



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL COMPLESSO OSPEDALIERO DI
TORRETTE DI ANCONA A SUPPORTO DEL PROGETTO DI ADEGUAMENTO
SISMICO E DEL MONITORAGGIO DELLA SALUTE STRUTTURALE IN
CONTINUO

*DYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE HOSPITAL COMPLEX OF TORRETTE IN ANCONA AS
SUPPORT FOR THE DESIGN OF SEISMIC RETROFITTING AND CONTINUOUS STRUCTURAL
HEALTH MONITORING*

Relatore:
Prof. Ing. Fabrizio Gara

Tesi di Laurea di:
Giovanni Fanesi

Correlatore:
Dott. Ing. Vanni Nicoletti

A.A 2021/2022

1 INDICE

| | | |
|------|--|--|
| 1. | INTRODUZIONE | 4 |
| 1.1. | CONTESTO E MOTIVAZIONE DELLA RICERCA..... | 4 |
| 1.2. | OBBIETTIVI DELLA TESI..... | 5 |
| 1.3. | STRUTTURA DELLA TESI | 6 |
| 2. | FONDAMENTI TEORICI..... | 7 |
| 2.1. | ANALISI MODALE | 7 |
| 2.2. | ANALISI MODALE OPERATIVA..... | 15 |
| 2.3. | STRUMENTAZIONE DI MISURA | 20 |
| 3. | STATO DELL'ARTE..... | 23 |
| 3.1. | MONITORAGGIO E SALUTE STRUTTURALE | 23 |
| 3.2. | PANORAMICA SULLE APPLICAZIONI DELL'OMA | 25 |
| 3.3. | APPROCCI E TECNICHE UTILIZZATE NELL'OMA..... | 26 |
| 4. | METODOLOGIA | 29 |
| 4.1. | DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO..... | 29 |
| 4.2. | PROCEDURA DI ACQUISIZIONE | 32 |
| 4.3. | IDENTIFICAZIONE DEI MODI DI VIBRARE | 37 |
| 5. | ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI | 44 |
| 5.1. | ANALISI DEI MODI DI VIBRAZIONE IDENTIFICATI..... | 44 |
| 5.2. | CONFRONTO DEI MODI DI VIBRAZIONE TRA LE DIVERSE CONDIZIONI | 49 |
| 5.3. | INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI..... | Errore. Il segnalibro non è definito. |
| 6. | CONCLUSIONI..... | 54 |

1. INTRODUZIONE

1.1. CONTESTO E MOTIVAZIONE DELLA RICERCA

Negli ultimi anni uno dei temi principali che ha riguardato l'ingegneria civile è stato quello del monitoraggio, definito più in generale come Structural Health Monitoring (SHM). L'SHM può essere definito come un processo di implementazione di strategie per l'individuazione del danno. La crescita dell'importanza dell'argomento è legata allo stato delle strutture e delle infrastrutture, spesso in condizioni di degrado avanzato. La branca dell'ingegneria relativa al monitoraggio è sicuramente uno strumento importante per individuare la necessità di intervenire con manutenzioni speciali e quindi di garantire il corretto funzionamento in esercizio delle opere.

La sicurezza e la gestione di edifici, ponti, gallerie, dighe ed altre importanti strutture richiedono un monitoraggio continuo, sia nel breve che nel lungo termine, per aumentare la conoscenza del comportamento dinamico della struttura e poter pianificare in maniera ottimale gli interventi di manutenzione e ristrutturazione. Spesso, infatti, nelle strutture in calcestruzzo compaiono fenomeni che possono provocare una diminuzione locale della resistenza e, nel lungo termine, influire sulla sicurezza strutturale del complesso. Il monitoraggio in continuo, dunque, si sta affermando come uno degli strumenti gestionali essenziali per garantire la sicurezza in servizio delle opere e per consentire una programmazione economica ed efficace degli interventi di manutenzione, specialmente nel caso di strutture di alta importanza strategica o che devono svolgere la loro funzione per molte decine di anni e che vengono quindi utilizzate in condizioni fortemente variabili e spesso distanti da quelle inizialmente previste. I seri danni e i collassi strutturali verificatisi nel corso degli anni hanno, inoltre, sottolineato la necessità di garantire una più efficace protezione delle costruzioni esistenti nei riguardi di eventi naturali eccezionali come i terremoti, al fine di mitigare anche le perdite connesse al verificarsi di tali eventi.

Il sistema di monitoraggio in continuo fornisce un gran numero di informazioni in tempo reale potendo così intervenire tempestivamente a seguito di eventi di danneggiamento, è inoltre un sistema economico, veloce e semplice da installare. Trattandosi però di una tecnica di controllo molto recente non si possiede ancora una conoscenza tale da poter correlare comportamenti dinamici di una struttura danneggiata, sia il danno di natura strutturale o non strutturale. Ciò che ad oggi in questa scienza manca sono relazioni dirette tra i parametri di caratterizzazione dinamica e gli elementi di strutture complesse, non sappiamo ad esempio

come varia il comportamento a seguito di un sisma che ha provocato lesioni allo stato limite di esercizio.

1.2. OBIETTIVI DELLA TESI

Questa tesi avrà come focus il complesso ospedaliero di Torrette di Ancona, esso si presenta come una struttura intelaiata di 7 piani comprendente 8 corpi totali. Nel 2015 sono iniziati lavori di adeguamento sismico conclusi all'inizio del 2023. A causa di questi interventi sono stati svolti negli anni diverse misurazioni accelerometriche con lo scopo di identificare, attraverso l'analisi modale operativa OMA, il comportamento dinamico dell'intero complesso. Più nello specifico si sono svolte tre campagne di misurazione:

- campagna di misurazione pre-intervento, queste misurazioni sono state fatte nel 2013 con fine di valutare e conoscere il comportamento dinamico globale, particolarmente complesso, anche data la presenza di giunti tecnici tra i diversi corpi dell'intero ospedale. Tali prove sono poi servite per la progettazione del sistema di protezione sismico
- campagna di misurazione durante l'intervento, misure effettuate tra il 2015 ed il 2016 interessanti solo un corpo del complesso. Sono state fatte due prove sul medesimo corpo prima e dopo l'adeguamento con lo scopo di valutare la variazione del comportamento della struttura a seguito dei lavori
- campagna post-intervento, tra aprile e maggio 2023 sono state fatte misure a supporto della progettazione di un sistema di monitoraggio in continuo fisso da installare nel sottotetto dell'ospedale riguardante tutti i corpi facenti parte del complesso. Si è inoltre svolto, in prima battuta, un monitoraggio in continuo di due giorni per valutare se i disturbi ambientali del piano potessero e potrebbero interferire con le successive misure effettuate e del sistema fisso che si vuole installare

L'obiettivo di questa tesi è dunque, in primis, quello di valutare la possibilità e la fattibilità dell'installazione del sistema di monitoraggio in continuo permanente e di fornire informazioni finalizzate alla sua progettazione, come ad esempio l'individuazione dei punti strategici dove posizionare gli accelerometri, valutare l'eventuale presenza di aree troppo rumorose e quindi non pratiche alle misure.

Altro obiettivo importante è la determinazione del comportamento dinamico globale dell'ospedale finalizzato alla creazione di un modello più rappresentativo di esso, utile anche alla ideazione e progettazione di futuri lavori di miglioramento. Verranno inoltre confrontati i dati

delle campagne di pre- e post- intervento di adeguamento sismico (2013 e 2023) così da capire meglio quale è stato il reale miglioramento avvenuto e come esso ha influito sull'intera struttura.

1.3. STRUTTURA DELLA TESI

Nei primi capitoli della tesi verranno introdotte le basi teoriche finalizzate ad una migliore comprensione delle analisi eseguite e dei risultati estratti da esse. In particolare, verrà spiegata la teoria alla base dell'analisi modale ed introdotti i concetti di frequenze e modi di vibrare, forme modali, masse partecipanti e smorzamenti. Seguiranno concetti a supporto dell'analisi modale operativa, i modi di identificazione e le metodologie di identificazione. Verrà fatta anche una panoramica generale su cosa rappresenti il monitoraggio di una struttura ed il concetto di stato di salute, le sue applicazioni ed inquadramento nel settore edilizio concentrandosi sull'analisi dei dati che serviranno per il suddetto, quindi: i tipi di analisi che esistono in letteratura, quali sono i più usati, specialmente nell'analisi modale operativa OMA e le tecniche ad essa correlate, le sue applicazioni ed i vantaggi che questa metodologia comporta. Finendo con un piccolo excursus sulla strumentazione e la descrizione della catena di misura e delle sue componenti.

Il nucleo centrale della tesi sarà costituito dalla descrizione del caso studio preso in esame su cui si è svolta l'analisi modale operativa. In questo contesto, verranno illustrate in dettaglio la geometria della struttura, le caratteristiche dei materiali utilizzati per la sua costruzione e la strumentazione impiegata per effettuare le diverse prove. Si descriveranno poi le fasi del processo di identificazione dei parametri modali. Dapprima si spiegherà l'acquisizione dei dati, ovvero la raccolta di informazioni sulla risposta dinamica della struttura a stimoli esterni, che avviene tramite l'uso di sensori posizionati sui piani della struttura. Si tratterà poi il processo di elaborazione dati, che prevede l'elaborazione delle informazioni acquisite al fine di ricavare i parametri modali desiderati. Successivamente, si parlerà della scelta della tecnica di identificazione, ovvero il metodo attraverso cui si ricavano i parametri modali a partire dai dati raccolti. Si farà riferimento alle principali tecniche utilizzate in letteratura, quali l'analisi delle funzioni di risposta in frequenza (FRF), l'analisi modale estesa (EMA) e l'analisi modale operativa (OMA), concentrandosi maggiormente su quest'ultima.

Infine, si illustrerà l'estrazione dei risultati, ovvero la presentazione dei parametri modali ricavati e la loro rappresentazione attraverso grafici e tabelle. Si farà riferimento alle principali informazioni che possono essere ottenute tramite l'analisi modale operativa, come le frequenze

naturali della struttura e le relative forme modali, che rappresentano i modi in cui la struttura vibra. Si confronteranno poi i risultati ottenuti con gli obiettivi prefissati in precedenza.

2. FONDAMENTI TEORICI

Verranno esplorati argomenti di teoria relativi a tre macro-argomenti: analisi modale, OMA, strumentazione. al fine di una più completa comprensione dell'opera.

2.1. ANALISI MODALE

L'analisi modale è lo studio del comportamento dinamico di una struttura quando viene sottoposta a vibrazione. In analisi strutturale, permette la determinazione delle proprietà e della risposta di una struttura, vincolata o libera, in dinamica autonoma oppure eccitata da sollecitazioni forzanti dinamiche imposte dall'esterno.

L'analisi modale è uno strumento efficiente per la descrizione, la comprensione e la riduzione a modello del comportamento strutturale; costituisce un mezzo eccellente per acquisire una solida conoscenza della dinamica delle strutture. Essa rappresenta lo studio del comportamento dinamico di una struttura quando viene sottoposta a vibrazione. Permette la determinazione delle proprietà e della risposta di una struttura, vincolata o libera, in dinamica autonoma oppure eccitata da sollecitazioni forzanti dinamiche imposte dall'esterno. Nel caso di corpi semplici l'analisi modale è in grado di studiare il comportamento dinamico nel dettaglio attraverso la valutazione delle sue frequenze naturali e dei modi propri di vibrare associati. Nel caso di strutture complesse, esse vengono preventivamente schematizzate attraverso il metodo degli elementi finiti al fine di ottenere gli stessi risultati riferiti all'insieme. Mediante tale analisi si definisce la risposta della struttura in progetto a forzanti con diversi contenuti armonici. Essa dà come risultato i modi di vibrare di una struttura. Per ciascun modo fornisce qual è il periodo di vibrazione, cioè l'intervallo di tempo che la struttura impiega per eseguire un'oscillazione completa e tornare al punto di partenza. Gli scopi possono essere vari, per esempio, evitare fenomeni di risonanza oppure valutare gli stati di sforzo/deformazione indotti dalle stesse forzanti. nell'ingegneria civile è spesso usata per quanto concerne l'analisi delle sollecitazioni sismiche.

Normalmente i sistemi strutturali, essendo le masse distribuite, sono sistemi continui e possiedono infiniti gradi di libertà. Nel caso di edifici multipiano, si può comunque osservare che le masse sono principalmente concentrate al livello degli impalcati per cui il loro comportamento può essere schematizzato considerando sistemi strutturali con N gradi di libertà ($N =$ numero di piani). Questa semplificazione è possibile grazie al discorso legato alla condensazione statica e ai termini dinamici che si presentano solo per gli spostamenti e non per le rotazioni. Anche per strutture caratterizzate più spiccatamente dalla continuità della distribuzione della massa, si può comunque pensare ad una schematizzazione in cui la distribuzione reale viene approssimata con un numero finito di masse.

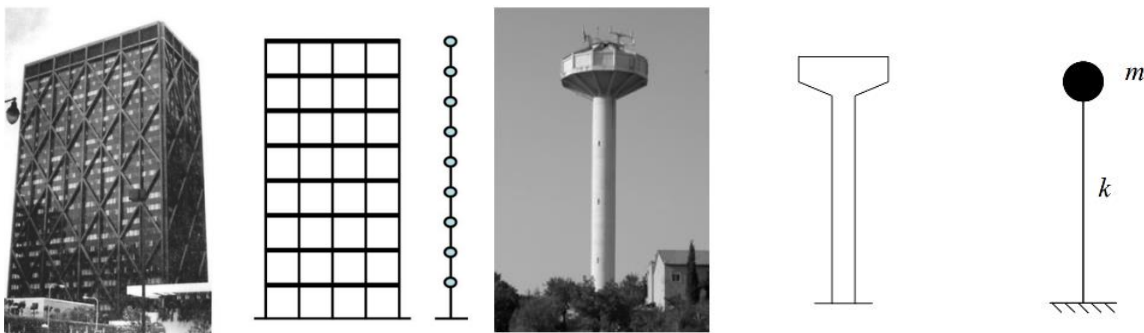


Figure 2.1 esempio di discretizzazione di un edificio multipiano a sinistra e torre avente un solo piano alla sommità a destra

Immaginiamo dunque un telaio di n piani modello shear-type agente in campo elastico e con masse discretizzate nei centri di piano, sottoposto ad azione sismica, quindi ad uno spostamento. In generale, ogni piano si comporterà in maniera apparentemente indipendente dagli altri e la deformata, che avevamo assegnata all'istante $t = 0$, cambierà forma in istanti successivi t_1, t_2, t_3 (Fig. 2.2). Applicando però particolari deformazioni iniziali i piani oscilleranno contemporaneamente in maniera proporzionale gli uni agli altri, con un periodo ben definito. Si dice in tal caso che la struttura oscilla secondo uno dei suoi modi principali. La deformata, definita a meno di un parametro, è detta deformata modale. Per un sistema dotato di n gradi di libertà esistono altrettante deformate distinte aventi tale proprietà, che possono essere ordinate in base ai valori decrescenti del periodo ($T_1 > T_2 \dots > T_n$). Si parla così di primo, secondo ... n -mo modo principale di oscillare del sistema (Fig. 2.3). I relativi periodi (o frequenze) di oscillazione

vengono detti periodi (o frequenze) principali o propri della struttura. In particolare, il periodo di oscillazione del primo modo viene spesso denominato periodo fondamentale di vibrazione. Le deformate modali sono caratterizzate dal presentare un numero di inversione del segno degli spostamenti dei traversi pari al numero d'ordine del modo meno uno.

