

**POLITECNICO DI TORINO**  
**ANNO ACCADEMICO 2017-2018**  
**I FACOLTA' DI INGEGNERIA**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**



**TESI DI LAUREA SPECIALISTICA**

***POSIZIONAMENTO OTTIMALE DI ACCELEROMETRI PER IL  
MONITORAGGIO DINAMICO DI BENI ARCHITETTONICI:  
TORRE CAMPANARIA DEL DUOMO DI FOSSANO***

RELATORE:

*PROF. ING. ROSARIO CERAVOLO*

CORRELATORI:

*ING. MARICA PECORELLI*

*ING. MARCO CIVERA*

CANDIDATO:

ENRICO NEGRETTI

Torino, 25 Settembre 2018

“Credo che Dio il settimo giorno non sia andato in vacanza, ma abbia inventato i nonni. E, accorgendosi che si trattava della più geniale delle sue creazioni, si sia preso una giornata libera per trascorrerla con loro.”

Fausto Brizzi

*“La strada da percorrere è presto indicata:  
Bisogna innanzitutto conoscere “cosa” conservare, e  
da tale conoscenza far scaturire il “come”  
conservare con sicurezza”*

*Antonino Giuffrè*

# Ringraziamenti

*Eccomi giunto alla fine di questa tesi e di questo mio percorso Universitario, nel quale credo di essere maturato come professionista in quella mia grande passione che è l'ingegneria civile, ma anche e soprattutto come persona.*

*Sono tante le conoscenze che ho fatto durante questo percorso, le amicizie che ho coltivato, i rapporti che ho stretto. Vorrei dedicare queste ultime righe per ringraziare tutte le persone che in me hanno sempre creduto e che mi hanno sempre sostenuto, sia nei momenti di difficoltà sia in quelli felici e spensierati. Vorrei che questi ringraziamenti siano un punto di arrivo da una parte, ma anche un punto di inizio, perché credo che non si finisca mai di crescere e spero di poter raggiungere nuovi traguardi importanti nella mia vita con tutte queste persone al mio fianco.*

*Premetto che i ringraziamenti e quindi le persone citate in questa sezione non sono elencate seguendo un ordine particolare, ma semplicemente ho scritto d'istinto, senza pensarci troppo, e per questo mi scuso già in partenza per tutte le persone che involontariamente potrei avere dimenticato. Ma se tu, mio caro lettore, non dovessi trovare il tuo nome nelle prossime righe... dimmelo e ti ringrazierò di persona, anche per il solo fatto che tu abbia interesse a leggere.*

*Vorrei ringraziare in primo luogo la mia famiglia, perché mi è sempre stata accanto e non mi ha mai fatto mancare il suo sostegno e il suo aiuto durante tutti questi anni.*

*Grazie mamma, Grazie papà. Grazie a voi che siete il mio punto di riferimento e che mi avete sostenuto sia economicamente che emotivamente e che avete permesso di percorrere e concludere questo cammino.*

*Grazie a voi, che prima di ogni esame mi dicevate sempre: "In bocca al lupo e, mi raccomando, stai tranquillo!" e al sentire quelle parole io rispondevo sempre "crepi il lupo" sì, ma tranquillo proprio non ero!*

*Aspettavo questo incoraggiamento prima di ogni esame, e anche se non l'ho mai ammesso, mi tranquillizzava sentirglielo dire.*

*Grazie a voi, che mi avete sempre sostenuto nell'affrontare ogni difficoltà, che mi avete consigliato nelle scelte più difficili e spronato a dare il massimo, sempre!*

*Ma ora, un enorme grazie va a te, nonnina mia!*

*Grazie a te per tutto l'affetto e l'amore che per raccontarlo almeno in piccola parte servirebbe un romanzo. Grazie per essere sempre stata orgogliosa di me e per avermi fatto sentire il tuo "Dottore Ingegnere", anche quando questa avventura non era ancora conclusa.*

*Ora però, da pochissimo tempo, non sei più qui con me, non puoi partecipare di persona a questa fine del mio percorso di studi, ma spero con tutto me stesso che tu mi stia guardando da Lassù e che tu sia orgogliosa di me e del ragazzo che sono diventato.*

*Un doveroso grazie, ora va a te, Thom. Quel migliore amico che tutti vorrebbero avere.*

*Sei una delle poche persone con la quale riesco a confidare i mie pensieri che mi porto dentro e che fanno rumore. Grazie per aver condiviso con me gran parte del percorso universitario, allietandolo con uscite serali, partite a calcetto, ma anche solo passando felici e semplici scorci di giornate da coinquilini, come preparare cena, guardare la tv o ascoltare musica. Ma soprattutto grazie per essere sempre presente e al mio fianco sin dalla terza elementare!*

*Grazie a tutti i miei amici con la quale condivido e dividevo le uscite nei weekend quando tornavo a casa da Torino. Grazie per tutte le feste che abbiamo fatto e le birre bevute. Grazie a voi, Davide, Daniele, Campi, Fede, Ciccio, Alex, Davi, Astrid, Bea, Sara.*

*Ora un grazie speciale va a tutto il gruppo "beach". È iniziato tutto per scherzo, ma ora questo sport ha permesso di legare molte persone del mio bel paesello che fino a prima magari si conoscevano solo di vista. Grazie per tutte le serate nelle quali ci siamo trovati per giocare o semplicemente trascorrere del tempo insieme. È sempre stata per me un importante valvola di sfogo per tutto lo stress che veniva accumulato soprattutto nei periodi delle sessioni esami. Quindi un doveroso grazie va a voi, Pigio, Monica, Roberta, Giulia, Roby, Monica, Leo, Diego, Steu, Nati, Nico, ...*

*Un sincero ringraziamento, ora, ai miei relatori, Marica prima e Marco poi, per la dedizione con cui mi hanno accompagnato durante questo percorso di stesura dell'elaborato e per aver fatto accrescere in me la sensibilità verso temi così attuali, quali il monitoraggio di manufatti storici e di enorme importanza architettonica.*

*Un pensiero alla fine di questo percorso va certamente a tutti i miei compagni di corso, ma soprattutto amici, con i quali ho condiviso l'entusiasmo, ma anche le fatiche che il nostro percorso di studi richiedeva e che sicuramente senza di loro sarebbe stato indubbiamente più difficile completare. Grazie per aver reso questo cammino indimenticabile. Sicuramente, in futuro, quando mi verrà in mente l'università, la prima cosa a cui farò riferimento sarà sicuramente il nostro gruppo di "In(g)CIVILI. Quindi grazie a voi, Luca, Pol, Matte, Silvia, Fab, Serafi, Pasq, Marco, Ron, Fra.*

*Ringrazio poi tutte le persone che non ho nominato esplicitamente in queste righe, ma che hanno avuto un ruolo importante nella mia vita, perché i ricordi di tutti voi sono impressi in maniera indelebile nel mio cuore.*

*Grazie!!*

*Enrico*

# Sommario

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPITOLO 1 –</b>	
<b>PROTEZIONE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO</b> .....	<b>10</b>
1.1 INTRODUZIONE E NORMATIVA .....	10
1.2 SICUREZZA E STATI LIMITE.....	11
1.3 FASE CONOSCITIVA.....	13
<b>CAPITOLO 2 –</b>	
<b>IL MONITORAGGIO STRUTTURALE</b> .....	<b>14</b>
2.1 PREMESSA.....	14
2.2 INTRODUZIONE: IL DANNO STRUTTURALE.....	15
2.3 APPLICAZIONI DEL MONITORAGGIO ALLE STRUTTURE.....	16
2.4 MONITORAGGIO DELLE COSTRUZIONI STORICO-MONUMENTALI .....	17
2.5 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	18
2.6 OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE .....	19
2.7 ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO .....	20
2.7.1 VALUTAZIONE OPERATIVA .....	21
2.7.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA STRUTTURA.....	22
2.7.3 SCELTA DELLA STRUMENTAZIONE E SUA POSIZIONE.....	22
2.7.4 METODI DI ECCITAZIONE .....	23
2.7.5 SETTAGGIO DEL SISTEMA E ACQUISIZIONE DATI .....	24
2.7.6 ELABORAZIONE DEL SEGNALE .....	25
2.7.7 IDENTIFICAZIONE DEI SENSORI DIFETTOSI .....	25
2.7.8 ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE .....	25
2.7.9 ELABORAZIONE DELLE CARATTERISTICHE .....	26
2.7.10 SVILUPPO DI UN MODELLO STATISTICO.....	26
2.7.11 RILEVAMENTO DEL DANNO.....	27
2.7.12 ALLARMI E RESOCONTI.....	27
2.8 ASSIOMI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE .....	28
2.9 METODI DI INDIVIDUAZIONE DEL DANNO .....	28
2.9.1 DATA DRIVEN APPROACH.....	29
2.9.2 MODEL DRIVEN APPROACH.....	29
2.10 TIPOLOGIE DI MONITORAGGIO STRUTTURALE .....	29
2.10.1 MONITORAGGIO STATICO .....	30

2.10.2 MONITORAGGIO DINAMICO .....	30
2.11 REQUISITI DEL MONITORAGGIO .....	31
2.12 TIPOLOGIE DI SENSORI .....	32
A) Sensori tradizionali .....	33
B) Sensori innovativi.....	36
2.13 PROBLEMI E LIMITAZIONI NELLO SVILUPPO DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO.....	37
2.14 CONCLUSIONI MONITORAGGIO .....	38
<b>CAPITOLO 3 -</b>	
<b>IDENTIFICAZIONE DINAMICA, FONDAMENTI DI ANALISI MODALE .....</b>	<b>40</b>
3.1 INTRODUZIONE.....	40
3.2 STATO DELL'ARTE .....	41
3.3 TECNICHE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA .....	42
3.4 ANALISI DEL SEGNALE.....	43
3.5 TEORIA DELLA DINAMICA DELLE STRUTTURE .....	44
3.6 MODELLO SPAZIALE DI UN SISTEMA .....	46
3.6.1 MODELLO NELLO SPAZIO DELLE FASI .....	47
3.6.2 MODELLO DISCRETO NEL TEMPO.....	48
3.7 MODEL UPDATING.....	49
<b>CAPITOLO 4 –</b>	
<b>CASO STUDIO: CAMPANILE DEL DUOMO DI FOSSANO.....</b>	<b>51</b>
4.1 INTRODUZIONE E GENERALITA' .....	51
4.2 MODELLO SPERIMENTALE E SOFTWARE UTILIZZATO .....	52
4.3 DESCRIZIONE GENERALE DEL CAMPANILE .....	52
4.4 STATO DI CONSERVAZIONE ED INTERVENTI.....	55
4.5 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI.....	56
4.5.1 PARAMETRI MECCANICI DELLA MURATURA.....	56
4.6 ANALISI MODALE E IDENTIFICAZIONE DEI MODI SIGNIFICATIVI .....	64
4.7 ANALISI DEI RISULTATI.....	72
<b>CAPITOLO 5 –</b>	
<b>OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA .....</b>	<b>73</b>
5.1 I MECCANISMI DI COLLASSO .....	73
5.2 MAC (Modal Assurance Criterion).....	84
5.2.1 CRITERIO AutoMAC .....	85
5.2.2 CRITERIO Cross MAC.....	86
5.3 SITUAZIONE DI PROGETTO ATTUALE DEL POSIZIONAMENTO DEGLI ACCELEROMETRI.....	88
5.4 APPLICAZIONI DEGLI ALGORITMI DI OSP AL CASO STUDIO.....	92

5.4.1 THE EFFECTIVE INDEPENDENCE METHOD (EI) .....	95
5.4.2 EIGENVALUE VECTOR PRODUCT .....	100
5.4.3 DRIVING POINT RESIDUE METHOD .....	102
5.4.4 ALGORITMI GENETICI DI OSP.....	105
5.4.5 ALGORITMI GENETICI CON OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	110
5.5 CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON I METODI DI OSP.....	113
5.6 PROGETTO ESECUTIVO DI OSP .....	113
<b>6 CONCLUSIONI.....</b>	<b>115</b>
<b>7 INDICE FIGURE.....</b>	<b>117</b>
<b>8 INDICE TABELLE .....</b>	<b>119</b>
<b>9 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>120</b>
<b>10 ALLEGATO A - listato ANSYS.....</b>	<b>126</b>
<b>11 ALLEGATO B - listato algoritmi MATLAB.....</b>	<b>140</b>

# INTRODUZIONE

L'oggetto di studio della presente tesi consiste nello sviluppo di un possibile sistema di monitoraggio dinamico e sismico per il Campanile del Duomo di Fossano (provincia di Cuneo), databile tra il 1395 e 1420 e il successivo confronto con il sistema di monitoraggio ipotizzato tutt'ora, come futuro investimento da realizzare.

Tale monitoraggio è realizzato mediante il posizionamento di una rete di accelerometri disposti sulla struttura in grado di captare eventuali modifiche intrinseche alla struttura come preavviso di eventuali danneggiamenti.

Ma come, quanti e dove vengono posizionati tali strumenti?

Tale lavoro, da me svolto, si occupa appunto di questo aspetto, attraverso lo studio di algoritmi di Optimal Sensor Placement, sviluppati in ambiente Matlab.

I beni architettonici rappresentano una risorsa inestimabile per il nostro Paese, dato che esprimono dei valori irripetibili e irripetibili della nostra società, a cui si affianca indubbiamente anche un valore economico.

Per questo motivo il concetto di conservazione di tali opere è uno dei principali obiettivi dell'edilizia odierna, ai fini di far sopravvivere quella che può essere considerata a tutti gli effetti la vera identità del nostro Paese. Gli interventi di ripristino e consolidamento strutturale devono basarsi sulla esatta comprensione delle cause e della dinamica del dissesto. Questo compito può essere facilitato dall'installazione di un sistema di monitoraggio che permette di rilevare lo *"status"* di una struttura tramite sensori installati in modo opportuno.

Il tema del monitoraggio strutturale presenta in realtà prospettive più ampie, infatti può interessare vari campi dell'ingegneria ed è applicabile su strutture di vario genere: edifici strategici, opere pubbliche, ponti, dighe.

Sulla base di questi principi, le norme sismiche italiane, basate sulle *"Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale"*, suggeriscono un appropriato *"livello di conoscenza"* come fattore chiave per la conservazione, il quale si può ottenere solo attraverso indagini approfondite.

# CAPITOLO 1 –

## PROTEZIONE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

### 1.1 INTRODUZIONE E NORMATIVA

I beni architettonici rappresentano una risorsa inestimabile per il nostro Paese, dato che esprimono dei valori irripetibili e irripetibili della nostra società, a cui si affianca indubbiamente anche un valore economico. Tutto ciò porta a valutazioni tecniche più accurate, minori tempi e costi di indagine, minore impatto sull'opera d'arte o sulla struttura analizzata.

Il monitoraggio strutturale, che qui è inteso come strumento di controllo dello stato conservativo del patrimonio edilizio di interesse storico-artistico pubblico o privato, rientra di diritto nel processo di prevenzione e messa in sicurezza del patrimonio stesso.

Infatti i meccanismi degenerativi, quali ad esempio fessurazioni, rotazioni, cedimenti verticali, eccessivi stati tensionali, variazione dei livelli di falda, minacciano inevitabilmente la stabilità di qualunque struttura.

Ai fini di sottolineare l'importanza del concetto di conservazione e tutela del patrimonio culturale e architettonico si può fare riferimento alle *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale-allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni del 28 febbraio 2017”*.

L'esigenza di elaborare le Linee Guida nasce dalla necessità, avvertita da tutto il Paese, di affrontare la mitigazione del rischio sismico, promuovendo una cultura della *conoscenza* e della *prevenzione*.

*“Edifici ben progettati e ben mantenuti hanno visto e provato, e più volte, terremoti di intensità anche elevata e sono ancora lì a testimoniare la loro capacità di resistere...”* [Antonino Giuffrè]

## 1.2 SICUREZZA E STATI LIMITE

Secondo le NTC 2018:

*“Le opere e le componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalle presenti norme.*

*La sicurezza e le prestazioni di un’opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale di progetto, di cui al § 2.4. Si definisce stato limite una condizione superata la quale l’opera non soddisfa più le esigenze elencate nelle presenti norme.*

*In particolare, secondo quanto stabilito nei capitoli specifici, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:*

- sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU): capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l’incolumità delle persone oppure comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l’opera;*
- sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE): capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;*
- sicurezza antincendio: capacità di garantire le prestazioni strutturali previste in caso d’incendio, per un periodo richiesto;*
- durabilità: capacità della costruzione di mantenere, nell’arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione;*
- robustezza: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all’entità di possibili cause innescanti eccezionali quali esplosioni e urti.*

*Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile. Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.*

*Per le opere esistenti è possibile fare riferimento a livelli di sicurezza diversi da quelli delle nuove opere ed è anche possibile considerare solo gli stati limite ultimi. Maggiori dettagli sono dati al Capitolo 8”.*

Quest’ultimo capitolo asserisce:

*“La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi devono tenere conto dei seguenti aspetti della costruzione:*

- essa riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;*
- in essa possono essere insiti, ma non palesi, difetti di impostazione e di realizzazione;*
- essa può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;*
- le sue strutture possono presentare degrado e/o modifiche significative, rispetto alla situazione originaria”.*

*“La valutazione della sicurezza di una struttura esistente è un procedimento quantitativo, volto a determinare l’entità delle azioni che la struttura è in grado di sostenere con il livello di sicurezza minimo richiesto dalla presente normativa. L’incremento del livello di sicurezza si persegue, essenzialmente, operando sulla concezione strutturale globale con interventi, anche locali.*

*La valutazione della sicurezza, argomentata con apposita relazione, deve permettere di stabilire se:*

- l’uso della costruzione possa continuare senza interventi;*
- l’uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell’uso);*
- sia necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi.*

*La valutazione della sicurezza deve effettuarsi quando ricorra anche una sola delle seguenti situazioni:*

- riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta a: significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, deformazioni significative conseguenti anche a problemi in fondazione; danneggiamenti prodotti da azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), da azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) o da situazioni di funzionamento ed uso anomali;*
- provati gravi errori di progetto o di costruzione;*
- cambio della destinazione d’uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o passaggio ad una classe d’uso superiore;*
- esecuzione di interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità e/o ne modifichino la rigidità;*
- ogni qualvolta si eseguano gli interventi strutturali di cui al § 8.4;*
- opere realizzate in assenza o difformità dal titolo abitativo, ove necessario al momento della costruzione, o in difformità alle norme tecniche per le costruzioni vigenti al momento della costruzione”.*

*“La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguite con riferimento ai soli SLU, salvo che per le costruzioni in classe d’uso IV, per le quali sono richieste anche le verifiche agli SLE specificate al § 7.3.6 e in quest’ultimo caso potranno essere adottati livelli prestazionali ridotti.*

*Per la combinazione sismica le verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC), secondo quanto specificato al § 7.3.6.*

*Nelle verifiche rispetto alle azioni sismiche il livello di sicurezza della costruzione è quantificato attraverso il rapporto  $\zeta_E$  tra l’azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l’azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione”.*

## 1.3 FASE CONOSCITIVA

Gli edifici storici sono strutture complesse: in genere sono il risultato di lavori che si sono protratti per decenni, in cui spesso sono stati impiegati materiali e tecniche costruttive diverse; inoltre nel corso dei secoli hanno subito modifiche e interventi. Non è un caso, quindi, che le nuove norme sismiche introducano e incentivino, in modo esplicito, il raggiungimento di un adeguato “livello di conoscenza”, ottenibile soltanto con l’impiego di appropriate indagini.

