale si sta spostando verso un approccio d'indagine multi-sensore. A tal proposito, la letteratura scientifica, evidenzia la forte complementarità tra l'uso dell'accelerometro e quello dell'estensimetro. Lo studio svolto da Kranjc, Slavič e Boltežar [4], evidenzia chiaramente i vantaggi derivanti dall'impiego congiunto di queste due tecnologie, nella comparazione dei parametri modali. Mentre l'accelerometro è ideale per definire la cinematica globale e catturare le forme modali ad alta frequenza, i sensori di deformazione come gli estensimetri eccellono nell'osservazione delle dinamiche locali, specialmente nel campo delle bassissime frequenze, dove gli accelerometri MEMS perdono di efficacia. Nel presente lavoro la posizione in cui è stato posto l'estensimetro è in pieno accordo con i principi dell'analisi sperimentale delle tensioni di Dally e Riley [3]. Infatti, la collocazione dell'estensimetro in prossimità dell'incastro, radice della trave, garantisce il monitoraggio del punto più critico di massimo momento flettente, fornendo un quadro completo, assieme all'accelerometro, del comportamento della trave. Da un punto di vista puramente teorico l'analisi del comportamento dinamico di una trave a sbalzo (cantilever beam) si fonda sul modello dell'oscillatore semplice ad un grado di libertà. Come descritto dallo studio compiuto da Chopra [7], citato nella suddetta tesi, per piccoli spostamenti il sistema è governato dall'equazione differenziale dell'equilibrio di D'Alembert:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

(1)

m = Massa [kg]

c = Coefficiente di smorzamento [N*s/m]

k = Rigidezza [N/m]

$\ddot{x}(t)$ = Accelerazione del sistema in funzione del tempo [m/s²]

$\dot{x}(t)$ = Velocità del sistema in funzione del tempo [m/s]

$x(t)$ = Spostamento del sistema in funzione del tempo [m]

Da cui si ricava la pulsazione naturale del sistema non smorzato:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

ω_n = Pulsazione naturale

K = Rigidezza

m = Massa

Tuttavia, la presenza di una massa considerevole in punta, data dallo smartphone, altera significativamente il bilanciamento dinamico, introducendo una discrepanza dal modello ideale. Questo fenomeno è noto come Mass Loading ed è oggetto di studi fin dagli anni '70. Infatti, uno studio compiuto da Laura, Pombo e Susemihl (1974) [10], conferma analiticamente e sperimentalmente il fatto che l'inerzia concentrata all'estremo libero determina una progressiva contrazione dello spettro di frequenza, governato da questa relazione:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eq} + m_{sensore}}} \quad (3)$$

f_n = Frequenza naturale [Hz]

k = Rigidezza flessionale [N/m]

m_{eq} = Massa equivalente [kg]

$m_{sensore}$ = Massa del sensore [kg]

Per l'estrazione affidabile di tali frequenze, a partire dai segnali grezzi, vengono adottate metodologie standard di elaborazione dei segnali consolidate dallo studio di Bendat e Piersol [8]. Tali autori hanno validato l'utilizzo della Fast Fourier Transform (FFT) per l'individuazione dei picchi di risonanza. Inoltre, lavorando con dispositivi a basso costo, diviene necessario un approccio statistico per quantificare l'incertezza, come dimostrato nello studio svolto da Tian [9]. La quantificazione dell'incertezza mediante il calcolo del valore medio della deviazione standard è un passaggio obbligatorio nell'analisi dei test modali sperimentali per garantire la ripetibilità del fenomeno osservato. Un ulteriore avanzamento teorico legato al limite del modello di Eulero-Bernoulli riscontrato nel corso della campagna sperimentale è l'assunzione di un incastro perfettamente rigido, ritenuto ideale. Tuttavia, come dimostrato recentemente dagli studi di validazione sperimentale condotti da Olejnik, Umer e Jablonski [1], le strutture reali deviano dal campo elastico lineare quando sono sottoposte a deflessioni elevate o shock impulsivi. Per descrivere accuratamente il fenomeno, si rende necessario introdurre un termine cubico nell'equazione differenziale, passando così al modello dell'oscillatore di Duffing:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + k_3x(t)^3 = 0$$

(4)

K_3 = Coefficiente cubico di non linearità [N/m³]

Il coefficiente cubico k_3 governa due fenomeni contrapposti all'interno dell'incastro reale:

- Hardening ($k_3 > 0$): Fenomeno di irrigidimento causato dalle micro-compattazioni delle fibre del materiale o dall'irrigidimento dell'asse sottoposto a shock ad alta energia.
- Softening ($k_3 < 0$): Ammorbidimento del sistema, indotto da micro-scorrimenti per attrito all'interfaccia trave-morsetto che riducono momentaneamente la rigidità rotazionale del vincolo. La coesistenza di questi fenomeni in un vincolo di laboratorio reale rende fondamentale l'integrazione di misurazioni cinematiche (globali) e deformative (locali) per ottenere un'identificazione strutturale completa e affidabile.

La rilevazione simultanea di questi due fenomeni complessi all'interno di un banco prova apparentemente semplice rende fondamentale l'approccio multi-sensore. Solo attraverso il confronto di misurazioni cinematiche e deformative è infatti possibile ottenere un'identificazione strutturale realmente completa, capace di distinguere la dinamica teorica da quella effettiva.

1.2 Scopo del lavoro

Il presente elaborato ha come obiettivo primario la validazione e la caratterizzazione sperimentale di un sistema di misura a basso costo applicato nell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM). Alla base della ricerca vi è l'intento di dimostrare come l'integrazione di sensori di natura commerciale, (accelerometri MEMS), integrati nello smartphone e di sistemi di trasduzione (estensimetri a foglio resistivo), possa fornire elevate prestazioni diagnostiche paragonabili a quelle offerte dalla tradizionale strumentazione da laboratorio. Per arrivare a dimostrare l'efficacia di tale sistema, l'attività di ricerca e le relative campagne sperimentali sono state strutturate per soddisfare due obiettivi metodologici specifici:

- Validazione della sensibilità strumentale low-cost: Valutare tramite test specifici l'accuratezza del sensore MEMS capacitivo triassiale di uno smartphone nella rilevazione dei parametri modali attraverso l'utilizzo di una trave a sbalzo. L'obiettivo, quindi, è di verificare la capacità del dispositivo di percepire micro-variazioni della frequenza naturale, confermando l'assenza di distorsioni del segnale per frequenze inferiori al limite di Nyquist;
- Dimostrazione dell'approccio multi-sensore: superare limiti intrinseci legati all'utilizzo di un singolo punto di osservazione. Lo scopo è dimostrare che l'acquisizione simultanea di segnali cinematici globali e di segnali deformativi locali, costituisce un approccio rigoroso per ottenere un quadro diagnostico completo. Tuttavia, l'elevata sensibilità del banco di misura equipaggiato di questa sensoristica, ha permesso di spingersi oltre gli scopi prefissati. L'acquisizione simultanea dei segnali, infatti, ha portato all'osservazione di fenomeni di dinamica non lineare imprevisti, dimostrando cedevolezza e micro-scorrimenti presenti in un incastro reale, che hanno generato variazioni di frequenze contrapposte come il Softening e l'Hardening.

Per illustrare nel dettaglio questo percorso di ricerca, validazione e analisi, la trattazione è stata organizzata in capitoli secondo la seguente struttura:

- Nel capitolo 2, (Materiali e metodi), vengono descritti il setup sperimentale e la strumentazione adoperata. In questa sezione si illustra: la configurazione del banco di misura strutturale (basato su una trave a sbalzo); si analizzano le caratteristiche dei sensori impiegati (estensimetro, accelerometro MEMS e martello strumentato); si definiscono i protocolli di acquisizione per i test in vibrazione libera e per l'eccitazione impulsiva. Sono presenti, inoltre, richiami ai fondamenti teorici della dinamica strutturale e le metodologie di elaborazione dei segnali.
- Nel Capitolo 3, (Risultati sperimentali e discussioni), sono esposti analizzati e discussi i dati raccolti. Vengono presentati dapprima i risultati dei test in vibrazione libera, quantificando l'impatto del Mass Loading e l'insorgenza delle prime non linearità durante il rilascio di masse e delle deflessioni imposte. Successivamente, sono analizzati i risultati derivanti dall'eccitazione impulsiva evidenziando le risposte del sistema sotto diversi livelli di energia. Un rigoroso approccio statistico garantisce la massima trasparenza sulle incertezze e sulle misurazioni.
- Nel capitolo 4, (Conclusioni), vengono tirate le somme dell'intero lavoro svolto, riportando le considerazioni conclusive sull'affidabilità del sistema di misura low cost validato, sul successo dell'approccio multi-sensore e sui possibili sviluppi futuri di questa tecnologia.

Capitolo 2 Materiali e metodi

2.1 Banco di misura strutturale

L'intera campagna sperimentale svolta durante il tirocinio è stata eseguita all'interno di un ambiente controllato quale il laboratorio di misure dell'università, mantenendo quindi al minimo l'esposizione a fonti di vibrazioni esterne che avrebbero potuto inquinare i segnali di acquisizione. Il setup fisico, adoperato, riproduce fedelmente il comportamento dinamico di una struttura flessibile semplice, consentendo quindi l'acquisizione pulita di segnali di vibrazione e l'innescare di fenomeni lineari e non, oggetto di studio.

2.1.1. Configurazione della trave a sbalzo

La struttura adoperata è costituita da un'asta metallica flessibile, una trave a sbalzo, nota in letteratura come cantilever beam. Il provino è realizzato interamente in acciaio, un materiale dal noto comportamento elastico-lineare con proprietà notevoli come omogeneità ed isotropia. Specifiche geometriche della trave:

- Lunghezza totale: 35,5 cm
- Lunghezza libera: 29,5 cm
- Spessore: 1mm

La scelta di uno spessore così ridotto risponde a due necessità sperimentali:

- Compatibilità con il campionamento low-cost: avere uno spessore esiguo abbatte la rigidezza flessionale della trave e quindi le frequenze naturali. Nel corso della campagna sperimentale, sono stati identificati due modi flessionali, (2Hz e 15,8Hz), ampiamente inferiori al limite di Nyquist di 50 Hz dettato dalla frequenza di campionamento dello smartphone, garantendo quindi acquisizioni corrette e prive di aliasing.
- Innesco delle non linearità in campo elastico: Uno spessore di 1 mm conferisce alla trave una notevole flessibilità che ha permesso nel corso dei test di indurre notevoli spostamenti all'estremità libera, senza mai raggiungere il regime plastico o la tensione di snervamento dell'acciaio. Il materiale, nonostante le sollecitazioni, è rimasto in campo elastico, ciò ha permesso di innescare micro-interazioni al vincolo senza rovinare il provino. Fra trave e morsetto, nel corso delle prove, si creano quindi delle interazioni che vanno a modificare la rigidezza teorica del sistema.
Per realizzare il vincolo cinematico e quindi creare la trave ancorata, una estremità dell'asta è stata rigidamente ancorata al banco di prova tramite l'utilizzo di un serraggio a morsetto come mostrato in Figura 1.

Una volta ancorata la trave come specificato in precedenza, la lunghezza della stessa si riduce da 35,5 cm a 29,5 cm. L'utilizzo di questo sistema di serraggio dovrebbe permettere di replicare un vincolo ideale, con rotazioni e traslazioni nulle ma come dimostrato in letteratura [1], l'utilizzo di un morsetto non costituisce un incastro ideale, bensì reale, in quanto la struttura, a livello macroscopico, appare rigidamente serrata con l'impossibilità di alcun movimento. A livello microscopico invece, la rigidezza torsionale all'interfaccia tra morsetto e trave, non è tendente all'infinito. Durante l'esecuzione dei test e quindi durante applicazioni di carichi, deflessioni imposte ed impulsi generati sulla trave, si generano micro-scorrimenti per attrito all'interno dell'ancoraggio. I microspostamenti generano una variazione della rigidezza del sistema andando a modificare la risposta della trave. Si creano fenomeni di natura non lineare come Softening ed Hardening, identificati nei successivi test.



Figura 1- Incastro reale dato dall'ancoraggio con morsetto

2.2. Strumentazione per il monitoraggio

Per caratterizzare il comportamento dinamico della struttura in esame e validare l'approccio low-cost, il banco di prova è stato equipaggiato con un sistema di monitoraggio multi-sensore. La catena di misura è composta da tre componenti fondamentali di natura fisica e classe tecnologica differente: un sensore per il tracciamento cinematico; un trasduttore per la misura per l'analisi della deformazione; un dispositivo di eccitazione per il calcolo dell'impulso.

2.2.1. Sensore per la cinematica globale: accelerometro MEMS

L'accelerometro è un trasduttore elettro-meccanico in grado di rilevare e misurare l'accelerazione di un corpo nello spazio, ovvero la variazione di velocità nel tempo del corpo al quale è solidale. Per il monitoraggio della cinematica globale della trave è stato impiegato un sensore accelerometrico MEMS triassiale, (Micro Electro-Mechanical Systems), integrato all'interno dello smartphone, nello specifico di un iPhone 13. Tale sensore presenta una risoluzione del convertitore Analogico-Digitale (ADC) pari a 16 bit e consente un campionamento ad una frequenza di 100 Hz. Per garantire che il dispositivo riesca ad identificare i modi di vibrare della struttura, è stato utilizzato un nastro isolante che ha permesso di mantenere estremamente solidale il cellulare durante il corso delle prove. Il dispositivo è stato posizionato e reso stabile ad una distanza di 3 cm dall'estremità libera della trave a sbalzo, come si evince dalla Figura 2. Questa specifica collocazione è stata scelta in quanto l'estremità libera rappresenta il punto di massima ampiezza per i modi di vibrazione flessionale. Acquisire le misurazioni in questo punto, infatti, permette di massimizzare il cinematismo rilevato, ottimizzando di conseguenza il rapporto segnale/rumore.