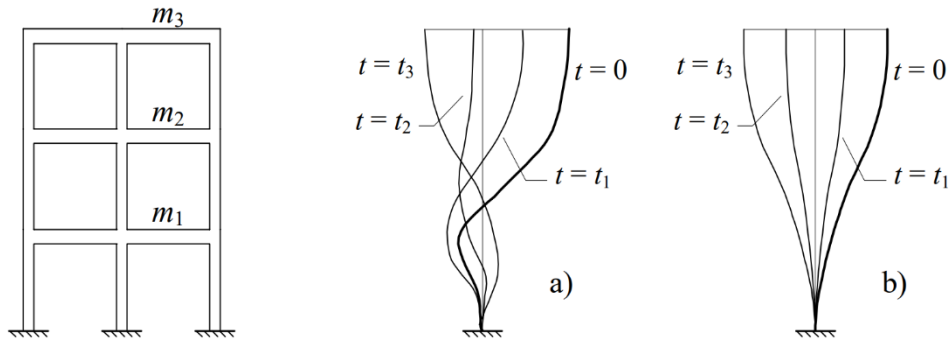


Figura 2.2 moto libero di un telaio multipiano: a) assegnando una qualsiasi deformata iniziale b) assegnando una particolare deformata iniziale

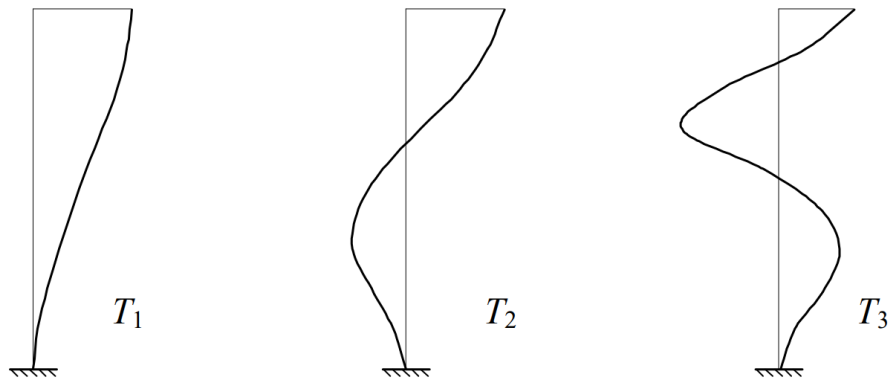


Figura 2.3 modi di oscillazione libera di un telaio

Per trattare matematicamente il moto di un sistema a più gradi di libertà occorre innanzitutto definire le incognite del problema. La scelta più intuitiva ricade, ovviamente, sugli spostamenti orizzontali $u_i(t)$ delle masse rispetto alla base del telaio (col pedice $i = 1 \dots n$ che indica la massa, ovvero il traverso). Imponendo la condizione di equilibrio dinamico, analogamente a quanto fatto per l'oscillatore semplice, si ottiene nel caso di moto libero non smorzato un insieme di equazioni differenziali che possono essere rappresentate sinteticamente dalla relazione matriciale

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = 0 \quad (1)$$

in cui \mathbf{u} è il vettore che contiene le n funzioni $u_i(t)$, $\ddot{\mathbf{u}}$ è il vettore che contiene le derivate seconde delle funzioni, \mathbf{m} è una matrice che contiene le masse, \mathbf{k} è la matrice di rigidità della struttura, che mette in relazione forze e spostamenti orizzontali. Avendo ipotizzato che le masse siano concentrate nei traversi, la matrice \mathbf{m} ha come unici valori non nulli quelli disposti lungo la diagonale principale, che sono pari alle masse m_i . Se lo spostamento iniziale coincide con la deformata modale ϕ_j (vettore che contiene gli spostamenti modali $\phi_{i,j}$) il sistema ha come soluzione

$$u_i(t) = \phi_{i,j} \cos(\omega_j t) \quad (2)$$

funzione armonica con frequenza angolare ω_j . Sostituendo nella (1) si ottiene

$$-\omega_j \mathbf{m} \phi_j + \mathbf{k} \phi_j = 0 \quad (3)$$

Che ha soluzioni non banali purché sia verificata la condizione

$$\det(\mathbf{k} - \omega_j^2 \mathbf{m}) = 0 \quad (4)$$

Sviluppando il determinante si ottiene un'equazione polinomiale di ordine n nell'incognita ω_j^2 che fornisce n soluzioni (appunto gli n modi di oscillazione libera). L'equazione (3) diventa così un sistema di equazioni lineari omogeneo nelle incognite $\phi_{i,j}$. Si noti che se lo schema fosse ad un solo grado di libertà la condizione (4) diventerebbe semplicemente $\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m} = 0$, che porta alla relazione vista in precedenza per l'oscillatore semplice. Anche se concettualmente semplice, lo sviluppo numerico di quanto sopra esposto è abbastanza oneroso. Fortunatamente si tratta di un problema matematico ben noto, quello della determinazione di autovalori (le frequenze angolari ω_j) ed autovettori (i vettori ϕ_j), la cui soluzione è descritta in numerosi testi di matematica e di ingegneria. Se lo spostamento iniziale non è proporzionale ad una deformata modale, diventa molto complicato risolvere il sistema di equazioni differenziali (1), perché ogni equazione contiene tutte le funzioni incognite. Il problema può essere risolto in maniera più agevole se si definiscono diversamente le incognite. Si osserva innanzitutto che quando un sistema oscilla secondo il j -esimo modo principale lo spostamento del traverso i può essere espresso in funzione della deformata modale

$$u_i(t) = \phi_{i,j} q_j(t) \quad (5)$$

essendo $\phi_{i,j}$ lo spostamento orizzontale del traverso i nella j -esima deformata modale. Una qualsiasi deformata u può essere descritta come combinazione lineare di quelle modali

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{i,j} q_j(t) \quad (6)$$

O, in termini matriciali

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{q} \quad (7)$$

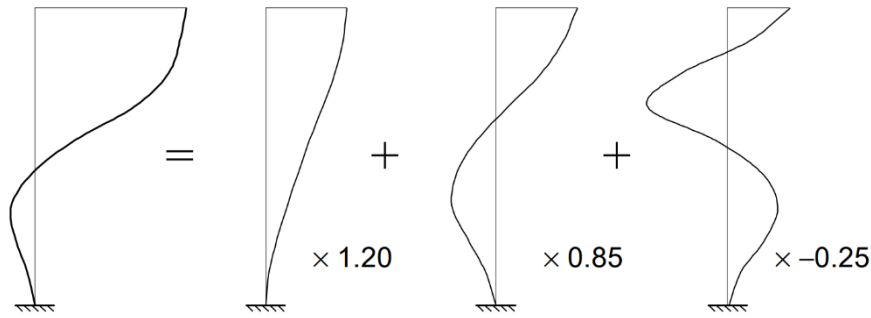


Figura 2.4 descrizione di una deformata come combinazione di quelle modali

La (36) indica semplicemente un cambio delle coordinate di riferimento, che non sono più gli spostamenti u_i , ma i coefficienti q_j , che vengono detti coordinate principali. Sostituendo questa relazione nella condizione di equilibrio dinamico (1) e premoltiplicando per ϕ^T , si ottiene

$$\mathbf{M} \mathbf{q} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (8)$$

Si può dimostrare che, per una proprietà detta di ortogonalità dei modi di vibrare, le matrici $\mathbf{M} = \phi^T \mathbf{m} \phi$ e $\mathbf{K} = \phi^T \mathbf{k} \phi$ hanno tutti i termini nulli, tranne quelli della diagonale principale. In particolare, è

$$M_{j,j} = \sum_{i=1}^n m_j \phi_{i,j}^2 \quad (9)$$

Questi termini sono inoltre legati tra loro dalla relazione

$$K_{j,j} = \omega_j^2 M_{j,j} \quad (10)$$

dove ω_j è la frequenza angolare del modo j . Il sistema si è quindi trasformato in n equazioni differenziali disaccoppiate, cioè contenenti ciascuna una sola funzione incognita.

Il moto libero (non smorzato) di un sistema a n gradi di libertà è quindi, in generale, una combinazione lineare di oscillazioni secondo le diverse deformate modali, con coefficienti che variano nel tempo secondo funzioni armoniche aventi periodi uguali a quelli propri del sistema. Nel caso in cui la deformata iniziale è proporzionale a quella di un modo principale del sistema tutti i coefficienti si annullano, tranne quello corrispondente alla deformata modale imposta; la struttura oscilla quindi esclusivamente secondo quel modo. Il moto libero smorzato può essere analizzato in maniera analoga, trasformando il sistema di equazioni differenziali nelle incognite

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (11)$$

Nel sistema delle incognite \mathbf{q}

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (12)$$

Occorre però notare che la matrice $\mathbf{C} = \Phi^T \mathbf{c} \Phi$ può essere, o no, una matrice diagonale come \mathbf{M} e \mathbf{K} . Nel primo caso, molto comune tra le strutture di interesse per il progettista strutturale, si parla di sistemi classicamente smorzati. Le equazioni differenziali sono disaccoppiate, diventando

$$M_{j,j} \ddot{q}_j + C_{j,j} \dot{q}_j + K_{j,j} q_j = 0 \quad (13)$$

O anche

$$q_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = 0 \quad (14)$$

ed il termine $C_{j,j}$ (o ξ_j) rappresenta lo smorzamento relativo al modo j . La soluzione è formalmente identica a quella dell'oscillatore semplice smorzato. Il moto è quindi combinazione lineare di oscillazioni secondo le diverse deformate modali, con coefficienti che variano nel tempo secondo funzioni armoniche aventi ampiezza che si riduce man mano. Il secondo caso, per il quale si parla di sistemi non classicamente smorzati, può verificarsi per strutture in cui alcune parti hanno massa e rigidità molto diverse dalle altre. Il fatto che le equazioni differenziali non siano disaccoppiate vanifica le semplificazioni introdotte ed impedisce, nel caso di moto forzato, il ricorso a tecniche standard quali l'analisi modale, di cui si parla nel successivo paragrafo. Per l'analisi di questi sistemi occorre utilizzare tecniche specifiche, che si ritrovano nella bibliografia specializzata.

La condizione di equilibrio dinamico per un sistema a più gradi di libertà soggetto ad un input sismico, scritta in forma matriciale, si presenta formalmente analoga a quella dell'oscillatore semplice

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \mathbf{u} = -\mathbf{m} \mathbf{l} \ddot{u}_g \quad (15)$$

Si noti solo che, avendo a che fare con un telaio piano, la matrice di massa \mathbf{m} è moltiplicata per un vettore unitario \mathbf{l} , oltre che per l'accelerazione \ddot{u}_g , per ottenere il termine noto; infatti nella generica equazione che esprime l'equilibrio dinamico del traverso i il relativo termine noto è pari a $m_i \ddot{u}_g$. Anche in questo caso, esprimendo gli spostamenti in funzione delle deformate modali con la (7) e premoltiplicando per Φ^T , si ottiene

$$\mathbf{M} \mathbf{q} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = -\Phi^T \mathbf{m} \mathbf{l} \ddot{u}_g \quad (16)$$

Se il sistema è classicamente smorzato, il sistema di equazioni differenziali si disaccoppia, ancora una volta, in n equazioni contenenti ciascuna una sola funzione incognita, che possono scriversi come

$$q_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\Gamma_j \ddot{u}_g \quad (17)$$

Con

$$\Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}^2} \quad (18)$$

L'equazione (17) è identica a quella di un oscillatore semplice, con periodo uguale a quello del modo considerato e soggetto allo stesso accelerogramma, salvo per il fatto che il moto sismico è scalato mediante il coefficiente Γ_j . La risposta sismica di un sistema a più gradi di libertà può quindi essere determinata ancora una volta come combinazione lineare di oscillazioni secondo le diverse deformate modali. Il contributo dei singoli modi varia nel tempo come se i modi fossero soggetti separatamente al sisma, ed è scalato mediante il termine Γ_j che indica se il contributo del modo al moto totale del sistema è più, o meno, rilevante ed è quindi detto coefficiente di partecipazione modale.

La scomposizione della risposta sismica nel contributo dei singoli modi è alla base di quella che viene detta analisi modale. In sintesi, essa consiste nel valutare i contributi massimi di ciascun modo (determinando le corrispondenti forze ed applicandole alla struttura) e nel combinare opportunamente i valori così ottenuti. Se si vogliono determinare le massime sollecitazioni corrispondenti al contributo del modo j basta applicare al telaio un insieme di forze F_j , che possono essere ottenute moltiplicando la matrice di rigidezza k per il valore massimo degli spostamenti corrispondenti al modo in questione

$$\mathbf{F}_j = \mathbf{k} \mathbf{u}_{j,\max} = \mathbf{k} \phi_j q_{j,\max} \quad (19)$$

Per le considerazioni fatte nel paragrafo precedente, il valore $q_{j,\max}$ può essere calcolato moltiplicando per Γ_j lo spostamento spettrale S_{De} . È però più conveniente esprimere la relazione in funzione delle masse, anziché delle rigidezze. Utilizzando la (3) si ha

$$\mathbf{F}_j = \mathbf{m} \phi_j \omega_j^2 q_{j,\max} \quad (20)$$

La quantità $\omega_j^2 q_{j,\max}$ può essere calcolata come prodotto del valore della pseudo-accelerazione letto nello spettro di risposta elastico S_e , in corrispondenza del periodo T_j , per il coefficiente di partecipazione modale Γ_j . Si può scrivere quindi

$$\mathbf{F}_j = \mathbf{m} \phi_j \Gamma_j S_e T_j \quad (21)$$

E la forza del travaso j vale

$$F_{i,j} = \mathbf{m} \phi_{i,j} \Gamma_j S_e T_j \quad (22)$$

Il taglio alla base, corrispondente al modo in esame, è

$$V_{b,j} = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \Gamma_j S_e(T_j) = M_j^* S_e(T_j) \quad (23)$$

Avendo posto

$$M_j^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \Gamma_j = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}^2} \quad (24)$$

La quantità M_j^* , che rappresenta la massa che moltiplicata per l'ordinata spettrale fornisce il taglio alla base relativo al modo j , è denominata massa partecipante, o massa eccitata dal modo. La somma delle masse partecipanti di tutti i modi è pari alla massa totale dell'edificio. La massa partecipante, espressa come percentuale di quella totale, indica quindi, meglio del coefficiente di partecipazione modale, l'entità complessiva del contributo del singolo modo. Alcune considerazioni sono però importanti:

- Modi con massa partecipante molto piccola, ad esempio inferiore al 5% della massa totale, danno contributi in genere trascurabili. Per questo motivo la normativa impone di prendere in considerazione un numero di modi la cui massa partecipante sia, in totale, almeno l'85% oppure tutti i modi la cui massa partecipante sia superiore al 5%.

- La massa partecipante è (per lo schema piano) via via decrescente col modo. È possibile, in genere, prendere in considerazione solo i primi modi, purché sia rispettato il requisito precedentemente indicato.

- Il primo modo è nettamente predominante per entità di massa partecipante. Inoltre, esso porta a forze dello stesso verso e quindi produce alla base dell'edificio un effetto sensibilmente maggiore di quello dei modi successivi, ai quali corrispondono forze tra loro discordi.

- Si ricordi però che il contributo del modo è dato dal prodotto di massa partecipante per accelerazione spettrale.

Per strutture molto deformabili il periodo del primo modo può essere tanto elevato da comportare valori dell'accelerazione, e quindi delle forze, sensibilmente ridotti ed un effetto inferiore a quello dei modi successivi. Il disaccoppiamento del moto consente di esaminare separatamente il contributo dei diversi modi, sia come sollecitazioni che come spostamenti. Se lo si conoscesse istante per istante, sarebbe possibile valutare il risultato complessivo come somma algebrica dei vari contributi. In effetti, però, risulta agevole solo calcolare il massimo valore prodotto dal singolo modo. Il problema nasce dal fatto che i moti non sono sicuramente sincroni; i massimi saranno quindi raggiunti in istanti diversi e non possono essere direttamente sommati tra loro. Se i periodi propri sono ben distinti tra loro, è possibile valutare un qualunque

ente E (caratteristica di sollecitazione in una sezione, spostamento di un punto, ecc.) come radice quadrata della somma dei quadrati (in inglese SRSS, ovvero “square root of sum of squares”)

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_j^2} \quad (25)$$

Se, invece, i periodi differiscono tra loro di meno del 10% (situazione rara nel caso di schemi piani ma frequente nel caso di schemi tridimensionali) è opportuno effettuare una combinazione quadratica completa (in inglese CQC, ovvero “complete quadratic combination”)

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \rho_{j,k} E_j E_k} \quad (26)$$

Con

$$\rho_{j,k} = \frac{8 \xi^2 (1 + \beta_{j,k}) \beta_{j,k}^{3/2}}{(1 - \beta_{j,k}^2)^2 + 4 \xi^2 \beta_{j,k} (1 + \beta_{j,k})^2} \quad \beta_{j,k} = \frac{\omega_j}{\omega_k} \quad (27)$$

2.2. ANALISI MODALE OPERATIVA

L’analisi dinamica viene generalmente effettuata per via analitica mediante l’analisi modale. Attraverso la conoscenza della geometria del sistema, delle condizioni al contorno e dei materiali impiegati, della distribuzione delle masse, delle rigidità e degli smorzamenti della struttura, si costruisce un sistema matriciale consente di ricavare i parametri modali.

Un secondo approccio è quello sperimentale, ovvero i suddetti parametri d’interesse (frequenze, smorzamenti relativi, forme modali) vengono identificati sullo studio della risposta della struttura, registrando le vibrazioni della stessa. Se le vibrazioni sono date da un input noto allora si parla di Analisi Modale Sperimentale EMA (experimental modal analysis) o anche chiamata input-output, se invece l’input è dato da fenomeni non accuratamente determinabili (traffico veicolare, vento, ecc.), allora si studierà la sola risposta della struttura senza conoscere l’input, tale metodologia prende il nome di Analisi Modale Operativa OMA (operational modal analysis) o anche chiamata output-only.

Un segnale è una qualsiasi grandezza fisica che varia rispetto a una o più variabili indipendenti e che è associata a un'informazione di interesse. Un sistema converte un segnale di ingresso in un segnale di uscita. La mappatura della risposta a un determinato stimolo rivela informazioni importanti sul sistema. Per esempio, l'analisi dell'oscillazione di un edificio (segnale di output) sotto il carico del vento (segnale di input) rende possibile l'identificazione delle caratteristiche dinamiche dell'edificio.

I problemi tipici dell'ingegneria sono di tipo previsionale. Per esempio, mirano a stimare la risposta di un sistema noto a un dato input. Tuttavia, l'attenzione è qui concentrata sui problemi inversi, in cui l'output è noto ma l'input o le caratteristiche del sistema sono sconosciute. In particolare, l'attenzione è sull'identificazione delle caratteristiche del sistema quando il segnale di output è noto (e si fanno alcune ipotesi sull'input).

Il termine rumore si riferisce a qualsiasi segnale indesiderato sovrapposto al segnale di interesse. La quantità di rumore in un segnale è quantificata dal rapporto segnale/rumore (SNR signal-to-noise ratio), espresso in dB come segue:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_s}{A_n} \right)$$

dove A_s e A_n indicano rispettivamente l'ampiezza del segnale e l'ampiezza del rumore (esprese nelle stesse unità di misura), rispettivamente quando l'SNR è basso, il segnale d'interesse può diventare indistinguibile. Pertanto, è necessario adottare strategie di acquisizione dei dati appropriate per minimizzare il livello di rumore che inevitabilmente influisce sulle misure.