*“La conservazione del patrimonio costruito si attua attraverso il progetto di restauro, che comprende le strategie per la sua conservazione nel tempo. Questo progetto di restauro deve essere basato su una serie di appropriate scelte tecniche e preparato all’interno di un processo conoscitivo che implichi la raccolta di informazioni e l’approfondita conoscenza dell’edificio e del sito. Questo processo comprende le indagini strutturali, le analisi grafiche e dimensionali e l’identificazione del significato storico, artistico e socio-culturale (...).*

*Il ruolo delle tecniche nell’ambito della conservazione e del restauro è strettamente legato alla ricerca scientifica interdisciplinare sugli specifici materiali e sulle specifiche tecnologie utilizzate nella costruzione, riparazione e restauro del patrimonio costruito”.*

La conoscenza di un edificio storico è un presupposto fondamentale sia ai fini di una attendibile valutazione della sicurezza sismica attuale, sia per la scelta di un efficace intervento di miglioramento. Le problematiche sono comuni a tutti gli edifici esistenti, anche se nel caso del patrimonio culturale tutelato, risulta ancora più importante conoscere le caratteristiche originarie della fabbrica, le modifiche intercorse nel tempo dovute ai fenomeni di danneggiamento derivanti dalle trasformazioni antropiche e dall’invecchiamento dei materiali.

La conoscenza può essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell’accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche e delle indagini sperimentali.

Il percorso della conoscenza può essere ricondotto alle seguenti attività:

- L’identificazione della costruzione, la sua localizzazione in relazione a particolari aree a rischio, ed il rapporto della stessa con il contesto urbano circostante;
- Il rilievo geometrico della costruzione nello stato attuale compresi gli eventuali fenomeni fessurativi e deformativi;
- L’individuazione dell’evoluzione della fabbrica, intesa come sequenza delle fasi di trasformazione edilizia, dall’ipotetica configurazione originale all’attuale;
- L’individuazione degli elementi costituenti l’organismo resistente;
- L’identificazione dei materiali, del loro stato di degrado e delle loro proprietà meccaniche;
- La conoscenza del sottosuolo e delle strutture di fondazione.

# CAPITOLO 2 –

## IL MONITORAGGIO STRUTTURALE

### 2.1 PREMESSA

L'enorme importanza che i sistemi meccanici e civili occupano all'interno della nostra società fa sì che la loro integrità sia divenuta non soltanto irrinunciabile al fine di limitare i danni economici, ma anche fondamentale per la salvaguardia di vite umane. Tutto ciò giustifica la nascita di discipline che studino sempre nuovi e più efficaci metodi di individuazione di danni e inefficienze.

Negli ultimi anni vi è stato un crescente interesse verso un nuovo campo di ricerca, chiamato monitoraggio strutturale o *Structural Health Monitoring (SHM)*. Esso si basa sulla risposta dinamica della struttura, ottenuta grazie a sensori permanentemente installati sull'opera.

Un sistema di monitoraggio si compone di sensori che possono misurare sia le grandezze ambientali sia la risposta strutturale alle sollecitazioni ambientali. Lo scopo non è soltanto quello di valutare la risposta sismica di un edificio, ossia l'identificazione di danni improvvisi o progressivi, ma è anche il controllo delle funzionalità della struttura nelle condizioni di esercizio, per poter eventualmente progettare efficaci interventi di miglioramento sismico o di rinforzo strutturale.

Quindi il monitoraggio strutturale coinvolge un gran numero di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile quali il progetto, la valutazione del danno, la manutenzione e il rinforzo di strutture esistenti e il controllo strutturale durante i terremoti.

I progressi nel campo dei sistemi di comunicazione permettono un monitoraggio in tempo reale della struttura. I dati vengono elaborati per individuare eventuali anomalie o per valutazioni di lungo termine. È perciò fondamentale l'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio, il cui spiega il ruolo fondamentale dell'analisi modale sperimentale nell'ambito del monitoraggio strutturale. L'interesse nei confronti dell'analisi modale nasce dalla constatazione che il comportamento dinamico della struttura dipende dalle sue caratteristiche intrinseche (masse, rigidità, smorzamenti, grado di vincolo, ...), pertanto, se non intervengono modifiche interne all'edificio, come ad esempio il danno strutturale, il comportamento dinamico della struttura rimane inalterato, viceversa, in presenza di fenomeni di danno, si noteranno delle variazioni nei parametri dinamici della struttura.

L'importanza del monitoraggio strutturale è data dal fatto che, per gli edifici storici, il controllo strumentale periodico della struttura è uno strumento per la conservazione e per la riduzione degli interventi, a vantaggio della conservazione, difatti il monitoraggio continuo della struttura permette di valutare l'effettiva entità del danno consentendo di programmare un adeguato programma di manutenzione qualora fosse necessario.

Nello studio di costruzioni storiche in muratura, la principale difficoltà è rappresentata dalla scarsa conoscenza delle caratteristiche meccaniche della muratura per via della eterogeneità delle qualità del

materiale, delle differenti tessiture murarie e dalla grande varietà degli elementi costruttivi. Qualora non siano disponibili prove di caratterizzazione dei materiali, l'identificazione dinamica rappresenta una valida alternativa al fine di identificare le proprietà elastiche della muratura.

## 2.2 INTRODUZIONE: IL DANNO STRUTTURALE

Il *danno* può essere definito, in termini generali, come un cambiamento introdotto nel sistema che ne influenza negativamente le sue attuali e future prestazioni. Implicitamente, in questa definizione, il concetto di *danno* non è significativo senza un confronto tra due differenti stati del sistema, uno dei quali è assunto come stato iniziale non danneggiato. Le variazioni introdotte nel sistema riguardano cambiamenti nei materiali, nelle proprietà geometriche, nelle condizioni al contorno e nella configurazione di vincolo, le quali influenzano negativamente le prestazioni del sistema. In tutte le opere edili il *danno* ha inizio a livello del materiale. Sebbene non sia una terminologia accettata universalmente, tale *danno* viene indicato come *difetto* o *imperfezione* ed è presente, con gradi differenti, in tutti i materiali. Tali difetti intrinseci dei materiali crescono quando il sistema è sottoposto a carichi d'esercizio, pertanto possono causare perdita d'efficienza della struttura. Il termine *danno* non indicata necessariamente una perdita totale di funzionalità della struttura ma, piuttosto, che il sistema non è più operativo in maniera ottimale. Con la crescita del *danno* si raggiungerà una situazione dove i suoi effetti non saranno più accettabili per i fruitori dell'edificio, questa situazione viene definita *collasso* della struttura. Dal punto di vista temporale il *danno* può accumularsi incrementalmente in lunghi periodi, come per i casi associati a corrosione o fenomeni di fatica; oppure si può verificare in brevi lassi temporali, come nel caso dei terremoti.

Il processo che attua una identificazione del *danno* nell'ingegneria aerospaziale, meccanica e civile viene definito *Structural Health Monitoring (SHM)*. Questo processo riguarda osservazioni sulle strutture o su sistemi meccanici, effettuate attraverso la raccolta periodica di misurazioni che permettono l'estrazione di caratteristiche sensibili al danno e l'analisi statistica di tali caratteristiche per poter stabilire il corrente stato di salute del sistema. I risultati delle analisi vengono periodicamente aggiornati per poter fornire indicazioni sulla capacità della struttura di poter continuare a svolgere la funzione stabilita, anche in lume all'inevitabile invecchiamento, quindi all'accumulo di danno, che risulta dalle condizioni di esercizio. Nel caso di eventi estremi come terremoti od esplosioni, il monitoraggio viene usato per eseguire un controllo sulle condizioni della struttura.

## 2.3 APPLICAZIONI DEL MONITORAGGIO ALLE STRUTTURE

L'installazione di un sistema di monitoraggio su edifici di maggior rilevanza storica, culturale e sociale, edifici pubblici, strutture produttive e consente, in primo luogo, di creare una sorta di "anagrafe strutturale" degli edifici monitorati che potrebbe risultare di grande valore anche per gli interventi di ripristino che verranno effettuati nel futuro. Gli aspetti più rilevanti, inoltre, riguardano non solo la sicurezza degli edifici più critici (ospedali, scuole, strutture pubbliche), ma di "Early Warning".

In ambito sismico sta diventando un'esigenza sempre più pressante quella di avere la possibilità di un preallarme che, nel caso in cui alcuni parametri di scuotimento del suolo superano una soglia di pericolo prestabilita, si possa intervenire automaticamente sospendendo attività potenzialmente pericolose, sia in ambito civile che industriale (si pensi ad esempio che numerosi danni possono essere provocati da fughe di gas in edifici o dalla rottura di impianti in funzione in ambito industriale o, infine, per la salvaguardia di attrezzature e macchinari che, in funzione durante un sisma, potrebbero danneggiarsi).

Inoltre, altri aspetti non meno rilevanti sono associati alla riduzione dei costi di manutenzione, ad esempio di ponti, a causa di problemi di fatica (con controlli mirati e solo quando realmente necessari).

La sfida principale nel campo del monitoraggio strutturale sta nel fatto che, a parte alcune tipologie di edifici pubblici e abitazioni private, tutte le strutture sono uniche. Questo significa che non esiste una comune soluzione ripetibile in tutte le situazioni. Così 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.

Ross & Matthews (1995) e Mita (1999) hanno individuato i casi nei quali il monitoraggio sia richiesto:

- Modifiche a strutture esistenti;
- Monitoraggio di strutture soggette a lavori esterni;
- Monitoraggio durante la demolizione;
- Strutture soggette a spostamenti di lungo termine o degrado dei materiali;
- Sviluppare schemi al fine di migliorare i futuri progetti sulla base dell'esperienza;
- Assestamenti dovuti a fenomeni di fatica;
- Nuovi sistemi di costruzione;
- Assestamenti post-terremoto per il controllo dell'integrità della struttura;
- Previsione ad un progetto basato sulle prestazioni.

## 2.4 MONITORAGGIO DELLE COSTRUZIONI STORICO-MONUMENTALI

L'Italia è conosciuta e rinomata in tutto il mondo per essere una delle nazioni più ricche in patrimonio culturale, architettonico ed ambientale. La protezione, la conservazione ed il restauro di questa splendida eredità dovrebbero essere una delle priorità per il nostro paese. Esso inoltre è caratterizzato da un'elevata sismicità; ciò comporta non solo la corretta gestione di questa enorme ricchezza, ma impone uno studio approfondito sulle metodologie sempre più innovative di controllo, prevenzione ed intervento che si sono sviluppate e si stanno sviluppando negli ultimi anni. La nostra cultura inoltre, ha portato ad avere costruzioni in muratura, un materiale dalle spiccate caratteristiche non lineari che sicuramente non facilitano lo studio del loro comportamento.

Negli anni sono nate e si sono sviluppate una serie di metodologie che permettono oggi di affrontare con ottimi risultati tutto ciò che riguarda la valutazione e il controllo temporale di strutture, parti di esse e l'insieme struttura-terreno di fondazione. Tutti i collassi strutturali sono, infatti, preceduti da deformazioni e movimenti con andamenti caratteristici in funzione del tempo ed in tal senso il monitoraggio si prefigge l'obiettivo di raccogliere dati temporali a costi relativamente bassi e con frequenza di misura variabile e programmabile in funzione della specifica applicazione e con una precisione adeguata allo scopo.

Il monitoraggio strutturale rappresenta il più moderno e indicato approccio per evitare i numerosi incidenti e disastri conseguenti:

- All'inevecchiamento fisiologico dei manufatti;
- A eventi naturali (quali frane, sismi, fenomeni di subsidenza);
- A cattivi criteri di costruzione.

La necessità di monitorare edifici e opere infrastrutturali in genere, sta diventando sempre più importante. Il monitoraggio consente la misurazione, periodica o continua, del comportamento degli elementi la cui integrità è vitale per la sicurezza delle strutture civili. In una situazione in cui non sono disponibili le risorse economiche per la messa in sicurezza degli edifici, o nella quale per motivi di tutela del patrimonio storico-artistico non sono possibili i massicci interventi necessari alla messa in sicurezza dei monumenti, si rende necessario, sempre più spesso, utilizzare l'unico approccio scientifico che garantisce la salvaguardia della pubblica incolumità.

## 2.5 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Negli ultimi anni, la comunità scientifica è stata intervistata sulla crescita di interesse nella definizione e applicazione di procedure per la valutazione strutturale e il monitoraggio di monumenti di costruzioni storiche. Diverse nazioni e progetti di ricerca internazionali, anche fondati dall'Unione Europea, stanno valutando vantaggi e svantaggi delle tecniche di monitoraggio e delle procedure come i test non distruttivi per la valutazione delle strutture in muratura. Sebbene manchino delle normative di riferimento, in alcuni paesi come l'Italia, sono state rilasciate delle linee guida su questo argomento.

Per quanto riguarda la normativa inerente al tema trattato, ovvero quello sul monitoraggio dei beni culturali, si può far riferimento alle *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale - allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni”*.

In particolare il tema del monitoraggio è affrontato al paragrafo § 4.1.9:

*“Il controllo periodico della costruzione è una pratica fortemente auspicabile poiché rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione.*

*[...]Per impostare un programma di monitoraggio è necessario eseguire preventivamente una accurata analisi del funzionamento strutturale, e quindi una interpretazione dei dissesti in atto, in modo da definire i parametri più significativi che, misurati in continuo o con scadenze temporali adeguate, consentono di certificarne il buon comportamento ovvero di valutare eventuali evoluzioni pericolose per la stabilità di insieme o di singole parti dell'edificio.*

*Il monitoraggio visivo, inteso come controllo periodico dell'insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell'ambiente circostante, rappresenta il punto di partenza di tale attività.*

*Informazioni aggiuntive possono essere acquisite attraverso il monitoraggio strumentale di alcuni parametri ritenuti significativi (movimento delle lesioni, spostamenti assoluti o relativi di punti della costruzione, rotazione di pareti o altri elementi). [...] In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione. Le proprietà dinamiche della struttura (frequenze e forme proprie di vibrazione) sono anch'esse parametri significativi del comportamento di una costruzione. In presenza di dissesti o trasformazioni della costruzione e del suo uso, queste grandezze subiscono delle alterazioni. Allo stato attuale delle conoscenze, l'identificazione del danno sulla base di una variazione delle proprietà dinamiche è molto difficile; inoltre, è noto che le costruzioni in muratura sono caratterizzate da un comportamento fortemente non lineare e ciò rende problematico il ricorso a parametri rappresentativi di un comportamento lineare equivalente. Tuttavia, il controllo di alcuni parametri della risposta dinamica, o eccitata artificialmente o mediante vibrazioni ambientali, può, in alcuni casi, rappresentare uno dei possibili elementi per l'identificazione di un cambiamento manifestatosi nella costruzione. La scelta dei parametri e l'interpretazione delle misure dinamiche vanno giustificate in relazione alla tipologia di dissesto ed agli scopi delle indagini.*

*Se si considera più in particolare la sicurezza sismica, essendo il terremoto un evento raro ed imprevedibile, è evidente che il monitoraggio non rappresenta uno strumento di allarme*

*o di individuazione del comportamento sismico. Un suo uso può risultare significativo nell'emergenza post-terremoto, su strutture fortemente danneggiate di cui si volesse verificare l'evoluzione del meccanismo attivato dal sisma e la risposta ad eventuali scosse di replica”.*

Recentemente, le applicazioni dell'SHM alle strutture ed edifici storici sono diventate in Italia molto più diffuse per via dell'importanza e della vastità del patrimonio culturale nel Paese. Uno dei primi esempi di applicazioni di SHM al patrimonio culturale è rappresentato dal sistema del Duomo di Santa Maria in Fiore a Firenze già attivo dal 1988 e formato da più di 160 sensori statici a causa della complessità dello stato fessurativo.

Ormai l'idea di applicare il monitoraggio ai beni culturali si sta sviluppando sempre più e il lavoro futuro è quello di pensare alla possibilità di esportare le metodologie adottate negli altri settori anche all'edilizia storica.

## 2.6 OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Con il termine “monitoraggio” si intende la quantificazione della progressione di un evento. L'attività di monitoraggio s'incentra su tre distinti obiettivi:

- Le cause del degrado;
- Gli effetti del degrado;
- La durabilità dei trattamenti di restauro.

Un punto forte del monitoraggio deve essere quindi quello di ottenere una corretta gestione del manufatto, in modo tale da permettergli di adempiere nel migliore dei modi alle sue funzioni durante la vita utile.

Raccogliere inoltre i dati relativi a diverse costruzioni, consente di ampliare la conoscenza sul comportamento di un determinato materiale, ma anche di costruire un database di informazioni utili sia in termini preventivi che di intervento su strutture similari.

Ciò ovviamente non deve indurre a trattare tutti i casi in modo analogo, in quanto ogni struttura in muratura ha una propria storia e delle proprie criticità che non possono essere accomunate ad altre.

Si può dunque concludere dicendo che il controllo periodico della costruzione rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione.

Il monitoraggio però può anche essere visto in un'altra ottica, ovvero, quella post-evento. Può essere infatti lo strumento che, in caso di avvenimenti eccezionali quali terremoti o esplosioni, consente di effettuare un rapido screening della struttura e, quasi in tempo reale, fornire informazioni affidabili sull'integrità della stessa e sul suo comportamento nei confronti di eventuali scosse di replica.

## 2.7 ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO

Per centrare gli obiettivi sopra citati è necessario che un sistema di monitoraggio venga strutturato secondo un'adeguata architettura.

Il processo di attuazione di strategie per l'identificazione del danno prende il nome di "*Structural Health Monitoring*" (SHM). Questo processo comporta il monitoraggio periodico o permanente di una struttura attraverso le misurazioni, l'estrapolazione dei sintomi caratteristici dei fenomeni oggetto di indagine e la loro analisi statistica per determinare lo stato attuale del sistema.

In termini generali risulta difficile definire una linea che si adatti ad ogni tipo di costruzione e che consenta di catturare ogni tipo di danno che può interessarla. Ogni caso dunque è diverso dagli altri, fermo restando però ad alcuni principi e dettami che ogni sistema di monitoraggio efficace deve seguire. In questo contesto il problema del monitoraggio strutturale (SHM), può essere affrontato facendo riferimento al cosiddetto "*Statistical Pattern Recognition Paradigm Approach*".

Ogni fase di monitoraggio strutturale, quindi dovrà essere progettata accuratamente. Tra le fasi troviamo:

1. Valutazione operativa
2. Caratterizzazione della struttura,
3. Scelta della strumentazione,
4. Tipo di eccitazione,
5. Acquisizione dati,
6. Elaborazione del segnale,
7. Identificazione dei sensori difettosi,
8. Estrazione delle caratteristiche,
9. Elaborazione delle caratteristiche,
10. Sviluppo di un modello statistico;
11. Rilevamento del danno,
12. Allarmi e resoconti.

Ogni funzione sarà di seguito discussa e spiegata.