Figura 2 – Posizione smartphone su trave

Confronto tecnologico: accelerometro MEMS vs accelerometro da laboratorio

L'impiego di un dispositivo mobile come strumento di misurazione richiede una rigorosa validazione delle prestazioni rispetto agli standard industriali. Nell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM), il confronto tra accelerometri piezoelettrici di laboratorio e

accelerometri MEMS integrati negli smartphone, è un tema ampiamente trattato in letteratura. A tale riguardo uno studio fondamentale in questo settore è stato condotto da Martinelli e Racic [2] i quali hanno affiancato accelerometri di laboratorio a diversi modelli di smartphone. Principio di trasduzione: Lo smartphone impiega una tecnologia MEMS capacitiva, che ha il vantaggio di poter misurare anche la componente continua dell'accelerazione, (ovvero la gravità). I sensori da laboratorio sfruttano invece tipicamente l'effetto piezoelettrico dei cristalli, risultando eccellenti per le alte frequenze ma fisicamente incapaci di misurare eventi statici.

- **Architettura e Cablaggio:** Il sensore industriale richiede numerosi cablaggi, un sistema di alimentazione esterna e costose schede di acquisizione (DAQ). Lo smartphone rappresenta invece un sistema "All-in-One" completamente wireless, capace di abbattere drasticamente i costi e i tempi di setup strumentale.
- **Rumore di fondo e affidabilità:** sebbene i sensori MEMS integrati negli smartphone presentino un rumore di fondo generalmente più elevato rispetto agli accelerometri industriali di laboratorio, la letteratura scientifica attesta che tali dispositivi offrono una risoluzione ampiamente compatibile con le finalità di estrazione dei parametri modali e dei test vibrazionali a bassa frequenza.

Limiti e criticità della strumentazione Low-Cost

Utilizzare sensoristica low-cost introduce inevitabili criticità specifiche documentate in letteratura, quest'ultime devono essere considerate nell'analisi della dinamica della struttura perché vanno a modificare i risultati dei test.

- **Effetto di Mass Loading:** Il problema principale riscontrato è costituito dalla massa del dispositivo, che risulta pari a circa 170g. Considerando il modello dell'oscillatore semplice, la frequenza naturale del sistema è definita come riportato precedentemente nella formula (4). La massa del sensore va ad incrementare il denominatore dell'equazione e questo si traduce inevitabilmente in una diminuzione della frequenza naturale rilevata.
- **Frequenza di campionamento limitata:** Rispetto ai sistemi di acquisizione da laboratorio (DAQ) che operano tipicamente nell'ordine dei kHz, l'accelerometro dello smartphone, gestito da siti browser o app native, presenta una frequenza di campionamento limitata a circa 100 Hz. In accordo con il teorema di Nyquist-Shannon, il sensore riesce a leggere correttamente solo vibrazioni fino a 50 Hz.

$$f_N = \frac{f_s}{2}$$

(5)

f_N = frequenza di Nyquist [Hz]

f_s = frequenza di campionamento dello strumento [Hz]

Questo rende il dispositivo idoneo esclusivamente per l'identificazione dei primi modi di vibrare a bassa frequenza, precludendo, di fatto, l'indagine di dinamiche modali di ordine superiore.

- Rumore di fondo (Noise Floor): I sensori MEMS commerciali presentano un livello di rumore intrinseco superiore rispetto ai sensori piezoelettrici, ciò rende indispensabile un filtraggio in fase di post-processing per l'estrazione dei dati.

2.2.2 Sensore per la dinamica locale: Estensimetro a foglio resistivo

L'estensimetro elettrico a resistenza (strain gauge), è un trasduttore in grado di misurare le deformazioni meccaniche superficiali di un corpo. Il suo principio di funzionamento si basa sull'effetto piezoresistivo: quando la griglia metallica del sensore viene allungata o compressa assieme al materiale su cui è incollata, la sua resistenza elettrica subisce una variazione proporzionale alla deformazione stessa. È stato impiegato un estensimetro mono assiale a foglio resistivo, caratterizzato da una griglia in costantana e da una resistenza nominale di 120 Ω . Il legame lineare tra la deformazione meccanica e la variazione di resistenza è governato dalla seguente relazione fondamentale:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF * \epsilon$$

(6)

ΔR = Variazione della resistenza indotta dalla sollecitazione [Ω]

R = Resistenza nominale a riposo dell'estensimetro [Ω]

GF = Gauge Factor (fattura di taratura), costante di sensibilità adimensionale fornita dal produttore [-]

ϵ = Deformazione locale [-]

L'installazione fisica dell'estensimetro sulla struttura oggetto degli studi non è stata di competenza dell'operatore, in quanto la trave è utilizzata in laboratorio per compiere esercitazioni con gli studenti, ed è stata fornita già equipaggiata del suddetto sensore. La procedura che si sarebbe dovuta applicare nel caso di installazione dell'estensimetro è rigorosa e standardizzata. Essa prevede infatti, una complessa preparazione superficiale del metallo e l'incollaggio millimetrico tramite adesivi strutturali specifici in condizioni controllate. La posizione dove si è deciso di collocare il sensore è diametralmente opposta a quella dell'accelerometro, è stato incollato infatti alla "radice" della trave come si evince nelle Figure 3-4. La collocazione è ampiamente giustificata dai principi fondamentali dell'analisi sperimentali delle tensioni e della flessione delle travi [3] in quanto il momento flettente raggiunge il valore massimo in corrispondenza della sezione d'incastro.

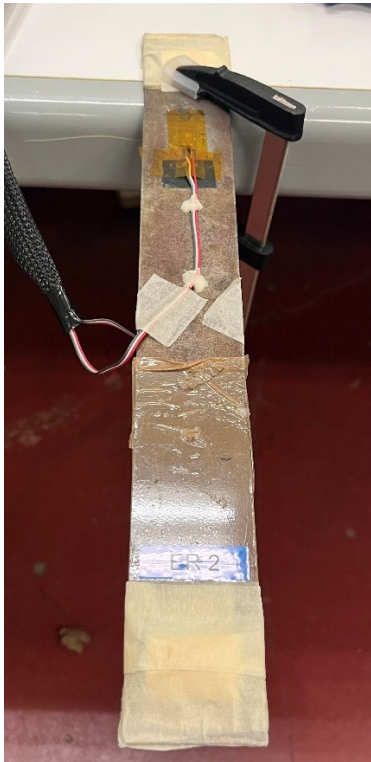


Figura 3



Figura 4

Figura 3-4 Posizione dell'estensimetro sulla trave

Limiti e criticità della misura estensimetrica

Informazione locale: L'estensimetro è un sensore che restituisce una precisione elevatissima, ma d'altro canto il posizionamento e la procedura di incollaggio sono molto vincolanti visto che, una volta collocato, non può essere riposizionato. Essendo uno strumento di misura locale questo si traduce in una validazione del solo punto sottostante al sensore. In altre parole, ciò rende il sistema "cieco" rispetto ad eventuali dinamiche anomale del resto della struttura.

2.2.3 Strumentazione per l'eccitazione impulsiva: Martello Strumentato

Per indurre l'eccitazione impulsiva sulla trave a sbalzo è stato impiegato un martello strumentato mostrato in Figura 6. A differenza di un martello tradizionale questo strumento integra al suo interno, (dietro la testa battente), una cella di carico basata su un cristallo piezoelettrico, quando il martello colpisce una struttura, il cristallo per un frangente di tempo subisce una compressione. Tramite l'effetto piezoelettrico viene generata una carica elettrica proporzionale alla forza d'impatto. Grazie a questo strumento è stato possibile ricostruire il profilo della forza nel tempo immessa nel sistema. Il martello utilizzato nel corso del tirocinio è di massa contenuta ed è contenuto all'interno del box mostrato in Figura 5.



Figura 5-Box contenente il martello strumentato



Figura 6-Martello strumentato

L'energia meccanica trasferita alla struttura, che viene definita come impulso, è regolata dalla seguente relazione:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt$$

(7)

I = impulso meccanico trasferito alla struttura [$N \cdot s$]

$F(t)$ = forza d'impatto rilevata dalla cella di carico in funzione del tempo [N]

t_1, t_2 = istante d'inizio e fine del contatto tra trave e martello [s]

dt = differenziale del tempo [s]

Il segnale in uscita del martello strumentato è un segnale di tensione espressa in mV/N .

Nel corso del tirocinio questo trasduttore è stato utilizzato per generare impatti a diversi livelli di energia definiti come:

- Colpo forte
- Colpo piano

L'utilizzo di questo strumento è stato fondamentale per identificare i comportamenti non lineari della struttura come Hardening e Softening.

Limiti e criticità dell'eccitazione impulsiva

Nonostante il martello strumentato sia lo standard industriale per le prove di Experimental Modal Analysis (EMA), quando questa viene svolta manualmente, si può incorrere in alcune sfide operative:

- Ripetibilità dell'impulso: essendo il colpo generato da un operatore, è impossibile garantire due impatti consecutivi identici in modulo e durata. Per questo motivo il protocollo di test ha previsto l'esecuzione di 4 misurazioni per ogni test al fine di garantire un comportamento medio affidabile.

- Rischio del doppio impatto: Lavorando su una struttura flessibile, uno dei problemi maggiori riscontrati che possono andare a non validare la prova, è il “Double -Hit”. Se la punta del martello “rimbalza” e quindi colpisce la struttura una seconda volta, l’input energetico viene distorto portando a falsi picchi. In fase di acquisizione, analizzando i risultati delle prove, sono stati scartati i segnali affetti da double-hit.

2.2.4 Complementarità dell’approccio multi-sensore

Dotare la struttura di estensimetro ed accelerometro rappresenta uno degli obiettivi del lavoro svolto, poiché attraverso l’acquisizione dei segnali relativi ad entrambi i sensori, si possono ottenere più informazioni rispetto a quelle che si avrebbero dall’impiego di un singolo sensore. Studi avanzati sull’impiego comparato dei sensori per le strutture a [4], evidenziano come accelerometri ed estensimetri siano metodologicamente complementari. Mentre i primi sono ottimali per tracciare la cinematica ad alta frequenza, i secondi catturano informazione sulla deformazione a bassa frequenza. Come già specificato in precedenza, il sistema utilizzato è ancorato tramite incastro reale e l’utilizzo di un singolo punto di osservazione può risultare fuorviante.

- Osservazione globale: L’accelerometro MEMS di cui è equipaggiato lo smartphone restituisce un’informazione di cinematica globale. Posizionato nell’estremità libera della trave esso identifica il movimento dell’intera struttura.
- Osservazione locale: L’estensimetro, posizionato diametralmente opposto all’accelerometro, (alla radice della trave), fornisce informazioni di dinamica locale. Misura lo stato di tensione e deformazione del materiale esattamente nel punto definito “critico” di interfaccia con il vincolo.

2.3. Acquisizione dei dati

Dopo aver completato l’allestimento del banco di misura ed aver posizionato adeguatamente la strumentazione, si è passati all’esecuzione dei test e quindi all’acquisizione dei segnali. Questa sezione è utilizzata sia per descrivere nel dettaglio hardware e software utilizzati per l’acquisizione dei segnali che per esplicitare, in maniera rigorosa, il protocollo sperimentale effettuato per l’esecuzione dei test. L’obiettivo del protocollo sperimentale sopra detto è quello di andare a minimizzare errori operativi da parte dell’operatore e garantire il più possibile la ripetibilità dei test.

2.3.1. Software di acquisizione e hardware di interfacciamento

Per trasformare i fenomeni fisici quali; vibrazioni, deformazioni e impatti in segnali analizzabili, sono state predisposte due catene di acquisizione separate, avviate in tempi diversi, a causa della diversa natura degli strumenti impiegati.

Acquisizione dati dell’accelerometro MEMS

L’acquisizione dei segnali accelerometrici è stata gestita interamente dallo smartphone, nello specifico un iPhone 13.

- Software: È stata utilizzata l’applicazione open-source Phyphox sviluppata dall’università RWTH di Aquisgrana; dimostrato da recenti studi [5] è il fatto che Phyphox registra ed esporta il flusso dell’accelerometro così come viene fornito dall’API del

sensores, senza filtraggio o preelaborazione aggiuntiva a livello di app, permettendo un controllo esplicito dei parametri di campionamento.

- Frequenza di campionamento: come anticipato in precedenza, l'applicazione ha utilizzato un sampling rate di 100 Hz, tale parametro è stato ritenuto idoneo avendo registrato picchi di frequenza massimi di circa 20 Hz.
- Esportazione dati: I segnali grezzi sono stati esportati in formato CSV (Comma Separated Values)

Acquisizione dati estensimetro e martello strumentato

I segnali analogici in uscita dalla configurazione dell'estensimetro e dagli impulsi dati utilizzando il martello, hanno richiesto un sistema di condizionamento e di conversione analogico-digitale (ADC) di tipologia industriale.