I segnali complessi possono essere decomposti in segnali elementari. Esempi di segnali elementari sono l'impulso e la sinusoidale. Quando il segnale viene scomposto in impulsi scalati e traslati, si effettua un'analisi nel dominio del tempo; se, invece, il segnale viene scomposto in impulsi scalati e sinusoidi, il segnale viene decomposto in sinusoidi scalate di frequenza diversa, l'analisi viene eseguita nel dominio della frequenza. È sempre possibile convertire un segnale da un dominio all'altro, per cui la scelta finale è solitamente dettata da considerazioni di efficienza computazionale, facilità di interpretazione dei dati e tecniche di riduzione del rumore.

Il comportamento dinamico dei sistemi fisici viene spesso descritto definendo un sistema lineare ideale a parametri costanti (noto anche come sistema lineare tempo-invariante LTI). Un sistema è caratterizzato da parametri costanti se tutte le sue proprietà fondamentali sono invarianti rispetto al tempo. Inoltre, presenta un andamento lineare tra input e output se le caratteristiche della risposta sono additive e omogenee. Di conseguenza, la risposta del sistema a una combinazione lineare di dati input equivale alla stessa combinazione lineare delle risposte

del sistema ai singoli input analizzati separatamente. L'ipotesi del parametro costante è ragionevolmente valida per molti sistemi fisici che si incontrano nella pratica. Tuttavia, la sua validità dipende dall'estensione dell'intervallo di tempo considerato.

Per grandi periodi di osservazione potrebbe non essere realistico. Questo è il caso, ad esempio, delle strutture sottoposte a vibrazioni continue, dove i danni da fatica possono causare un cambiamento nella rigidità della struttura. Gli intervalli di tempo di interesse pratico per le prove modali output-only sono tali da poter considerare la struttura come invariante nel tempo. La validità dell'ipotesi di linearità per le strutture reali dipende non solo dalle caratteristiche della struttura, ma anche dall'entità dell'input. I sistemi fisici mostrano tipicamente caratteristiche di risposta non lineari quando l'entità del carico applicato è grande. Inoltre, le non linearità non sono associate a bruschi cambiamenti nella risposta; la presenza di una transizione rende il problema ancora più complesso. Tuttavia, per le applicazioni di nostro interesse, la risposta di molte strutture può essere ragionevolmente assunta come lineare, poiché l'eccitazione ambientale produce vibrazioni di piccola ampiezza.

Da un punto di vista generale, la dinamica di una struttura, come qualsiasi altro sistema meccanico, può essere descritta in termini di massa, rigidità e smorzamento, oppure in termini di vibrazione (frequenze naturali, rapporti di smorzamento e forme di modo) o in termini di risposta a un'eccitazione standard.

Il primo approccio viene solitamente adottato quando si imposta un modello FE della struttura.

Le proprietà dinamiche delle strutture descrivono la loro risposta alle vibrazioni libere (quando non viene applicata alcuna forza o accelerazione) o, in altre parole, il modo in cui vibrano "naturalmente". In effetti, sotto certe ipotesi, la risposta dinamica della struttura può essere scomposta in un insieme di modi di vibrazione, ognuno dei quali ha una sua caratteristica forma deformata: la forma del modo. La frequenza naturale ed il rapporto di smorzamento corrispondenti governano il moto della struttura secondo una di queste forme. Le frequenze naturali e le forme modali possono essere ottenute dalle proprietà di massa e rigidità della struttura attraverso la soluzione di un problema agli autogeni. Nell'ipotesi di uno smorzamento viscoso proporzionale, i modi della struttura smorzata coincidono con quelli della struttura non smorzata. Pertanto, è possibile calcolare gli autovalori e gli autovettori reali (associati alle frequenze naturali e alle forme di modo) del sistema senza smorzamento e, in una seconda fase, applicare una correzione alle risposte modali per tenere conto dell'effetto dello smorzamento.

Vale la pena sottolineare che, mentre le autofrequenze dei sistemi non smorzati proporzionalmente smorzati sono univocamente determinati, gli autovettori non lo sono.

Infatti, il problema degli autogeni lascia indeterminato il fattore di scala. Tuttavia, esso influisce solo sull'ampiezza, mentre la forma (cioè i valori relativi delle componenti del vettore forma del modo) rimane invariata. Per questo motivo, di solito si adottano procedure di scalatura convenzionali per normalizzare i vettori di forma del modo. Uno schema di scalatura spesso adottato si basa sull'ortogonalità dei modi naturali rispetto alle matrici di massa e rigidità della struttura.

La pre- e post-moltiplicazione di queste matrici per la matrice modale $[\Phi]$, che raccoglie i vettori dei modi di forma in colonne, dà come risultato le seguenti matrici diagonali

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & m_r & \\ & & \ddots \end{bmatrix}$$

$$[\Phi]^T [K] [\Phi] = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & k_r & \\ & & \ddots \end{bmatrix}$$

Pertanto, è possibile normalizzare i vettori di forma di modo in modo che la matrice (1.2) sia uguale alla matrice identità. Secondo questo schema di scalatura, gli elementi sulla diagonale principale della matrice (1.3) corrispondono agli autovalori. La relazione tra la forma di modo normalizzata in massa $\{\psi_r\}$ e quella non scalata $\{\Psi_r\}$ per il modo r-esimo è:

$$\{\psi_r\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\Psi_r\}$$

Dove:

$$m_r = \{\Psi_r\}^T [M] \{\Psi_r\}$$

È anche chiamata massa modale

Nel caso più generale di smorzamento viscoso non proporzionale, la soluzione di vibrazione libera è determinata da un problema di autovalori complessi. Gli autovalori ottenuti e i corrispondenti autovalori a valore complesso sono in coppie complesse coniugate. Nelle applicazioni pratiche dell'OMA, in genere si identificano forme di modo a valore reale, ma a volte vengono stimate anche le forme di modo complesse. I vettori di modo complessi possono essere il risultato di uno smorzamento non proporzionale o di altre cause; quindi, è importante riconoscere se sono fisici o meno.

Altri descrittori della dinamica dei sistemi lineari a parametro costante sono definiti in termini di risposta a eccitazioni "standard". Quando l'eccitazione è rappresentata da un ingresso impulsivo unitario, la dinamica del sistema può essere descritta dalla sua funzione di risposta

all'impulso (IRF impulse response function). Quando l'eccitazione è una forza sinusoidale di ampiezza unitaria applicata a ogni frequenza in un determinato intervallo, si ottiene un altro descrittore: la cosiddetta funzione di risposta in frequenza (FRF frequency response function) definita sull'intervallo di frequenza considerato. Come per i parametri modali, FRF e IRF sono univocamente determinati dalle proprietà di massa, smorzamento e rigidità della struttura. Inoltre, possono essere espressi anche in termini di parametri modali. Anche se ogni conversione da un modello all'altro è teoricamente reversibile (ad esempio, è possibile calcolare le proprietà modali dalle matrici di massa, rigidità e smorzamento e viceversa), nel caso di indagini sperimentali solo un sottoinsieme limitato di punti della struttura e non tutti i modi vengono identificati. L'incompletezza delle informazioni ha gravi conseguenze sulla possibilità di ricostruire le matrici di massa, smorzamento e le matrici di rigidità dai risultati delle prove modali.

Si consideri per semplicità un sistema ad un singolo grado di libertà (SDOF), cioè un sistema la cui risposta dinamica è descritta da un solo parametro di spostamento, a differenza dei sistemi a più gradi di libertà (MDOF), in cui le posizioni spostate di tutte le masse rispetto alla loro configurazione iniziale sono descritte da una serie di spostamenti indipendenti (gradi di libertà-DOF). I concetti che seguono possono essere facilmente estesi a sistemi MDOF con un'appropriata notazione matriciale. Per un qualsiasi input arbitrario $f(t)$, l'output del sistema SDOF è dato dal seguente integrale di convoluzione dell'IRF $h(\tau)$ con l'input:

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)f(t - \tau)d\tau$$

Il limite inferiore di integrazione è zero, poiché si è ipotizzato che il sistema LTI sia fisicamente realizzabile (causale), cioè che risponda solo agli input passati. L'ipotesi di causalità, infatti, implica che:

$$h(\tau) = 0 \quad \forall \tau < 0$$

Un sistema LTI è stabile anche se ogni funzione d'input $f(t)$ vincolata produce un output $y(t)$ vincolato. In alternativa, un sistema LTI stabile e fisicamente realizzabile può essere descritto dalla FRF $H(\omega)$. L'integrale di convoluzione della (1.6) si riduce a una semplice moltiplicazione quando viene espresso in termini di FRF e delle trasformate di Fourier dell'input - $F(\omega)$ - e dell'output- $Y(\omega)$:

$$Y(\omega) = H(\omega)F(\omega)$$

Un sistema LTI (linear time invariant) non può causare alcuna traslazione di frequenza. Può solo modificare l'ampiezza e la fase dell'input applicato. La sua FRF è una funzione dell'unica frequenza, mentre non è funzione né del tempo né dell'eccitazione del sistema.

Dal punto di vista sperimentale, le FRF sono stimate mediante prove di vibrazione forzata. A seconda del numero di input applicati e del numero di output misurati, si possono identificare quattro tipi di schemi di prova: Single Input Single Output (SISO), Single Input Multiple Output (SIMO), Multiple Input Single Output (MISO), Multiple Input Multiple Output (MIMO). I test modali di solo output, sono sempre di tipo MIMO a causa delle ipotesi sull'input.

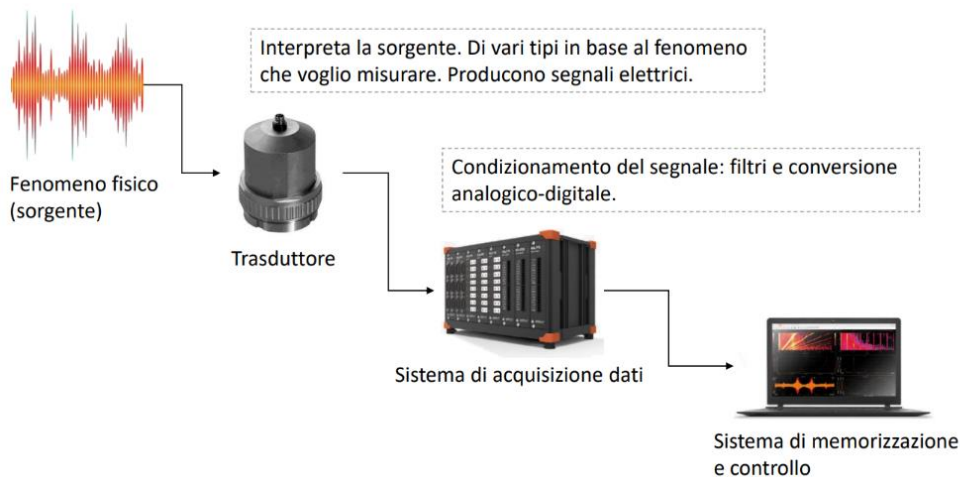
2.3. STRUMENTAZIONE DI MISURA

Misure di alta qualità rappresentano il primo passo fondamentale per un'identificazione modale di successo. Qualsiasi metodo OMA è inefficace se le misure sono completamente corrotte dal rumore. Misure scadenti possono essere il risultato di una scelta errata dei sensori o dell'hardware di misura, ma possono anche essere dovute a un cablaggio errato. Infatti, per una data scelta dell'hardware di misura e dei sensori, spesso si possono adottare diversi schemi di misura. La scelta dello schema di cablaggio più appropriato e l'adozione delle relative specifiche per l'intero percorso del segnale analogico giocano un ruolo primario nella raccolta di dati di alta qualità.

I componenti principali di una prova di analisi modale sono:

- la struttura in esame
- un certo numero di trasduttori di mobili
- un dispositivo di acquisizione dati
- un sistema di elaborazione dei dati per l'estrazione delle informazioni modali dai dati registrati.
- Un sistema di memorizzazione e controllo.

Figura 2.3.1 schema di catena di misura



TRASDUTTORI / ACCELEROMETRI

Per quanto riguarda i trasduttori, la funzione di qualsiasi sensore è la conversione di una quantità fisica in una grandezza elettrica, tipicamente la tensione. Quindi, il segnale elettrico sotto forma di tensione viene trasferito all'hardware di acquisizione dati per la digitalizzazione.

Più semplicemente possiamo schematizzare un trasduttore monoassiale come una massa nota, tenuta in posizione per mezzo di una molla in un alloggiamento. Alla massa è consentito di muoversi solamente nella direzione della molla ed una forza ad essa applicata fa sì che la molla si deformi. Misurando la deformazione si risale alla forza applicata e dunque all'accelerazione della massa. Lo stesso concetto può essere applicato anche nelle altre dimensioni così da risultare il trasduttore triassiale.

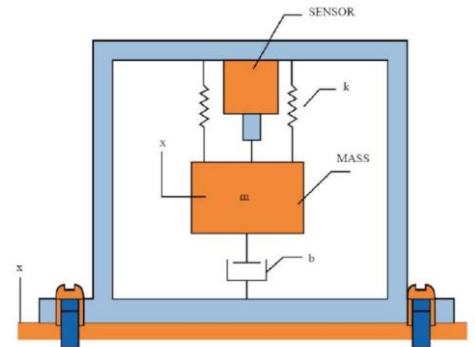


Figura 2.3.2 modello schematico di un trasduttore monoassiale



Figura 2.3.3 trasduttori monoassiali

Oggi giorno si usano sensori più precisi, molto più comunemente si fa spesso uso di accelerometri piezoelettrici. Essi sono costruiti sfruttando l'effetto piezometrico dato dai cristalli

di quarzo o da materiali di tipo ceramico come il Titanio di bario o lo Zirconato Titanato di Piombo. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri, alcuni cristalli se sottoposti all'azione di una sollecitazione di tipo meccanico esterna, generano una migrazione di cariche che, con l'utilizzo di un apposito circuito, può essere tradotto in una differenza di potenziale, ed è proprio la misura di tale differenza che ci permette di risalire all'intensità della forza agente sull'elemento.

In questi accelerometri la massa viene sospesa sul cristallo piezoelettrico, che in questo caso costituisce sia il sensore che il mezzo elastico, che quando viene compresso genera tensione, come avviene per gli accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric). Questi tipi di trasduttori hanno un circuito elettronico integrato all'interno e non necessitano di un preamplificatore esterno ma solo di un alimentatore esterno a energia continua collegato tramite cavo coassiale.

SCHEDA DI ACQUISIZIONE

I sistemi di acquisizione dati eseguono la conversione dei segnali analogici provenienti dai sensori in segnali digitali, che possono essere memorizzati su un supporto digitale e analizzati da un software. Essi sono collegati ai trasduttori mediante cavi coassiali e poi posizionati nei chassis.



Figura 2.3.4 cDAQ a sinistra e cRIO a destra

Abbiamo 2 tipologie di chassis, i cDAQ (compact data acquisition) leggono i dati provenienti dalla scheda di acquisizione per poi inviarli alla cRIO la quale permette una lettura in real-time, sincronizzando tutte le cDAQ ed essa collegate, ed il processamento dei dati.

Infine, l'ultimo tassello della catena di misura è un computer che permette di controllare la cRIO e di leggere e memorizzare i dati delle misure.

3. STATO DELL'ARTE

3.1. MONITORAGGIO E SALUTE STRUTTURALE

Il monitoraggio delle infrastrutture e delle strutture ad alta importanza, come gli ospedali, svolge un importante ruolo considerando gli alti costi necessari per garantire il loro corretto funzionamento e livello di sicurezza. Le esse sono opere molto complesse, che nel tempo sono soggette a deterioramento e dunque ad alterazione delle proprie caratteristiche statiche e dinamiche che ne possono compromettere le prestazioni in esercizio. Il controllo e la manutenzione consentono di prevenire queste problematiche. I moderni sistemi di monitoraggio svolgono un importante ruolo in quanto consentono di monitorare in continuo o meno lo stato di salute della struttura, segnalando in anticipo le condizioni che potrebbero portare ad un dissesto o collasso. Ciò comporta un'importante riduzione dei costi di manutenzione, in particolar modo di quella ordinaria.

Si possono sicuramente adottare diverse tipologie di monitoraggio che dipendono dallo scopo dello stesso. La complessità di un sistema di monitoraggio è direttamente correlata alla natura ed alla dimensione della struttura o infrastruttura che si va a monitorare, ed alla necessità di mantenere un monitoraggio costante o meno. In ogni caso, la realizzazione di tale sistema non è mai semplice in quanto, oltre al posizionamento dei sensori ed all'elaborazione dei dati, è necessario conoscere la tipologia della struttura, i meccanismi di degrado ed i criteri per la valutazione del suo stato.

Per quanto riguarda la strategia di monitoraggio da adottare si distinguono sicuramente: monitoraggio statico e dinamico. Il monitoraggio statico è volto alla valutazione, nel lungo periodo, di variazioni delle grandezze misurate che possono essere inclinazioni, spostamenti, aperture delle fessure mentre il monitoraggio dinamico è mirato principalmente all'identificazione dinamica della struttura e quindi alla definizione dei parametri modali della stessa. Cambiando la strategia di monitoraggio adottata, cambiano gli strumenti ed i sensori che vengono utilizzati.