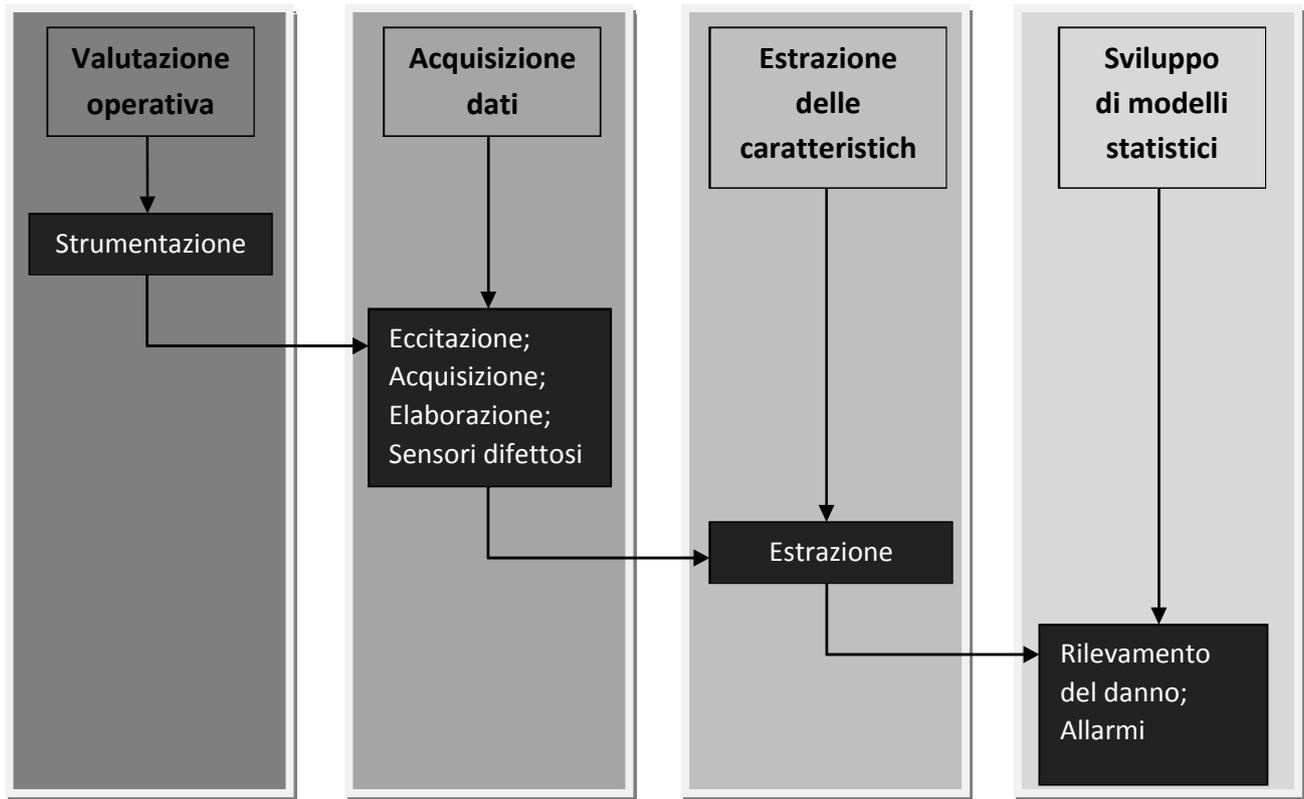


Figura 1 - Rappresentazione delle fasi e dello schema funzionale del processo del monitoraggio

## 2.7.1 VALUTAZIONE OPERATIVA

La valutazione operativa ha lo scopo di rispondere a quattro domande riguardanti la capacità di identificare il danno e il suo sviluppo futuro. Tali domande sono:

- *Quali sono i motivi economici e/o di salvaguardia della vita umana che spingono lo sviluppo del monitoraggio?*
- *Come viene definito il danno per il sistema monitorato?*
- *Quali sono le condizioni, sia operative che ambientali, secondo le quali il sistema può funzionare?*
- *Quali sono le limitazioni nell'acquisizione dei dati nell'ambiente operativo?*

Come già accennato poco prima, le motivazioni economiche e quelle di sicurezza in termini di vita umana e strutturale, sono state e sono tuttora le linee guida per lo sviluppo di un sistema di monitoraggio completo ed affidabile in grado di garantire la funzionalità di un qualsiasi oggetto, sia esso un aeromobile o una costruzione, durante tutto il periodo della sua vita utile.

La seconda questione messa in luce è quella relativa al danno. Quando un sistema SHM viene implementato su di una struttura, è importante che si definisca e si quantifichi il danno che si sta cercando, facendo in modo che la probabilità con cui esso sarà rilevato sia sufficiente, impiegando in modo razionale ed intelligente le risorse a disposizione.

Il danno che può essere identificato secondo due diversi indici:

- Indice di danno locale:

$$d_n = \frac{S_n - \bar{S}_n}{S_n}$$

Dove  $S_n$  è l'area trasversale non danneggiata,  $\bar{S}_n$  è l'area danneggiata;

- Indice di danno globale:

$$D = \frac{U - \bar{U}}{U}$$

Dove  $\bar{U}$  ed  $U$  rappresentano rispettivamente l'energia totale della struttura con riferimento al suo stato danneggiato e non danneggiato.

## 2.7.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA STRUTTURA

Il secondo passo da compiere per organizzare e strutturare un buon sistema di acquisizione e monitoraggio è sicuramente quello della caratterizzazione della struttura che si vuole studiare. Una buona conoscenza del caso in esame è essenziale per poter identificare già nelle prime fasi gli aspetti critici che si pongono e formulare delle prime ipotesi sui possibili scenari di danneggiamento che possono intervenire. Le informazioni a disposizione possono dunque essere la base per la pianificazione di una corretta strategia di monitoraggio.

La scelta delle tipologie dei sensori da impiegare, il loro posizionamento, la calibrazione ed il settaggio del sistema sono direttamente dipendenti dalla caratterizzazione dell'opera. Una scarsa conoscenza della struttura, può infatti pregiudicare il buon esito della progettazione, andando ad inficiare le caratteristiche tecniche ed economiche del sistema.

Non bisogna inoltre dimenticarsi di reperire utili informazioni anche sull'ambiente circostante e sulle condizioni di operatività dell'apparato, in quanto tasselli non sottovalutabili nella progettazione del monitoraggio.

Oltre alla caratterizzazione della struttura, è necessaria anche un'indagine dei fenomeni e delle caratteristiche che si vogliono studiare e monitorare. Questa ricerca è ovviamente necessaria per la scelta degli apparati più consoni per la loro identificazione.

## 2.7.3 SCELTA DELLA STRUMENTAZIONE E SUA POSIZIONE

La scelta della tipologia di sensori da impiegare in un sistema di monitoraggio è ovviamente legata a ciò che si vuole identificare per la struttura in esame. Il costo, la risoluzione, l'ambiente in cui si deve operare sono elementi che non devono passare inosservati se si vuol costituire un sistema robusto ed efficiente, sia dal punto di vista economico che prestazionale. Nel caso di edifici storici e di particolare rilievo, l'attenzione si sposta anche su livelli estetici da preservare, andando anche contro ad alcune soluzioni che sembrerebbero quelle ottimali.

Altro tema importante che non si deve trascurare è quello che riguarda il posizionamento dei sensori. Vincoli di posizionamento o estetici possono in qualche modo intaccare la giusta e migliore ubicazione che

risulterebbe da un'approfondita analisi del problema; queste incertezze nascono ovviamente per le strutture già esistenti, ma in particolar modo per i beni storici e culturali di cui è pieno il nostro Paese.

Il continuo sviluppo della ricerca riguardante la tecnologia di miniaturizzazione dei sensori e di trasmissione dati via rete wireless può sicuramente venire incontro alle esigenze dei progettisti che si imbattono in casi di questo tipo. Il vantaggio dei sensori wireless sta nel fatto che non c'è bisogno di stendere cavi per la loro installazione, questo risulta un aspetto molto importante nel caso di sistemi di monitoraggio molto estesi e complessi che utilizzano un elevato numero di sensori; inoltre, cavi e connettori sono soggetti ad usura. Per controparte i principali svantaggi dei sensori wireless sono l'elevato consumo di alimentazione, il lento trasferimento dati e la sincronizzazione, pertanto per tali sistemi devono essere studiati ed applicati caratteristici algoritmi.

Il numero dei sensori può variare da uno a diverse centinaia in relazione alla complessità della struttura e alle caratteristiche che devono essere rilevate. La posizione dei sensori può essere determinata usando un modello ad elementi finiti della struttura per poter anticipare gli scenari di danno utilizzando ottimizzazioni o metodi euristici.

La buona collocazione dei sensori deve dunque essere un giusto compromesso tra la teoria e la necessità di realizzare un sistema efficiente non solo dal punto di vista prestazionale, ma anche di quello realizzativo e manutentivo.

La letteratura viene in aiuto fornendo numerosi metodi ed algoritmi che consentono di ottenere una buona base di partenza per la scelta di un numero sufficiente e ottimale di sensori da impiegare nel sistema di monitoraggio, obiettivo raggiunto andando a massimizzare o minimizzare una certa funzione di costo che può variare da caso a caso.

I metodi più utilizzati per il posizionamento ottimale dei sensori (*Optimal Sensor Placement - OSP*) sono esaminati in maniera esaustiva nel capitolo 5.

## 2.7.4 METODI DI ECCITAZIONE

I metodi di eccitazione della struttura possono essere divisi in due differenti categorie:

- Eccitazione ambientale;
- Forzante artificiale.

La scelta tra queste due differenti metodologie di eccitazione è condizionata da numerosi fattori tra i quali:

- Tipologia di struttura;
- Obiettivo del sistema di monitoraggio;
- Esigenza di un monitoraggio in continuo;
- Presenza di ulteriori carichi difficili da misurare;
- Motivazioni economiche.

Una prima considerazione può essere fatta sulla convenienza dell'impiego dell'eccitazione ambientale in quanto essa è gratuita, fattore non trascurabile, continua e priva di interventi antropici. In alcuni casi però il suo utilizzo può risultare sconveniente; in opportune situazioni infatti, diviene necessario eccitare la struttura con una certa intensità e frequenza, cosa che il "rumore" ambientale non può di certo garantire.

In alcune situazioni essa può risultare talmente bassa da non consentire l'eccitazione dei modi oggetto di interesse o da non assicurare un buon segnale. In questi casi, risulta indispensabile l'impiego di strumentazioni che consentano di produrre opportune forzanti artificiali.

L'eccitazione artificiale, invece viene usata quando non è presente l'eccitazione ambientale. Il vantaggio di poter disporre di una eccitazione artificiale sta nella possibilità che questa può essere controllata e misurata. Disporre di eccitazione artificiale è utile poiché in questa maniera si può indagare su tutta la banda delle frequenze di interesse. Si possono ottenere questi risultati utilizzando:

- Attuatori;
- Shakers;
- Martelli;
- Tavole vibranti;
- Pesi in caduta.

Per molti di quelli citati l'input può essere facilmente misurato consentendo di adottare opportune tecniche di identificazione dinamica. Il vantaggio di conoscere le caratteristiche dell'eccitazione è quello di poter identificare alcuni parametri di danno che in altro modo non sarebbero individuabili.

Va tenuto presente, però, che nella maggior parte delle strutture dell'ingegneria civile, con frequenze naturali basse, l'eccitazione artificiale è difficile da applicare e molto costosa e necessita di un largo uso di attuatori idraulici e di molta potenza.

Tutte queste considerazioni vanno tenute in conto quando si progetta un sistema di monitoraggio perché andranno ad influenzare le operazioni di acquisizione e trattamento dei dati.

## 2.7.5 SETTAGGIO DEL SISTEMA E ACQUISIZIONE DATI

Il settaggio del sistema di monitoraggio riguarda in particolare la definizione delle caratteristiche che denotano l'acquisizione dei dati. I sensori convertono una quantità misurata in un segnale elettrico analogico. L'obiettivo del sistema di acquisizione è quello di raccogliere le serie temporali di dati in un computer per una futura analisi. Se le caratteristiche dipendono da più di un sensore, allora tali sensori devono essere campionati simultaneamente. La frequenza di campionamento e la lunghezza delle registrazioni devono essere adattate alle necessità delle caratteristiche da estrarre. L'acquisizione dati automatica può essere basata su un orologio o su trigger. La digitalizzazione del segnale deve essere effettuata con attenzione. Se la frequenza di campionamento è  $f_s$ , la frequenza massima che può essere osservata  $f_{max}$  risulta pari a:  $f_{max} = \frac{f_s}{2}$ . Se la frequenza di campionamento è bassa, frequenze sopra  $\frac{f_s}{2}$  non sono correttamente interpretate come frequenze basse, questo fenomeno viene definito *aliasing*.

Altro punto da considerare è il fattore tempo, ovvero la frequenza con cui i dati vengono registrati. In particolare si possono distinguere due tipologie di casistica:

- Controllo di eventi istantanei quali sisma, vento, impatti, esplosioni;
- Monitoraggio di fenomeni che perdurano nel tempo quali invecchiamento, deterioramento, cedimenti.

Nel primo caso risulta necessaria un'acquisizione immediatamente prima dell'evento e successivamente una ad intervalli regolari (post-evento).

L'attivazione del sistema, in casi di eventi eccezionali, può avvenire grazie ad alcune strategie di “*triggering*” che consentono, per esempio, di iniziare l'acquisizione dei dati non appena un dispositivo rileva un input superiore ad una certa soglia.

Nel caso invece l'obiettivo del monitoraggio risulti quello di acquisire informazioni su fenomeni che perdurano nel tempo, è necessario provvedere ad un'acquisizione praticamente in continuo. In ogni caso si deve prevedere un controllo preliminare sui dati in modo da evitare la registrazione di segnali di rumore che possano influenzare l'acquisizione che si vuole compiere.

## 2.7.6 ELABORAZIONE DEL SEGNALE

L'elaborazione del segnale viene usata per estrarre direttamente le caratteristiche oppure per operare una fase di pre-processing dei dati per l'estrazione delle caratteristiche. Tipicamente l'elaborazione del segnale estrae alcune informazioni utili dalle serie temporali usando le proprietà stocastiche oppure basandosi su alcune assunzioni. Spesso si applica un filtro per limitare il campo delle frequenze del segnale. Nella misurazione delle vibrazioni il valore medio viene solitamente rimosso poiché non contiene informazioni utili. *La trasformata di Fourier* è lo strumento che permette di convertire il segnale dal dominio del tempo nel dominio delle frequenze. Questo metodo è veloce e non prevede perdita di informazioni nella trasformazioni.

## 2.7.7 IDENTIFICAZIONE DEI SENSORI DIFETTOSI

I sistemi di monitoraggio che misurano le vibrazioni si basano su dati raccolti durante la vita utile della struttura. È perciò importante individuare possibili sensori difettosi per mantenere l'affidabilità del sistema. I sistemi di monitoraggio includono diversi sensori che misurano il moto globale, oppure modi minori, della struttura. La correlazione incrociata dei sensori può essere utilizzata per individuare sensori mal funzionanti o difettosi e per correggere il segnale di tali sensori.

## 2.7.8 ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE

Le serie temporali includono molti dati, i quali devono essere compressi per poter essere elaborati e poter ricavare le caratteristiche della struttura. Queste caratteristiche sono considerate come le “impronte digitali” del sistema e sono estratte dalle misurazioni delle serie temporali. L'obiettivo è di trovare caratteristiche che sono sensibili al danno ma non sensibili alle normali variazioni dell'ambiente (carichi, temperatura, ecc.). Un cambiamento nelle caratteristiche è sintomo di presenza di danno. Poiché il sistema di monitoraggio esegue ripetute misurazioni durante la vita della struttura, l'estrazione delle caratteristiche deve essere automatica. Alcune caratteristiche sono facili da estrarre automaticamente, mentre altre hanno bisogno di supervisione e regole da automatizzare. L'estrazione di caratteristiche viene classificata in metodi parametrici e non parametrici.

## 2.7.9 ELABORAZIONE DELLE CARATTERISTICHE

La dimensione del vettore caratteristico rispetto alle serie temporali è sensibilmente inferiore. Ogni singola caratteristica può essere usata per la prevenzione del danno, in alternativa potrebbe essere usata una statistica a più variabili. Il primo passo è quello di selezionare i dati dalla struttura non danneggiata la quale rappresenta la condizione strutturale di riferimento. I dati iniziali devono comprendere l'intera gamma delle condizioni ambientali od operative, poiché influenzano le caratteristiche e possono fornire false indicazioni di danno se non propriamente analizzate. Ci sono differenti tipi di caratteristiche e gli intervalli da cui dipendono le proprietà scelte possono variare considerevolmente. Per esempio le frequenze naturali possono variare da 0,2 a 200Hz, mentre i rapporti di smorzamento variano solitamente tra 0,001 e 0,1. Quando si considera l'identificazione del danno, le proprietà con alti valori assoluti o variazioni tendono a dominare. Pertanto tutte le caratteristiche vengono standardizzate per avere una media tendente a zero e una varianza unitaria all'interno dei dati di formazione. Il numero delle caratteristiche osservate potrebbe essere troppo alto per realizzare analisi statistiche affidabili, anche dieci proprietà possono essere troppe anche in presenza di una quantità di dati finiti. Vanno perciò osservate solo le caratteristiche sensibili al danno. Comunque, le informazioni di solito richieste non sono sempre disponibili. Un'altra possibilità è quella di lasciare decidere i dati quali siano le caratteristiche più sensibili al danno, selezionando tutte le proprietà e utilizzando tutte le informazioni disponibili. Solo le caratteristiche con frequenti anomalie devono essere rimosse, così come le caratteristiche costanti.

## 2.7.10 SVILUPPO DI UN MODELLO STATISTICO

Al contrario di ciò che è accaduto per lo studio delle fasi di estrazione e condensazione, lo sviluppo di modelli statistici per l'analisi dei dati raccolti non ha ricevuto degna attenzione dalla letteratura tecnica. Nonostante questa carenza, in letteratura si trovano in genere tre categorie di algoritmi per lo sviluppo di un modello statistico:

- *"Group classification"*
- *"Regression analysis"*
- *"Outlier analysis"*

I primi due sono algoritmi che possono essere ricondotti alla famiglia dei cosiddetti *"supervised learning"*, ovvero di quelli che possono essere impiegati quando sono disponibili dati sia per la struttura non danneggiata che per quella danneggiata.

L'ultimo invece fa parte della categoria dei cosiddetti *"unsupervised learning"*, cioè di quegli algoritmi utilizzabili quando non sono a disposizione dati riferiti allo stato danneggiato dell'opera.

Lo stato di danno di un sistema può essere descritto in cinque passi attraverso la risposta a cinque quesiti così come proposto da Rytter (1993):

1. *Esistenza*. È presente il danno nella struttura?
2. *Localizzazione*. Dove si trova il danno nella struttura?
3. *Tipo*. Di quale tipologia di danno si tratta?
4. *Estensione*. Quanto severo è il danno presente nella struttura?
5. *Prognosi*. Quanta vita utile rimane alla struttura?

Rispondendo a queste domande nell'ordine presentato significa incrementare la conoscenza sullo stato di danno presente. Vengono in aiuto i modelli statistici presentati che consentono di dare una risposta chiara e quantificabile.

Le tecniche sperimentali dinamico - strutturali possono essere usate per rispondere ai primi due quesiti (esistenza e posizione del danno) sia con i metodi “*supervised learning*” che con quelli “*unsupervised learning*”.

### 2.7.11 RILEVAMENTO DEL DANNO

L’obiettivo dell’identificazione del danno è quello di stabilire se effettivamente il danno è presente nella struttura. La decisione deve essere presa usando metodi statistici, poiché tutte le caratteristiche variano in base alle misurazioni effettuate per cui le decisioni devono essere fatte solo sui cambiamenti significativi. Costruire un grafico di controllo è una delle tecniche primarie nel processo statistico di controllo e può essere utilizzato anche nella pratica del monitoraggio strutturale. Vengono tracciate le caratteristiche qualitative come funzioni del numero dei campionamenti, si stabiliscono dei limiti inferiori e superiori, i quali sono calcolati soltanto dai campionamenti nei quali il processo viene ritenuto sotto controllo. Quando sono presenti fonti di variabilità insolite, i campioni statistici verranno riportati fuori dai limiti di controllo e perciò verrà prodotto un segnale di allarme. Si possono creare molteplici grafici di controllo, che possono avere una singola variabile oppure più variabili, dalla lettura che viene fatta su tali grafici si può stabilire il livello di danno della struttura.

Per identificare, invece, il tipo di danno devono essere disponibili dati relativi a strutture che presentano specifici tipi di danneggiamento, in modo da poterli correlare con quelli rilevati. In questo caso risulta necessaria l'applicazione del metodo “*supervised learning*”.

Sono invece indispensabili modelli analitici per stimare la gravità del danno ed il margine di vita utile della struttura, a meno che non si disponga di dati relativi al sistema stesso, o ad altri simili, in presenza di differenti livelli di danno. L'entità del danno e la vita residua possono essere valutati con il metodo “*supervised learning*”, ma solamente dopo aver individuato il tipo di danno presente.

Fase molto importante del processo di sviluppo del modello statistico è quella di test dei modelli; essi vengono eseguiti con dati reali per definire la sensibilità al danno delle caratteristiche selezionate e verificare la possibilità di falsa indicazione di danno.