- Hardware: attraverso l'utilizzo di cablaggi si è collegato il sensore ad un modulo di acquisizione dati. Questo componente si è occupato di fornire la corretta tensione di alimentazione per il ponte di Wheatstone dell'estensimetro e di digitalizzare i segnali analogici.
- Software: La gestione dell'acquisizione è stata svolta attraverso Catman, un software professionale validato ampiamente per la diagnostica strutturale [6]. Esso viene infatti utilizzato in innumerevoli studi per testare sensoristica low-cost, in quanto è ritenuto eccezionalmente affidabile.
- Esportazione dati: Le misurazioni di forza [N] e deformazione [$\mu\epsilon$] sono state esportate in formato testuale, e successivamente elaborate con i dati cinematici estratti dallo smartphone.

2.3.2. Protocollo sperimentale per prove di vibrazione libera

La caratterizzazione dinamica della trave ha previsto l'esecuzione di due differenti test progettati per determinare le frequenze naturali, andando a variare le condizioni d'innescò. In ambo le prove l'iPhone 13 è stato reso solidale alla struttura (3 cm dall'estremità libera, Figura 2) mediante l'utilizzo di nastro isolante ad alta tenuta. Si è deciso di adoperare questa soluzione poiché garantisce sia un ridotto ingombro volumetrico, (poiché va ad interagire con lo schermo) sia il non danneggiamento del dispositivo.

Cronoprogramma di sincronizzazione e ripetibilità dei test (valido per entrambe le prove):

Allo scopo di garantire la massima solidità dei dati per entrambi i test, si è deciso di adottare la stessa procedura operativa, strutturata come segue:

- Sincronizzazione temporale: L'acquisizione ha avuto inizio con l'avvio dell'applicazione Phyphox precedentemente installata sullo smartphone; seguono 10 secondi di attesa, per dar modo alla struttura di dissipare le vibrazioni indotte dall'interazione dell'operatore con il touch-screen del dispositivo. Si avvia il software Catman sul PC per registrare ulteriori 10 secondi di baseline, al ventesimo secondo totale registrato da Phyphox viene innescato l'evento dinamico, lasciando registrare la vibrazione e il suo naturale smorzamento per 60 secondi. Una volta raggiunti i 70 secondi sul timer di Catman si interrompono le acquisizioni su entrambi i software.

- Ripetibilità statistica: Per garantire l'affidabilità del dato e minimizzare gli errori introdotti dall'operatore, l'intera sequenza operativa viene ripetuta per 3 volte per ciascuna delle configurazioni adoperate.

Vibrazione libera mediante rilascio di carico statico: Questo test sfrutta il rilascio istantaneo di una massa per innescare l'oscillazione, permettendo di valutare la sensibilità del sistema alle variazioni della massa. Materiali utilizzati:

- Pesistica graduata:
 - 270g (Figura 7)
 - 200g (Figura 8)
 - 100g (Figura 9)
- Filo in nylon
- Forbici



Figura 7- peso da 270 g



Figura 8- peso da 200 g



Figura 9- peso da 100 g

Esecuzione dell'innescò: questa avviene previa attivazione dei programmi di acquisizione, tramite l'utilizzo di un filo in nylon che viene ancorato ad un'estremità alla punta della trave. All'altra estremità viene sospesa invece, la massa scelta, inducendo un'inflexione statica verso il basso come si nota nella configurazione adottata usando il peso graduato da 270 g in Figura 10.



Figura 10 – Configurazione effettuata con peso da 270 g

In accordo con la procedura di sincronizzazione temporale, una volta passati i 20 secondi per attivare i programmi, l'operatore recide il filo con le forbici tramite un movimento netto. Considerando che per ogni configurazione sono state svolte tre ripetizioni dei test la campagna ha prodotto 9 campionamenti. Dalle suddette configurazioni e attraverso l'utilizzo della sensoristica si ottengono i segnali grezzi; come si può notare in Figura 11 vi è riportato un esempio di segnale grezzo ottenuto dall'accelerometro e in Figura 12 un esempio di segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro.

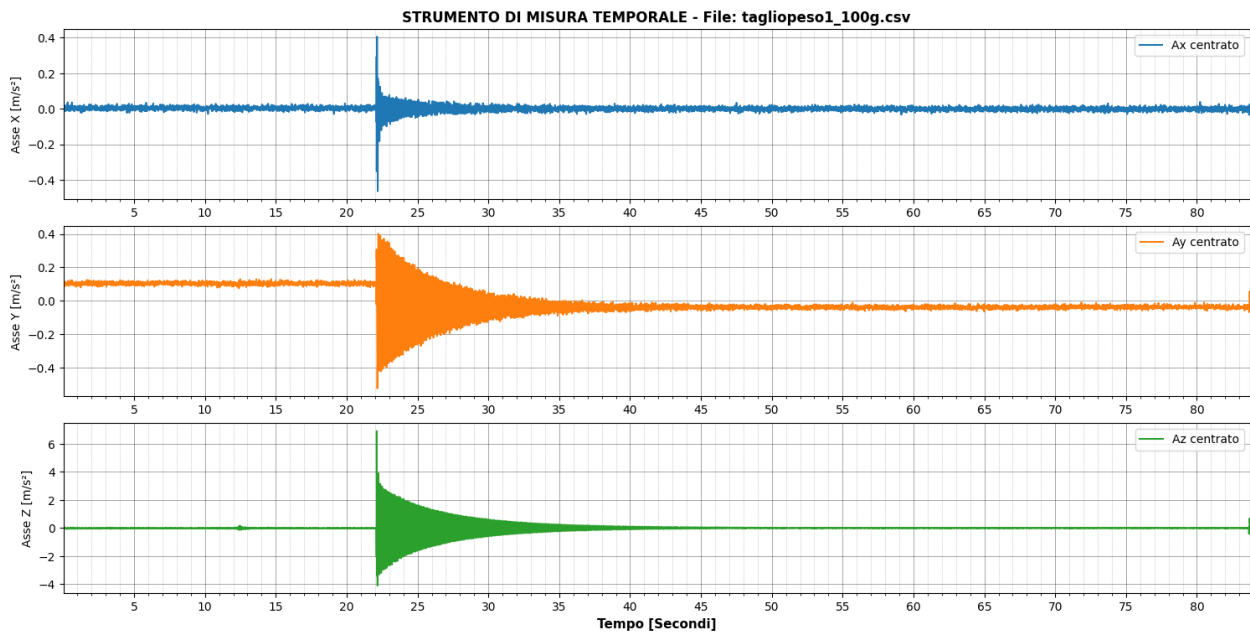


Figura 11- Esempio di segnale grezzo ottenuto dall'accelerometro

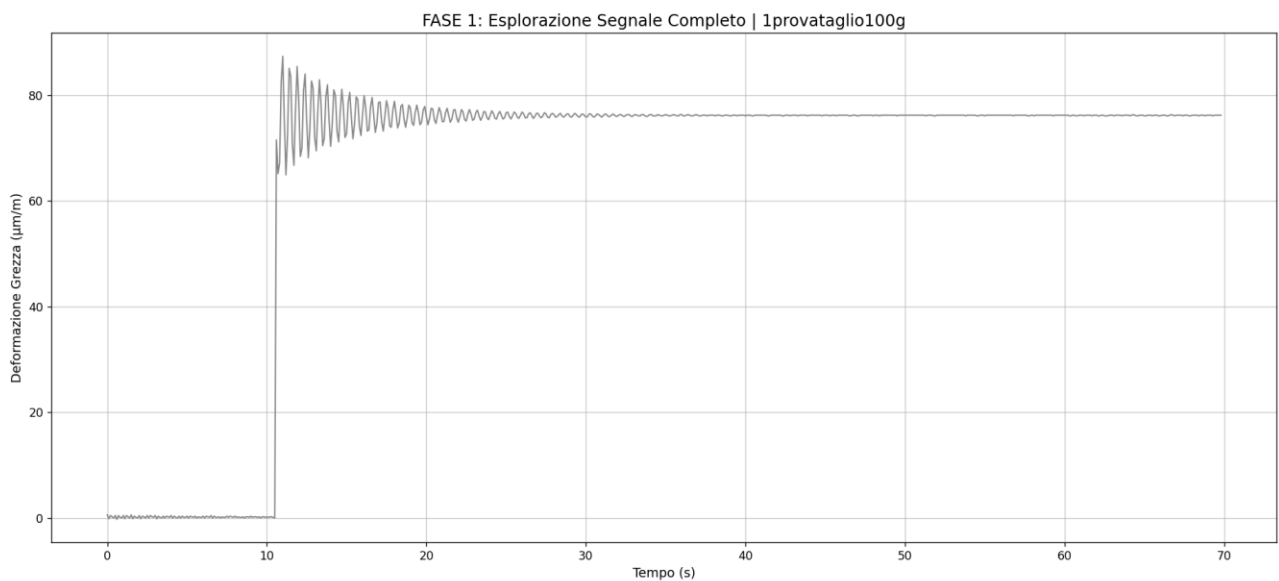


Figura12- Esempio di segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro

Vibrazione libera da deflessione iniziale imposta: Questa seconda prova è stata concepita imponendo uno spostamento puramente geometrico senza l'aggiunta di masse esterne

pendenti. Materiali utilizzati: Per la riuscita della prova è stato utilizzato un supporto rigido di riscontro ad altezza variabile posizionato sotto la punta libera della trave, come si evince in Figura 13 dove vi era stata preparata la configurazione per la prova di deflessione imposta di 3 cm. Tale supporto è stato utilizzato come vincolo per imporre l'esatto spostamento iniziale producendo tre casistiche differenti:

- 3 cm (massima deflessione)
- 2 cm (deflessione media)
- 1 cm (deflessione minima)

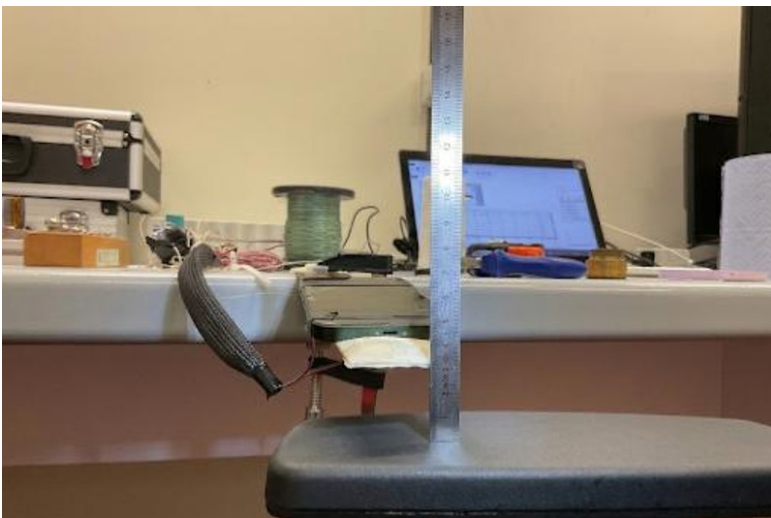


Figura 13- Configurazione utilizzata per deflessione imposta di 3 cm, massima deflessione

Esecuzione dell'innescò: l'operatore infletteva manualmente la punta della trave verso il basso fino ad arrivare al vincolo (in relazione a che altezza di deflessione si voleva ottenere, la variazione di altezza asta- vincolo veniva misurata previo inizio della prova).

Una volta arrivati al vincolo l'operatore rilasciava istantaneamente la presa, liberando la trave e permettendo al sistema di risalire e dissipare l'energia elastica accumulata. Analogamente al test precedente sono state eseguite 3 ripetizioni per quota, per un totale di 9 acquisizioni. Di seguito sono riportati esempi di segnali grezzi ottenuti dalle acquisizioni svolte, in Figura 14 un segnale grezzo ottenuto dall'accelerometro, mentre in Figura 15 un segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro.