Il processo di implementazione di una strategia di individuazione del danno su una struttura o infrastruttura civile, meccanica o aerospaziale è oggi definito come Structural Health Monitoring (SHM). I sistemi di SHM consentono di monitorare in maniera continua lo stato di salute delle strutture e quindi di programmare al meglio gli interventi di manutenzione ottimizzando tempistiche e costi. Il danno può essere invece definito come un'alterazione del sistema strutturale che va ad influenzare in maniera negativa le prestazioni in esercizio dello stesso. Se una struttura è danneggiata significa che c'è stata una variazione del sistema dallo

stato iniziale, stato considerato non danneggiato. Il danno strutturale, se degenera può causare dal non più corretto funzionamento della struttura fino alla riduzione della vita utile o addirittura al collasso. Lo scopo delle tecniche di SHM è proprio quello di individuare le variazioni del comportamento della struttura (in particolare se si parla di monitoraggio dinamico) ed in base a queste variazioni definire l'entità del danno, se presente e se la sensibilità delle misure è sufficiente. L'SHM segue un modello che può essere rappresentato mediante quattro fasi: valutazione operativa, acquisizione, fusione e pretrattamento dei dati, estrazione delle informazioni ed elaborazione delle stesse mediante opportuni modelli.

L'obiettivo del monitoraggio strutturale è lo studio delle condizioni strutturali dell'opera in esame e soprattutto la definizione dell'evoluzione nel tempo dei parametri e delle grandezze fisiche tenute sotto osservazione. La sfida principale nel campo del monitoraggio strutturale sta nel fatto che tutte le strutture sono uniche, non è possibile, quindi, utilizzare statisticamente le osservazioni effettuate su oggetti tutti uguali per elaborare previsioni di danno. Per la precedente ragione è fondamentale la fase di caratterizzazione della struttura. Dunque, una peculiarità dei sistemi di monitoraggio per le infrastrutture e strutture civili è che la maggior parte dei sistemi devono essere orientati verso un monitoraggio di lungo termine per valutare le prestazioni nello stato di salute della struttura, ciò implica la necessità di stabilire criteri di priorità come ben evidenziato nelle recenti linee guida per la sicurezza dei ponti esistenti emanate dal CSLP. In definitiva, con il termine monitoraggio si indica l'attività incentrata sui seguenti obiettivi:

- Definizione della variazione del comportamento strutturale;
- Definizione del danno sulla base delle variazioni individuate;
- Definizione degli effetti del danno sulle prestazioni;
- Definizione effetti del degrado.

La definizione del livello di danno non è sicuramente un'operazione semplice. Worden definisce due grandi classi di metodi per l'individuazione del danno:

- *Model-Driven Approach*: l'identificazione del danno è studiata come un problema inverso. Si parte da un modello rappresentativo della struttura (modello agli elementi finiti – FEM) considerato come privo di danno ed in base alle variazioni delle caratteristiche dinamiche della struttura misurate si definisce il danno;

- *Data-Driven Approach*: l'identificazione del danno è studiata come un problema di riconoscimento di un modello di riferimento funzionale. Si assegna una classe di danno alla struttura in funzione di quello che è stato misurato, tenendo conto, per confronto, di altri eventi osservati e misurati in precedenza sullo stesso oggetto, si ha dunque un riferimento non

rappresentativa della natura fisico-meccanica della struttura ma solo della relazione azioni-risposte (è basato su raccolte dati disponibili negli archivi).

3.2. PANORAMICA SULLE APPLICAZIONI DELL'OMA

L'analisi modale operativa (OMA) è una tecnica di analisi strutturale che consente di ottenere informazioni sul comportamento dinamico di una struttura, senza la necessità di conoscere a priori i suoi parametri. Questa tecnica nasce in primis per l'ingegneria aerospaziale per poi rendersi conto delle sue potenzialità anche negli ambiti dell'ingegneria meccanica, biomedica e civile. Essa è stata sviluppata nei primi anni '90 come alternativa alla classica analisi modale, che richiede la conoscenza degli elementi costitutivi della struttura, ma si è diffusa solo negli ultimi decenni. L'OMA si basa invece sull'utilizzo di tecniche di elaborazione dati, che permettono di ricostruire la risposta dinamica della struttura a partire dai segnali di misura acquisiti e quindi da sollecitazioni. Nelle prime applicazioni pratiche di questa tecnica la tecnologia di acquisizione dati e di elaborazione digitale era ancora agli inizi. Tuttavia, l'OMA ha fatto progressi significativi negli ultimi anni grazie all'avanzamento della tecnologia digitale e della potenza di calcolo dei computer, permettendo l'elaborazione di grandi quantità di dati.

L'utilizzo dell'OMA presenta numerosi vantaggi rispetto all'analisi modale sperimentale (EMA) in particolare il suo basso costo, dovuto alla necessità di dover misurare solo le vibrazioni della struttura in esame, e la sua capacità di effettuare misurazioni senza interrompere il normale funzionamento della struttura, ciò ci permette anche di avere un quadro reale dell'edificio in quanto stiamo misurando il suo reale comportamento in stato di operatività. Questo approccio non invasivo riduce i tempi di fermo della struttura, il che è particolarmente importante per le strutture critiche, come i ponti o le torri di trasmissione, in cui l'interruzione delle attività può essere costosa e difficile da organizzare. Inoltre, rispetto alle tecniche classiche non richiede la conoscenza a priori dei parametri della struttura, il che significa che può essere applicata anche in casi in cui la geometria o le proprietà del materiale sono sconosciute. L'OMA è in grado di individuare le frequenze e le forme modali anche in presenza di rumore e disturbi ambientali.

Tuttavia, come tutte le tecniche di analisi strutturale, anche l'OMA presenta dei limiti. In particolare, la precisione dei risultati dipende in gran parte dalla qualità delle misurazioni, che a loro volta dipendono dalle condizioni di carico, dell'ambiente, dal tipo di sollecitazione e dalla posizione dei sensori di misura, influenzando la precisione delle analisi. Inoltre, la ricostruzione della

risposta dinamica della struttura a partire dai segnali di misura richiede l'utilizzo di algoritmi di elaborazione dati complessi e può richiedere notevoli risorse di calcolo.

Nonostante questi limiti, l'OMA è un'utile tecnica di analisi strutturale che trova applicazione in numerosi campi dell'ingegneria civile. E principali applicazioni sono:

- Il monitoraggio dello stato di salute strutturale: essendo una tecnica non invasiva ed economica si presta particolarmente bene per il monitoraggio in continuo
- Individuazione di difetti o anomalie: permettendoci di confrontare i dati attesi dai modelli matematici di progetto con l'attuale e reale comportamento della struttura
- valutare l'effetto di interventi di riparazione e di rafforzamento, specialmente in ambito sismico: comodo, semplice, facile e veloce attraverso un confronto di risultati derivanti da misure avvenute prima e dopo l'intervento permette di avere una buona stima sull'efficacia del sistema di adeguamento
- ottimizzazione del modello analitico: essendo i risultati derivanti da una risposta reale dell'edificio, possono essere utilizzati per un confronto, e dunque come metro di paragone per l'ottimizzazione del modello analitico

3.3. APPROCCI E TECNICHE UTILIZZATE NELL'OMA

Con l'espressione "identificazione dinamica" di una struttura si intendono tutte quelle tecniche che consentono di individuare la risposta dinamica della struttura stessa, in termini di frequenze proprie, corrispondenti modi di vibrazione e coefficienti di smorzamento. Due sono i possibili approcci:

- L'approccio analitico: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, la distribuzione di massa, rigidità e smorzamento della struttura è espressa tramite matrici di massa, rigidità e smorzamento; da qui è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali);
- L'approccio sperimentale: partendo dalla misura dell'input dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

Le varie tecniche di identificazione sperimentale sono nate inizialmente nel campo della ricerca aeronautica, allo scopo di studiare il comportamento dei velivoli sotto l'azione delle vibrazioni indotte dai carichi dinamici a cui essi sono sottoposti in esercizio; si sono poi estese a vari altri campi, dall'industria automobilistica alla robotica, alle costruzioni. Si tratta di tecniche non distruttive, e in quanto tali possono essere applicate sia a strutture nuove, per esempio in fase di collaudo, sia a strutture esistenti o storiche.

Le tecniche di analisi modale trovano oggi sempre maggiore applicazione in campo ingegneristico: infatti, anche se l'avvento dei moderni computer, caratterizzati da prestazioni sempre più elevate, consente la realizzazione di modelli, anche molto complessi, agli elementi finiti per analizzare le proprietà statiche e dinamiche delle strutture, accade spesso che le proprietà dinamiche calcolate con un'analisi agli elementi finiti differiscano da quelle effettive della struttura. Questa differenza è da imputarsi a varie cause:

- L'analisi agli elementi finiti è basata su una discretizzazione della realtà, intendendo con ciò che i campi di spostamento vengono approssimati attraverso funzioni di forma predefinite all'interno di ciascun elemento;
- Mentre le proprietà di massa e rigidità sono facilmente valutabili sulla base delle proprietà dei materiali e della geometria degli elementi, risulta molto più difficile tenere correttamente conto delle proprietà di smorzamento della struttura all'interno del modello: infatti, lo smorzamento strutturale è legato non solo alle proprietà dei materiali ma anche ad una serie di altri meccanismi difficili da modellare analiticamente (apertura e chiusura di microfessure nel calcestruzzo, interazione con elementi non strutturali, etc.)
- La geometria effettiva può essere diversa da quella considerata nel modello.

Per colmare il gap tra struttura reale e modello è necessario, allora, ricorrere a tecniche sperimentali al fine di confrontare i risultati del modello con quelli ottenuti dalle misure. L'analisi modale sperimentale è nota anche come "problema inverso" (in analogia con il cosiddetto "problema diretto", nel quale sono noti l'input e la struttura, e si vuole conoscere la risposta), trattandosi di un problema nel quale sono noti, appunto, la risposta e ciò che la causa (l'input) e si vuole conoscere la struttura.

Il principale motivo di interesse nei riguardi di questo tipo di analisi è legato alla considerazione che il comportamento dinamico di una struttura è una sorta di "impronta digitale", nel senso che esso dipende solo dalle sue caratteristiche intrinseche (masse, rigidità, smorzamenti, grado di vincolo, ecc...) e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato. Pertanto, se non intervengono modificazioni interne al manufatto (come, per esempio, dei danni

strutturali), il comportamento della struttura rimane inalterato; in caso contrario, si noterà una variazione delle frequenze e dei modi propri di vibrare.

La correttezza dei risultati forniti dall'analisi modale operativa può, tuttavia, essere inficiata se al rumore bianco si sovrappone un'eccitazione non casuale. La più grande differenza fra le tecniche EMA e OMA consiste nel fatto che mentre le prime operano in un contesto deterministico, le seconde in uno stocastico.

Un criterio di classificazione dei metodi, nel caso di procedure EMA, si basa sul numero di input e output, dato che le posizioni delle forzanti e dei punti in cui viene misurata la risposta possono essere singole o molteplici; è possibile, allora, distinguere i seguenti casi:

- Una risposta dovuta a una sola forzante: single-input single-output (SISO);
- Molteplici risposte dovute a una sola eccitazione: single-input multiple-output (SIMO);
- Molteplici risposte dovute a varie forzanti: multiple-input multiple-output (MIMO);
- Una risposta dovuta a molteplici forzanti: multiple-input single-output (MISO).

I primi tre metodi sono quelli più usati. Le prove sperimentali per la determinazione dei parametri modali sono basate sulla possibilità di descrivere il comportamento dinamico della struttura o mediante un set di equazioni differenziali nel dominio del tempo, oppure mediante un set di equazioni algebriche nel dominio della frequenza. Le tecniche di identificazione dinamica possono, pertanto, essere raggruppate in tecniche nel dominio del tempo e tecniche nel dominio della frequenza. Questo argomento è oggetto del Capitolo

4. METODOLOGIA

Verrà di seguito descritto il lavoro di fatto svoltosi, ovvero dalla descrizione del caso studio al lavoro effettuato durante le campagne di misurazione ed in fine l'analisi delle prove e l'identificazione dei modi

4.1. DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO



Figura 4.1.1 vista satellitare del complesso ospedaliero con individuazione dei corpi

Il complesso ospedaliero è composto da una struttura intelaiata in calcestruzzo armato di 7 piani più un seminterrato, è suddiviso in 8 corpi separati da giunti tecnici; 3 di costituiscono la parte centrale dell'ospedale (corpo: B, IB, I) al quale sono collegati i restanti corpi che rappresentano le ali (corpo: A, C, E, N, L), quest'ultime sono a loro volta divise nel centro da ulteriori giunti divisori, verranno in seguito distinti in blocchi interni (la metà delle ali collegate al corpo centrale) e blocchi esterni (la restante metà delle ali lontana dal corpo centrale). Le ali sono lunghe 70 m e larghe 14 m con pilatri ogni 6 m longitudinalmente, sono presenti un vano ascensore e delle scale per ognuno dei 2 blocchi e collegano tutti i piani. I componenti del copro centrale sono lunghi 40 e 33 m larghi sempre 14 m e un interasse della pilastrata di 6 m nella loro direzione longitudinale, solamente i 2 esterni presentano una scalinata.

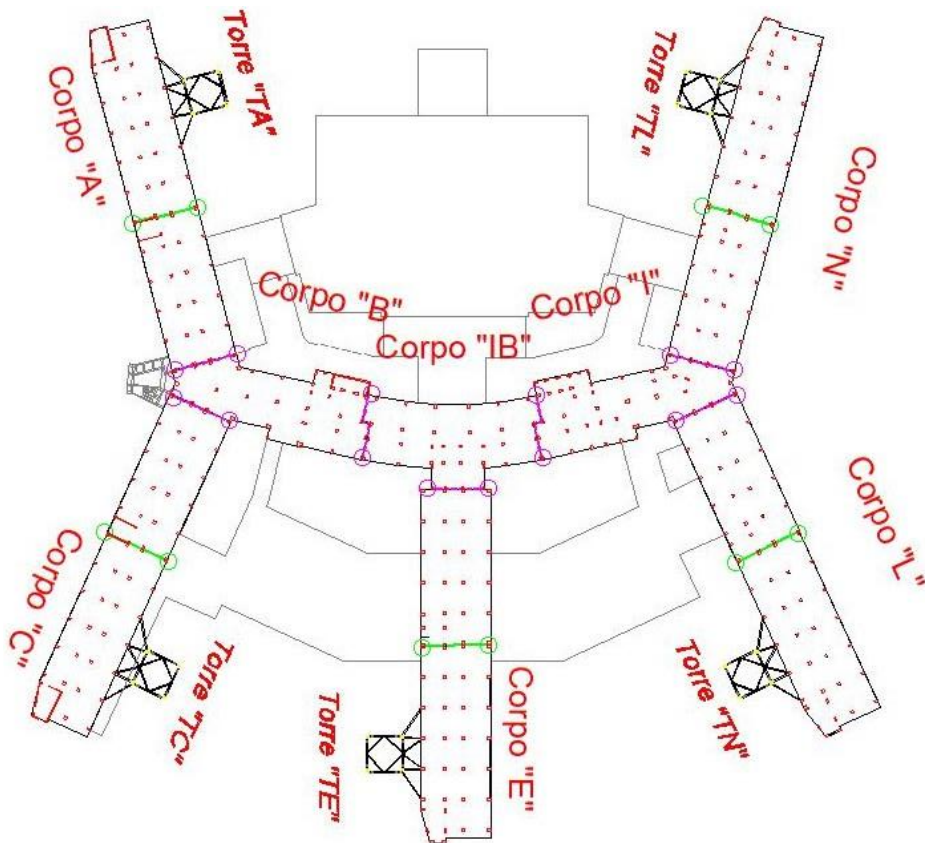


Figura 4.1.2 pianta del complesso ospedaliero con evidenziate le pilastrate, le torri dissipative, i giunti ed i nomi dei corpi. in verde le cuciture mediante piastre in acciaio ed in viola i dissipatori viscosi

I diversi blocchi che costituiscono il complesso ospedaliero sono strutture indipendenti, separate da giunti strutturali di circa 5 cm; in alcune zone, specialmente nel sottotetto, i giunti sono visibili e facilmente ispezionabili non essendo dotati di coprigiunto: essi risultano riempiti da pannelli di polistirene interposti tra gli elementi strutturali dei due blocchi. Il comportamento dei blocchi soggetti a vibrazioni di bassissima intensità, come quelle prodotte dal rumore ambientale, può tuttavia non essere totalmente indipendente dai blocchi adiacenti. Le vibrazioni potrebbero, infatti, essere trasmesse da piccoli punti di contatto tra i due blocchi o da elementi non strutturali quali elementi di finitura, tubazioni, impianti ecc... Nel caso limite di comportamento univoco dell'intero complesso i singoli blocchi sarebbero caratterizzati dagli stessi valori delle frequenze proprie, individuati dai picchi delle PSD, e dalle stesse forme modali. Più verosimilmente, nel caso in esame, si potrebbe avere un'interferenza parziale tra i vari blocchi; ciò risulterebbe in un accoppiamento dei modi propri di vibrare, in particolare di quelli corrispondenti a frequenze ravvicinate. Questo comportamento può essere indagato tramite l'autoMAC che fornisce una misura quantitativa del grado di somiglianza di due forme modali.



Figura 4.1.3 in alto a sinistra: piastra in acciaio posto sul giunto. in basso a sinistra dissipatore viscoso. a destra torre dissipativa

Nel 2016 sono iniziati lavori di protezione sismica, ovvero la costruzione di 5 torri dissipative in acciaio realizzate all'esterno degli edifici esistenti, alle estremità delle ali e collegate ai vari piani. È inoltre stata realizzata una cucitura tramite piastre in acciaio e dissipatori viscosi dei corpi in prossimità dei giunti sismici per garantire l'efficacia delle torri su tutti gli elementi dell'ospedale. Questi interventi sono stati realizzati un 2 anni diversi, nel 2016 si è vista la costruzione di sole 3 torri, mentre le altre 2 sono state realizzate all'inizio del 2023.