### 2.7.12 ALLARMI E RESOCONTI

Il sistema di monitoraggio deve essere connesso ad una rete per poter trasferire i dati sulle condizioni della struttura. Sono importanti tre funzioni:

1. Il sistema di monitoraggio deve essere in grado di inviare segnali di allarme non appena viene stabilita la possibilità che possa insorgere del danneggiamento alla struttura;
2. L’ingegnere deve avere accesso alla centralina di acquisizione dati per trasferire i dati in ufficio e poter, quindi, eseguire una analisi off-line oppure per cambiare i dati da monitorare;
3. È essenziale che il sistema di monitoraggio informi periodicamente l’ingegnere sullo stato del sistema stesso. Di norma un segnale di allarme viene inviato quando si misurano almeno due eventi consecutivi di rilevamento del danno.

## 2.8 ASSIOMI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Gli studi effettuati negli ultimi decenni nel campo del monitoraggio strutturale, hanno portato gli autori a formulare una serie di assiomi da applicare al campo del SHM. Differentemente, però, da quanto avviene in matematica, dove gli assiomi possono essere sufficienti per la formulazione di una teoria, nella pratica del monitoraggio strutturale gli assiomi non sono sufficienti a fornire una metodologia. Innanzitutto gli autori concordano nell'affermare che gli assiomi proposti potrebbero non rappresentare la totalità delle verità possibili nel campo del monitoraggio, per cui ci potrebbero essere verità omesse nella trattazione degli assiomi. Inoltre gli assiomi proposti non specificano i modi di operare del monitoraggio strutturale, mancano, cioè, una serie di algoritmi che possano portare l'ingegnere dalla raccolta dati alla decisione in maniera univoca. Gli assiomi del monitoraggio strutturale sono, secondo Worden:

1. Tutti i materiali hanno difetti intrinseci.
2. La valutazione del danno richiede un confronto tra due stati del sistema.
3. L'identificazione dell'esistenza e la localizzazione del danno può essere eseguita con una modalità unsupervised learning, mentre l'identificazione del tipo di danno presente e della gravità del danno può essere effettuata solo attraverso modalità supervised learning.
4. I sensori non misurano il danno. L'estrazione di proprietà attraverso l'elaborazione del segnale e classificazioni statistiche sono necessari per convertire i dati dei sensori in informazioni sul danno.
5. È necessaria una estrazione intelligente delle caratteristiche, in modo tale da poter analizzare quelle che sono influenzate dal danno e non da cambiamenti ambientali od operativi.
6. Le scale di lunghezza e di tempo associate all'inizio ed evoluzione del danno, indicano quali devono essere le caratteristiche che deve avvertire il sistema di monitoraggio.
7. Esiste un rapporto tra la sensibilità al danno di un algoritmo e la sua capacità di eliminare i disturbi.
8. La dimensione del danno che può essere individuata dai cambiamenti nella dinamica del sistema è inversamente proporzionale al range delle frequenze di eccitazione.

## 2.9 METODI DI INDIVIDUAZIONE DEL DANNO

Secondo il prof. Worden esistono due metodi per individuare la presenza di danno in una struttura:

- *Model Driven Approach*
- *Data Driven Approach*

Il primo metodo considera l'identificazione del danno come un problema inverso, viene dapprima creato un modello ad alta fedeltà della struttura, sulla base di leggi fisiche basate sui principi primi della materia, supponendola priva di danno. I cambiamenti nei dati raccolti vengono poi relazionati con le modifiche nei parametri fisici della struttura attraverso un sistema di algoritmi basati sull'algebra lineare o sulle teorie ottimizzate.

Il secondo metodo considera l'identificazione del danno come un problema di riconoscimento di un modello di riferimento. I dati interessanti misurati dal sistema vengono assegnati ad una classe di danno attraverso un algoritmo di riconoscimento del modello. Tali algoritmi possono essere *unsupervised learning* oppure *supervised learning*. Nel caso di algoritmi supervised learning sono richiesti gli esempi di tutte le classi di danno.

### 2.9.1 DATA DRIVEN APPROACH

In questo approccio si individua il danno trattando il problema come l'identificazione di un modello di riferimento della struttura. Vengono implementati algoritmi di identificazione del modello al fine di assegnare una classe di danno ai dati raccolti dal sistema. Questi algoritmi si basano su valutazioni comparative sullo stato di salute dei sistemi sotto controllo con quello di altri eventi conosciuti. Finché il comportamento della struttura monitorata è simile a quello del sistema di riferimento è da escludersi la presenza di danno nella struttura. Quando, invece, il comportamento inizia a discostarsi da quello del sistema di riferimento, allora, viene rilevata la presenza di danno nella struttura. Non esistono sensori in grado di misurare il danno, tuttavia questo può essere identificato attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti. Sono richieste diverse fasi prima di formulare una decisione. Tale decisione può essere di controllo (SPC) o una decisione basata su un sistema di monitoraggio (SHM o CM).

### 2.9.2 MODEL DRIVEN APPROACH

L'approccio basato su modelli permette di affrontare più facilmente situazioni nuove o impreviste, dal momento che questa tecnica può integrare e replicare una ampia gamma di comportamenti, anche se non osservati precedentemente nei sistemi reali, questo perché tale approccio si basa su modelli matematici e non su raccolte dati disponibili.

Quando lo stato di un sistema si discosta dal comportamento operativo previsto, si può continuare a lavorare con l'aggiornamento dei parametri fisici che descrivono la nuova situazione. Grazie a questa capacità questo metodo non utilizza le informazioni storiche che sono richieste dal data driven approach.

## 2.10 TIPOLOGIE DI MONITORAGGIO STRUTTURALE

Le tipologie e le classificazioni del monitoraggio strutturale sono molteplici.

Una prima distinzione la si può ottenere dalla metodologia impiegata. Si parla di monitoraggio visivo che può essere inteso come controllo periodico dell'insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell'ambiente circostante; esso rappresenta il punto di partenza di tale attività.

Per un'indagine più approfondita si parla invece di monitoraggio strumentale che consente di tenere sotto controllo, periodico oppure meno, parametri ulteriori che, con il sopracitato monitoraggio, non sarebbero individuabili. Nell'ambito di questa seconda tipologia si può inoltre discernere tra:

- Monitoraggio statico,
- Monitoraggio dinamico.

## 2.10.1 MONITORAGGIO STATICO

Il monitoraggio statico riguarda la conoscenza di tutte quelle grandezze quali pressione, forza, temperatura, umidità, livello della falda, ecc.

Quelle citate sono ovviamente quelle che più vengono tenute in conto quando si vuol eseguire un monitoraggio completo della struttura. Per ogni grandezza esistono diverse strumentazioni, quali per esempio: piezometri; celle di carico; celle di pressione; sensori di temperatura ed umidità; fessurimetri. È inoltre importante eseguire un controllo continuo e duraturo per riuscire a distinguere i fenomeni “ciclici”, da quelli “patologici”, quali ad esempio quelli riguardanti l'incremento di lesioni e dissesti.

Il monitoraggio statico richiede vengano regolarmente misurate piccole variazioni su lunghi periodi. Possono essere sufficiente poche misurazioni per minuto, in alcuni casi per ora, al fine di ottenere indicazioni sul parametro soggetto a variazione che può essere causata da cicli climatici giornalieri o da periodi effetti gradualmente. Il monitoraggio statico quindi consente la conoscenza di valori di determinate grandezze a livello puntuale, piuttosto che il comportamento a livello globale.

Necessario risulta costituire un'affidabile architettura del sistema in modo che ogni strumentazione impiegata sia funzionale alle altre e non fine a se stessa, in modo da poter impiegare tutte le informazioni raccolte in maniera esaustiva ed efficiente.

Le strumentazioni esposte non completano sicuramente la struttura del sistema nel suo completo, ma, come già detto in precedenza, devono essere accompagnate da altri elementi, sia materiali che non.

Primo fra tutti è la buona conoscenza del manufatto, che comprende gli aspetti geometrici, strutturali, fessurativi e tutti quelli necessari ad una completa comprensione dell'opera.

Non mancano poi tutti gli apparecchi di trasduzione che consentono di inviare alle unità di acquisizione i dati registrati dagli strumenti.

In ultimo si rende poi necessario un buon software di trattamento dei dati che non si fermi alla sola registrazione ed illustrazione dei valori, ma effettui un'analisi più approfondita che consenta di ottenere informazioni preziose sul comportamento di una struttura.

## 2.10.2 MONITORAGGIO DINAMICO

Per costituire un valido ed efficace sistema di monitoraggio è necessario affiancare quello statico con un monitoraggio di tipo dinamico.

Il monitoraggio dinamico ha lo scopo di fornire una caratterizzazione dinamica o di risposta sismica della struttura. Il monitoraggio dinamico può essere portato avanti puntualmente o periodicamente attraverso strumenti in grado di eseguire test dinamici misurando le vibrazioni caratteristiche della struttura indotte da forzanti esterne o da fenomeni naturali.

Un'altra possibilità è quella di installare sistemi permanenti capaci di auto attivarsi e catturare il moto della struttura ogniqualvolta avviene un microsisma oppure una significativa fonte di vibrazione supera una determinata soglia (*monitoraggio trigger-based*).

Il monitoraggio dinamico in continuo, tramite lettura remota ed istantanea dei parametri (spostamenti, velocità ed accelerazioni) rappresentativi del comportamento statico e dinamico della struttura, può consentire la conoscenza in real-time di utili informazioni sullo stato di salute globale dell'opera d'arte, ovvero sull'insorgere o sull'evolversi di gravi stati di danneggiamento. Il monitoraggio dinamico in continuo necessita di grandi disponibilità di memoria dati per la raccolta nel sistema di acquisizione.

Il monitoraggio dinamico è stato molto sviluppato sia per implementare l'individuazione del danno basata su algoritmi che riguardano il cambiamento delle forme modali dei parametri del sistema strutturale (come la frequenza naturale, i modi di vibrare e il rapporto di smorzamento) che possono essere relazionati al danno e sia per controllare la risposta dinamica durante eventi eccezionali (forti venti, microsismi o terremoti).

Una tipica architettura dei sistemi di monitoraggio dinamico è basata sull'impiego di sensori periferici (accelerometri, geofoni ecc.) direttamente connessi tramite cavi ad un sistema di acquisizione centralizzato. Il ruolo di tale sistema è quello di aggregare, immagazzinare ed elaborare una grande mole di dati dinamici costituiti da grandezze variabili a seconda del tipo di sensore utilizzato.

I sistemi di monitoraggio possono quindi essere usati per creare un database di misure durante l'intero ciclo di vita della struttura; è evidente l'importanza dell'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio e durante eventi sismici.

Se si vuol costituire un'architettura robusta ed affidabile, si dovrà rinunciare alla tecnologia wireless in quanto, per un sistema di acquisizione permanente, suddetta tecnologia porterebbe ad uno sfasamento tra i segnali provenienti dai vari sensori non consentendo così una corretta valutazione del comportamento della struttura.

## 2.11 REQUISITI DEL MONITORAGGIO

Nella fase di progettazione di sistemi di monitoraggio automatici si devono valutare attentamente i seguenti aspetti:

- *Condizioni ambientali*: la scelta della strumentazione e dello schema dei cavi deve essere deciso dopo una analisi dettagliata sulle condizioni ambientali affinché si possa garantire la necessaria protezione del sistema, l'assenza di rumore elettrico e condizioni accessibili per l'installazione dei sensori.
- *Accuratezza*: si devono considerare tutti i tipi di errore (sistematici o casuali) che possono influire sui dati rilevati dalla strumentazione. È importante valutare non solo la precisione di ogni trasduttore ma anche quella dell'intero sistema.
- *Affidabilità*: se un sistema di monitoraggio viene lasciato permanentemente in una struttura, viene richiesto un alto grado di affidabilità. È inoltre necessario individuare automaticamente possibili sensori difettosi o malfunzionamenti del sistema.
- *Flessibilità*: gli aggiornamenti del sistema, sostituzione o integrazione di alcuni sensori è necessaria durante il ciclo di vita del sistema.
- *Manutenzione*: devono essere programmate periodiche ispezioni per garantire l'affidabilità del sistema, qualora si verificassero eventi eccezionali tali manutenzioni sono fortemente richieste.

## 2.12 TIPOLOGIE DI SENSORI

Un trasduttore è uno strumento in grado di convertire una quantità fisica che definisce la risposta di un sistema (come ad esempio spostamenti, velocità, accelerazione, tensioni, deformazioni, forze, ecc.) in un segnale elettrico proporzionale che dovrà essere elaborato dal sistema di acquisizione dati. I trasduttori possono essere di tipo analogico, ossia il segnale in uscita è una grandezza elettrica che varia in modo continuo, o digitale, dove il segnale in uscita è composto da uno o più segnali digitali che possono assumere solo due livelli di tensione: attivo (non ha bisogno di alimentazione per essere prodotto) o passivo (in tal caso è richiesta una alimentazione). I sensori devono soddisfare le seguenti caratteristiche di prestazione: sensibilità, risoluzione, portata, linearità, isteresi, accuratezza, precisione, isolamento, basso costo, durabilità.

Nel caso di sensori analogici il segnale in uscita è di tipo continuo e richiede un convertitore A/D, mentre nel caso di sensori digitali la conversione A/D viene eseguita già all'interno del sensore.

### •ANALOG: temporal and spatial continuous

temperature	Thermocouple, pt100	$\Delta V, \Delta \Omega$
load/force	Load cell	$\Delta \Omega$
strain	Strain gauge, fiber	$\Delta \Omega$
acceleration	Accelerometer	$\Delta \Omega$
sound	Microphone	$\Delta \Omega$
displacement	Potenzioni, LVDT, resolver	$\Delta V$

### •DIGITAL: temporal discrete

displacement	Encoder, CCD, Laser	pulse
state	Limit switch	$\Delta V$
frequency	counter	pulse

Figura 2 - Sensori, monitoraggio strutturale

La strumentazione e i sensori comunemente usati nei sistemi di monitoraggio sono di seguito elencati e descritti. Sono stati suddivisi in due categorie: A) sensori tradizionali e B) sensori innovativi.

## A) Sensori tradizionali

- Pendoli: pendoli diretti oppure inversi sono utilizzati per misurare con accuratezza eventuali spostamenti di grandi strutture orizzontali come dighe, ponti o altri tipologie di strutture. L'estremità superiore del filo di acciaio è ancorata alla struttura sotto osservazione, un peso sospeso nell'estremità inferiore è libero di muoversi in un serbatoio d'olio che serve a smorzare le oscillazioni del filo. Gli spostamenti relativi del filo possono essere misurati usando un lettore ottico.



Figura 3 - Pendolo diretto e rovescio

- Sonde inclinometriche: consentono di individuare spostamenti relativi in strutture sotterranee o fuori terra.
- Inclinometri: misurano la variazione di inclinazione di elementi strutturali. Il segnale in uscita è proporzionale all'angolo di inclinazione raggiunto dallo strumento rispetto alla direzione della verticale.



Figura 4 - Inclinometro da parete



Figura 5 – Inclinometro fisso da foro

- Trasduttori di spostamento (o estensimetri, nella terminologia inglese *linear variable differential transformer LVDT*): sono usati per descrivere lo sviluppo nel tempo di fessure presenti nella struttura in specifiche aree accuratamente scelte per ottenere risultati significativi. Si dovrebbero inserire due estensimetri per il piano dell'elemento strutturale nel quale si possono verificare entrambe le deformazioni assiali (contrazione ed espansione nella direzione perpendicolare della fessura) e fenomeni di slittamento. Se possibile, le misure ridondanti garantiscono l'affidabilità dei risultati ottenuti.
- Igrometri: misurano l'umidità dell'aria.

- Anemometri: misurano la velocità o la pressione del vento.
- Celle di carico: vengono usate nel monitoraggio dei tiranti, della catene, delle chiodature, delle bullonature, dei diaframmi, dei muri di contenimento, di carichi applicati all'esterno vincolati ad un elemento trave o sulla testa di un palo.



Figura 6 - Celle di carico

- Celle di pressione idrauliche: vengono usate per valutare l'andamento delle tensioni nel piano di giacitura dei maschi murari o nel terreno, man mano che variano le condizioni di carico. La cella è costituita da due lamine di acciaio saldate lungo tutto il perimetro e separate internamente da una sottile cavità che viene saturata sotto vuoto con olio disareato che garantisce la massima rigidità. Le celle di pressione idraulica sono progettate per misurare la pressione totale esercitata al contatto tra due differenti materiali o strutture, possono anche essere annegate nel terreno o nel calcestruzzo per determinare lo stato di sforzo.

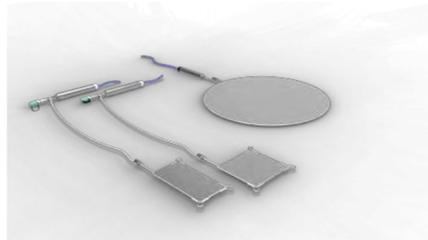


Figura 7 - Celle di pressione idrauliche

- Accelerometri: misurano le accelerazioni indotte da vibrazioni naturali oppure da forzanti esterne. Il principio operativo dello strumento consiste nell'individuazione dell'inerzia della massa quando è soggetta ad accelerazioni.

Gli accelerometri possono essere: i) accelerometri piezoelettrici, ii) accelerometro capacitivi e piezoresistivi, iii) accelerometri *force-balance*.

i) Accelerometri piezoelettrici: l'elemento attivo dell'accelerometro è del materiale piezoelettrico, il quale, su un lato, è collegato rigidamente alla base del sensore, mentre sull'altro è attaccato ad una massa sismica. Quando l'accelerometro è soggetto a vibrazioni, la forza generata da tale fenomeno agisce sull'elemento piezoelettrico. Questa forza è uguale al prodotto dell'accelerazione per la massa sismica. A causa dell'effetto piezoelettrico viene generata una carica elettrica in uscita proporzionale alla forza applicata che l'ha generata. I vantaggi di questo tipo di accelerometri sono rappresentati di fatto che sono trasduttori attivi, per cui non necessitano di alimentazione elettrica, sono stabili e hanno un comportamento lineare sopra ampie frequenze e in campo dinamico. Hanno lo svantaggio di non poter misurare accelerazioni quasi statiche, infatti il materiale piezoelettrico genera un segnale elettrico quando viene compresso, ma se la compressione permane, il segnale generato tende a dissiparsi dopo un breve periodo, questo fenomeno è detto *leakage*, in seguito ad una accelerazione quasi-statica il segnale si congela per poi dissiparsi, non producendo, quindi, più alcun segnale in uscita.

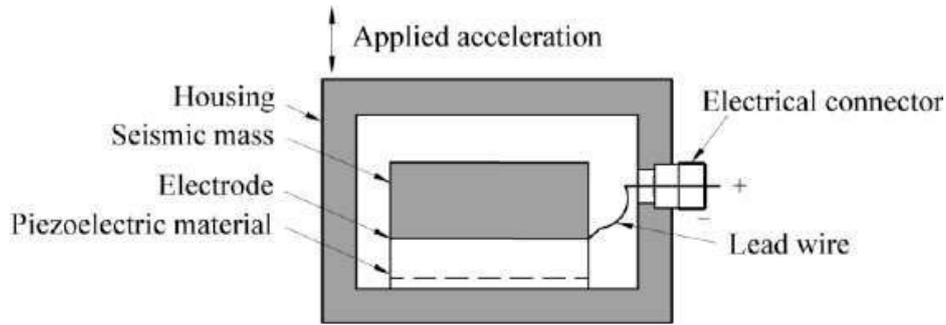


Figura 8 - Schema di funzionamento di un accelerometro piezoelettrico

ii) *Accelerometri capacitivi e piezoresistivi*: sono strutturati come diaframmi che agiscono come una massa che subisce flessione in presenza di accelerazioni. I sensori piezoresistivi sono composti da travi a sbalzo con una massa all'estremità libera. Gli strain gauges sono fissati alla mensola e, quando eccitati, il differenziale dei segnali di output delle deformazioni è proporzionale all'accelerazione.

Negli accelerometri capacitivi ci sono due piastre fissate nel diaframma che funzionano come due condensatori, ognuno con una propria piastra fissata e ognuno in grado di condividere il diaframma come piastra mobile.