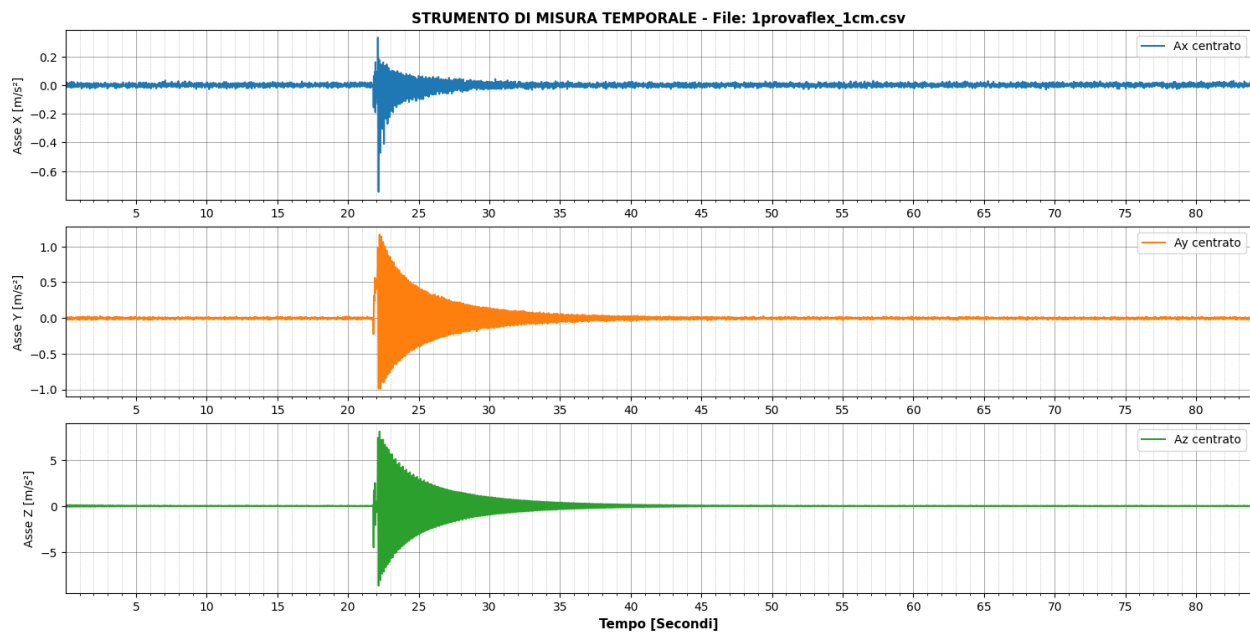


Figura 14 - Esempio di segnale grezzo ottenuto dall'accelerometro

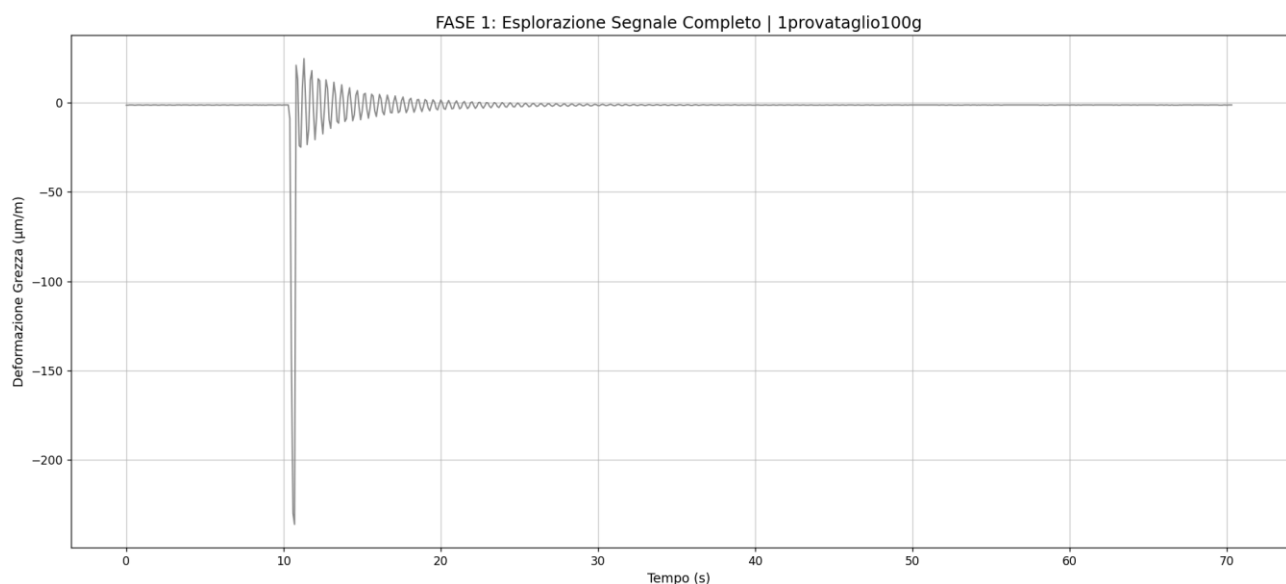


Figura 15-Esempio di segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro

2.3.3. Protocollo sperimentale per eccitazione impulsiva

La terza campagna di prove sperimentali è finalizzata allo studio della risposta dinamica del sistema sotto azione di impulso di forza noto misurabile e variabile in ampiezza. L'utilizzo del martello ha permesso di quantificare esattamente l'energia meccanica trasferita alla trave nel momento dell'impatto. Come per le prove precedenti lo smartphone è stato reso solidale alla trave tramite l'utilizzo di nastratura. I segnali accelerometrici sono stati acquisiti attraverso Phyphox, mentre i segnali di deformazione dell'estensimetro e picco di forza del martello sono stati acquisiti attraverso l'utilizzo di Catman; è stato mantenuto il rigoroso cronoprogramma già validato nei precedenti test:

- Avvio di Phyphox e attesa di 10 secondi per la stabilizzazione della trave;

- Avvio di Catman e registrazione di ulteriori 10 secondi di baseline;
- Innesco dell'evento dinamico al ventesimo secondo totale;
- Registrazione della vibrazione libera per 60 secondi e arresto simultaneo

Esecuzione dell'innesco: L'operatore ha utilizzato il martello strumentato per imprimere un colpo secco e istantaneo alla struttura, direzionato verticalmente dall'alto verso il basso. Inizialmente la campagna sperimentale prevedeva l'applicazione dell'impatto impulsivo all'estremità libera della trave, con l'obiettivo di andare a massimizzare il braccio della forza. Tuttavia, in fase di test, tale configurazione ha evidenziato forti criticità in quanto la ridotta rigidità flessionale all'estremità causava un'oscillazione di ampiezza eccessiva, determinando fenomeni di doppio impatto del martello e distorcendo il segnale acquisito. Vi è stato bisogno quindi di un cambio di posizione dove applicare l'impulso per ovviare al problema. Si è scelta di conseguenza una posizione intermedia lungo la campata della trave, nello specifico tra l'alloggiamento dello smartphone e la posizione dell'estensimetro alla radice. L'operatore ha calibrato manualmente la forza dell'impatto su due distinti livelli:

- Colpo piano (bassa energia): impatto controllato e leggero, eccitazione della struttura e mantenimento della stessa nel suo regime elastico lineare. In questa configurazione le micro-interazioni al vincolo sono teoricamente minime.
- Colpo forte (alta energia): tramite questo impatto vi è un trasferimento elevato di energia cinetica al sistema che viene forzato verso limiti non lineari. Si esasperano i micro-scorrimenti e la compattazione locale all'interfaccia del morsetto.

Ripetibilità statistica:

Essendo l'impulso del martello strumentato governato dalla manualità dell'operatore, per garantire la massima solidità statistica del segnale e minimizzare gli errori casuali, il protocollo ha previsto l'esecuzione di quattro ripetizioni per ciascun livello di energia. Al fine di garantire la massima affidabilità dei test, l'operatore si è preoccupato di validare in tempo reale la curva di forza tramite l'interfaccia del software Catman. A tal proposito sono state validate e registrate esclusivamente le acquisizioni derivanti da impatti netti, le esecuzioni non conformi a tali standard qualitativi non sono state incluse nel set di analisi. Al termine di questa campagna sono state salvate con successo 4 registrazioni multi-sensori indipendenti, allineate nel dominio del tempo. Di seguito sono riportate, in Figura 16 un esempio di segnale grezzo ottenuto dall'impulso del martello; in Figura 17 un esempio di segnale grezzo ottenuto dall'accelerometro e in Figura 18 un esempio di segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro.

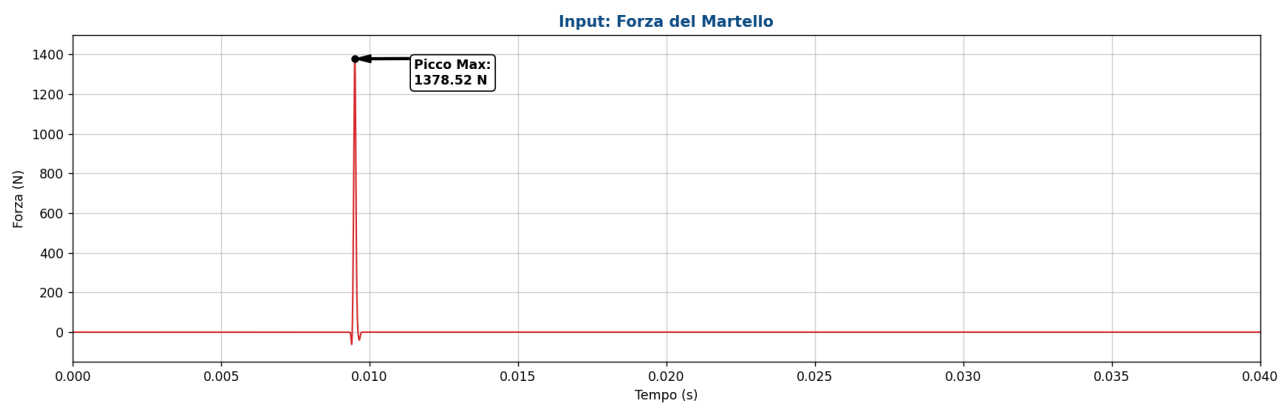


Figura 16 – Esempio di segnale grezzo ottenuto dall’impulso dato con il martello

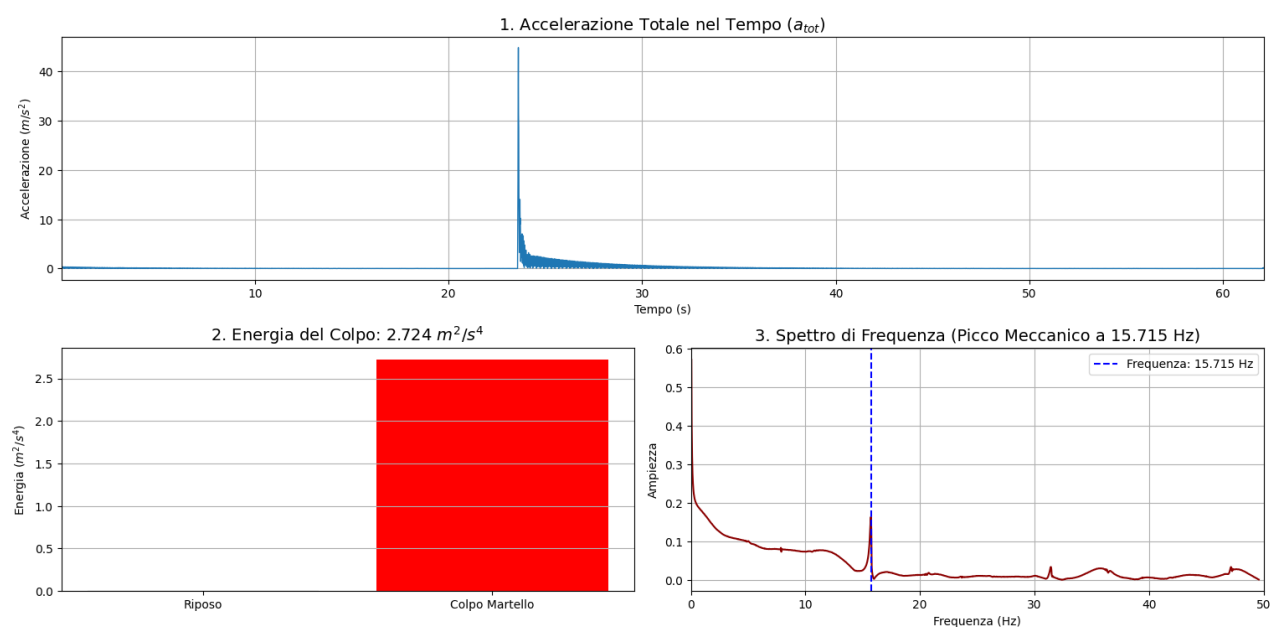


Figura 17 - Esempio di segnale grezzo ottenuto dall’accelerometro

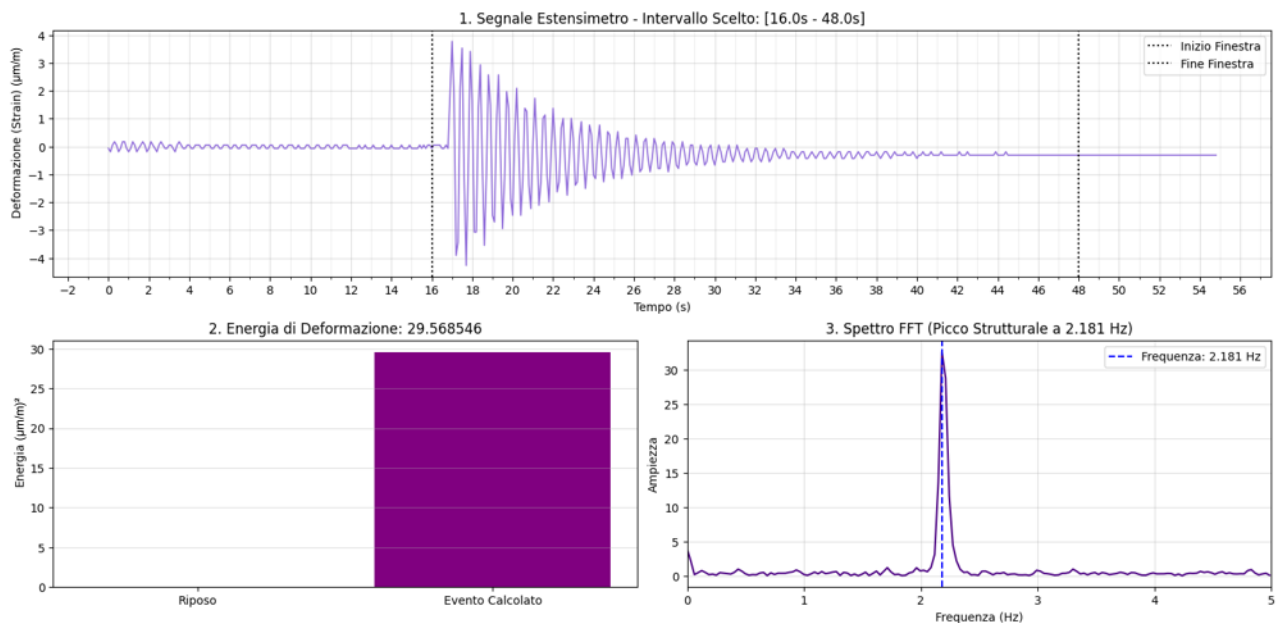


Figura 18 - Esempio di segnale grezzo ottenuto dall'estensimetro

2.4 Metodologia di analisi dei dati e fondamenti teorici

Per riuscire al meglio ad interpretare i segnali grezzi ottenuti dalla campagna sperimentale effettuata, e riuscire a tradurli in parametri fisici significativi, è fondamentale determinare il comportamento della trave utilizzando modelli matematici. Di seguito vengono richiamati i fondamenti teorici della dinamica strutturale e le tecniche di lavorazione di segnale supportati da letteratura scientifica.