Dato che opere di protezione sismica sono state fatte in due fasi, si sono eseguite numerose misure accelerometriche negli anni, in particolare:

- 2013, dal 17/04/2013 al 27/06/2013 sono state eseguite misure per la determinazione del comportamento dinamico pre-intervento su tutti i corpi del complesso
- 2015, il 03/09/2015, in previsione degli imminenti dell'inizio dei lavori di costruzione, sono state fatte misure nel solo corpo E



Figura 4.1.4 accelerometri posti in prossimità del giunto

- 2016, 2 misurazioni effettuate sul corpo E il 06/05/2016 ed il 26/05/2016 post lavori per effettuare un confronto dei risultati prima e dopo installazione della torre dissipativa e la cucitura del giunto

- 2023, iniziate il 04/04/2023, quindi dopo la conclusione dell'iniziale progetto di protezione sismica, sono stati eseguiti un monitoraggio in continuo di 2 giorni riguardante il sottotetto di tutti i corpi, ed inoltre anche prove di caratterizzazione dinamica di tutto il complesso per poter fare un confronto con i dati acquisiti nel 2013, ovvero un confronto di tutto il complesso ospedaliero prima e dopo la costruzione di tutte citate opere di protezione

4.2. PROCEDURA DI ACQUISIZIONE

4.2.1 STRUMENTAZIONE USATA

La catena di misura impiegata per la misura delle accelerazioni nelle prove antecedenti l'intervento di adeguamento (2013) si compone di:

- 3 accelerometri monoassiali piezoelettrici B&K modello 8306:
 - sensibilità nominale 10000 mV/g
 - campo +/- 1 g pk
 - range di frequenza 0.06:1250 Hz
- 8 accelerometri monoassiali piezoelettrici PCB modello 393B31:
 - sensibilità nominale 10000 mV/g
 - campo +/- 1 g pk
 - range di frequenza ($\pm 10\%$) 0.07:300 Hz
- 1 accelerometro monoassiale piezoelettrico PCB modello 393C:
 - sensibilità nominale 1000 mV/g
 - campo +/- 2.5 g pk
 - range di frequenza ($\pm 10\%$) 0.01:1200 Hz
- 2 vibration meter B&K modello 2511
- 3 schede di acquisizione NI 9234 24 bit, range selezionabile
- 1 chassis (8 slot USB) NI cDAQ-9178 - 1 computer portatile.

Nel dettaglio, la catena di misura impiegata nelle prove successive i lavori di adeguamento (2023) si compone di:

- 12 accelerometri monoassiali piezoelettrici PCB modello 393B31 con sensibilità nominale 10000 mV/g , range di misura +/- 0.5 g pk, range di frequenza ($\pm 10\%$) 0.07÷300 Hz, broadband resolution 1 μ g (RMS);
- 4 schede di acquisizione NI 9230 con risoluzione 24 bit, range di acquisizione +/- 5 V, freq. di campionamento massima 12.8 kS/s/ch;
- 3 chassis (4 slot) NI cDAQ-9185 TSN enabled;
- 1 chassis (8 slot) NI cRIO-9045 TSN enabled, 1.30 GHz Dual-Core CPU, 2 GB DRAM, 4 GB Storage, -20 °C to 55 °C, Kintex-7 70T FPGA;
- cavi coassiali;
- cavi ethernet, Cat. 6 schermati S/FTP;
- 1 computer portatile con software dedicato.

4.2.2 INTRODUZIONE SUL POSIZIONAMENTO DEI SENSORI

Il moto nel piano del singolo orizzontamento, supposto indeformabile, risulta individuato quando sono determinate le due componenti traslazionali e quella rotazionale. A tal fine sono state rilevate le accelerazioni lungo due assi ortogonali in un punto del piano, denominato **A**, e l'accelerazione in un altro punto, denominato **B**, posto sufficientemente lontano, valutata nella direzione trasversale alla congiungente di B con A. Per determinare le forme modali dell'edificio sono state rilevate le accelerazioni di 4 dei 7 impalcati dell'edificio scegliendo, quando possibile, i piani 1, 3 5, 7 (indicando con 0 il piano terra e con 7 il sottotetto). I punti di misura A e B dei vari piani sono stati posizionati lungo la stessa verticale. In Figura 4.2.2.1, a titolo di esempio, sono riportati i punti di misura A e B e le direzioni di misura dei 3 accelerometri per ciascun piano monitorato del blocco esterno del Corpo E.

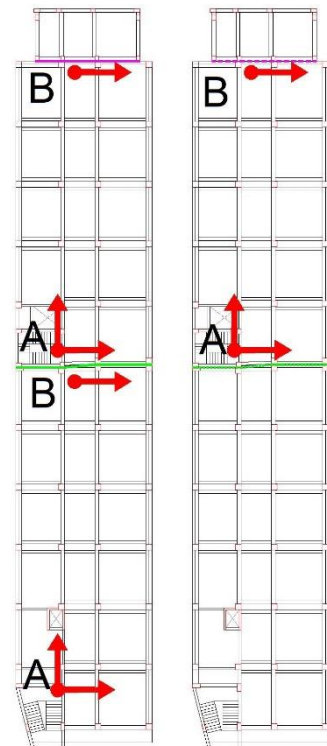


Figura 4.2.2.1 pianta con posizionamento sensori corpo E dei piani 1, 3, 5 (destra) e 7 (sinistra)

In alcuni casi, non essendo stato possibile utilizzare tutti gli accelerometri contemporaneamente, si sono previste differenti configurazioni di prova nelle quale alcuni accelerometri sono stati lasciati nella stessa posizione mentre altri sono stati spostati nelle posizioni precedentemente non monitorate. Quelli tenuti fissi costituiranno il riferimento in base al quale saranno scalate le misure relative a configurazioni non simultanee. Per garantire il corretto posizionamento degli accelerometri e la misura dell'accelerazione in direzione orizzontale, i sensori sono stati montati in modo solidale, tramite un perno filettato, su squadrette metalliche fissate al pavimento mediante cera d'api e/o colla a caldo.

4.2.3 POSIZIONAMENTO SENSORI MISURE PRE-INTERVENTO (2013)

è mostrata la disposizione in pianta degli accelerometri delle prove avvenute nel 2013, con indicate le direzioni ed i canali di acquisizione per il corpo oggetto di studio. Le misure sono state eseguite considerando 2 punti di misura per ciascuno dei 4 piani dell'edificio, i piani 0, 3, 5, 7. Nel primo punto di misura, denominato A, sono state rilevate le accelerazioni secondo due direzioni ortogonali (denominate X, la trasversale, e Y, la longitudinale), mentre nel secondo punto di misura, denominato B, è stata rilevata l'accelerazione lungo la direzione trasversale X. Il punto di misura A è posizionato all'interno del vano scala ad un'estremità del blocco, mentre il punto di misura B è posto in posizione opposta rispetto ad A, all'altra estremità del blocco. La conoscenza delle accelerazioni lungo due assi ortogonali nel punto A e dell'accelerazione lungo la direzione trasversale valutata in B, posto sufficientemente lontano da A, permette di determinare il moto nel piano dell'orizzontamento (supposto indeformabile), individuando sia le due componenti traslazionali che quella rotazionale. I punti A e B nei vari piani sono posizionati lungo la stessa verticale.

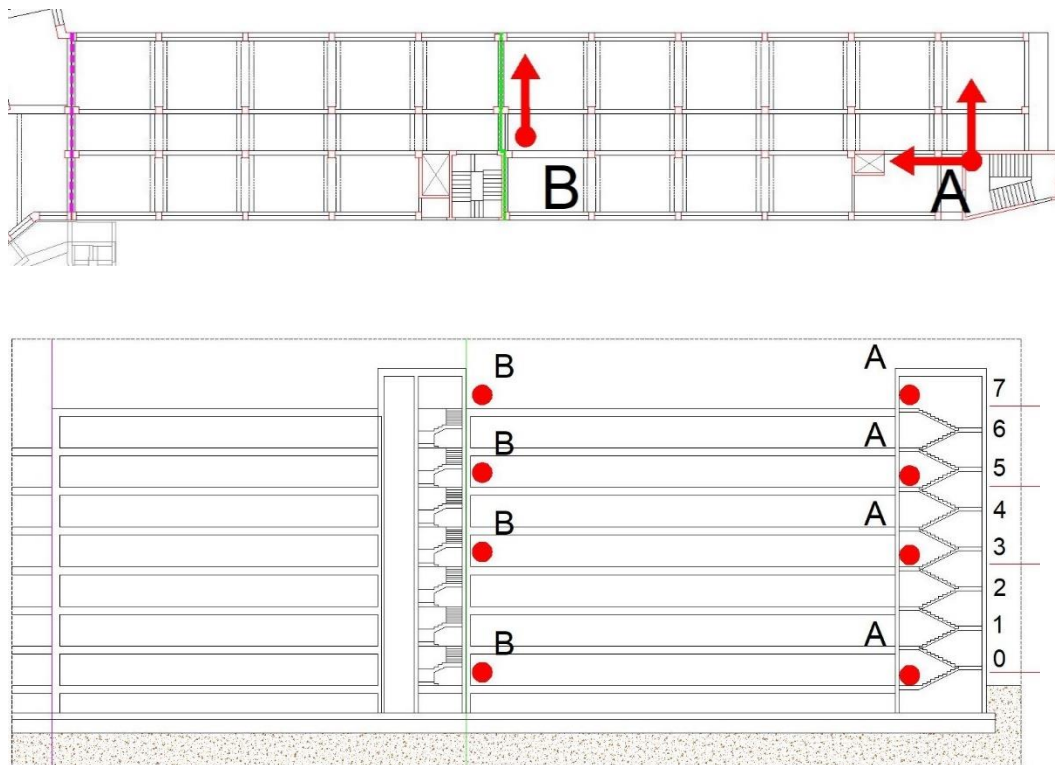


Figura 4.2.2.3 pianta e prospetto corpo C

4.2.4 POSIZIONAMENTO SENSORI MISURE DURANTE L'INTERVENTO (2015/2016)

Queste misurazioni sono state fatte solamente nel corpo E per cui si è avuto la possibilità di prendere dati, e quindi la restituzione, di tutti i piani e dell'intera ala, ossia il corpo esterno ed anche il corpo interno. Sono state effettuate 3 configurazioni di prova: la prima interessa il blocco esterno ed i piani dispari (1, 3, 5, 7), la seconda ancora il blocco esterno ma i piani pari (2, 4, 6, 7) e la terza interessa i piani dispari del blocco interno. In tutte e 3 le prove sono stati tenuti 3 accelerometri fissi di riferimento nel sottotetto (piano 7) del blocco esterno per poter scalare i risultati delle diverse configurazioni e avere una restituzione completa. In figura 4.2.4.1 È riportato come esempio la pianta delle prove della configurazione 3.

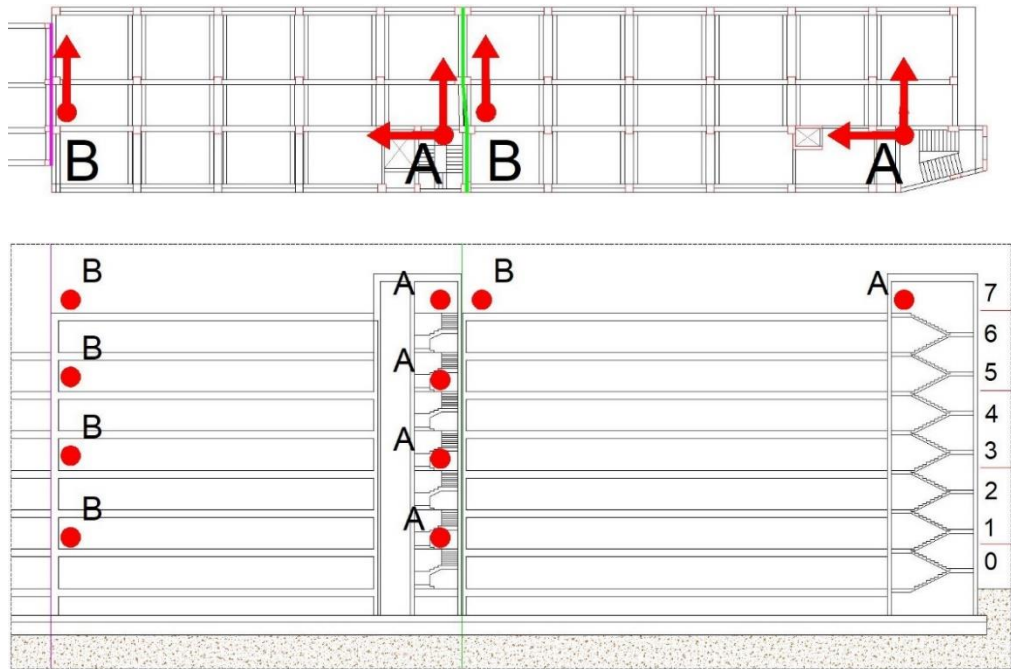


Figura 4.2.4.1 pianata e prospetto corpo E

4.2.5 POSIZIONAMENTO SENSORI MISURE POST-INTERVENTO (2023)

Le misure di post-intervento comprendono un primo monitoraggio in continuo di 2 giorni con sensori sparsi nel sottotetto per tutta l'area dell'intero complesso (corpi: A, C, B, IB, I, E, L, N) come collaudo iniziale ma soprattutto, essendo questo il piano dove verranno tenuti fissi gli accelerometri di riferimento per le operazioni di scalatura e "merging)" ed anche il piano con più disturbo di segnale, perché presenti numerosi sistemi di impianti (ventilazione, pompe, pistoni di ascensori, ecc.) si è voluto verificare la qualità dei segnali misurati.

Successivamente sono state eseguite le prove per ogni corpo prevedendo 4 configurazioni, una per ogni piano analizzato (1, 3, 5, 7) ed avendo come riferimento un sensore su ogni corpo, posto nel sottotetto. Per il corpo centrale (B, IB, I) sono stati usati 3 accelerometri per ogni blocco, 2 ortogonali posti in una estremità denominata punto A ed uno opposto quanto più possibile distante in direzione trasversale denominato B. per le ali si è scelto di misurare contemporaneamente sia i blocchi interni che quelli esterni con 6 accelerometri per piano, 2 coppie ortogonali in prossimità del giunto di mezzeria ed altri 2 opposti nelle estremità per cogliere la rotazione.

Nonostante le misure siano state effettuate su tutti i corpi componenti il complesso ospedalieri nell'analisi dei risultati mancano i corpi E e B poiché essi sono stati misurati per ultimi seguendo la scaletta delle misurazioni e per problemi di tempistiche non si è potuto procedere alla loro analisi, si menziona inoltre che le misure dei corpi I e IB sono state effettuate contemporaneamente e pertanto i dati sono stati analizzati insieme senza la possibilità di separare i risultati. In figura 4.2.5 un esempio di disposizione

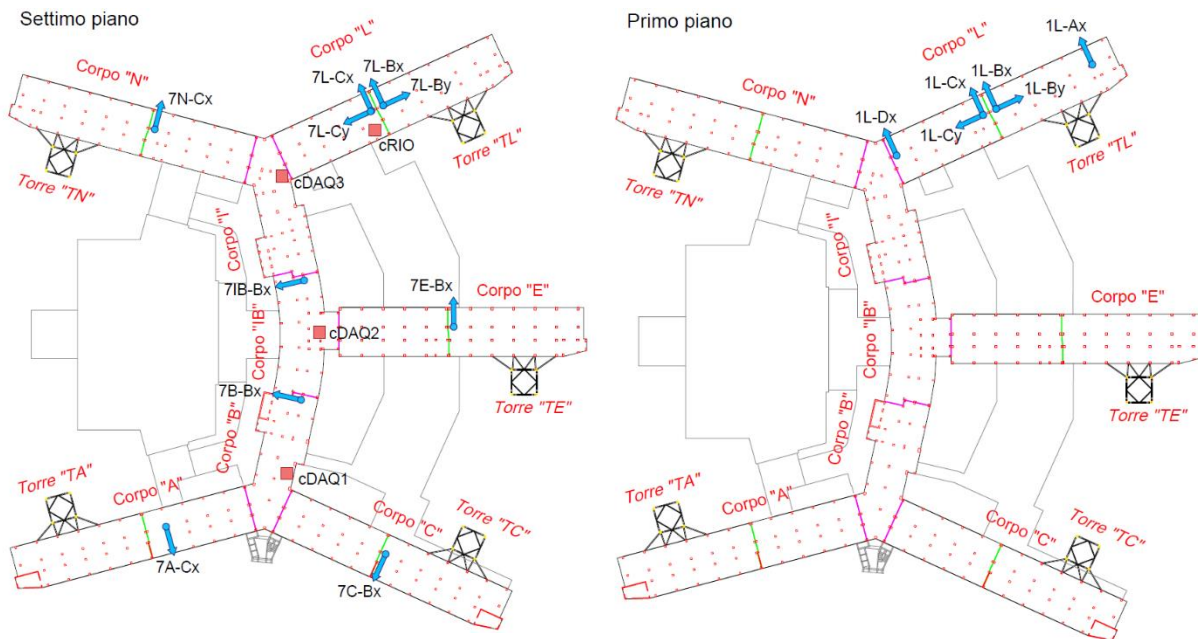


Figura 4.2.5 piante e prospettiva corpo L

4.3. IDENTIFICAZIONE DEI MODI DI VIBRARE

In questo paragrafo vediamo nel dettaglio come avviene di fatto il passaggio pratico dal segnale digitale acquisito dalla catena di misura, alla restituzione finale dei parametri di caratterizzazione dinamica dell'edificio, è possibile identificare quattro passaggi fondamentali. Tali passaggi costituiscono la metodologia usata per l'analisi modale operativa e permettono di ottenere una rappresentazione completa del comportamento dinamici della struttura, e sono:

- Pre-processamento dei segnali: utile ad eliminare le frequenze non appartenenti alla struttura ed ottenere uno spettro delle frequenze del solo edificio.
- Identificazione dei parametri modali: applicazione dell'algoritmo del metodo che si vuole utilizzare per il calcolo dei parametri
- Data merging: unione dei risultati ottenuti da più identificazione in una unica soluzione

- Rappresentazione grafica: disegno di un modello rappresentativo gli spostamenti modali

4.3.1 PRE-PROCESSAMENTO DEI SEGNALI

Come operazione preliminare nella metodologia di identificazione tramite OMA, è necessario eseguire un lavoro di pre-processamento sui dati acquisiti. I dati grezzi registrati non possono ancora essere utilizzati per identificare i vari modi della struttura, in quanto contengono vibrazioni non appartenenti alla struttura stessa, ma derivanti da dispositivi meccanici in funzione come ascensori, pompe, sistemi di areazione, ecc., e impulsi causati da disturbi accidentali come lo sbattere di infissi, che vengono classificati come disturbi di fondo.