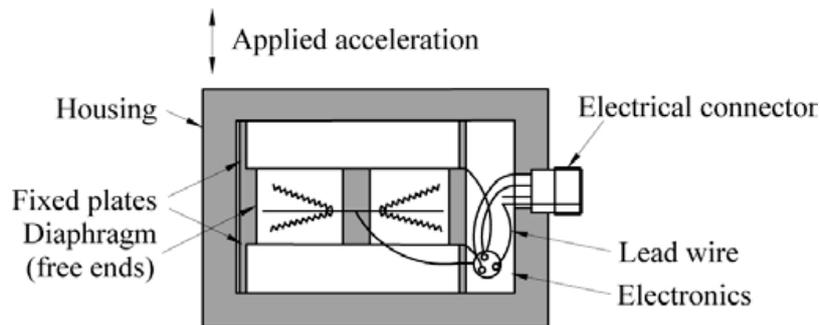


Figura 9- Schema di funzionamento di un accelerometro capacitivo

iii) *Accelerometri force-balance*: a differenza dei tradizionali accelerometri, il contenitore ha al suo interno una massa sospesa contrastata da una equivalente molla meccanica. Ci sono due classi di accelerometri *force-balance*: quelli a pendolo, che hanno una massa girevole sbilanciata con uno spostamento angolare e quelli del tipo a non-pendolo, che hanno una massa che è spostata linearmente.

## B) Sensori innovativi

Vengono di seguito riportati alcune metodologie innovative sia per quanto riguarda i sensori sia per le unità di raccolta dati.

- Sistemi GPS: i GPS hanno fornito nuove possibilità per la diretta misurazione di spostamenti nelle strutture, sostituendo le più tradizionali soluzioni come i vasi comunicanti, il filo a piombo o l'interferometria laser. Un GPS differenziale, il quale dipende dall'esatta misura del tempo di transito delle onde radio dal satellite al ricevitore, consente una diretta misura della deviazione assoluta, evitando diversi problemi che sorgono usando le tradizionali apparecchiature di sistemi ottici. Alcuni recenti progetti dimostrano le potenzialità dei GPS usati come sistemi di monitoraggio come nella torre radio in Giappone e un gruppo di tre grattacieli a Chicago, dove è stata implementata una veloce fase di post-processing dei dati acquisiti. La principale applicazione dei GPS nei sistemi di monitoraggio è quella che avviene nei ponti sospesi, caratterizzati da basse frequenze e da lenti spostamenti indotti dalle vibrazioni ambientali.
- Reti wireless di sensori: le reti wireless di sensori (in inglese Wireless Sensor Network WSN) si possono considerare come reti comprendenti un gruppo di sensori distribuiti su una struttura, comunicanti tra di loro al fine di rilevare, condividere ed elaborare i dati acquisiti dall'ambiente fisico. Di solito queste reti sono composte da un certo numero di elementi capaci di comunicare tra loro, chiamati nodi. Un nodo lavora grazie alle batterie ed è equipaggiato con un numero variabile di sensori. I sistemi WSN, comparati con i tradizionali sistemi cablati, riducono considerevolmente i tempi e i costi d'installazione e non sono soggetti a stesura di cavi e strappi o rotture causate da urti o eventi ambientali estremi. Tuttavia i sistemi wireless che formano le reti non garantiscono la stessa affidabilità in termini di velocità di trasmissione dei dati (i pacchetti radio possono andare persi durante la trasmissione e i ricetrasmittitori impiegati hanno di solito un limitato potere e limitata larghezza di banda).

## 2.13 PROBLEMI E LIMITAZIONI NELLO SVILUPPO DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO

Nel presente paragrafo vengono proposti i principali problemi e le limitazioni che impediscono uno sviluppo nelle tecniche di monitoraggio.

### *a) Affidabilità del sistema*

I sistemi di monitoraggio sono destinati ad assistere i proprietari/operatori delle infrastrutture nella gestione delle strutture, una esaustiva analisi di costi e benefici sarà necessaria per mostrare che i benefici superano i costi. A parte l'esborso iniziale nella pianificazione, acquisto ed installazione del sistema, il funzionamento e la manutenzione del sistema dovrebbe avere dei bassi costi.

### *b) Strumentazione inappropriata e sovraccarico dei sensori*

Con la crescita del numero e degli esempi di applicazioni di monitoraggio strutturale, sempre più spesso vengono previste spese per la strumentazione e per il monitoraggio, ciò non rappresenta, però, un incentivo ad una selezione attenta dei sensori e ad un loro corretto posizionamento con l'intenzione di ottenere informazioni utili riguardo le prestazioni della struttura. C'è la tendenza di installare più dispositivi del necessario, questo rappresenta un ostacolo soprattutto nel caso in cui il sistema di monitoraggio debba essere installato su opere esistenti. In particolare per prestabiliti budget, la tendenza di installare più strumenti del necessario, può influire sulla qualità della strumentazione scelta e sulla vita della strumentazione, così saper prevedere le prestazioni attese e determinare i punti critici della struttura rappresenta un aiuto per poter usare un numero minore di sensori ottenendo però maggiori informazioni.

### *c) Raccolta dati e sovraccarico di memoria*

Un corollario della sovra-strumentazione è il sovraccarico di dati, vengono assimilati più dati di quelli che possono essere elaborati dal sistema di elaborazione dati. Si possono eseguire un numero minore di elaborazioni dati attraverso un posizionamento accurato dei sensori e una attenta pianificazione del sistema di monitoraggio usando studi sullo scenario di degrado e/o danno, insieme a sistemi di monitoraggio adottati in strutture in simili condizioni operative ed ambientali.

### *d) Trasmissione dati*

La trasmissione dati dalla unità centrale del sistema di monitoraggio al server dell'istituto che ha in carica la gestione delle attività è un compito piuttosto complicato. Le connessioni wireless, le connessioni tramite modem *dial-up* oppure attraverso dei router permanenti sono in grado di formare connessioni stabili per lo scambio e la trasmissione dei dati.

### *e) Fattori ambientali e rumore*

Nei sistemi di monitoraggio che controllano le vibrazioni ambientali, usando degli accelerometri si possono controllare le condizioni, ma il cambiamento delle proprietà modali a causa di variazioni ambientali riducono di molto la probabilità di successo sull'individuazione del danno e la sua localizzazione. Una parziale mitigazione di tali effetti può essere raggiunta attraverso metodi basati su

modelli fisici oppure modelli statistici degli effetti ambientali, ma a livello di rumore il problema continua a persistere anche con piccole variazioni statiche del segnale.

*f) Presentazione dei risultati del monitoraggio*

Uno degli obiettivi più significativi del monitoraggio strutturale è quello di convertire dati in informazioni. Non deve, a tal proposito, essere trascurata la creazione di grafici o di presentazioni delle informazioni per operatori che potrebbero non avere familiarità con le sofisticate procedure numeriche di elaborazione dei dati.

*g) Sviluppo di norme e codici per l'applicazione del monitoraggio strutturale*

Sebbene l'uso del monitoraggio strutturale nell'ingegneria civile stia crescendo sempre più col passare degli anni, insieme alla ricerca eseguita nel settore della comunità scientifica, mancano ancora delle normative e dei codici da seguire per una corretta applicazione dell'SHM. A questo scopo è necessario, per il rilascio di tali norme per il progetto di equipaggiamenti di misurazione e sistemi di acquisizione dati, usare sia applicazioni in laboratorio che strutture a fondo scala. Inoltre c'è il bisogno di definire ed elaborare un rigoroso approccio normativo da proporre a progettisti, costruttori, sviluppatori e gestori in un contesto di un maturo e consapevole quadro normativo.

## 2.14 CONCLUSIONI MONITORAGGIO

In questo capitolo è stato presentato un resoconto sullo stato dell'arte del monitoraggio strutturale. Inizialmente lo *Structural Health Monitoring* (SHM) è stato applicato nell'ingegneria meccanica ed aerospaziale per studiare lo stato di salute delle componenti di sistemi meccanici. Negli ultimi decenni, però, si è utilizzato l'SHM anche nel campo dell'ingegneria civile per monitorare l'evoluzione del danno nelle strutture. Le applicazioni dell'SHM, nel campo dell'ingegneria civile, riguardano, ovviamente molte strutture dell'ingegneria civile, le infrastrutture, dighe, ponti, gallerie, impianti off-shore, strutture del patrimonio culturale.

In seguito a questo *excursus* sullo stato dell'arte sono state esposte le fasi del monitoraggio strutturale, il quale si pone come obiettivo la conoscenza del livello di danno presente nella struttura e la sua evoluzione durante il ciclo operativo dell'edificio.

Il processo del monitoraggio si compone di quattro fasi: 1) valutazione operativa; 2) acquisizione dati; 3) estrazioni delle caratteristiche; 4) sviluppo di modelli statistici.

Durante la prima fase ci si pongono delle domande in merito alla capacità del sistema di monitoraggio di individuare il danno, con particolare attenzione agli aspetti economici, alle condizioni ambientali e ai limiti operativi presenti nella struttura e alla strumentazione che dovrà essere utilizzata.

Nella seconda fase dell'acquisizione dati si stanno sviluppando algoritmi in grado di automatizzare la fase per gestire la grande mole di dati raccolti, necessari per arrivare alla determinazione delle caratteristiche fondamentali della struttura, anche in questa fase le considerazioni di ordine economico giocano un ruolo fondamentale nella scelta della quantità di sensori da inserire e sulla gestione del sistema di acquisizione dati.

La terza fase riguarda l'estrazione, nel capitolo viene indicata l'evoluzione nella procedura di estrazione dati, la quale sta evolvendo verso la definizione di algoritmi automatici di estrazione dati. Estratti i parametri che identificano la struttura si può procedere con la fase di valutazione del danno attraverso lo studio di modelli statistici.

Nell'ultima fase si identifica e si studia l'evoluzione del danno e in particolare esistono due approcci: il *Data Driven Approach* e il *Model Driven Approach*.

Affrontato il processo del monitoraggio strutturale, sono stati elencati e spiegati gli strumenti che si installano per monitorare le strutture.

In conclusione sono state riportate le limitazioni nel campo del monitoraggio strutturale, le quali riguardano: l'affidabilità del sistema, la strumentazione inadeguata e il sovraccarico dei sensori, la trasmissione dei dati, fattori ambientali e rumore, la presentazione dei risultati, lo sviluppo di norme e codici per l'applicazione del monitoraggio strutturale.

# CAPITOLO 3 -

## IDENTIFICAZIONE DINAMICA, FONDAMENTI DI ANALISI MODALE

### 3.1 INTRODUZIONE

Lo scopo dell'analisi della risposta dinamica, nel campo dell'Ingegneria civile e quindi riferito ad una struttura, è quello di determinare e valutare i dati che caratterizzano il suo comportamento a partire dalla fase di progetto fino a quella di esercizio.

Durante la fase di progetto, il progettista necessita di convalidare le ipotesi fatte sulla base dei risultati derivanti da prove sperimentali. In questo modo egli verifica ed eventualmente corregge l'accuratezza (taratura) dei modelli matematici o di calcolo utilizzati in tale fase.

Durante la fase di esercizio, soprattutto per opere di importanza strategica (dighe, ponti, grandi impianti industriali, centrali nucleari ecc.) o rilevanza storica l'analisi viene attuata mediante una serie di misurazioni periodiche. Attraverso questo monitoraggio si è in grado di diagnosticare, ad esempio, fenomeni di degrado in atto. Inoltre, la conoscenza delle caratteristiche modali di una struttura in opera consente di prevedere la risposta che questa avrà se sottoposta a sollecitazioni ambientali come sismi; permettendo quindi di andare ad intervenire in modo preventivo su eventuali punti deboli riscontrati.

Sulla base di ciò che è stato esposto nei paragrafi precedenti, risulta evidente il ruolo fondamentale dell'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio e della tecnica per l'individuazione del danno nell'ambito del monitoraggio strutturale.

Al fine di determinare il comportamento dinamico di una struttura sono possibili due differenti approcci:

- L'approccio analitico: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, della distribuzione delle masse, delle rigidità e dello smorzamento, 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.

Generalizzando, quindi, per identificazione dinamica si intendono tutte quelle tecniche, analitiche e sperimentali, che consentono di individuare la risposta dinamica della struttura (frequenze proprie, modi di vibrare e coefficienti di smorzamento).

L'interesse nei confronti dell'analisi modale nasce dalla constatazione che il comportamento dinamico della struttura è una sorta di "impronta digitale", il quale dipende dalle caratteristiche intrinseche (masse, rigidzze, smorzamenti, grado di vincolo, ecc.) e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato; pertanto, se non intervengono modifiche interne all'edificio (come per esempio il danno strutturale), il comportamento dinamico della struttura rimane inalterato, mentre, viceversa, in presenza di fenomeni di danno, si noteranno delle variazioni nei parametri dinamici della struttura.

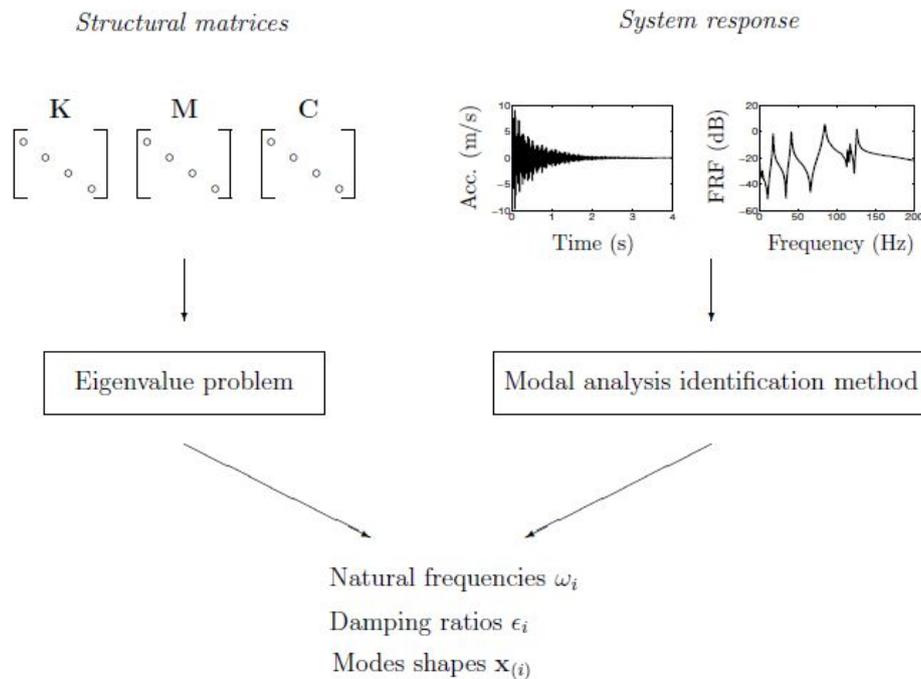


Figura 10 - Identificazione dinamica: approccio analitico e sperimentale

## 3.2 STATO DELL'ARTE

L'identificazione dinamica delle strutture rappresenta una delle più importanti tecniche non distruttive per conoscere il comportamento sismico delle strutture dell'ingegneria civile. Inoltre, l'applicazione di diverse tecniche di identificazione modale in modelli oggetto di test di laboratorio consente di determinare il danno strutturale eventualmente presente, così come informazioni circa l'influenza delle tecniche di rinforzo nell'ambito del comportamento dinamico.

L'identificazione dinamica venne sviluppata per la prima volta nel campo aeronautico e aerospaziale [Kennedy e Pancu, 1947]. Numerosi studi vennero condotti nei decenni successivi e negli anni '70, con l'avvento dei trasduttori, dei sensori e dei sistemi di acquisizione, furono introdotti i primi test modali. Solo negli anni '80 questa metodologia fu adottata anche per la caratterizzazione di strutture civili. In particolare, vennero sperimentate diverse metodologie, basate principalmente sull'analisi della risposta di una struttura soggetta all'applicazione di una forzante esterna (metodologia *input-output*), o sullo studio delle sue vibrazioni naturali (metodologia *output-only*).

Queste analisi conducono all'identificazione delle frequenze fondamentali, forme modali, rapporti di smorzamento e di altri parametri modali. In base alla loro variazione, possono essere individuati e localizzati i danni strutturali.

Gli studi e le ricerche effettuate, dimostrano come i test dinamici rappresentino una metodologia di investigazione potenzialmente molto efficace, in grado di ottenere molteplici informazioni riguardanti sia l'intera struttura, sia un danno locale. Tale conoscenza conduce ad una scelta dell'intervento più appropriato e consente l'analisi dell'efficacia delle tecniche di rinforzo sulle strutture considerate.

L'applicazione dell'identificazione modale agli edifici storici rappresenta un tema difficile, a causa della grande variabilità delle proprietà meccaniche della muratura, a differenza di altri materiali più omogenei, tipo l'acciaio. Comunque, risulta evidente come questa tecnica possa risultare molto utile e come possa essere efficacemente applicata nel rilievo di costruzioni storiche. Attualmente, tale metodologia permette di ottenere informazioni globali circa la struttura esaminata, in un modo assolutamente non distruttivo.

### 3.3 TECNICHE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

In campo ingegneristico sono sempre più usate le tecniche di analisi modale, infatti, anche se lo sviluppo nel mondo dell'informatica ha portato ad avere computer con prestazioni sempre più elevate, permettendo di realizzare modelli agli elementi finiti sempre più complessi per poter studiare le proprietà statiche e dinamiche delle strutture, accade sovente che le proprietà dinamiche 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, con ciò si intende che i campi di spostamento vengono approssimati attraverso funzioni di forma predefinite all'interno di ciascun elemento;
- Mentre le proprietà di massa e di 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, difatti, lo smorzamento non legato solamente alle proprietà dei materiali ma anche ad una serie di altri meccanismi difficili da modellare analiticamente (apertura e chiusura delle micro fessure, interazione con altri elementi non strutturali, ecc.);
- La geometria effettiva può essere diversa da quella considerata nel modello.

Per colmare le differenze tra struttura reale e modello agli elementi finiti è necessario ricorrere a tecniche sperimentali al fine di controllare i risultati del modello con quelli ottenuti dalle misure, le misure ottenute consentono di aggiornare il modello in modo da renderlo aderente alla realtà.

I test di identificazione dinamica si suddividono in due categorie in relazione alla conoscenza o meno della sollecitazione alla quale è soggetta la struttura:

- Tecniche *input-output* dove vengono misurate sia le forze eccitanti sia la risposta strutturale. La struttura viene sollecitata in uno o più punti, in seguito alla sollecitazione si misura la risposta strutturale. In questo caso l'analisi dinamica svolta prende il nome di Analisi dinamica Sperimentale (*Experimental Modal Analysis*, **EMA**): queste procedure consentono la determinazione delle proprietà dinamiche della struttura in termini di frequenze naturali, rapporti di smorzamento e forme modali, questi parametri serviranno per calibrare il modello della struttura. È inoltre possibile determinare i parametri modali della funzione risposta in frequenza del segnale di risposta al segnale di *input*.

- Tecniche *output-only* dove viene misurata la sola risposta del sistema. L'analisi modale può essere effettuata anche nel caso di eccitazione ambientale, la quale viene considerata rumore bianco, perciò l'*input* sulla struttura non è noto, in questo caso le tecniche di analisi modale prendono il nome di Analisi Modale Operazionale (*Operational Modal Analysis*, **OMA**). Le tecniche OMA portano ad ottenere gli stessi risultati delle tecniche EMA, con la differenza che risulta impossibile determinare i fattori di partecipazione modale non conoscendo l'*input*.

L'analisi modale sperimentale, basata sull'applicazione di un *input* noto alla struttura, risulta non facilmente applicabile alla maggior parte degli edifici, perciò si preferisce operare attraverso l'analisi modale operazionale, sfruttando il rumore ambientale per l'identificazione strutturale, evitando così il ricorso ad attrezzature particolare (quali vibrodine, martelli strumentali, eccitatori oleodinamici o elettrodinamici) che eccitino direttamente la struttura. Questo si tramuta in una serie di vantaggi:

- La prova è rapida ed economica, dato che non sono necessarie attrezzature per sollecitare la struttura;
- Le misure vengono effettuate nelle effettive condizioni operative della struttura, per cui i parametri dinamici ottenuti sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle reali condizioni di utilizzo;
- La prova non interferisce con l'operatività della struttura

La correttezza dei risultati forniti dall'OMA può, tuttavia, essere inficiata se al rumore bianco si sovrappone un'eccitazione non casuale.