2.4.1 Dinamica lineare: Modello dell'oscillatore semplice

Il comportamento dinamico di una trave a sbalzo sottoposta a vibrazione flessionale può essere analizzato per piccoli spostamenti attraverso il modello dell'oscillatore semplice a un grado di libertà. [7]. L'equazione differenziale del moto per le libere oscillazioni smorzate di questo sistema è governata dalla legge di equilibrio di D'alembert riportata precedentemente nella formula (1). Dividendo l'equazione per la massa è possibile introdurre la pulsazione, già definita nella formula (2) e il rapporto di smorzamento:

$$\zeta = \frac{c}{2 * \sqrt{k * m}} \quad (8)$$

ζ = Rapporto di Smorzamento [-]

c = Coefficiente di smorzamento [N*s/m]

k = Rigidezza [N/m]

m = massa [kg]

Il parametro di maggiore importanza già elencato in precedenza nella formula (3) è la frequenza naturale di vibrazione f_n [Hz]. Come confermato dall'articolo citato, le strutture metalliche in acciaio come quella presa in esame presentano tassi di smorzamento estremamente ridotti (ζ

$\ll 1$), la frequenza dell'oscillazione smorzata f_d è matematicamente coincidente con la frequenza naturale non smorzata f_n

$$f_d = f_n * \sqrt{1 - \zeta^2} \approx f_n$$

(9)

f_d = Frequenza dell'oscillazione smorzata [Hz]

f_n = Frequenza naturale non smorzata [Hz]

L'equazione della frequenza naturale evidenzia due principi fondamentali che evidenzieremo poi nei risultati:

- Sensibilità alla massa: un incremento della massa m provoca un proporzionale abbassamento di frequenza naturale f_n
- Sensibilità alla rigidità: una qualsiasi variazione di rigidità k si traduce in una deviazione della frequenza naturale

2.4.2 Dinamica non lineare: Fenomeni di Hardening e Softening

Il modello lineare dell'oscillatore semplice perde di validità quando il sistema viene sottoposto ad elevate eccitazioni o grandi spostamenti imposti. La rigidità k che viene presa a livello teorico come ideale non è più una costante, ma assume una dipendenza diretta dall'ampiezza dello spostamento. Tale fenomeno viene descritto dal modello dell'oscillatore di Duffing, (già riportato in precedenza nella formula 3) la cui forza elastica introduce un termine cubico non lineare [1].

A seconda del segno assunto dal coefficiente non lineare k_3 la struttura manifesta due comportamenti diametralmente opposti:

- Hardening (irrigidimento, $k_3 > 0$): si verifica questo fenomeno quando vi è un aumento della rigidità del sistema all'aumentare dell'ampiezza di oscillazione. A livello macroscopico è associato all'irrigidimento geometrico dell'asse della trave, mentre a livello microscopico è riconducibile ai micro-accorciamenti e micro-allungamenti (compattazione microscopica) delle fibre dei materiali nel nodo incastrato (interfaccia nodo-morsetto) sottoposto a shock impulsivi.
- Softening (Ammorbidimento, $k_3 < 0$): si verifica quando la rigidità diminuisce all'aumentare dell'ampiezza di oscillazione. Le ampie deformazioni flessionali innescano micro-scorrimenti per attrito all'interfaccia trave-morsetto inducendo una momentanea perdita di aderenza.

Tale fenomeno induce una riduzione della rigidità rotazionale globale del vincolo rispetto all'ideale matematico, provocando un abbassamento della frequenza naturale. La teoria classica di Eulero- Bernoulli prevede per una trave ideale in acciaio un comportamento di irrigidimento puro; d'altro canto, nelle campagne sperimentali si osserva la tendenza opposta. Citando lo studio di validazione sperimentale [1]: *“questo contrasto rivela l'influenza di effetti del mondo reale, come la cedevolezza o i micro scorrimenti in corrispondenza del morsetto, che sono assenti nella formulazione idealizzata”*. A livello fisico, infatti, le elevate ampiezze di flessione innescano micro-

scorrimenti per attrito all'interfaccia trave-morsetto riducendo la rigidità rotazionale del vincolo.

2.4.3. Elaborazione dei segnali

I segnali grezzi esportati dall'applicazione Phyphox e dal software Catman si presentano come un campionamento nel dominio del tempo (file CSV o testuali). Per l'analisi dinamica, i segnali grezzi acquisiti dal sensore MEMS lungo le tre direzioni principali (X, Y, Z) sono stati "puliti" dall'offset statico gravitazionale mediante detrending. Successivamente le tre componenti sono state combinate per ricavare il modulo dell'accelerazione globale, calcolato secondo la seguente espressione:

$$a_{tot}(t) = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2}$$

(10)

$a_{tot}(t)$ = Accelerazione globale [m/s²]

$a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$, = Componenti direzionali dell'accelerazione in funzione del tempo [m/s²]

L'utilizzo dell'accelerazione globale a_{tot} ha permesso di catturare l'intera energia cinetica del sistema, indipendentemente dal perfetto allineamento geometrico dello smartphone rispetto al piano di deflessione della trave. Per estrarre il contenuto modale, calcolare l'energia dell'evento ed evidenziare le risonanze i file oggetto di studio sono stati importati e processati attraverso script dedicati in Python, avvalendosi di librerie come Numpy e Scipy). La procedura di post lavorazione è stata strutturata per generare un pannello completo seguendo una rigorosa struttura composta da quattro fasi:

- **Signal trimming:** Poiché le registrazioni contenevano inevitabilmente rumore di fondo iniziale e periodi lunghi di quiete finale è stata implementata una funzione di taglio manuale. Per ogni singola prova l'operatore ha analizzato visivamente il grafico grezzo e ha fornito lo script e i parametri esatti di inizio e fine evento da analizzare. Il segnale è stato così troncato per contenere esclusivamente la vibrazione libera smorzata massimizzando la pulizia dell'analisi successiva.
- **Detrending:** I sensori possono presentare offset intrinseci come misurazione della gravità statica per gli accelerometri o lievi sbilanciamenti del ponte per gli estensimetri. Lo script in Python calcola la media aritmetica dell'intero segnale troncato e sottrae punto per punto l'array dei segnali, questo passaggio centra perfettamente l'oscillazione sullo zero.
- **Calcolo dell'energia dell'evento:** Il codice calcola l'energia complessiva associato all'evento deformativo cinematico.

L'energia di un segnale discreto $x(n)$ campionato per N punti viene valutata come la somma dei quadrati delle ampiezze:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2$$

(11)

E = Energia complessiva dell'evento, per l'accelerometro [m²/s⁴], per l'estensimetro [(μm/m)²]

x (n) = Ampiezza del segnale discreto, per l'accelerometro [m/s²], per l'estensimetro [(μm/m)]

N = Numero di punti (campionamento) [-]

N= Indice del campione [-]

Questo valore scalare quantifica l'intensità globale della prova ed è stato rappresentato graficamente tramite un apposito diagramma a barre per un rapido confronto visivo.

- Trasformata di Fourier (FFT) e Peak picking: al segnale, reso “pulito” dai processi precedenti viene applicato l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform). Si tratta di un'implementazione ottimata della Trasformata Discreta di Fourier (DFT). [8]. Calcolata come:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \text{ per } K = 0, 1, \dots, N - 1$$

(12)

X(k) = componente in frequenza, per l'accelerometro [m/s²], per l'estensimetro [(μm/m)]

x (n) = segnale nel dominio del tempo, per l'accelerometro [m/s²], per l'estensimetro [(μm/m)]

K = Indice della frequenza [-]

N = Numero di punti (campionamento) [-]

N= Indice del campione [-]

Si è ottenuto lo spettro dell'ampiezza, il codice sfrutta funzioni di ricerca dei massimi locali per identificare in modo automatico la coordinata x, ovvero la Frequenza Naturale f_n corrispondente al picco massimo di energia. Al termine di queste procedure i valori finali sono espressi come media aritmetica delle misurazioni effettuate, mentre la dispersione del dato è quantificata attraverso la deviazione standard inserita nei diagrammi riassuntivi sotto forma di barre di errore.

2.4.4. Sintesi procedurale: schemi a blocchi

Al fine di riassumere i protocolli ampiamente descritti nei paragrafi precedenti e di evidenziare le differenze operative tra le diverse campagne sperimentali, si riportano di seguito due distinti schemi a blocchi. Il primo schema, riportato in Figura 19, raffigura la sintesi di procedura effettuata relativamente al test di vibrazione libera, rilascio di masse e deflessione imposte. Il secondo, riportato in Figura 20, descrive invece la procedura eseguita per il test con eccitazione impulsiva caratterizzata principalmente

dall'inserimento nell'iter della prova di un terzo sensore, il martello strumentato, fondamentale per quantificare l'energia in ingresso e per riconoscere a pieno i fenomeni non lineari.