Uno dei vantaggi dell'OMA è l'acquisizione dei dati senza interrompere il normale funzionamento e utilizzo della struttura in esame. Tuttavia, ciò comporta l'impossibilità di eseguire misure in un ambiente controllato e privo di disturbi. Un altro problema dei dati grezzi acquisiti è il loro elevato numero. Ad esempio, sono stati acquisiti 2048 valori ogni secondo per 15-20 minuti, e computare tutti questi valori richiederebbe computer ad elevate prestazioni. Per questo motivo, in prima battuta, è stato effettuato un taglio passa-basso a 30 Hz e un ricampionamento di 1/20 di quello di partenza, ovvero di 102,4 al secondo. Questa scelta rappresenta sempre un compromesso tra il bisogno di un'accurata rappresentazione del segnale in digitale e la memoria e lo spazio nell'hard disk disponibile. Inoltre, per eliminare i disturbi di fondo e altri segnali non pertinenti, è stata effettuata una pulizia del segnale attraverso algoritmi di filtraggio. Tuttavia, anche dopo queste operazioni, in alcuni casi possono persistere picchi anomali che sfuggono ai filtri. Pertanto, è stata eseguita un'ulteriore fase di taglio manuale dei pezzi di segnale sporco. Tuttavia, va considerato che in seguito alle operazioni di filtraggio, i primi 20 secondi dei dati saranno sempre da scartare. Inoltre, in alcuni casi, nonostante le operazioni di pulizia del segnale, possono rimanere alcuni picchi anomali che devono essere individuati ed eliminati manualmente. Infine, per verificare l'efficacia del pre-processamento dei dati, è stata calcolata la PSD (power spectral density) prima e dopo il processo di filtraggio. Lo spettro ottenuto dal segnale originale è stato confrontato con quello ottenuto dopo il pre-processamento, al fine di garantire che il filtro non abbia compromesso o distorto il segnale.

In sintesi, il processo di pre-processamento dei dati è una fase essenziale della metodologia di identificazione tramite OMA, in quanto consente di eliminare i disturbi di fondo e altri segnali non pertinenti, ridurre il numero di dati da elaborare e garantire la qualità del segnale pre-processato.

In figura 4.3.1 un esempio di segnale prima e dopo filtraggio

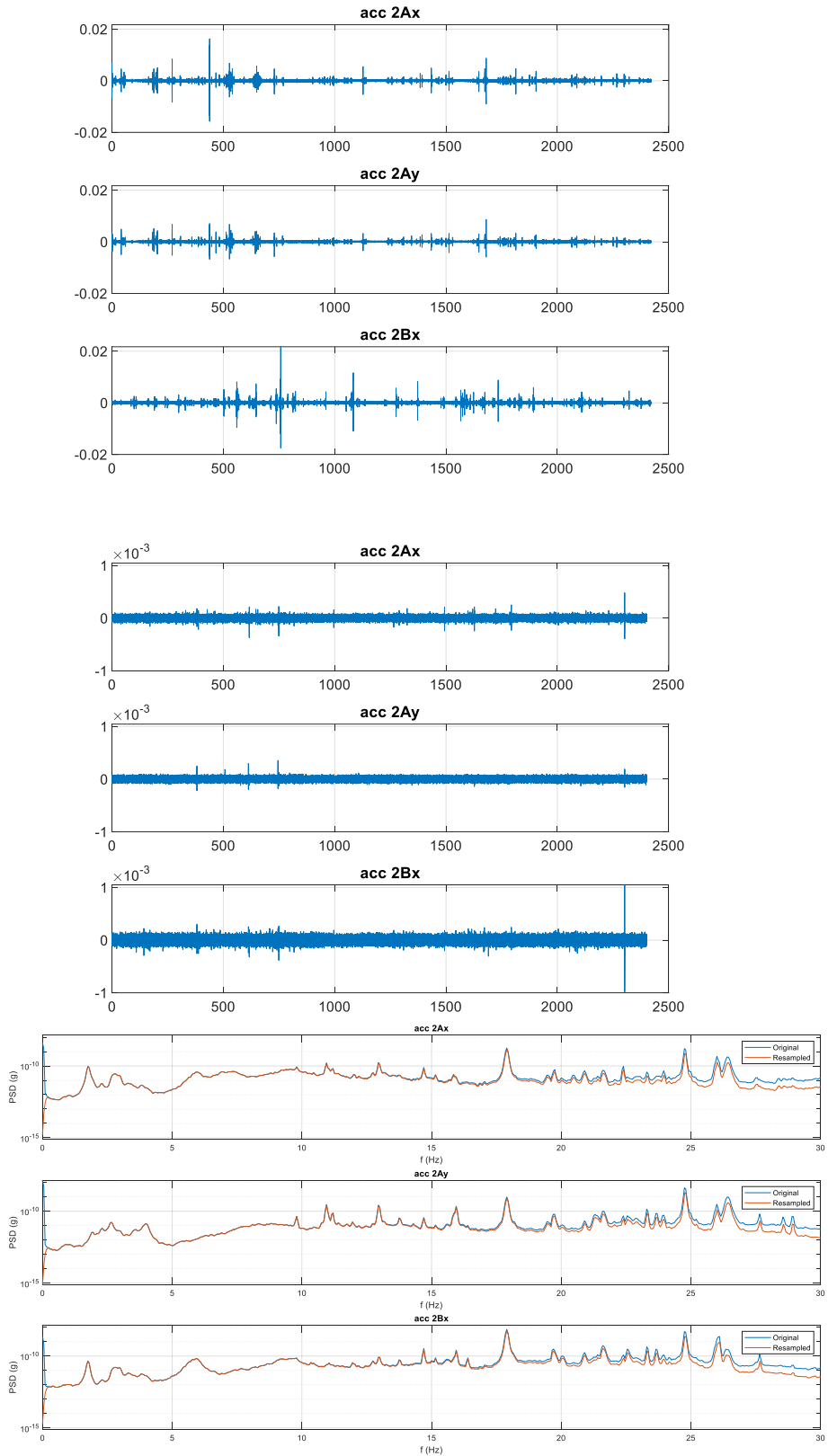


Figura 4.3.1 segnale prima del filtro (in alto), dopo il filtro (al centro) e PSD (in basso)

4.3.2 IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI MODALI

Come già detto nel capitolo 2 in letteratura esistono diversi metodi di identificazione OMA che possono essere classificati sia in base al numero di input e output, sia in base al dominio cui essi sono sviluppati.

In particolare, essi possono essere distinti in SIMO (singular input multiple output), MISO (multiple input singular output), SISO (singular input singular output) e MIMO (multiple input multiple output), sviluppati nel dominio del tempo, nel dominio delle frequenze o metodi di tipo ibrido. Tra i più usati citiamo:

| | Method | Characteristics |
|-------------------------|--|--|
| Frequency Domain | Peack Picking (PP) | Classic SDOF method |
| | Frequency Domain Decomposition (FDD) | MDOF method; application of SVD to reduce noise |
| Time Domain | Random Decrement (RD) | Operates on time domain series, leading to a free decay curve analysis |
| | Recussive Techniques (ARMA) | Time series modelling using recursive algorithms |
| | Maximum Likelihood | Stochastic methods based on the minimization of a covariance matrix |
| | Stochastic Subspace Identification Method (SSI-Data) | Stochastic methods based on the project of state vector of past realizations |

- *Peack Picking*, PP, nel dominio della frequenza;
- *Frequency Domain Decomposition*, FDD;
- *Enhanced Frequency Domain Decomposition*, EFDD;
- *Curve-fit Frequency Domain Decomposition*, CFDD;
- *Stochastic Subspace Identification*, SSI, nel dominio del tempo

In queste analisi è stato usato un metodo MIMO sviluppato nel 4 dominio del tempo, cioè basato sull'analisi del processo risposta strutturale, più nello specifico si è usato un SSI-PC ovvero "Stochastic Subspace Identification" implementato col metodo "Principle Component".

In generale gli edifici di questa tipologia oscillano a frequenze non superiori i 20 Hz e molto più comunemente sotto i 10 Hz, per questo motivo si è ritenuto eseguire un ulteriore filtro passa-basso a 10 Hz così da snellire il calcolo e semplificando il lavoro di ricerca delle soluzioni. Per motivi prestazionali del computer si è invece dovuto eseguire un ulteriore ricampionamento a 51.2 Hz che con il nuovo filtro verifica comunque il teorema di Nyquist, il quale enuncia che per evitare fenomeni di aliasing il ricampionamento deve essere fatto ad una frequenza non

inferiore a 2 volte quella di indagine. Successivamente è stato applicato l’algoritmo del citato metodo SSI-PC, in questa fase è importante definire i seguenti parametri: ordine massimo del modello (2 volte il numero massimo di gradi di libertà della struttura, Ord_Max), numero di blocchi di righe della matrice di hankel (i), la massima distanza tra le soluzioni per appartenere allo stesso cluster (Max dist) ed il numero minimo di soluzioni all’interno di un cluster (soglia). La quantità e la qualità dei modi in output è data dalla variazione dei valori dei precitati parametri, essi verranno a più riprese modificati ed aggiustati, ottenendo così come risultato i parametri di caratterizzazione dei singoli modi (frequenza naturale e rapporto di smorzamento), gli spostamenti di piano per ogni forma modale ed il fattore di complessità di modo (MCF- mode complexity factor). Grazie ad un confronto tra i risultati delle diverse prove effettuate per ogni blocco ed i diagrammi di stabilizzazione e frequenza-smorzamento si sono potuti individuare nei risultati i modi da scartare. Decisioni ponderate sulla base di: modi non trovati nelle altre prove, modi non associati a nessun picco di risonanza, complessità dei modi elevata e forme modali ridondanti.

In figura 4.3.2 un esempio di identificazione trovata con evidenziati i modi trovati

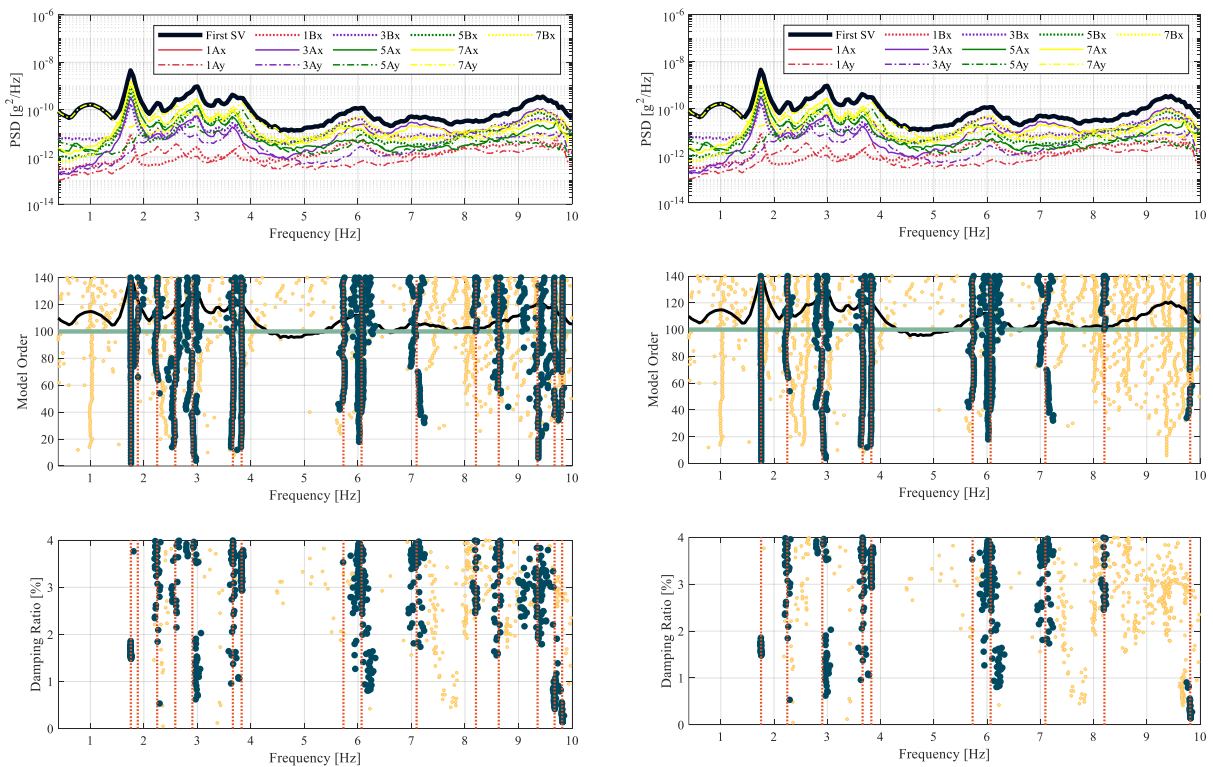


Figura 1 partendo dall'alto: spettro delle PSD e SVD, cluster, smorzamenti. a sinistra tutte le soluzioni trovate, a destra le soluzioni reali al netto dei falsi modi

4.3.3 DATA MERGING

In alcuni casi non è stato possibile eseguire le misurazioni simultaneamente su tutti i piani e sono dunque state ripetute impostando diverse configurazioni la cui somma comprendesse tutti i piani necessari, tenendo fermi alcuni sensori detti di riferimento (in genere quelli dell'ultimo piano), e spostando gli altri detti mobili. Tenendo conto della non stazionarietà dell'input, le forme modali ottenute dal processo di identificazione sono state scalate mediante la tecnica chiamata PoSER (Post Separate Estimation Re-Scaling). Essa prevede in un primo momento l'identificazione dei parametri modali per ogni singola configurazione e poi un'operazione di "merging" dei diversi valori delle forme modali e la moltiplicazione dei diversi punti costituenti le forme modali per i coefficienti ottenuti dal rapporto tra le componenti delle PSD relative agli accelerometri di riferimento nelle diverse configurazioni, riferite alle diverse frequenze di risonanza. Per ogni corpo è stata successivamente calcolata la matrice MAC (modal assurance criterion), tale metodo è l'indice più usato per rappresentare le correlazioni tra le forme modali.

$$MAC(\{\phi_n^a\}, \{\phi_n^e\}) = \frac{|\{\phi_n^a\}^T \{\phi_n^e\}|^2}{(\{\phi_n^a\}^T \{\phi_n^a\})(\{\phi_n^e\}^T \{\phi_n^e\})}$$

ϕ_n^a = forma modale a del modo n

ϕ_n^e = forma modale e del modo n

Gli elementi della matrice sono il grado di accoppiamento tra i singoli modi delle 2 forme modali, essi variano tra 0 e 1 dove il primo significa che i 2 modi sono totalmente disaccoppiati ed il secondo che sono totalmente accoppiati. Nel caso studiato il confronto è stato fatto tra le componenti del vettore singolare alla frequenza di risonanza e quelle relative alle frequenze vicine della singola prova, dando modo di valutare il grado di accoppiamento dei diversi modi.

In figura 4.3.3 troviamo l'AUTOMAC

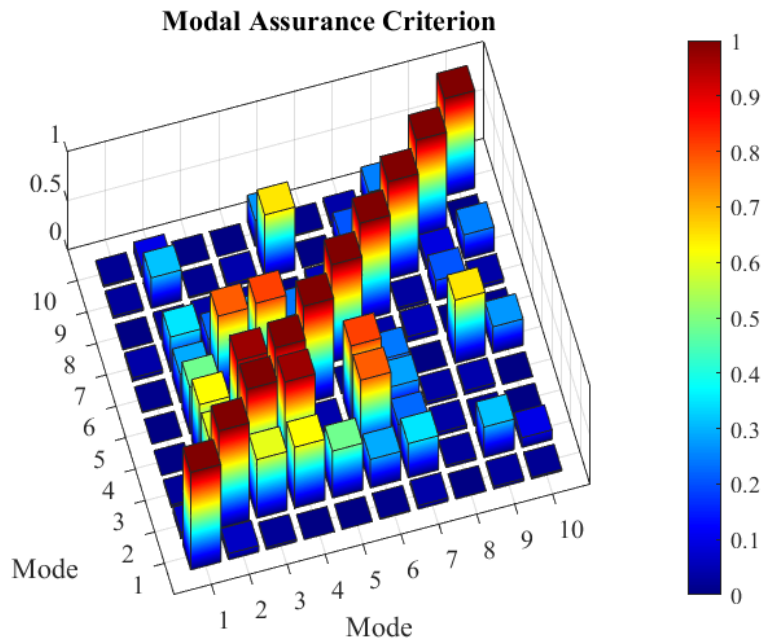


Figura 4.3.3 matrice auto MAC

4.3.4 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

La rappresentazione grafica dei modi individuati attraverso l'analisi modale operativa è un passaggio fondamentale per la valutazione della risposta dinamica di una struttura, essa permette di visualizzare in modo chiaro e immediato i risultati dell'analisi, consentendo di valutare l'efficacia del processo di identificazione e di verificare se i modi individuati sono coerenti con le aspettative teoriche o le ipotesi di progetto. Inoltre, la rappresentazione grafica consente di individuare eventuali discrepanze o anomalie rispetto ai risultati attesi, fornendo così importanti indicazioni per eventuali azioni correttive o di manutenzione. In definitiva, la rappresentazione grafica dei modi identificati è uno strumento fondamentale per la valutazione della risposta dinamica delle strutture e rappresenta un importante supporto per l'analisi e l'interpretazione dei dati raccolti durante l'analisi modale operativa.