## 3.4 ANALISI DEL SEGNALE

Il processamento dei segnali acquisiti è una fase fondamentale per l'elaborazione dei risultati nella quale è importante evitare errori nell'analisi dei dati per non alterare i risultati. A tal proposito si osserva che, normalmente, i segnali acquisiti, come accelerazione, spostamento o forze, sono contenute nel dominio del tempo, mentre i più comuni metodi di analisi elaborano i dati nel dominio delle frequenze.

Il primo passo nell'analisi del segnale è la conversione del segnale stesso, raccolto in forma analogica, in forma digitale, in questa maniera i dati raccolti vengono processati sotto forma di valori discreti e non di funzioni continue. Si osserva che un segnale può essere definito analogico o digitale nella seguente maniera:

- Segnale analogico: un segnale rappresentato da una funzione continua nel tempo, è un segnale analogo al segnale fisico che rappresenta;
- Segnale digitale: un segnale rappresentato da una sequenza di numeri, ognuno dei quali rappresenta il valore del segnale in un determinato istante di tempo (il segnale viene discretizzato).

In questa prima fase di conversione si possono verificare diversi tipi di problematiche insite nella modalità di acquisizione dei dati e nella modalità di trasformazione del segnale: tali problemi sono legati all'insorgenza degli errori di *aliasing* (errore nel definire l'intervallo di campionamento del segnale) e di *leakage* (legato alla lunghezza della time-history).

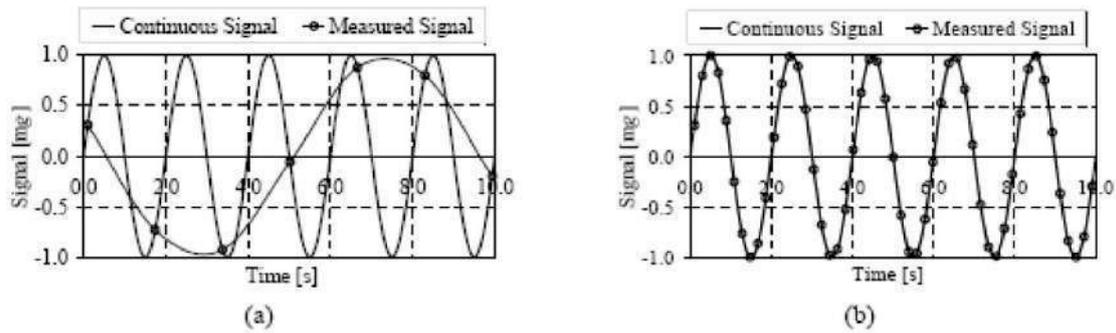


Figura 11 - Esempio di errore di aliasing: a) campionamento insufficiente; b) campionamento corretto

In generale, i metodi nel dominio delle frequenze tendono a fornire i migliori risultati quando nei dati campionati presente una vasta banda di frequenze o un ampio numero di modi oscillatori, mentre i metodi che operano numericamente nel dominio temporale portano a risultati più accurati quando il range di frequenze di interesse è limitato e il numero di modi da identificare è modesto.

Ciononostante i metodi nel dominio del tempo hanno il grande svantaggio di essere in grado di individuare solamente i modi che insistono all'interno del range di frequenze fissato a priori e non tengono in conto gli effetti dovuti ai modi esterni a tale range.

### 3.5 TEORIA DELLA DINAMICA DELLE STRUTTURE

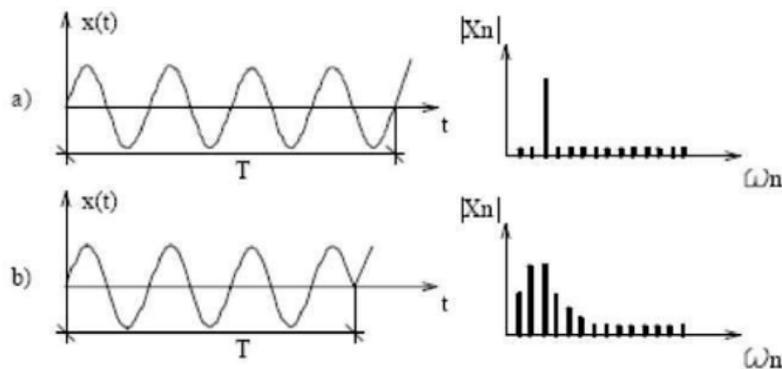


Figura 12- a) spettro reale; b) effetto leakage

Oltre alla prima grande classificazione dei metodi di identificazione tra quelli che lavorano nel dominio del tempo e delle frequenze, si possono effettuare altre classificazioni.

La prima riguarda la suddivisione in metodi diretti e metodi indiretti.

I primi sono basati sulla determinazione del sistema spaziale, cioè della matrice di equilibrio dinamico, dalla quale discende tutta la trattazione. Da questa, risolvendo un autoproblema, è possibile risalire ai parametri modali.

I secondi, invece, si basano sul modello modale, cioè sulla determinazione diretta dei parametri modali.

Un'altra classificazione possibile dei metodi di identificazione riguarda la quantità di modi che possono essere determinati. Nel caso in cui i modi siano molteplici, si ha una trattazione a più gradi di libertà (**MDOF**), mentre nel caso in cui si identifichi un unico modo, si ha una trattazione di un singolo grado di libertà (**SDOF**).

Negli algoritmi nel dominio del tempo si hanno unicamente metodi MDOF, mentre nel dominio delle frequenze sono possibili entrambe le procedure. È possibile svolgere un'analisi sulla base di un'unica FRF alla volta, cioè eccitando la struttura e misurandone la risposta su un unico punto della medesima; questa procedura è detta di tipo *single-input-single-output* (SISO). Esistono procedure per analizzare contemporaneamente più FRF, sotto l'eccitazione di un singolo punto della struttura, in questo caso si parla di metodi *single-input-multi-output* (SIMO). Ciononostante i metodi più diffusi sono quelli che prevedono l'impiego di più punti di eccitazione del sistema e più punti di rilevazione della risposta simultaneamente, essi sono definiti come metodi *multi-input-multi-output* (MIMO). Infine è possibile imbattersi, più raramente, in metodi che prevedono l'impiego di più sollecitazioni contemporanee, ma di un solo punto di rilevazione della risposta, e sono detti *multi-input-single-output* (MISO).

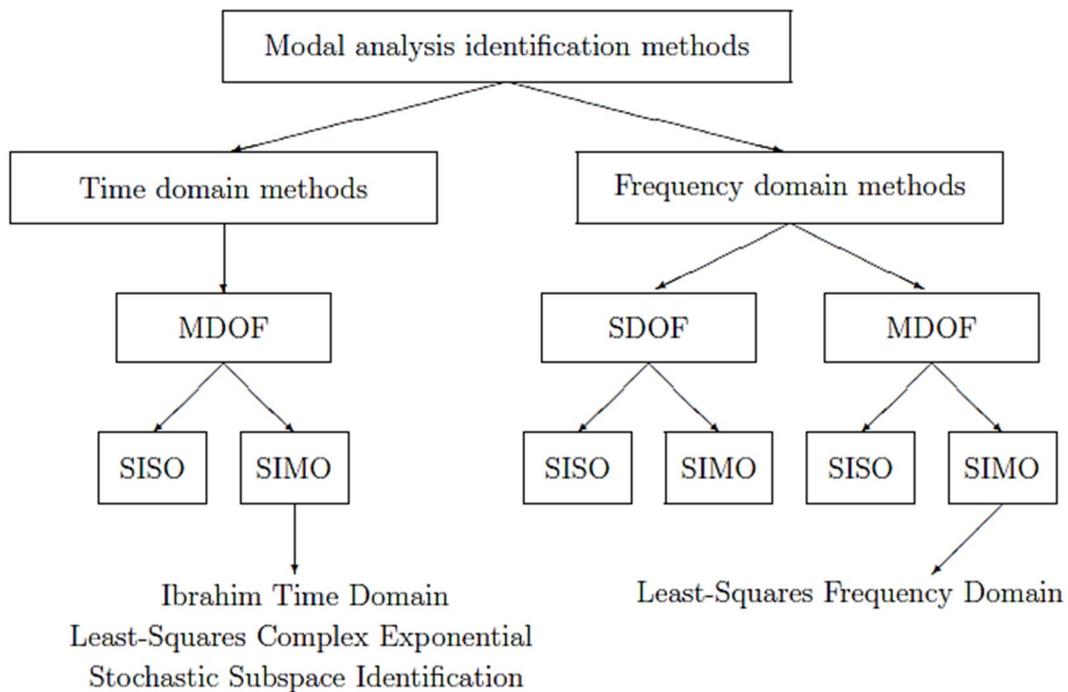


Figura 13 - Classificazione dei metodi di identificazione

## 3.6 MODELLO SPAZIALE DI UN SISTEMA

Il primo approccio alla dinamica delle strutture può avvenire con lo studio dei sistemi a un grado di libertà, cioè di un sistema SDOF (*single degree of freedom*).

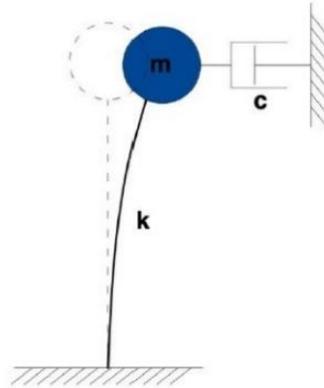


Figura 14 - Sistema smorzato SDOF

Questo tipo di modello è adatto non solo per descrivere il comportamento di un sistema costituito da un'unica massa concentrata, ma nello studio di alcuni problemi si può ricondurre a tale schematizzazione anche strutture più complesse che presentino un comportamento globale assimilabile a quello di un sistema ad un grado di libertà. Nella maggior parte dei casi è necessario studiare sistemi MDOF (*multiple degree of freedom*), cioè sistemi con più gradi di libertà. Si consideri pertanto un sistema meccanico discreto con  $N$  masse connesse tra loro attraverso molle e smorzatori:

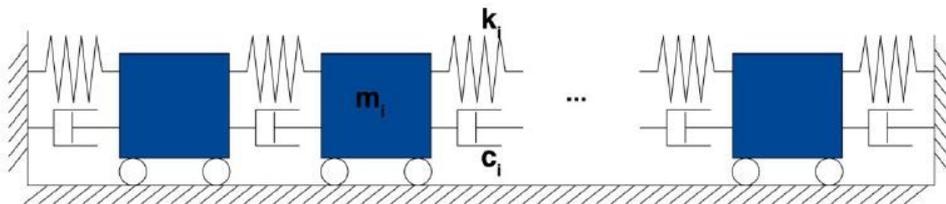


Figura 15 - Sistema smorzato MDOF

può essere descritto dal seguente sistema di equazioni differenziali del secondo ordine, ottenuto scrivendo l'equilibrio delle forze agenti sulle masse:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [\zeta]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(u(t), t)\} \quad (3.1)$$

in cui  $[M]$ ,  $[\zeta]$  e  $[K]$  rappresentano rispettivamente la matrice delle masse, la matrice degli smorzamenti e la matrice delle rigidezze; tali matrici hanno dimensioni  $(N \times N)$  e definiscono il cosiddetto *Modello Spaziale del sistema*;  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$  e  $u(t)$  sono vettori di dimensioni  $(N \times 1)$  e rappresentano rispettivamente le accelerazioni, le velocità e gli spostamenti di ognuna delle  $N$  masse;  $f(u(t), t)$  è il vettore della forzante del sistema ed ha dimensioni  $(N \times 1)$ .

Risolvendo un problema agli autovalori sul sistema indicato nella (3.1) è possibile passare dal *Modello Spaziale* al *Modello Modale* che consiste in matrici di dimensioni  $(N \times N)$  contenenti le  $N$  frequenze, gli  $N$  smorzamenti e le  $N$  forme modali.

Nel caso delle strutture dell'ingegneria civile si hanno sistemi aventi parametri distribuiti anziché concentrati; l'equazione (3.1) può rappresentare l'approssimazione ad elementi finiti del sistema con  $N$  gradi di libertà.

Tale equazione descrive fedelmente il comportamento di una struttura vibrante, ma non può essere usata direttamente con un modello FEM per diversi motivi:

- L'equazione prevede un tempo continuo, mentre le misure sperimentali sono acquisite con un certo tempo di campionamento; si ha pertanto una successione di dati relativa ad un tempo discreto;
- Non possono essere monitorati tutti i gradi di libertà e, nonostante spesso si ricorra a diversi set-up per l'acquisizione delle accelerazioni, il numero delle misure è sempre limitato (in genere una ventina di punti di misura);
- In aggiunta all'eccitazione  $f(t)$ , nella realtà è sempre presente del rumore che non si riesce a misurare.

Tuttavia, una adeguata scelta della posizione di un numero esiguo, ma sufficiente, di accelerometri permette di risalire con buona approssimazione al comportamento dinamico della struttura esaminata; inoltre, per quanto riguarda l'input, per i metodi identificativi *output only* non è necessario conoscere l'eccitazione perché si assume che il sistema sia eccitato da rumore bianco.

Infine è possibile, tramite opportune trasformazioni, passare da un sistema continuo nel tempo in un sistema discreto nel tempo. Un modo per tener conto di tutti questi aspetti è di trasformare l'equazione di equilibrio dinamico (4.1) in una forma più comoda rappresentata dal modello nello spazio delle fasi e discreto nel tempo.

### 3.6.1 MODELLO NELLO SPAZIO DELLE FASI

Si segue la trattazione tramite la quale è possibile passare dal sistema di equazioni del 2° ordine dell'espressione (3.1) ad un sistema di equazioni del 1° ordine. Questo approccio è alla base sia del metodo SSI. Si introducono le seguenti definizioni per poter effettuare alcune trasformazioni nella (3.1):

$$\{f(u(t), t)\} = [F]\{\delta(t)\} \quad (3.2)$$

nella quale compaiono la matrice  $[F]$ , di dimensioni  $(N \times m)$ , che descrive gli input nello spazio e il vettore  $\{\delta(t)\}$ , di dimensioni  $(m \times 1)$ , che descrive gli  $m$  input nel tempo; si definisce il vettore di stato di dimensioni  $(2N \times 1)$ :

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Si utilizzano inoltre le matrici  $[A']$  e  $[B']$ , di dimensioni  $(2N \times 2N)$ , e  $(2N \times m)$ , rispettivamente:

$$[A'] = \begin{bmatrix} 0 & I_{2N} \\ -[M][K]^{-1} & [M]^{-1}[\zeta] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[B'] = \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1}[\zeta] \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

L'equazione (3.1) diventa pertanto:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A']\{x(t)\} + [B']\{\delta(t)\} \quad (3.6)$$

Si sottolinea che il numero di elementi del vettore  $\{x(t)\}$  nello spazio delle fasi ha dimensioni doppie rispetto al numero di gradi di libertà del sistema descritto con il modello spaziale. Inoltre, come anticipato, non tutti i gradi di libertà sono misurati, ma le misure sono effettuate solo in  $l$  punti tramite accelerometri e trasduttori di velocità o spostamenti; si può pertanto definire l'equazione:

$$\{y(t)\} = [C_a]\{\ddot{u}(t)\} + [C_v]\{\dot{u}(t)\} + [C_d]\{u(t)\} \quad (3.7)$$

in cui  $\{y(t)\}$  è il vettore degli output di dimensioni  $(l \times 1)$  e le matrici  $[C_a]$ ,  $[C_v]$  e  $[C_d]$  sono le matrici di influenza degli output rispettivamente per accelerazioni, velocità e spostamenti; tali matrici hanno dimensioni  $(l \times 2N)$  e descrivono la relazione tra i vettori  $\{\ddot{u}(t)\}$ ,  $\{\dot{u}(t)\}$  e  $\{u(t)\}$  con il vettore delle misure  $\{y(t)\}$  e per questo contengono semplicemente i fattori di conversione tra unità fisiche (come misure in metri) e unità elettriche (ad esempio in volt). Tramite le relazioni:

$$[C] = [[C_d] - [C_a][M]^{-1}[K][C_v] - [C_a][M]^{-1}[\zeta]] \quad (3.8)$$

$$[D] = [C_a][M]^{-1}[F] \quad (3.9)$$

se si risolve la (3.1) cercando  $\{\ddot{u}(t)\}$  e lo si sostituisce nella (3.7) si ottiene:

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} + [D]\{\delta(t)\} \quad (3.10)$$

Le matrici  $[C]$  e  $[D]$  sono rispettivamente la matrice di output (di dimensioni e spostamenti; tali matrici hanno dimensioni  $(l \times 2N)$  e la matrice di trasmissione diretta (di dimensioni e spostamenti; tali matrici hanno dimensioni  $(l \times m)$ ). La matrice  $[D]$  si omette quando per le misure sperimentali non si utilizzano accelerometri. Le equazioni (3.6) e (3.10) costituiscono il modello nello spazio delle fasi di un sistema, continuo nel tempo:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A']\{x(t)\} + [B']\{\delta(t)\} \quad (3.11a)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} + [D]\{\delta(t)\} \quad (3.11b)$$

È necessario inoltre passare dal modello continuo nel tempo al modello discreto nel tempo, come si illustra nel prossimo paragrafo.

### 3.6.2 MODELLO DISCRETO NEL TEMPO

In fase sperimentale i dati vengono campionati, cioè non sono valutati ad ogni istante di tempo  $t \in \mathfrak{R}$ , ma sono disponibili ad istanti di tempo discreti distanti  $k \Delta t$ , con  $k \in \mathbf{N}$  e in cui  $\Delta t$  è il tempo di campionamento. Date le condizioni iniziali  $x(t_0)$  ad un istante  $t = t_0$ , la soluzione della (3.11a) porta all'espressione:

$$\{x(t)\} = e^{[A'](t-t_0)}\{x(t_0)\} + \int_{t_0}^t e^{[A'](t-t_0)}[B']\{\delta(\tau)\}d\tau \quad (3.12)$$

valida per ogni istante  $t$  successivo ad un istante iniziale  $t_0$ . Per dare una rappresentazione discreta della (3.12) è necessario considerare molti intervalli di tempo ugualmente suddivisi in intervalli costanti  $\Delta t$ . Sostituendo  $t = (k+1)\Delta t$  e  $t_0 = k\Delta t$  nella (3.12), si ha:

$$\{x((k+1)\Delta t)\} = e^{[A']\Delta t}\{x(k\Delta t)\} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{[A']((k+1)\Delta t - \tau)}[B']\{\delta(\tau)\}d\tau \quad (4.13)$$

Assumendo che l'input  $\{\delta(\tau)\}$  sia costante durante l'intervallo di tempo  $k\Delta t \div (k+1)\Delta t$  ed operando il cambio di variabile  $\tau' = (k+1)\Delta t - \tau$ , si ottiene:

$$\{x((k+1)\Delta t)\} = e^{[A']\Delta t}\{x(k\Delta t)\} + \left[ \int_0^{\Delta t} e^{[A']\tau'}d\tau [B'] \right] \{\delta(k\Delta t)\} \quad (4.14)$$

Per semplicità si introducono le seguenti notazioni che servono a descrivere completamente il sistema discreto nello spazio delle fasi:

$$[A] = e^{[A']\Delta t} \quad (4.15)$$

$$[B] = - \int_0^{\Delta t} e^{[A']\tau'} d\tau [B'] \quad (4.16)$$

$$x(k+1) = \{x((k+1)\Delta t)\} \quad (4.17)$$

$$\{\delta(k)\} = \{\delta(k\Delta t)\} \quad (4.18)$$

Così l'equazione (4.14) per un sistema discreto diventa:

$$x(k+1) = [A]\{x(k)\} + [B]\{\delta(k)\} \text{ per } k = 0,1,2,3 \dots \quad (4.19)$$

e la (3.11b) diventa:

$$\{y(k)\} = [C]\{x(k)\} + [D]\{\delta(k)\} \quad (4.20)$$

Si è trasformato un modello continuo nel tempo nella sua versione discreta nel tempo e quindi il sistema (3.11) diventa:

$$\begin{aligned} \{x(k+1)\} &= [A]\{x(k)\} + [B]\{\delta(k)\} \\ \{y(k)\} &= [C]\{x(k)\} + [D]\{\delta(k)\} \end{aligned} \quad (4.21)$$

## 3.7 MODEL UPDATING

I dati raccolti durante il monitoraggio, sia statico sia dinamico, possono essere utilizzati per calibrare ed aggiornare il modello numerico agli elementi finiti rappresentativo della struttura. Il *model updating* è quel processo di quantificazione della differenze tra i risultati di un'analisi su un modello agli elementi finiti e i dati sulla risposta misurati sulla struttura, per poi modificare i valori di input dei parametri inseriti nel modello al fine di ottenere un modello valido. Durante questo processo, i dati sperimentali vengono comparati con i risultati delle predizioni numeriche ottenute dal modello. La risposta dinamica viene mostrata sotto forma di spostamenti, danni e possibili meccanismi di collasso, poi viene comparata con i risultati numerici e il modello viene implementato fino ad ottenere risultati soddisfacenti. Gli aggiornamenti riguardano le proprietà dei materiali, la geometria o la morfologia degli elementi strutturali, la modellazione delle connessioni, l'influenza del terreno, le possibili interazioni con edifici adiacenti e la distribuzione del danno (in particolare l'influenza di grosse fessure locali o separazioni).