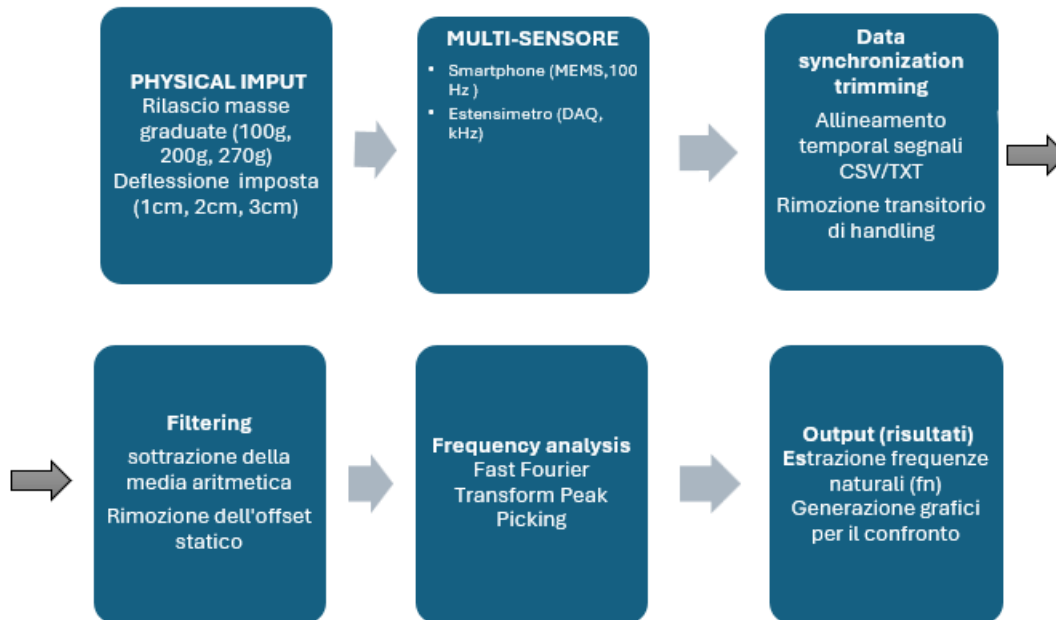


Figura 19 -Schema a blocchi prove di vibrazione libera

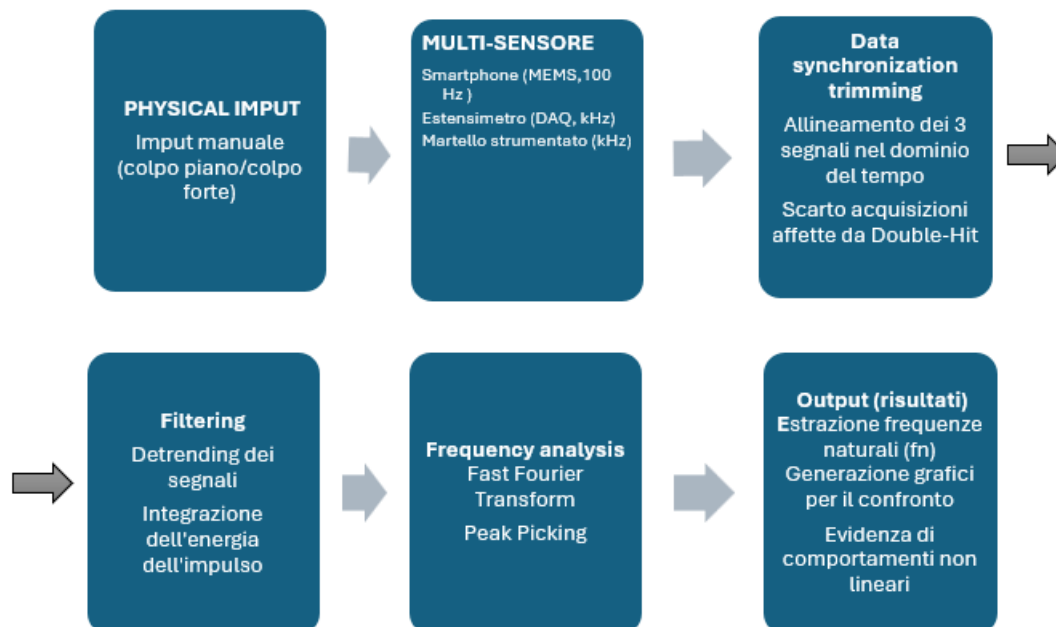


Figura 20 -Schema a blocchi prove di eccitazione impulsiva

Capitolo 3 Risultati sperimentali e discussioni

Il presente capitolo è dedicato all'esposizione e all'interpretazione dei dati acquisiti durante la campagna sperimentale. I segnali grezzi registrati simultaneamente attraverso la sensoristica low-cost sono stati elaborati seguendo la precisa sequenza esposta nel paragrafo 2.4.3. Per ogni configurazione dei test, i risultati vengono presentati in termini di energia del fenomeno (varianza del segnale nel dominio del tempo) e di frequenza naturale, estratta mediante l'algoritmo di FFT. Al fine di garantire la massima chiarezza dei dati ottenuti all'interno delle tabelle vi è riportata la media aritmetica delle misurazioni effettuate, mentre la varianza è individuata nei diagrammi. Trattandosi di misurazioni sperimentali è stato ritenuto opportuno quantificare l'incertezza e la dispersione dei dati; come si evince da articoli scientifici quale quello svolto da Qin Tian [9] l'utilizzo di grafici a dispersione con valori medi e barre che raffigurano la deviazione standard è un metodo rigoroso per rappresentare l'incertezza legata alle frequenze naturali. Al fine di garantire la massima trasparenza statistica i diagrammi a dispersione presentati in questo capitolo seguono una codifica specifica:

- Marcatori circolari grigi (segnali grezzi): Rappresentano i valori esatti estratti dalle singole ripetizioni sperimentali dei test, mostrando le reali distribuzioni delle acquisizioni.
- Marcatore circolare blu (valore medio): identifica la media aritmetica calcolata sulle ripetizioni di quella specifica configurazione.
- Barre di tolleranza nere (Deviazione standard): Rappresentano l'intervallo di confidenza. Tale parametro quantifica l'incertezza e la ripetibilità della misura.
- Asse X: Rappresenta il parametro fisico indipendente e manipolato dall'operatore, esso quindi può consistere nella massa graduata applicata in sospensione, nell'ampiezza iniziale di deflessione imposta oppure nel livello energetico dell'eccitazione impulsiva
- asse Y: Rappresenta la frequenza naturale di vibrazione o la frequenza di risonanza estratta tramite algoritmi di identificazione dei picchi.

Nel fenomeno del monitoraggio strutturale sperimentale, l'interazione fisica tra la struttura in esame e la strumentazione di misura costituisce un elemento di fondamentale importanza. Nel presente caso di studio avendo utilizzato un accelerometro MEMS che è integrato all'interno di uno smartphone dal peso di 170 grammi, l'utilizzo di esso comporta una problematica nota in letteratura come Mass Loading. La conseguenza fisica dell'utilizzo di tale sensore è un rallentamento della dinamica del sistema che si traduce in una riduzione delle sue frequenze naturali di vibrazione. La letteratura concorda nel dimostrare che l'effetto di mass Loading raggiunge il picco massimo quando la massa aggiunta è collocata all'estremità libera della trave, in tale posizione infatti le ampiezze delle oscillazioni sono massime amplificando al massimo l'inerzia introdotta nel sistema durante il moto. Uno studio [10] condotto da P.A.A.Laura, J.L:pombo ed E:A,Susemihl, in cui gli autori hanno analizzato in modo esaustivo il comportamento di una trave incastrata da un estremo e dotata di una massa concentrata all'estremo libero, dimostra come la presenza di tale carico in punta alteri il bilanciamento dinamico del sistema portando a una progressiva contrazione dello spettro della frequenza di risonanza. Fin dalla misurazione iniziale quindi la sola presenza dello smartphone vincolato alle estremità della trave introduce un effetto di Mass Loading che riduce la frequenza di vibrazione rispetto al sistema teorico privo di strumentazioni. Nelle fasi successive

dell'esperimento l'aggiunta di ulteriori carichi concentrati andrà ad accentuare in modo controllato tale fenomeno generando un rallentamento progressivo e prevedibile della risposta dinamica che verrà dettagliatamente discusso nell'analisi dei risultati.

3.1. Risultati dei test con vibrazione libera

I primi risultati riportati riguardano i test di vibrazione libera, questi test sono stati concepiti con lo scopo di validare la sensibilità della strumentazione adottata, valutandone la capacità di rilevare variazioni minime in termini di frequenza ed energia. Al fine di garantire il massimo rigore scientifico, i segnali estratti dalle singole prove sono stati aggregati, come confermato da letteratura specifica [9]. I risultati sono stati esposti considerando il valore medio delle misurazioni, mentre la variabilità è stata quantificata mediante deviazione standard e rappresentata nei grafici sotto forma di barre di errore.

3.1.1 Risultati del test con rilascio di carichi statici

Il protocollo sperimentale ha previsto l'innescò delle vibrazioni mediante il rilascio istantaneo di masse graduate da 270 g, 200 g, 100 g, (riportate nel paragrafo 2.3.2. nelle figure 7,8,9) sospese tramite l'utilizzo di filo all'estremità libera della trave. L'elaborazione dei dati registrati nel corso dei 9 differenti campionamenti ha prodotto risultati che vengo riassunti nella Tabella 1.

Vibrazione libera mediante rilascio di carico statico					
Entità del carico	Tentativo	Accelerometro		Estensimetro	
		Energia del fenomeno m^2/s^4	Picco di frequenza Hz	Energia del fenomeno m^2/s^4	Picco di frequenza Hz
270g	Prova 1	2.327	15.689	7485.11	2.148
	Prova 2	1.919	15.698	8537.27	2.139
	Prova 3	2.107	15.708	9836.18	2.139
	Media	2.117	15.698	8619.52	2.142
200g	Prova 1	1.160	15.727	4440.25	2.152
	Prova 2	1.524	15.730	5170.82	2.141
	Prova 3	1.541	15.705	4268.86	2.141
	Media	1.408	15.720	4626.64	2.145
100g	Prova 1	0.432	15.731	1599.64	2.123
	Prova 2	0.437	15.755	1535.54	2.141
	Prova 3	0.381	15.754	1517.10	2.139
	Media	0.417	15.756	1550.76	2.134

Tabella 1-Risultati test vibrazione libera mediante rilascio di carico statico

Volendo analizzare separatamente i segnali ottenuti dai due diversi sensori, in primo luogo si osserva una perfetta concordanza al modello teorico della dinamica lineare per quanto riguarda la cinematica globale. Come si evince chiaramente dalle medie aritmetiche del picco di frequenza relative all'accelerometro riportate nella Tabella 1, e dal grafico riportato nella Figura 21, vi è una chiara diminuzione della frequenza all'aumentare della massa applicata, in pieno accordo con la legge dell'oscillatore semplice. L'incremento della massa applicata passata da 100 g a 270 g ha determinato un aumento considerevole dell'energia vibrazionale, passata da 0.417 a 2.117 m^2/s^4 , ma ha simultaneamente "appesantito" il sistema diminuendo la frequenza di risonanza da 15.756 Hz a 15.698 Hz. Il fatto che l'architettura low-cost dello smartphone sia stato in grado di quantificare in modo netto una variazione di frequenza

microscopica (0.06 Hz) mantenendo una deviazione standard contenuta, conferma una sensibilità strumentale adeguata alle applicazioni diagnostiche professionali.

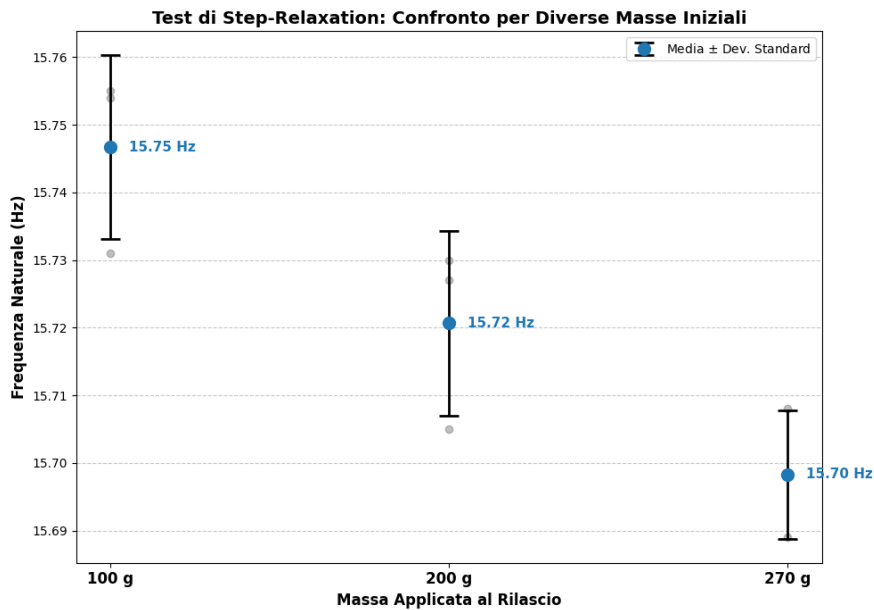


Figura 21-Grafico con risultati accelerometrici test rilascio di carichi statici

Spostando l'attenzione verso il segnale di deformazione fornito dall'estensimetro la tabella in Tabella 1 mostra che l'energia del fenomeno misurata all'incastro, subisce un aumento considerevole al crescere del peso rilasciato, passando da un valore di $1550.76 \text{ m}^2/\text{s}^4$ a $8619.52 \text{ m}^2/\text{s}^4$. Come si evince dalla Figura 22 in cui sono riportati i risultati dell'estensimetro l'evoluzione del primo modo flessionale si differenzia dalla tendenza decrescente dell'accelerometro, la frequenza infatti si mantiene pressoché stabile attorno al valore medio di 2.14 Hz. Questa stabilità locale è indice del fatto che l'aggiunta di una massa posizionata all'estremità opposta della trave rallenta il moto della trave ma non modifica la rigidità in questo specifico test.

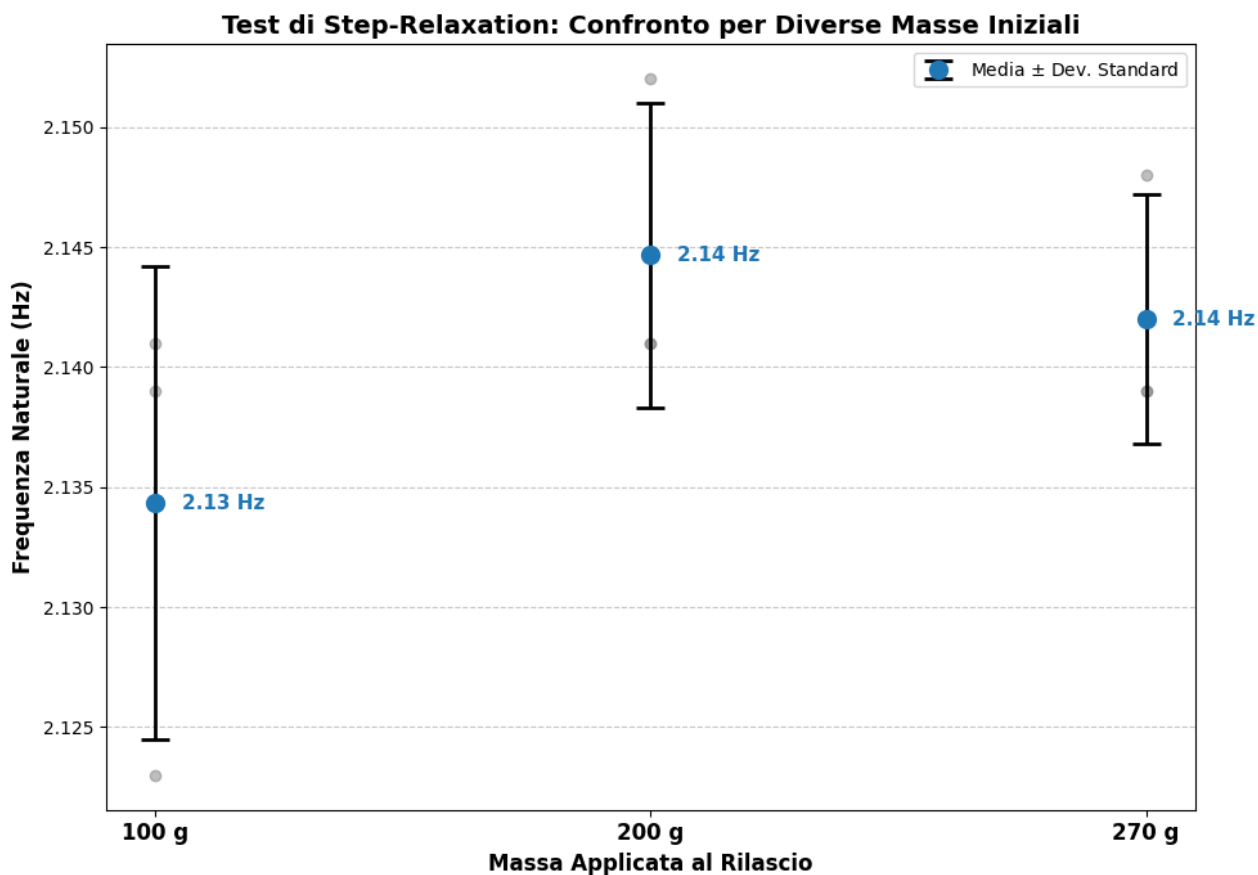


Figura 22- Grafico con i risultati dell'estensimetro del test rilascio di carichi statici

3.1.2. Risultati del test a deflessione iniziale imposta

La seconda fase del protocollo sperimentale in vibrazione libera si è concentrata esclusivamente sull'influenza dell'ampiezza di deformazione iniziale. La trave in acciaio è stata inflessa manualmente verso il basso imponendo tre livelli di spostamento statico alla punta (3 cm, 2 cm, 1 cm) e successivamente rilasciata. Questo test è stato concepito per forzare la struttura verso i limiti del regime lineare e interrogarsi sul comportamento della trave sugli spostamenti. I risultati calcolati su 9 acquisizioni totali sono riportati nella Tabella 2 sottostante.