In figura 4.3.4 alcuni esempi

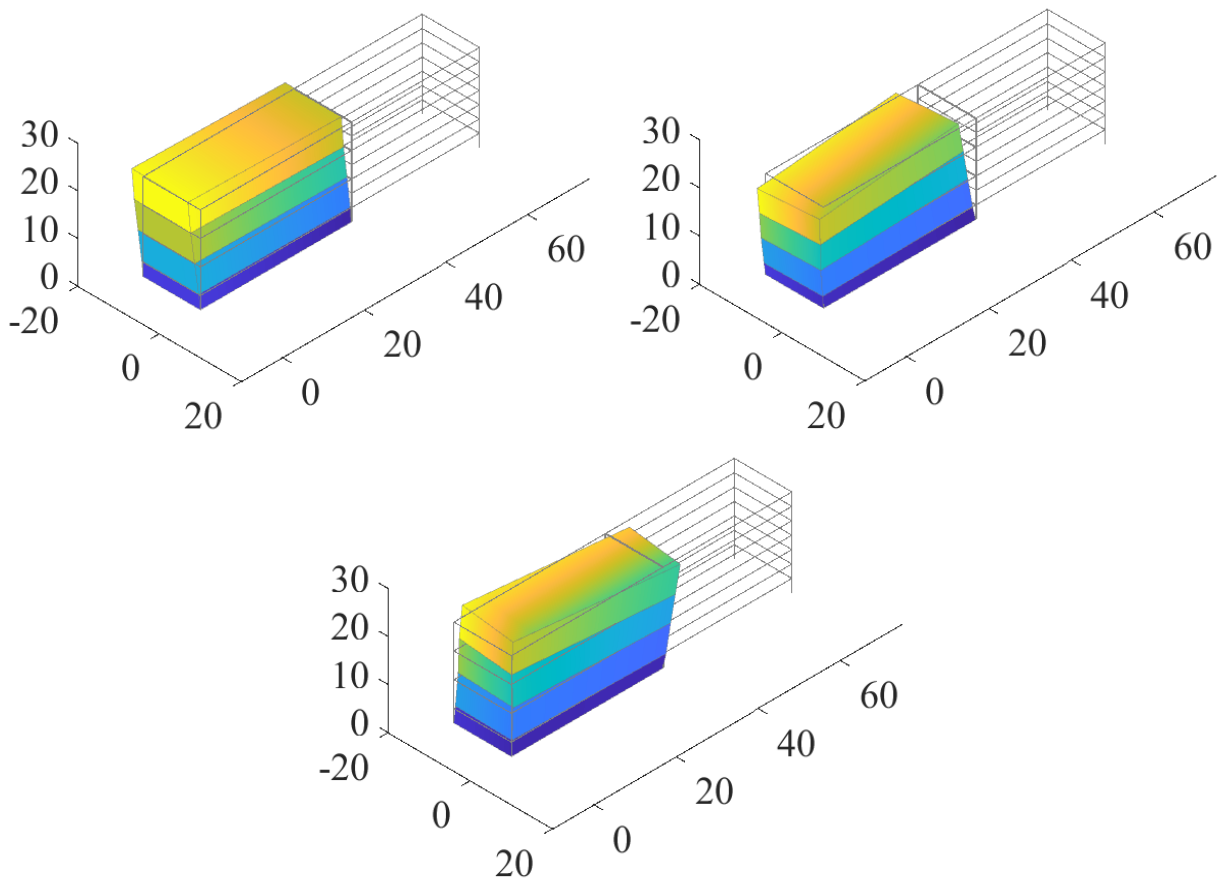


Figura 4.3.4 prime 3 forme modali fondamentali del corpo E

5. ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

5.1. ANALISI DEI MODI DI VIBRAZIONE IDENTIFICATI

5.1.1 MISURE PRE-INTERVENTO (2013)

Dai risultati ricavati sono stati trovati quasi sempre più di 10 modi di vibrare ed in alcuni casi fino a 16, i corpi che hanno prodotto più risultati o comunque risultati più chiari e lineari sono le ali, ed infatti è dove sono stati trovati più modi. Mentre per quanto riguarda i corpi centrali la ricerca delle forme modali, soprattutto relative ai modi più alti, è risultata più complicata, al tal punto che in un caso si è dovuto procedere ad un filtro di taglio a 7 Hz per far risultare chiari almeno i primi modi, ovvero quelli più importanti e con la maggiore massa partecipante. Ciò è probabilmente dovuto sia ad un maggiore disturbo avvenuto in fase di analisi poiché si tratta di aree molto frequentate, e quindi con molto rumore, e sia perché nonostante i giunti sono comunque corpi confinati su 3 lati a differenza delle ali che possiedono un estremo libero.

Sono di seguito riportate le tabelle con le frequenze ed i rapporti di smorzamento dei vari corpi comprendenti il complesso ospedaliero

| corpo A | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.84 | 2.08 |
| 2 | 2.34 | 4.52 |
| 3 | 2.54 | 2.77 |
| 4 | 2.69 | 2.75 |
| 5 | 3.38 | 4.67 |
| 6 | 4.43 | 4.02 |
| 7 | 4.68 | 2.59 |
| 8 | 5.34 | 2.58 |
| 9 | 5.95 | 1.58 |
| 10 | 6.38 | 1.84 |
| 11 | 7.49 | 3.64 |
| 12 | 8.11 | 0.13 |
| 13 | 9.1 | 0.15 |
| 14 | 9.44 | 0.24 |
| 15 | 9.82 | 0.47 |
| 16 | 9.91 | 0.35 |

| corpo B | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 2.23 | 5.69 |
| 2 | 2.7 | 4.42 |
| 3 | 2.89 | 3.15 |
| 4 | 3.24 | 2.59 |
| 5 | 4.22 | 4.31 |
| 6 | 5.27 | 5.12 |
| 7 | 6.46 | 3.69 |

| corpo C | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.92 | 3.12 |
| 2 | 2.31 | 6.03 |
| 3 | 2.76 | 5.86 |
| 4 | 2.93 | 5.27 |
| 5 | 3.57 | 3.5 |
| 6 | 4.09 | 8.08 |
| 7 | 4.41 | 2.72 |
| 8 | 5.33 | 2.77 |
| 9 | 6.03 | 3.06 |
| 10 | 7.05 | 3.39 |
| 11 | 8.1 | 3.52 |
| 12 | 9.81 | 0.16 |

| corpo E | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.76 | 1.8 |
| 2 | 1.94 | 1.96 |
| 3 | 2.28 | 3.65 |
| 4 | 2.62 | 2.43 |
| 5 | 2.72 | 6.09 |
| 6 | 3 | 1.96 |
| 7 | 3.36 | 1.5 |
| 8 | 3.66 | 2.95 |
| 9 | 3.81 | 3.1 |
| 10 | 5.75 | 4.04 |
| 11 | 6 | 3.33 |
| 12 | 6.1 | 3.17 |

| corpo IB | | |
|----------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.91 | 2.88 |
| 2 | 2.23 | 2.99 |
| 3 | 2.5 | 4.73 |
| 4 | 2.78 | 3.21 |
| 5 | 3.03 | 4.07 |
| 6 | 3.34 | 3.58 |
| 7 | 3.49 | 4.01 |
| 8 | 5.23 | 2.56 |
| 9 | 5.68 | 3.98 |
| 10 | 9.8 | 0.26 |

| corpo I | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.88 | 2.57 |
| 2 | 1.96 | 3.27 |
| 3 | 2.22 | 2.84 |
| 4 | 2.46 | 2.97 |
| 5 | 2.73 | 5.87 |
| 6 | 3.14 | 2.73 |
| 7 | 3.45 | 3.42 |
| 8 | 3.67 | 4.21 |
| 9 | 5.02 | 4.33 |
| 10 | 5.63 | 3.26 |
| 11 | 9.7 | 0.7 |
| 12 | 9.8 | 0.34 |

| corpo L | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.65 | 1.61 |
| 2 | 2.01 | 2.3 |
| 3 | 2.38 | 2.97 |
| 4 | 2.52 | 2.92 |
| 5 | 3.05 | 4.18 |
| 6 | 3.56 | 3.21 |
| 7 | 4.1 | 2.11 |
| 8 | 4.59 | 4.28 |
| 9 | 5.23 | 2.17 |
| 10 | 6.22 | 2.54 |
| 11 | 6.85 | 3.26 |
| 12 | 7.13 | 2.71 |
| 13 | 7.93 | 2.58 |
| 14 | 8.99 | 1.46 |
| 15 | 9.8 | 0.18 |

| corpo N | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.57 | 1.79 |
| 2 | 1.9 | 2.39 |
| 3 | 2.28 | 3.04 |
| 4 | 2.68 | 2.44 |
| 5 | 3.06 | 4.92 |
| 6 | 3.71 | 3.14 |
| 7 | 4.9 | 2.19 |
| 8 | 5.55 | 2.67 |
| 9 | 6.18 | 2.66 |
| 10 | 8.6 | 2.49 |
| 11 | 9.58 | 1.26 |
| 12 | 9.8 | 0.33 |

5.1.2 MISURE DURANTE L'INTERVENTO (2015/2016)

Come si evince dalle tabelle il numero dei risultati tra le due prove è nettamente diverso nonostante sia stata eseguita la stessa procedura di acquisizione e analisi, e nono stante siano prove avvenute a pochi mesi di distanza. Nelle misure pre-intervento risultano individuati ben 15 modi a differenza dei soli 9 relativi al post-intervento.

| prove 2015 | | |
|------------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.76 | 1.59 |
| 2 | 1.93 | 2.64 |
| 3 | 2.31 | 2.78 |
| 4 | 2.67 | 3.1 |
| 5 | 2.75 | 2.63 |
| 6 | 3.02 | 1.86 |
| 7 | 3.34 | 3.22 |
| 8 | 3.57 | 2.39 |
| 9 | 3.87 | 3.47 |
| 10 | 4.03 | 2.37 |
| 11 | 5.87 | 2.81 |
| 12 | 5.96 | 2.64 |
| 13 | 6.28 | 2.6 |
| 14 | 7.21 | 3.89 |
| 15 | 9.79 | 0.27 |

| prove 2016 | | |
|------------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.84 | 4.35 |
| 2 | 2.22 | 1.49 |
| 3 | 2.55 | 3.57 |
| 4 | 2.7 | 2.99 |
| 5 | 3.18 | 3.12 |
| 6 | 3.46 | 3.34 |
| 7 | 6.02 | 3.61 |
| 8 | 7.05 | 4.97 |
| 9 | 9.79 | 0.27 |

5.1.3 MISURE POST-INTERVENTO (2023)

Le analisi delle misure post adeguamento hanno portato all'individuazione e riconoscimento di un gran numero di modi di vibrare, circa 20 modi per corpo, ciò è probabilmente dato dal fatto che sono stati usati come sonori di riferimento accelerometri sparsi in tutti il sottotetto almeno uno per ogni corpo, portando quindi anche all'individuazione dei loro modi. Di seguito sono riportate le tabelle contenenti i risultati.

| corpo A | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.6 | 1.67 |
| 2 | 1.74 | 1.53 |
| 3 | 1.82 | 1.44 |
| 4 | 1.87 | 1.61 |
| 5 | 2.15 | 4.26 |
| 6 | 2.17 | 3.34 |
| 7 | 2.35 | 2.86 |
| 8 | 2.66 | 1.49 |
| 9 | 2.82 | 3.16 |
| 10 | 3.04 | 3.04 |
| 11 | 3.15 | 2.21 |
| 12 | 3.37 | 3.52 |
| 13 | 3.56 | 1.8 |
| 14 | 3.73 | 1.85 |
| 15 | 3.99 | 2.69 |
| 16 | 5.13 | 4.43 |
| 17 | 5.35 | 2.7 |
| 18 | 9.43 | 1.33 |

| corpo C | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.58 | 1.99 |
| 2 | 1.75 | 1.44 |
| 3 | 1.79 | 1.5 |
| 4 | 1.84 | 1.98 |
| 5 | 2.15 | 3.53 |
| 6 | 2.17 | 3.14 |
| 7 | 2.36 | 2.71 |
| 8 | 2.67 | 1.55 |
| 9 | 2.79 | 1.92 |
| 10 | 3.07 | 2.73 |
| 11 | 3.15 | 1.98 |
| 12 | 3.43 | 2.82 |
| 13 | 3.6 | 2.12 |
| 14 | 3.78 | 1.79 |
| 15 | 4.05 | 3.13 |
| 16 | 4.94 | 3.57 |
| 17 | 5.18 | 2.69 |
| 18 | 5.3 | 3.34 |
| 19 | 5.84 | 3.78 |
| 20 | 9.34 | 1.94 |

| corpi I e IB | | |
|--------------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.58 | 1.96 |
| 2 | 1.77 | 1.62 |
| 3 | 1.82 | 1.48 |
| 4 | 1.86 | 1.79 |
| 5 | 2.16 | 4.53 |
| 6 | 2.22 | 3.61 |
| 7 | 2.45 | 3.28 |
| 8 | 2.79 | 1.53 |
| 9 | 3.21 | 2.39 |
| 10 | 3.29 | 2.29 |
| 11 | 3.65 | 2.54 |
| 12 | 3.78 | 1.95 |
| 13 | 3.98 | 1.77 |
| 14 | 4.32 | 2.78 |
| 15 | 5.12 | 3.94 |
| 16 | 5.21 | 2.9 |
| 17 | 6.68 | 3.64 |
| 18 | 7.13 | 2.66 |

| corpo L | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.52 | 2.08 |
| 2 | 1.53 | 2.34 |
| 3 | 1.69 | 1.6 |
| 4 | 1.75 | 1.66 |
| 5 | 1.77 | 1.97 |
| 6 | 1.78 | 2.15 |
| 7 | 2.01 | 2.71 |
| 8 | 2.11 | 3.3 |
| 9 | 2.21 | 2.97 |
| 10 | 2.3 | 3.56 |
| 11 | 2.52 | 2.49 |
| 12 | 2.64 | 3.78 |
| 13 | 2.8 | 3.01 |
| 14 | 2.94 | 2.54 |
| 15 | 3.24 | 2.8 |
| 16 | 3.47 | 2.76 |
| 17 | 3.59 | 2.31 |
| 18 | 4.46 | 4.33 |
| 19 | 4.85 | 3.19 |
| 20 | 5.04 | 2.56 |
| 21 | 5.42 | 3.19 |
| 22 | 6.96 | 3.46 |
| 23 | 7.52 | 0.76 |

| corpo N | | |
|---------|----------|-----------|
| modo | f [Hz] | ξ [%] |
| 1 | 1.6 | 1.51 |
| 2 | 1.78 | 1.4 |
| 3 | 1.83 | 1.56 |
| 4 | 1.86 | 1.72 |
| 5 | 1.88 | 1.57 |
| 6 | 2.23 | 4.08 |
| 7 | 2.43 | 3.49 |
| 8 | 2.77 | 1.42 |
| 9 | 2.88 | 2.09 |
| 10 | 2.94 | 4.37 |
| 11 | 3.23 | 3.14 |
| 12 | 3.61 | 1.66 |
| 13 | 3.78 | 1.75 |
| 14 | 3.92 | 1.72 |
| 15 | 4.26 | 3.24 |
| 16 | 5.19 | 2.82 |
| 17 | 5.64 | 2.87 |
| 18 | 8.52 | 1.91 |
| 19 | 9.43 | 1.34 |

5.2. CONFRONTO DEI MODI DI VIBRAZIONE TRA LE DIVERSE CONDIZIONI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Vengono, in questo paragrafo, effettuati due confronti tra 2 paia di prove, in particolare ci si baserà principalmente sul numero dei modi identificati e sulle loro frequenze, le prove sono state accoppiate anche avendo osservato le relative forme modali. Come primo vengono confrontati i risultati delle misure avvenute durante i lavori di adeguamento sismico avvenute durante gli anni 2015 e 2016. Segue poi un altro confronto diretto tra le prove del 2013 e del 2023 attraverso lo stesso procedimento.

5.2.1 MISURAZIONI 2015 - 2016

La prima osservazione da fare, come già detto, è sul numero di modi identificati, non verrà dato peso a ciò per i modi alle alte frequenze dato la loro incertezza di precisione come tali.