La validazione è il processo di determinazione del grado al quale un modello è un'accurata rappresentazione del mondo reale dal punti di vista di un previsto uso del modello.

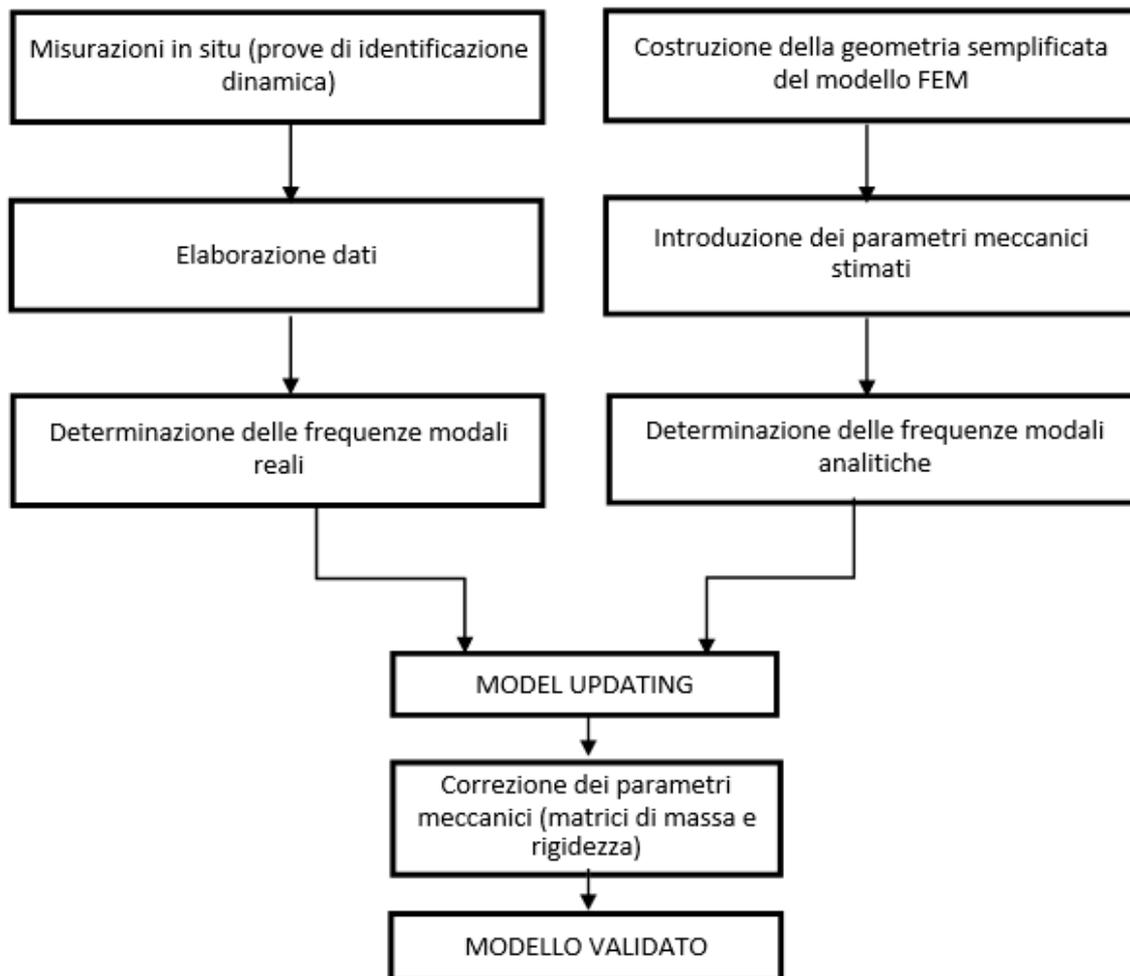


Figura 16 - Procedura adottata durante la correlazione tra test dinamici e il modello FEM

## CAPITOLO 4 –

# CASO STUDIO: CAMPANILE DEL DUOMO DI FOSSANO

### 4.1 INTRODUZIONE E GENERALITA'

La modellazione della muratura riveste un ruolo fondamentale per l'analisi in un programma di calcolo. E' molto difficile cogliere il comportamento reale delle costruzioni in muratura soprattutto per quanto riguarda quelle esistenti, a causa di molteplici fattori tra cui la forte disomogeneità del materiale, quindi modellare la schematizzazione più attinente alla realtà non è sempre facile.

Per questo, la definizione degli obiettivi, il riconoscimento delle problematiche della struttura, la comprensione della costruzione, costituiscono un presupposto imprescindibile per una modellazione "critica", finalizzata a scelte fondamentali della modellazione tra cui la scala spaziale, lo schema strutturale, il legame costitutivo e il tipo di analisi. Tali scelte, tra le quali esiste una forte interazione, denotano la problematica della modellazione strutturale: la mediazione tra l'accuratezza del modello e la necessità di sintesi. Questa seconda esigenza non è funzionale unicamente a minimizzare l'onere computazionale della modellazione, ma anche a rendere comprensibili e controllabili i suoi risultati. Il modello di calcolo deve quindi attuare una sintesi delle componenti della muratura e delle azioni agenti in modo da avere uno schema semplificato, ma attinente alla realtà. In particolare, deve riuscire a cogliere le sollecitazioni agenti sulla struttura (N, T, M) e le deformazioni conseguenti. Non necessariamente la modellazione deve essere il più precisa e dettagliata possibile, ciò dipende dal tipo di "scala" che ci prefiggiamo; non è in generale vero che un maggiore dettaglio porta a migliori e più precisi risultati: modelli molto complessi potrebbero portare anche a valutazioni erronee e fuorvianti, dato che ipotesi sbagliate portano sicuramente a risultati sbagliati. È questa la vera difficoltà nella modellazione, e in generale nel lavoro di un ingegnere, e cioè riuscire a cogliere gli aspetti importanti e trascurare quelli che invece non danno contributi significativi ai risultati cui si vuole arrivare, in poche parole la difficoltà sta nell'aver una buona capacità di sintesi.

## 4.2 MODELLO SPERIMENTALE E SOFTWARE UTILIZZATO

Il modello teorico dell'edificio oggetto di questo studio che è stato precedentemente elaborato e calibrato attraverso un idoneo algoritmo di " *Model Updating*", la cui peculiarità era quella di andare a ritrarre tutti i parametri prescelti del modello di calcolo (quali coefficienti di Poisson, moduli elastici, rigidità dei vincoli, masse..) in modo da avere una forte corrispondenza tra le caratteristiche misurate (come ad esempio frequenze proprie e auto deformate modali) e quelle simulate nel modello di calcolo, costituisce il punto di partenza per tutte le verifiche volte alla valutazione della sicurezza strutturale, dell'andamento del danneggiamento e deterioramento dei materiali e dell'efficacia degli interventi di adeguamento e miglioramento sismico.

Per svolgere questo lavoro di tesi è stato utilizzato il software commerciale ANSYS Mechanical APDL versione 17.2. Si tratta di un potente strumento di calcolo diffuso in tutto il mondo e adatto ad una grande varietà di campi disciplinari che consente di svolgere analisi strutturali e meccaniche in regime statico o dinamico, in campo lineare e non lineare, analisi termodinamiche, simulazioni elettromagnetiche, ed ancora fluidodinamiche, ecc.



## 4.3 DESCRIZIONE GENERALE DEL CAMPANILE

Il *Duomo di Fossano*, dedicato a *San Givonale*, patrono della città, è situato nel centro storico in *piazza Manfredi*. La chiesa fu progettata nel 1771 dal *Quarini*, mentre il campanile, di stile differente, è anteriore, contemporaneo alla precedente costruzione, databile tra il 1395 e il 1420. La cattedrale, che ha sostituito la precedente costruzione duecentesca, presenta una maestosa facciata nel tipico mattone piemontese e segue lo stile neoclassico.

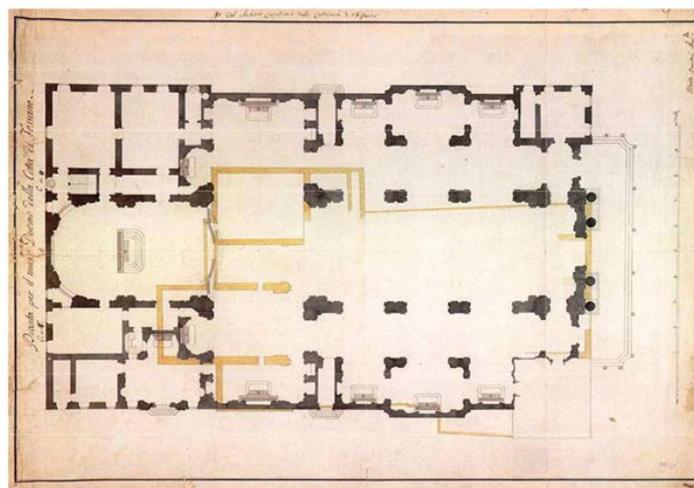
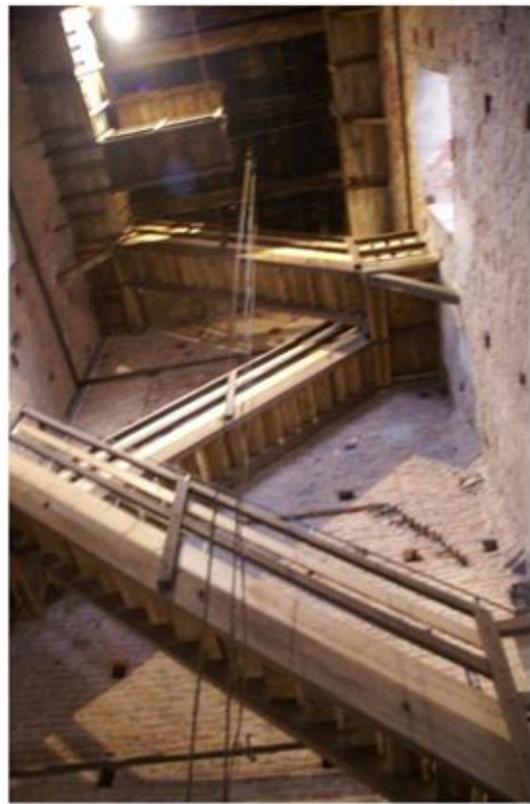


Figura 17 - Stralcio del progetto originale del Quarini (1771)

La torre campanaria oggetto dell'indagine ha base quadrata fino a quota 35 m dal piano campagna con pareti dallo spessore medio di 1,5 m, poiché in origine la scala era disposta in spessore. Tali passaggi interni alle pareti furono parzialmente chiusi a seguito di un primo intervento di restauro dei primi anni del '900, durante il quale le scale furono sostituite da una serie di rampe in legno all'interno della torre; inoltre furono disposti 3 ordini di tiranti in ferro alle quote di 14, 21 e 32 m, dal diametro medio di 6 cm. Oltre il livello delle serliane è presente la cella campanaria a pianta ottagonale, con pareti di spessore medio pari a 0,5 m; tale struttura si erge fino al colmo del tetto ligneo che tocca quota 46 m. La struttura presenta tre solai: il primo, in muratura, poggia sulla volta a crociera duecentesca, ed è posto a quota 9,9 m dal piano campagna; il secondo, posto a quota 28,2 m, è di tipo ligneo e poggia su travi in legno accoppiate a sezione circolare aventi diametro pari a circa 40 cm; l'ultimo solaio, a quota 35 m, presenta una stratigrafia singolare, ossia lo strato inferiore, in laterizio, poggia su un graticcio di travi ad arco, lo strato superiore invece è ligneo e all'estradosso si confonde con i solai presenti ai livelli inferiori.



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Prospetto principale della struttura da Via Roma; (b) Vista interna della torre campanaria con scala in legno a sostituzione della scala a spessore di muratura esterna.

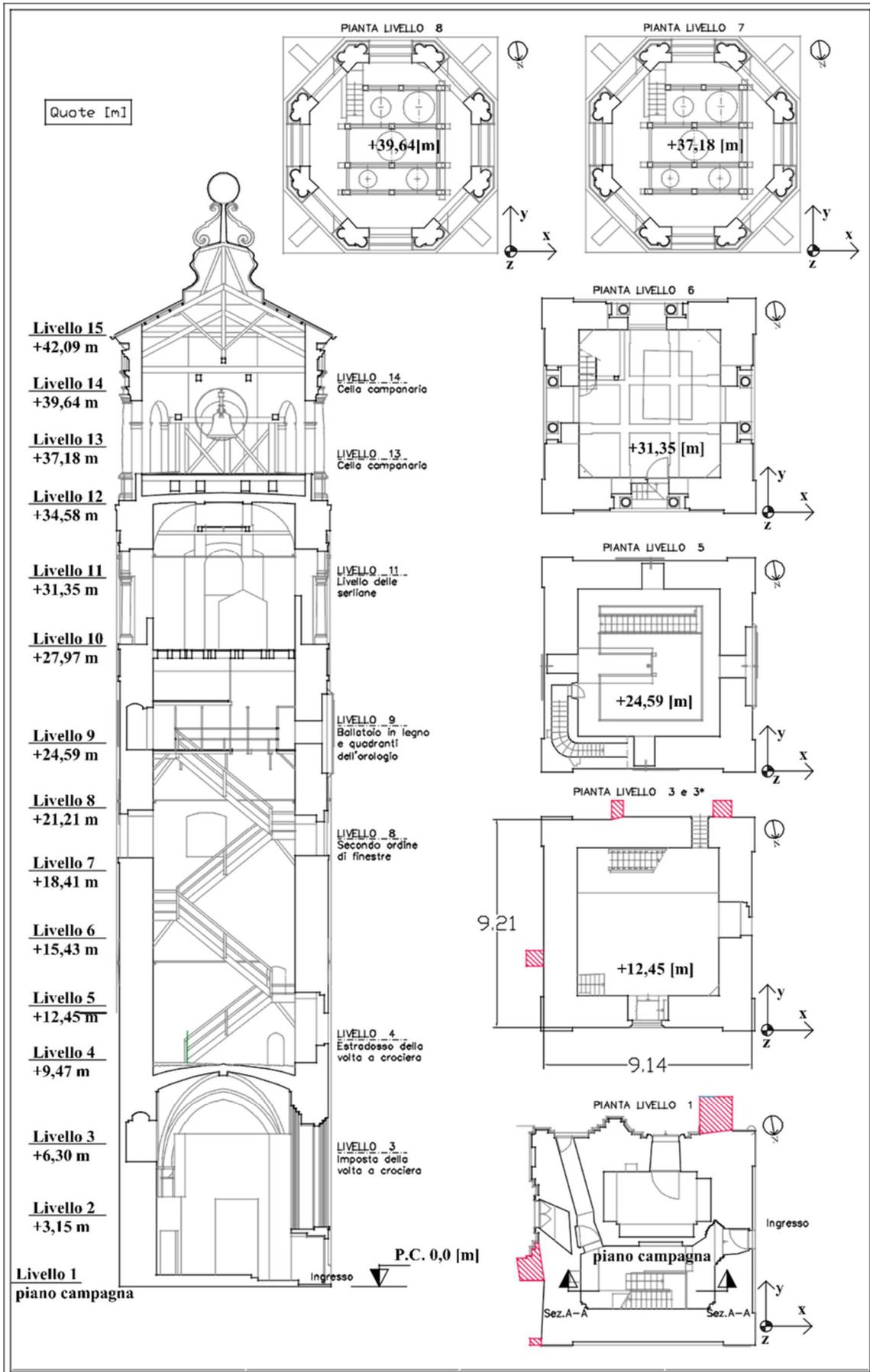


Figura 19 - Pianta e sezione trasversale della struttura del campanile

## 4.4 STATO DI CONSERVAZIONE ED INTERVENTI

L'edificio presenta un quadro fessurativo che evidenzia una diffusa presenza di lesioni generalmente ad andamento verticale, visibili all'interno, sulle murature a nudo. Sull'esterno esse sono occultate dall'intonaco, per altro staccato in più punti dal supporto murario. Certamente esse sono in gran parte (ma non solo) attribuibili al terremoto del 1887, a seguito del quale venne eseguito un intervento di consolidamento particolarmente efficace, come i carotaggi hanno potuto dimostrare. L'intervento di allora era consistito nel riempimento della scala interna alle murature d'ambito, scala che si spingeva fino in prossimità della cella campanaria, a mezzo di muratura di mattoni di ottima consistenza: l'opera, più che rendere continua la sezione portante (obbiettivo arduo da raggiungere per l'impossibilità di rendere omogeneo vecchio e nuovo tessuto murario e per la difficoltà di realizzare in numero sufficiente efficaci ammorsamenti tra la muratura che si andava realizzando e i sottili setti laterali della scala) è tuttavia servita come risorsa precauzionale in caso di cedimento della sezione muraria originale. In altre parole il dispositivo si configurava come un puntello pronto ad entrare in azione in caso di menomazione della struttura esistente. Inoltre il campanile venne dotato di alcuni anelli di cerchiaggio costituiti da tiranti metallici di diametro circa 60 mm, inseriti a filo delle murature interne del campanile, intestati con capochiavi nelle zone angolari esterne del campanile. Lo scopo di questo intervento era quello di contrastare l'allargamento delle fessure presenti, migliorando il comportamento d'insieme, soprattutto in vista di future azioni orizzontali dovute a terremoti. Col passare degli anni il beneficio si è protratto anche nei confronti delle sempre crescenti vibrazioni del traffico veicolare.

L'ultimo intervento risalente al 2012, a seguito di un ulteriore sviluppo di fessure verticali sui paramenti del campanile, prevede, in attesa di effettuare un miglioramento permanente, la messa in sicurezza provvisoria delle pareti perimetrali mediante cerchiaggio costituito da 11 ordini di tiranti in acciaio posti sia sull'esterno che all'interno dell'edificio (si veda figura successiva).