Vibrazione libera da deflessione iniziale imposta					
Altezza di flessione	Tentativo	Accelerometro		Estensimetro	
		Energia del fenomeno m^2/s^4	Picco di frequenza Hz	Energia del fenomeno m^2/s^4	Picco di frequenza Hz
3cm	Prova 1	6.654	15.766	6737.33	2.090
	Prova 2	5.833	15.798	5095.28	2.126
	Prova 3	7.756	15.793	4812.95	2.093
	Media	6.747	15.786	5548.52	2.103
2cm	Prova 1	4.937	15.846	1721.11	2.093
	Prova 2	4.937	15.846	1166.21	2.120
	Prova 3	3.760	15.874	1542.31	2.060
	Media	4.545	15.855	1476.54	2.104
1cm	Prova 1	2.137	15.888	444.53	2.060
	Prova 2	2.213	15.881	341.77	2.060
	Prova 3	1.759	15.902	407.25	2.093
	Media	2.036	15.890	397.854	2.071

Tabella 2-Risultati test vibrazione libera da deflessione iniziale imposta

L'analisi dei dati rileva fondamentalmente l'architettura multi-sensore adottata per il banco di prova. Difatti, all'aumentare dell'energia potenziale elastica immessa del sistema, i due sensori registrano derive in frequenza diametralmente opposte, svelando la complessità del vincolo reale. Analizzando i segnali acquisiti dell'accelerometro MEMS capacitivo triassiale, si osserva un calo della frequenza naturale al crescere dell'ampiezza di deflessione iniziale imposta. Passando da un'inflexione da 1 cm ad una di 3 cm notiamo una diminuzione della frequenza naturale (f_n) media, che passa da 15.890 Hz a 15.786 Hz. La diminuzione della frequenza di risonanza è una conferma della presenza di Softening (ammorbidimento). Le ampie oscillazioni, infatti, innescano micro-scorrimenti per attrito all'interno del serraggio del morsetto, riducendo la rigidezza rotazionale globale del sistema rispetto al modello di incastro ideale che è privo di micro-scorrimenti. In Figura 23 sono riportati graficamente i risultati derivanti dall'implementazione dell'accelerometro

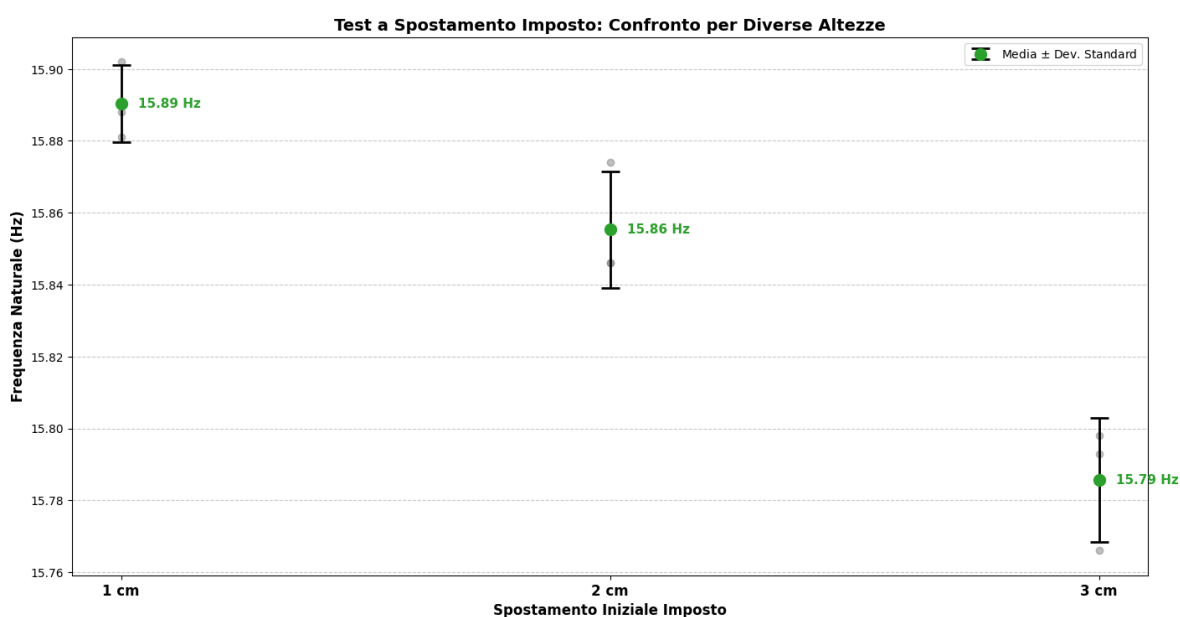


Figura 23- Grafico con risultati accelerometrici test a deflessione iniziale imposta

Spostando l'attenzione verso i risultati ottenuti dall'estensimetro evidenziati nella Figura 24 sottostante, si evince un comportamento diametralmente opposto. Difatti, al crescere della deflessione (da 1 cm a 3 cm) la frequenza registrata dal sensore deformativo subisce un incremento, passando da 2.071 Hz a 2.103 Hz. L'aumento di tale parametro è indice di presenza di Hardening (irrigidimento) locale. In prossimità del vincolo vi è il massimo momento flettente che causa micro-compattazioni delle interfacce tra acciaio della trave e ganasce del morsetto. Ciò genera un aumento di rigidezza locale che l'accelerometro, posto all'estremità opposta rispetto all'estensimetro, non riesce a percepire. Questo test dimostra inequivocabilmente il successo dell'approccio multi-sensore, in quanto lo smartphone si è rivelato sufficientemente sensibile da individuare il comportamento globale della trave nel suo complesso. D'altro canto, l'estensimetro ha misurato l'irrigidimento locale alla radice della trave. L'integrazione di questi due sensori e il loro dispiegamento simultaneo, ha consentito una diagnosi completa e reale del sistema, che altrimenti sarebbe risultata incompleta.

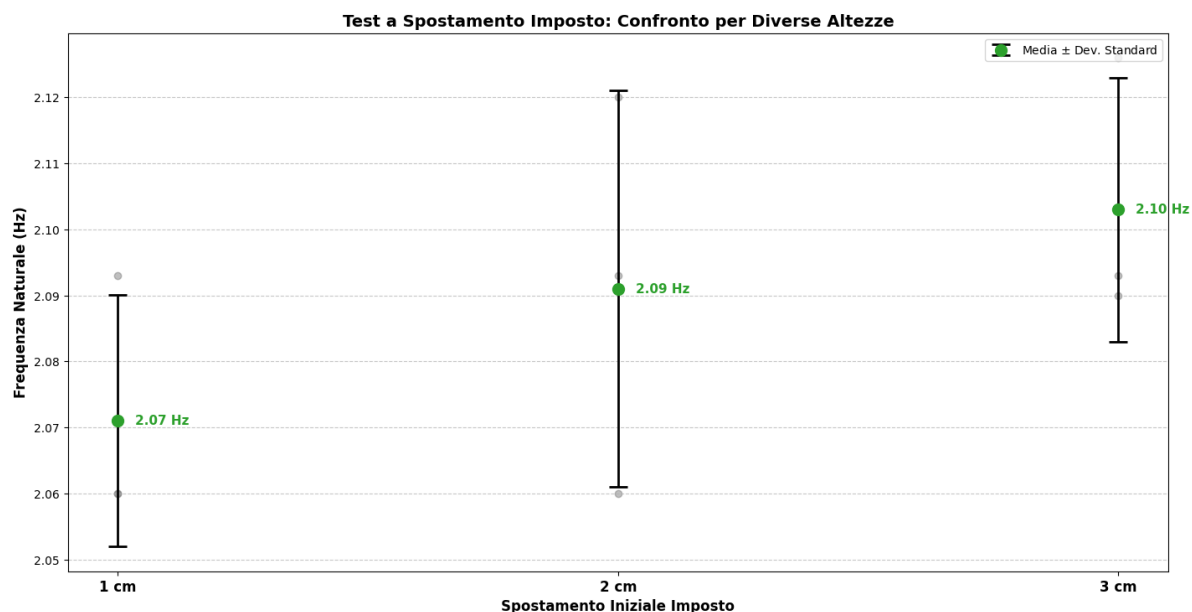


Figura 24- Grafico con risultati dell'estensimetro del test a deflessione iniziale imposta

3.2 Risultati per l'eccitazione impulsiva

La terza e ultima campagna sperimentale è composta dal test definitivo per la validazione di procedura di monitoraggio proposta. Differentemente dalle prove di vibrazione libera, in cui l'energia iniziale era stimata in base a dati geometrici o gravitazionali, l'impiego del martello strumentato ha consentito di quantificare l'esatto impulso di forza di ingresso. L'approccio utilizzato ha permesso di correlare in modo rigoroso la risposta dinamica e deformativa della trave tramite l'energia meccanica trasferita al sistema con l'impatto.

3.2.1. Risultati del test con martello strumentato

Per esaminare il comportamento strutturale l'operatore ha strutturato il test su due distinti livelli di energia, un impatto a bassa energia (colpo piano) ed uno ad alta energia (colpo forte). I risultati delle 8 acquisizioni multi-sensore, allineate nel dominio del tempo e detratte di eventuali fenomeni di double-hit sono riassunti nella sottostante Tabella 3:

Eccitazione impulsiva con martello strumentato						
Entità del colpo	Tentativo	Impulso [mV]	Accelerometro		Estensimetro	
			Energia del fenomeno [m^2/s^4]	Picco di frequenza [Hz]	Energia del fenomeno [m^2/s^4]	Picco di frequenza [Hz]
colpo piano	Prova 2	4.37	0.283	15.606	29.56	2.181
	Prova 3	3.88	0.255	15.634	14.40	2.118
	Media	4.125	0.269	15.62	21.98	2.149
Colpo forte	Prova 1	1557.63	2.724	15.715	345.55	2.150
	Prova 4	1408.32	0.813	15.734	195.41	2.118
	Media	1482.97	17.685	15.724	270.48	2.134

Tabella 3-Risultati del test di Eccitazione impulsiva con martello strumentato

Da questa tabella si evince che le forze d'impatto dinamico provocano reazioni, nei sensori, opposte rispetto a quelle viste nei test di flessione manuale. Infatti, Il trasferimento di energia mediante shock impulsivo, innesca fenomeni non lineari inversi rispetto a quelli osservati precedentemente nel test di deflessione statica imposta. Per esaminare al meglio questa situazione si riportano i grafici nelle Figure 25 e 26, che mostrano come cambiano le frequenze

in relazione alla forza del colpo ricevuto. Analizzando in primo luogo il comportamento generale, (attraverso la lettura del grafico riportato in Figura 25), registrato dell'accelerometro MEMS dello smartphone, notiamo come passando dal colpo piano al colpo forte la frequenza sale da 15.620 Hz a 15.724 Hz. Questo aumento di frequenza indica un chiaro fenomeno di Hardening (irrigidimento) globale. A differenza dei test svolti e analizzati in precedenza il colpo istantaneo del martello genera un'onda di shock ad alta frequenza. Prima che la trave possa inflettersi in ampie oscillazioni globali, l'energia dall'impulso compatta il sistema lungo il suo asse longitudinale, innescando una temporanea resistenza che il sensore MEMS rileva come un aumento di rigidità flessionale equivalente.