Fattore invece di maggiore rilevanza è la mancanza del secondo modo di vibrare (1.93 Hz) nelle prove post-intervento. La causa della perdita di questo modo fondamentale è probabilmente da attribuire alla cucitura tramite piastra in acciaio del giunto tecnico a metà del corpo, aumentando notevolmente la rigidità nella direzione longitudinale.

| prove 2015 | | prove 2016 | |
|------------|----------|------------|------|
| modo | f [Hz] | f [Hz] | modo |
| 1 | 1.76 | 1.84 | 1 |
| 2 | 1.93 | | |
| 3 | 2.31 | 2.22 | 2 |
| 4 | 2.67 | 2.55 | 3 |
| 5 | 2.75 | 2.7 | 4 |
| 6 | 3.02 | 3.18 | 5 |
| 7 | 3.34 | 3.46 | 6 |
| 8 | 3.57 | | |
| 9 | 3.87 | | |
| 10 | 4.03 | | |
| 11 | 5.87 | | |
| 12 | 5.96 | 6.02 | 7 |
| 13 | 6.28 | | |
| 14 | 7.21 | 7.05 | 8 |
| 15 | 9.79 | 9.79 | 9 |

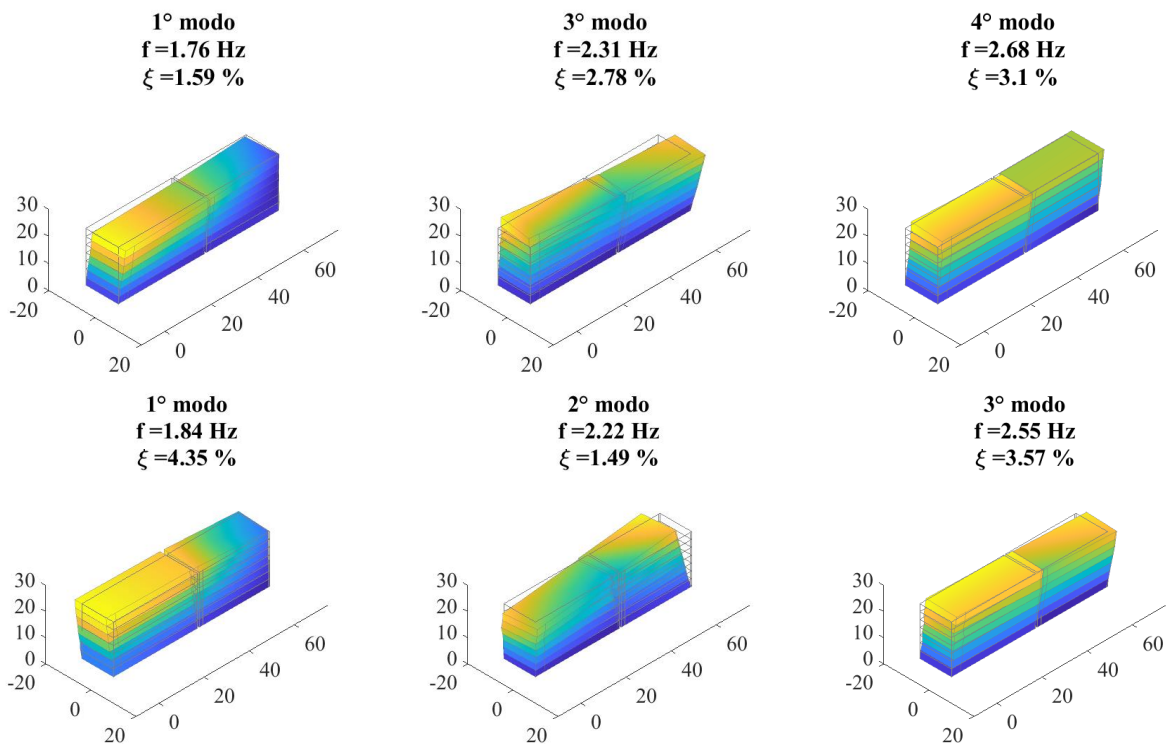


Figura 2 confronto tra le forme modali dei primi modi trasversali, longitudinale e rotazionale

5.2.2 MISURAZIONI 2013 - 2023

Come detto di sopra, i modi più importanti ed utili al fine di un confronto sono i primi, come si può vedere il numero dei risultati delle prove del 2023 è nettamente maggiore, ciò è dovuto dalla presenza nel sottotetto di sensori fissi in ogni corpo per ogni prova, serviti per il processo di scalatura ed unione dei risultati, il che ha portato all'inevitabile identificazione dei modi (almeno i primi) di ogni corpo. Va fatto inoltre presente che le prime misure sono state fatte 10 anni prima e con strumentazioni diverse, per cui ci si può aspettare che anche la qualità dei segnali registrati possa aver influito. Questa mole di risultati rende difficoltosa anche qualsivoglia valutazione basata sulla frequenza di vibrazione e rapporto di smorzamento, in generale però questi valori non sembrano unitamente minori o maggiori tra le due misure, ma appaiono mediamente simili. Si può comunque affermare che la qualità dei risultati delle prove del 2023 è maggiore soprattutto qualitativamente sufficiente per l'installazione di un sistema di monitoraggio in continuo permanente.

| corpo A 2013 | | corpo A 2023 | |
|--------------|--------|--------------|------|
| modo | f [Hz] | f [Hz] | modo |
| | | 1.6 | 1 |
| | | 1.74 | 2 |
| 1 | 1.84 | 1.82 | 3 |
| | | 1.87 | 4 |
| | | 2.15 | 5 |
| | | 2.17 | 6 |
| 2 | 2.34 | 2.35 | 7 |
| 3 | 2.54 | | |
| 4 | 2.69 | 2.66 | 8 |
| | | 2.82 | 9 |
| | | 3.04 | 10 |
| | | 3.15 | 11 |
| 5 | 3.38 | 3.37 | 12 |
| | | 3.56 | 13 |
| | | 3.73 | 14 |
| | | 3.99 | 15 |
| 6 | 4.43 | | |
| 7 | 4.68 | | |
| | | 5.13 | 16 |
| 8 | 5.34 | 5.35 | 17 |
| 9 | 5.95 | | |
| 10 | 6.38 | | |
| 11 | 7.49 | | |
| 12 | 8.11 | | |
| 13 | 9.1 | | |
| 14 | 9.44 | 9.43 | 18 |
| 15 | 9.82 | | |
| 16 | 9.91 | | |

| corpo C 2013 | | corpo C 2023 | |
|--------------|--------|--------------|------|
| modo | f [Hz] | f [Hz] | modo |
| | | 1.58 | 1 |
| | | 1.75 | 2 |
| | | 1.79 | 3 |
| 1 | 1.92 | 1.84 | 4 |
| | | 2.15 | 5 |
| | | 2.17 | 6 |
| 2 | 2.31 | 2.36 | 7 |
| | | 2.67 | 8 |
| 3 | 2.76 | 2.79 | 9 |
| 4 | 2.93 | 3.07 | 10 |
| | | 3.15 | 11 |
| | | 3.43 | 12 |
| 5 | 3.57 | 3.6 | 13 |
| | | 3.78 | 14 |
| 6 | 4.09 | 4.05 | 15 |
| 7 | 4.41 | | |
| | | 4.94 | 16 |
| | | 5.18 | 17 |
| 8 | 5.33 | 5.3 | 18 |
| 9 | 6.03 | 5.84 | 19 |
| 10 | 7.05 | | |
| 11 | 8.1 | | |
| | | 9.34 | 20 |
| 12 | 9.81 | | |

| corpo L 2013 | | corpo L 2023 | |
|--------------|----------|--------------|----------|
| modo | f [Hz] | modo | f [Hz] |
| | | 1 | 1.52 |
| | | 2 | 1.53 |
| 1 | 1.65 | 3 | 1.69 |
| | | 4 | 1.75 |
| | | 5 | 1.77 |
| 2 | 2.01 | 6 | 1.78 |
| | | 7 | 2.01 |
| | | 8 | 2.11 |
| | | 9 | 2.21 |
| 3 | 2.38 | 10 | 2.3 |
| 4 | 2.52 | 11 | 2.52 |
| | | 12 | 2.64 |
| | | 13 | 2.8 |
| 5 | 3.05 | 14 | 2.94 |
| | | 15 | 3.24 |
| | | 16 | 3.47 |
| 6 | 3.56 | 17 | 3.59 |
| 7 | 4.1 | | |
| 8 | 4.59 | 18 | 4.46 |
| | | 19 | 4.85 |
| 9 | 5.23 | 20 | 5.04 |
| | | | |
| | | 21 | 5.42 |
| 10 | 6.22 | | |
| 11 | 6.85 | 22 | 6.96 |
| 12 | 7.13 | | |
| | | 23 | 7.52 |
| 13 | 7.93 | | |
| 14 | 8.99 | | |
| 15 | 9.8 | | |

| corpo N 2013 | | corpo N 2023 | |
|--------------|----------|--------------|------|
| modo | f [Hz] | f [Hz] | modo |
| 1 | 1.57 | 1.6 | 1 |
| | | 1.78 | 2 |
| | | 1.83 | 3 |
| | | 1.86 | 4 |
| 2 | 1.9 | 1.88 | 5 |
| 3 | 2.28 | 2.23 | 6 |
| | | 2.43 | 7 |
| 4 | 2.68 | 2.77 | 8 |
| | | 2.88 | 9 |
| 5 | 3.06 | 2.94 | 10 |
| | | 3.23 | 11 |
| | | 3.61 | 12 |
| 6 | 3.71 | 3.78 | 13 |
| | | 3.92 | 14 |
| | | 4.26 | 15 |
| 7 | 4.9 | 5.19 | 16 |
| 8 | 5.55 | 5.64 | 17 |
| 9 | 6.18 | | |
| 10 | 8.6 | 8.52 | 18 |
| 11 | 9.58 | 9.43 | 19 |
| 12 | 9.8 | | |

| corpo IB | | corpo I | | corpi I e IB | |
|----------|----------|---------|----------|--------------|----------|
| modo | f [Hz] | modo | f [Hz] | modo | f [Hz] |
| | | | | 1 | 1.58 |
| | | | | 2 | 1.77 |
| | | | | 3 | 1.82 |
| 1 | 1.91 | 1 | 1.88 | 4 | 1.86 |
| | | 2 | 1.96 | | |
| 2 | 2.23 | 3 | 2.22 | 5 | 2.16 |
| 3 | 2.5 | 4 | 2.46 | 6 | 2.22 |
| 4 | 2.78 | 5 | 2.73 | 7 | 2.45 |
| 5 | 3.03 | 6 | 3.14 | 8 | 2.79 |
| 6 | 3.34 | 7 | 3.45 | 9 | 3.21 |
| 7 | 3.49 | 8 | 3.67 | 10 | 3.29 |
| | | | | 11 | 3.65 |
| | | | | 12 | 3.78 |
| | | | | 13 | 3.98 |
| | | 9 | 5.02 | 14 | 4.32 |
| 8 | 5.23 | | | 15 | 5.12 |
| 9 | 5.68 | 10 | 5.63 | 16 | 5.21 |
| | | | | 17 | 6.68 |
| | | 11 | 9.7 | 18 | 7.13 |
| 10 | 9.8 | 12 | 9.8 | | |

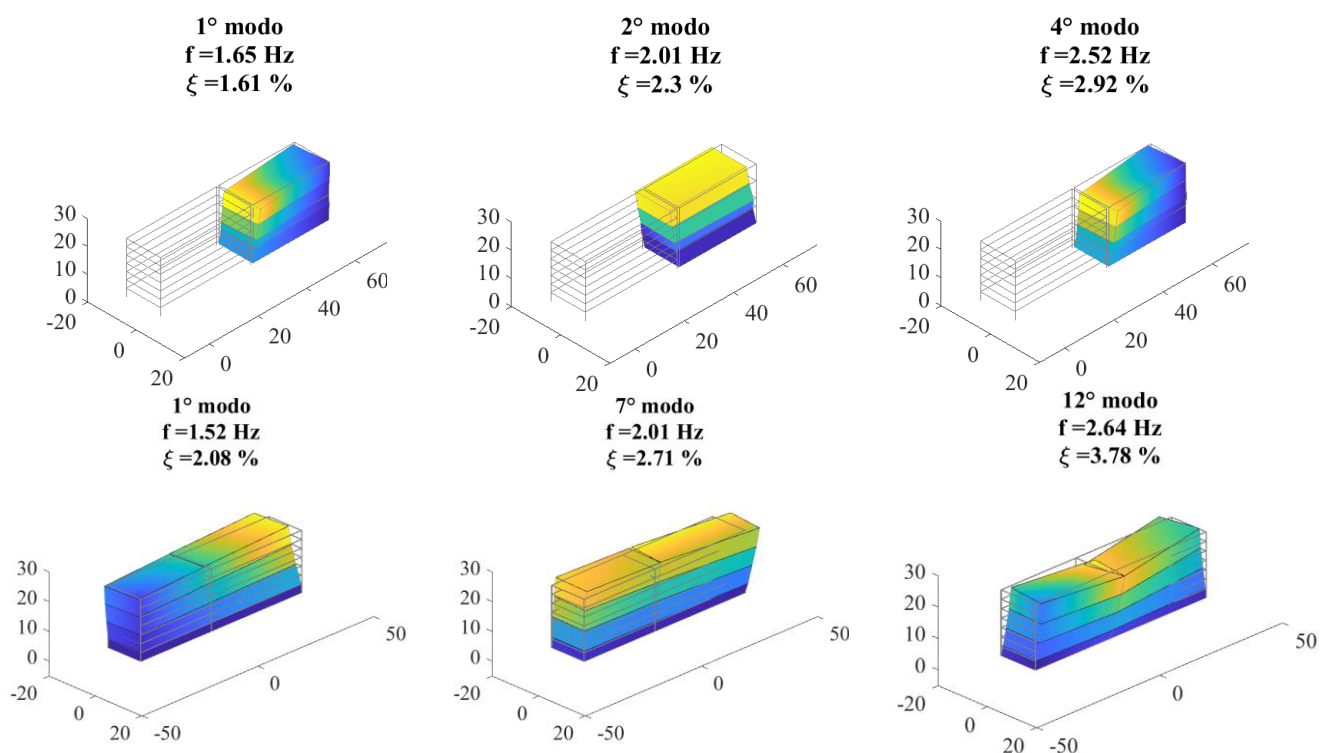


Figura 3 confronto tra le forme modali dei primi modi trasversle, longitudinale e rotazionale

6. CONCLUSIONI

Il monitoraggio della salute strutturale (SHM) sta trovando sempre più largo uso nell'ingegneria delle costruzioni, la tecnica più usata è l'analisi modale operativa (OMA) la quale prevede lo studio del comportamento dinamico a partire dalle vibrazioni naturali dell'edificio prodotte da input passivi e non misurabili, quali ad esempio vento e traffico.

È stato preso in esame il complesso ospedaliero di Torrette di Ancona, esso presenta una struttura articolata in 8 corpi intelaiati in calcestruzzo armato uniti fra di loro tramite giunti tecnici. Nel 2016 è iniziato un intervento di adeguamento sismico concluso all'inizio del 2023, comprendente installazione di 5 torri dissipative e la cucitura dei giunti mediane elementi in acciaio e dissipatori viscosi.

Durante quest'ultimi dieci anni si sono svolte 3 campagne di misure dedite alla caratterizzazione dei parametri modali della struttura (frequenze di risonanza, rapporti di smorzamento e forme modali). Queste sono avvenute prima, durante e dopo i citati lavori di protezione sismica, le prime erano a supporto della progettazione dello stesso intervento, le seconde avevano lo scopo di valutare il funzionamento dello stesso a seguito dell'installazione delle prime 3 torri dissipative e dunque durante i lavori, ed infine l'ultima campagna è stata realizzata a supporto della progettazione dell'installazione di una stazione di monitoraggio in continuo permanente nel sottotetto dell'intera struttura.

A seguito dell'analisi di queste campagne di misure il primo fattore che emerge a seguito di un confronto tra le prove antecedenti e successive l'intervento di adeguamento è notevole numero maggiore di risultati in termini di modi di vibrare delle prove più recenti, causato probabilmente dalla presenza di alcuni sensori fissi di riferimento in tutti i corpi durante l'analisi dei singoli, ciò comporta in un singolo corpo il rilevamento dei modi anche degli altri corpi facente parte del complesso. Inoltre, a seguito della cucitura dei giunti si è rilevato un aumento delle frequenze date dall'aumento della rigidità globale.

In conclusione, le prove del 2023 hanno avuto un riscontro positivo determinando agibile e privo di disturbi il piano ed i punti dove verranno posizionati i sensori nel monitoraggio fisso. I risultati ottenuti risultano essere di buona qualità e più che sufficienti ad una buona caratterizzazione del comportamento dinamico dell'intero complesso ospedaliero

BIBLIOGRAFIA

[1] MECCANICA SPERIMENTALE (ACCELEROMETRI) - scuola di scienze della salute umana.

Dott. Ing Sara Matteolo

[2] GROUND, TAXI AND FLIGHT VIBRATION TEST OF FULL-COMPOSITE VERY LIGHT AIRCRAFT

– tesi di laurea magistrale di Riccardo Liaci

[3] PROVE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA DEL COMPLESSO OSPEDALIERO REGIONALE A

TORRETTE DI ANCONA - Prof. Ing. Luigino Dezi Dott. Ing. Fabrizio Gara

[4] OPERATIONAL MODAL ANALYSIS OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES – Carlo Rainieri,

Giovanni Fabbrocino

[5] MONITORAGGIO SISMICO E IDENTIFICAZIONE CON SENSORI MEMS DI UN EDIFICIO

DELLA PROTEZIONE CIVILE - tesi di Laurea di Nicoletta Zuccheri