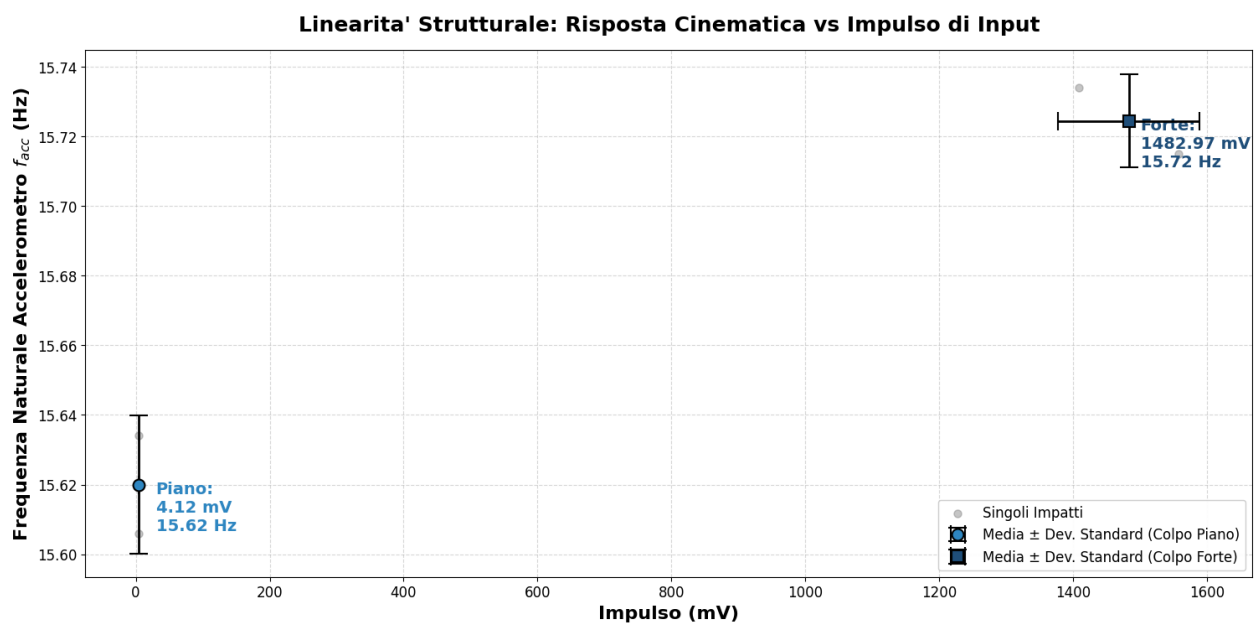


Figura 25-Grafico con risultati accelerometrici del test di Eccitazione impulsiva con martello strumentato

Simultaneamente, l'analisi locale fornita dall'estensimetro posizionato all'estremità libera della trave, mostra la tendenza contraria come si evince in Figura 26. Aumentando la forza del colpo, infatti, la frequenza scende da 2.150 Hz a 2.134 Hz. Questa diminuzione indica un fenomeno di Softening (ammorbidimento) locale. L'urto impulsivo genera micro-scorrimenti istantanei delle fibre superficiali con la momentanea perdita di aderenza e il conseguente calo della rigidità rotazionale del nodo. Gli scorrimenti vengono catturati con estrema precisione dall'estensimetro, rilevando una cedevolezza non prevedibile in analisi globale svolta dall'accelerometro.

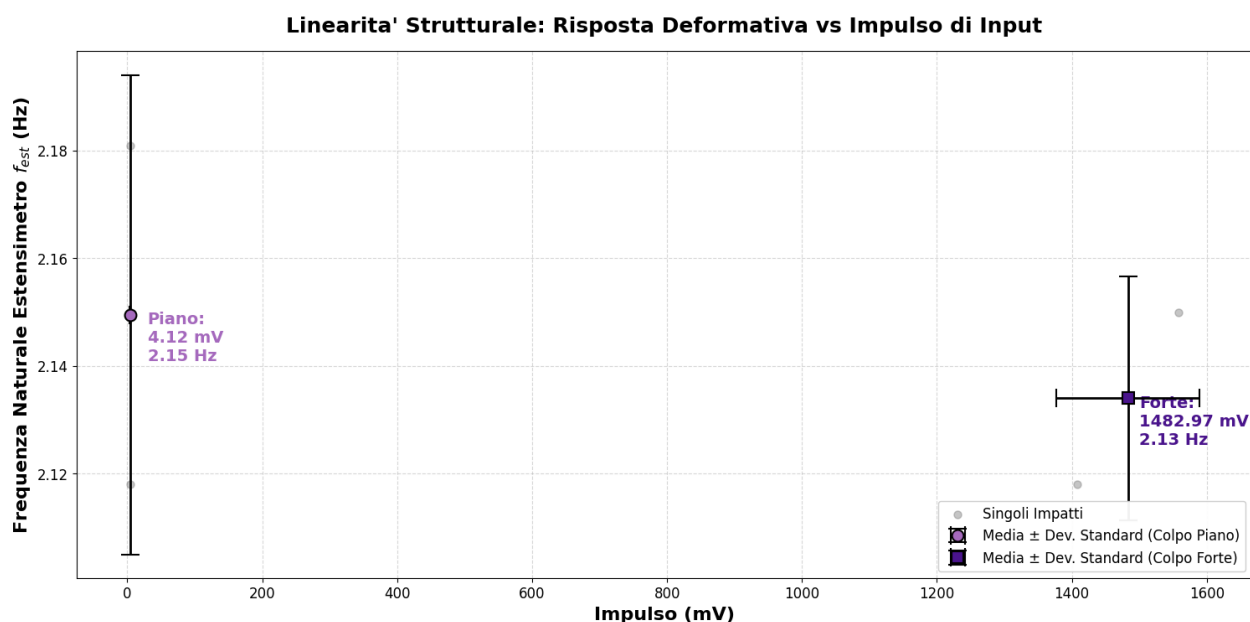


Figura-26 Grafico con risultati estensimetrici del test di Eccitazione impulsiva con martello strumentato

4 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di caratterizzare e validare sperimentalmente un sistema di misura a basso costo per applicazione di Structural Health Monitoring (SHM), integrando sensori di derivazione commerciali quali gli accelerometri MEMS integrati negli smartphone con trasduttori industriali tradizionali ovvero, estensimetri a foglio resistivo. L'estesa campagna sperimentale condotta su un modello di trave sbalzo ha permesso di trarre conclusioni significative validando sia l'architettura strumentale preposta sia le metodologie di analisi dati utilizzate. In primo luogo, i risultati sperimentali hanno ampiamente confermato l'affidabilità dell'accelerometro MEMS dello smartphone per il monitoraggio modale a bassa frequenza. Nonostante i limiti intrinseci della tecnologia quali la limitata frequenza di campionamento (100 Hz, che impone un limite di Nyquist a 50 Hz) e un rumore di fondo superiore a quello dei sensori piezoelettrici da laboratorio, il dispositivo si è dimostrato estremamente sensibile. Nei test di vibrazione libera con rilascio di masse lo smartphone è stato in grado di quantificare variazioni della frequenza naturale dell'ordine di centesimi di Hertz. Incrementando il carico sospeso in punta da 100 g a 270 g, il sensore ha tracciato in modo inequivocabile il calo di frequenza (indotto dal fenomeno del Mass Loading) passata da 15.756 Hz a 15.698 Hz. L'affidabilità della strumentazione è stata validata anche attraverso il calcolo dell'energia del fenomeno. Il sistema ha infatti registrato un aumento proporzionale e coerente dell'energia vibrazionale all'aumentare del carico: la variazione della massa da 100 g a 270 g ha comportato un incremento dell'energia globale misurata dall'accelerometro da 0.417 a 2.117 m^2/s^4 e un corrispondente aumento dell'energia deformativa misurata dall'estensimetro da 1550.76 a 8619.52 $(\mu\text{m}/\text{m})^2$. Il risultato scientificamente più rilevante della ricerca è la dimostrazione del successo dell'approccio multi-sensore basato sul confronto diretto dei segnali. La campagna sperimentale ha rilevato che l'impiego di un singolo punto di analisi e di una singola tipologia di osservazione avrebbe condotto ad una identificazione

strutturale parziale e fuorviante. L'interazione tra l'asta flessibile in acciaio e l'incastro reale a morsetto ha innescato complessi comportamenti non lineari deviando dal modello ideale lineare di Eulero Bernoulli. L'acquisizione simultanea dei segnali attraverso l'implementazione di più sensori ha svelato invece la coesistenza di due fenomeni fisici contrapposti, che sarebbero stati impossibili da identificare attraverso l'utilizzo di un singolo sensore:

- Durante i test di deflessione iniziali imposta, il progressivo incremento dello spostamento (da 1 cm a 3 cm) si è tradotto in una netta crescita dell'energia del fenomeno, salita da 2.036 a 6.747 m^2/s^4 per la cinematica e da 397.854 a 5548.52 $(\mu\text{m}/\text{m})^2$ per la dinamica locale. L'accelerometro in punta ha registrato un progressivo calo della frequenza globale all'aumentare dell'ampiezza di oscillazione, scendendo da 15.890 Hz per un'inflessione di 1 cm a 15.786 Hz per 3 cm, evidenziando quindi un fenomeno di Softening indotto da micro-scorrimenti all'incastro. Simultaneamente, l'estensimetro alla radice ha registrato un aumento della frequenza locale che è salita da 2.071 Hz a 2.103 Hz, indice della presenza di Hardening dovuto dalle micro-compattazione delle interfacce.
- Nei test di eccitazione impulsiva con martello strumentato la situazione si è invertita. Passando da un colpo piano a un colpo forte, l'energia del fenomeno ha subito un salto di magnitudo evidente, passando da 0.269 a 17.685 m^2/s^4 sull'accelerometro e da 21.98 a 270.48 $(\mu\text{m}/\text{m})^2$ sull'estensimetro. Gli impulsi ad alta energia hanno innescato un temporaneo Hardening globale registrato dell'accelerometro con la frequenza salita da 15.620 Hz a 15.724 Hz, mentre l'estensimetro ha intercettato la cedevolezza locale dovuta all'urto istantaneo registrando un calo di frequenza che è passata da 2.150 Hz a 2.134 Hz.

L'osservazione comparata di più sistemi di osservazione si è quindi rilevato fondamentale durante l'avanzamento del lavoro. L'accelerometro MEMS ha descritto perfettamente la cinematica globale del sistema, mentre l'estensimetro ha fornito informazioni locali imprescindibili. Sebbene il sistema low cost si sia dimostrato altamente prestazionale rimangono alcune limitazioni importanti, infatti rimane il fatto che il peso dello smartphone (circa 170 g) genera un effetto di Mass Loading su elementi strutturali leggeri e flessibili come la trave oggetto di studio. Tuttavia, aver dimostrato l'affidabilità di uno smartphone per l'estrazione dei parametri modali permette di abbattere le criticità del monitoraggio tradizionale, favorendo l'impiego di questi dispositivi per l'ispezione su vasta scala. In futuro cellulari con integrati i MEMS o sensori equivalenti potranno essere impiegati in reti wireless per monitoraggio di ponti in tempo reale, sfruttando le vibrazioni indotte dal traffico veicolare o dai pedoni per diagnosticare eventuali anomalie strutturali. Inoltre, Incrociando i segnali estratti da sensori di natura diversa dislocati lungo l'opera, sarà possibile ricostruire in tempo reale come si deforma un'intera struttura nello spazio. Uno dei risultati ottenuti più evidenti rimane aver dimostrato che i sensori low cost possono rilevare i fenomeni non lineari a livello del vincolo, nella realtà industriale difetti strutturali come l'allentamento di un giunto bullonato o l'inizio di una cricca innescano esattamente questo tipo di non linearità. Questo studio apre le porte a rilevazione di danni in connessione critiche misurando semplicemente le fluttuazioni anomale delle frequenze al variare dell'ampiezza di vibrazione.

5 Bibliografia

- [1] Paweł Olejnik, MuhammadUmer e Jakub Jabłonski << Exact Analytical Solutions for Free Single-Mode Nonlinear Cantilever Beam Dynamics: Experimental Validation Using High-Speed Vision >>
- [2] Luca Martinelli, Vitomir Racic, Bruno Alberto Dal Lago e Francesco Foti <<Testing Walking-Induced Vibration of Floors Using Smartphones Recordings >>
- [3] Dally,J.W.,e Riley,W.F. << Experimental Stress Analysis.McGraw-Hill>>1991
- [4] T. Kranjc, J. Slavič, M. Boltežar, << A comparison of the strain and the classic experimental modal analysis>> 2014
- [5] Diba Rashidi, Ali Moradi,Mahmoud Reza Hashemi, Hadi Moradi << Smartphones for Science: Accuracy and Frequency Fidelity of Built-In Accelerometers>>2026
- [6] Donato Abruzzese, Davide Bracale, Damiano Forconi, Gian Marco Grizzi, Andrea Micheletti*, Daniele Paradisi, Alessandro Tiero, and Sreymom Vuth <<Permanent monitoring of thin structures with low-cost devices>>2021
- [7] Anil K.Chopra univerity of california at Berkely << Dynamic of Structure, Theory and Application to Earthquake Engineering>>1995
- [8] Bendat & Piersol, <<Random Data: Analysis and Measurement Procedures">> 2011
- [9] Qin Tian, Kai Yao ed Shixin Cao << Research on Quantification of Structural Natural Frequency Uncertainty and Finite Element Model Updating Based on Gaussian Process>>
- [10] P. A. A. Laura, J. L. Pombo, E. A. Susemihl, << A note on the vibrations of a clamped-free beam with a mass at the free end >>.1974