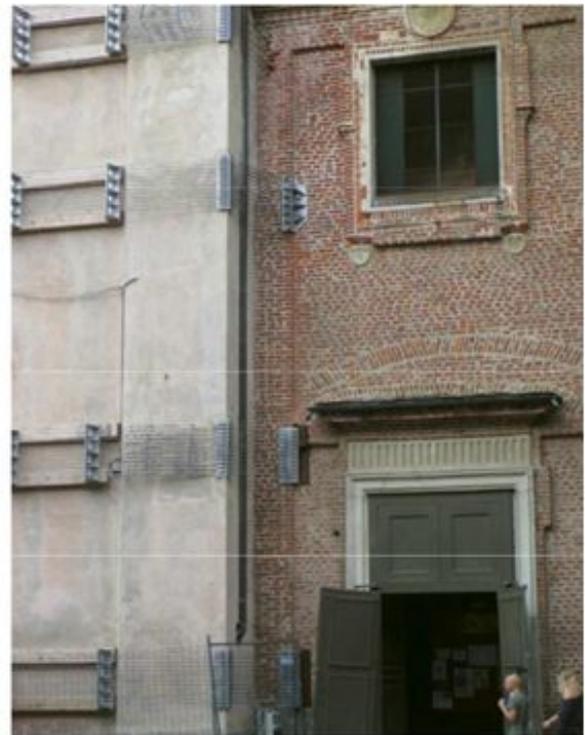


Figura 20 - Stato attuale con intervento di cerchiatura esterna della struttura

## 4.5 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI

### 4.5.1 PARAMETRI MECCANICI DELLA MURATURA

L'esame dei carotaggi (figura seguente) denota nel migliore dei casi una muratura di modeste caratteristiche meccaniche (essenzialmente al piano terra) e scadente nella parte centrale del campanile fin sotto l'impalcato del piano della campane. Sulla base dei dati bibliografici ed, in particolare delle sperimentazioni condotte dal prof. G. Pistone su murature analoghe per sito geografico, epoca di costruzione e soprattutto analogia dei materiali costituenti e del solido murario nel suo complesso, la resistenza caratteristica attesa viene individuata nei seguenti valori:

- Tratto tra piano terreno e volta ogivale: 2.00 MPa;
- Tratto tra volta ogivale e piano delle campane: 0.90 MPa.

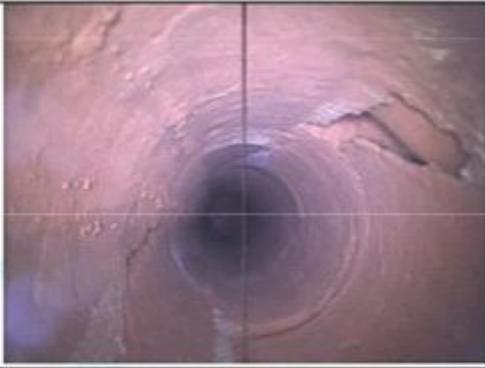
FOSSANO BELL TOWER			
LEVEL	COMPRESSIVE STRENGTH [MPa]		
0	2.00		
1	0.90		
2	0.90		

Figura 21 - Particolare dei carotaggi effettuati sulla muratura del campanile

Inoltre i valori dei moduli elastici assunti nell'analisi strutturale, corrispondono a quelli ottenuti dall'updating del modello agli elementi finiti (raffigurato in seguito) sulla base dell'identificazione dinamica.

Nel modello sono state definite 4 sezioni:

- Livello 0 si estende dal piano campagna sino ad un'altezza di 9,47 metri;
- Livello 1 da 9,47 m a 21,21 metri;
- Livello 2 da 21,21 m a 34,58 metri;
- Cella campanaria da 34,58 a 42,09 metri.

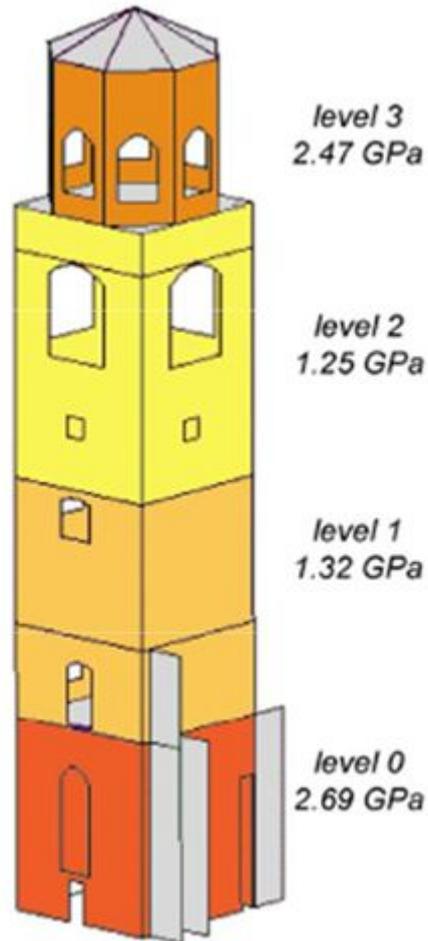


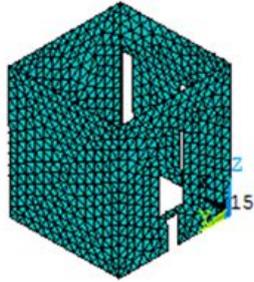
Figura 22 - Valori dei moduli elastici assunti nel modello agli elementi finiti

Tabella 1 - Parametri di rigidezza della struttura ottenuti dal modello agli elementi finiti updatedo

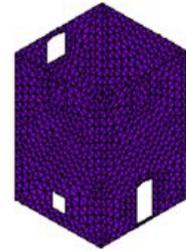
Materiale	Elemento	Modulo di Young [Mpa]	Coefficiente di Poisson [-]
1	Muratura livello 0	2690	0,3
2	Muratura livello 1	1320	0,3
3	Muratura livello 2	1250	0,3
4	Muratura livello 3	2470	0,3
5	Setti di collegamento in direzione X	500	0,3
6	Setti di collegamento in direzione Y	500	0,3

Di seguito si raffigurano i macroelementi in cui è stata suddivisa la struttura.

Ognuno di essi è stato caratterizzato da una differente tipologia di materiale ottimizzata in modo tale da massimizzare l'affinità tra le forme e le frequenze modali del modello numerico e quelle identificate.



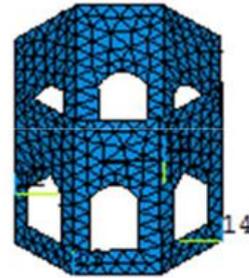
*Muratura liv. 0 - Materiale 1*



*Muratura liv. 1 - Materiale 2*



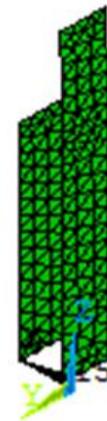
*Muratura liv. 2 - Materiale 3*



*Muratura liv. 3 - Materiale 4*



*Setti di collegamento in X - Materiale 5*



*Setti di collegamento in Y- Materiale 6*

La disponibilità di un modello ad elementi finiti tarato in base alle prove sperimentali permette di effettuare valutazioni del comportamento strutturale. Tale analisi consentirà di evidenziare le carenze costruttive presenti nel fabbricato e, conseguentemente, di definire al meglio gli interventi di miglioramento o di adeguamento della struttura.

La modellazione del campanile è stata effettuata con ANSYS, tramite gli elementi di cui in seguito viene riportata una breve descrizione delle loro caratteristiche, tratta dalle linee guida del software ANSYS:

- SHELL 281: è una versione recente di elementi piani bidimensionali che supporta anche deformazioni in campo plastico. È una tipologia adatta per analizzare gusci moderatamente spessi. L'elemento shell 281 ha otto nodi con 6 gradi di libertà per ognuno dei quali sono possibili traslazioni e rotazioni lungo e attorno agli assi X, Y, Z (quando viene utilizzata l'opzione "membrana", l'elemento ha gradi di libertà solo traslazionali). Con tale tipologia di elemento sono possibili sia calcoli lineari che non lineari. Inoltre possono essere utilizzati per applicazioni che descrivono strati con differenti spessori e proprietà meccaniche. I diversi layer e i loro spessori possono essere definiti sia attraverso le "Real constant" che tramite le "Section properties".

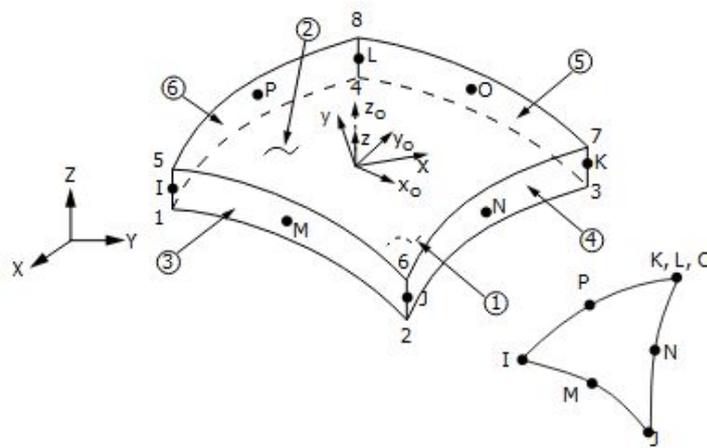


Figura 23 - Geometria Elemento shell281 (raffigurata anche la triangular option, non raccomandata)

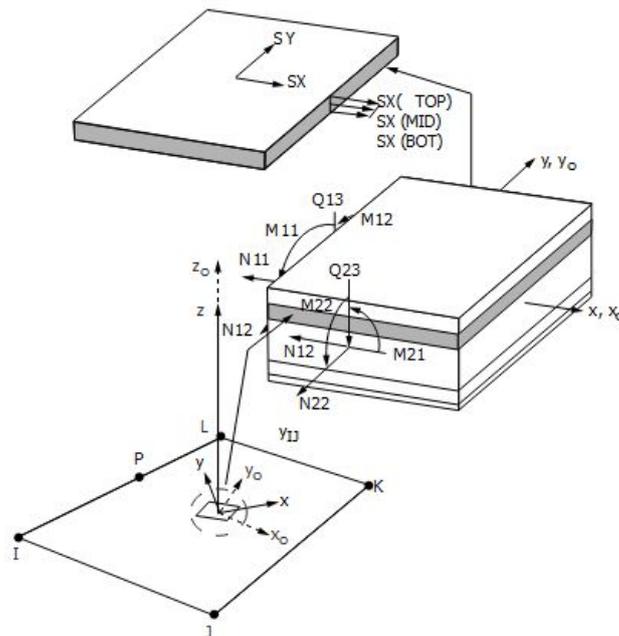


Figura 24 - Stress Output dell'elemento shell281

Al fine di rendere più comprensibili e intuitivi i risultati estrapolati dalle analisi, si è scelto di utilizzare una meshatura di tipo quadrangolare.

Durante l'analisi modale, avere una meshatura di tipo triangolare si è dimostrata utile al fine dell'ottenimento di risultati maggiormente dettagliati riguardo forme modali e frequenze proprie della struttura, ma nella fase di estrapolazione dei risultati in termini di sollecitazioni, avere delle mesh di questo tipo, avrebbe reso particolarmente difficile l'interpretazione dei risultati essendo gli output riferiti agli assi globali del workplane di Ansys. Effettuando perciò una meshatura quadrangolare, e con una conseguente creazione di un sistema di riferimento locale concorde con quello globale (attraverso il comando ESYS) è stato possibile orientare i vari elementi shell secondo una precisa direzione in modo da avere relativi versi e assi concordi tra di loro. Questo rende possibile la distinzione in asse verticale e orizzontale degli elementi che restano invariati su tutte le facciate della struttura.

- LINK180: è un elemento monoassiale (asta) che può essere utilizzato in una varietà di applicazioni di ingegneria, quali ad esempio travi, catene, capriate, molle. Esso possiede tre gradi di libertà per ogni nodo. Plasticità, creep, rotazione, grande capacità di deformazione sono caratteristiche incluse nelle possibili azioni dell'elemento. Ciò rende questo elemento adattabile sia ad analisi di tipo lineare che analisi non lineari, attraverso l'assegnazione delle opportune caratteristiche al materiale costituente.

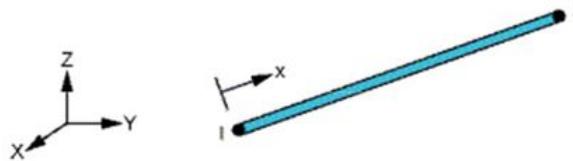


Figura 25 - Geometria dell'elemento Link180

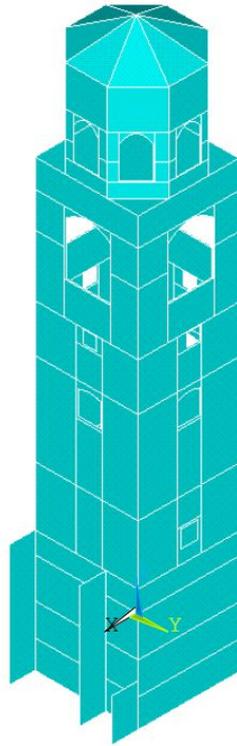


Figura 26 - Vista assonometrica del campanile (ANSYS)

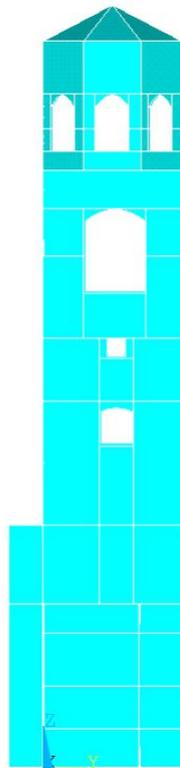


Figura 27 - Vista laterale del campanile (ANSYS)

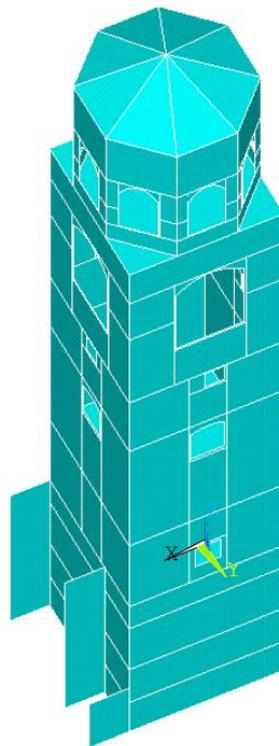


Figura 28 - Vista obliqua del campanile (ANSYS)

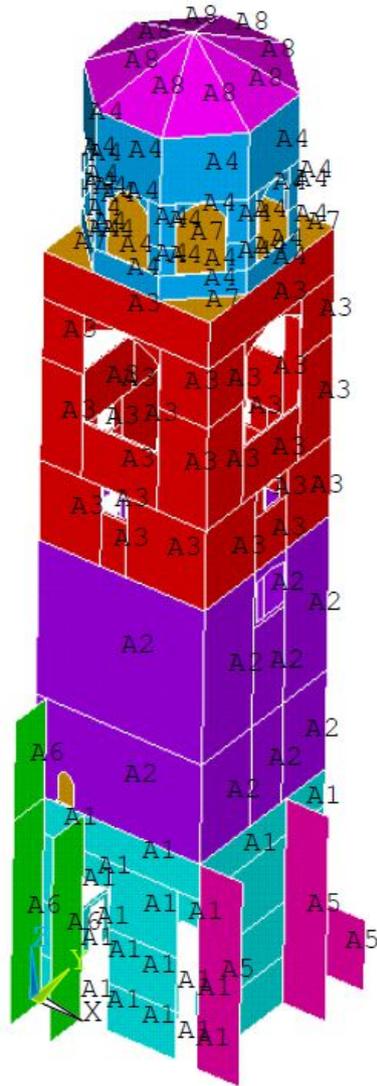


Figura 29 - - Suddivisione a colori dei macroelementi con differenti caratteristiche di modulo elastico

Nella realizzazione della mesh sull'intero modello, si è cercato di far coincidere i nodi degli elementi adiacenti per garantire la continuità nella discretizzazione degli elementi.

Ad esempio, ove possibile, è stato dato lo stesso numero di divisioni nelle linee di interfaccia tra un elemento strutturale e l'altro, mentre in alcuni casi è stato utilizzato il comando di Ansys "NUMMRG", facendo coincidere i nodi sfalsati secondo una prefissata tolleranza.

Questi aspetti rappresentano un requisito fondamentale per qualsiasi tipo di modellazione ad elementi finiti, prescindendo dal software di calcolo.

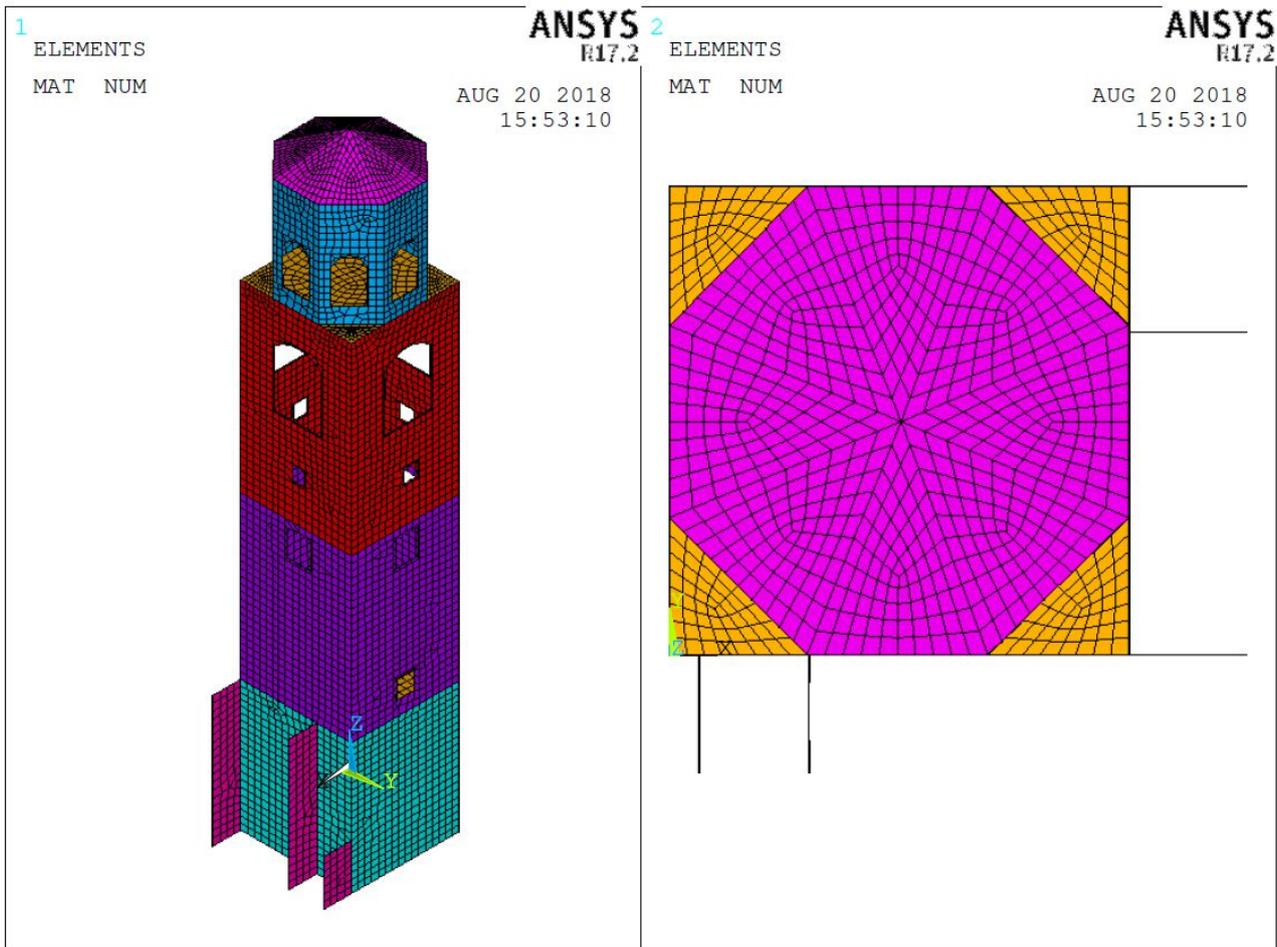


Figura 30 - Meshatura del campanile

## 4.6 ANALISI MODALE E IDENTIFICAZIONE DEI MODI SIGNIFICATIVI

Per identificare la risposta della struttura soggetta ad azioni dinamiche è stata effettuata in ANSYS l'analisi modale, estraendo i primi 10 modi di vibrazione.

A partire dalle forme modali sarà possibile eseguire le prime considerazioni sul posizionamento degli accelerometri, in funzione degli spostamenti più rilevanti della struttura.

Nelle figure e tabelle seguenti vengono riportati i risultati dell'analisi modale.

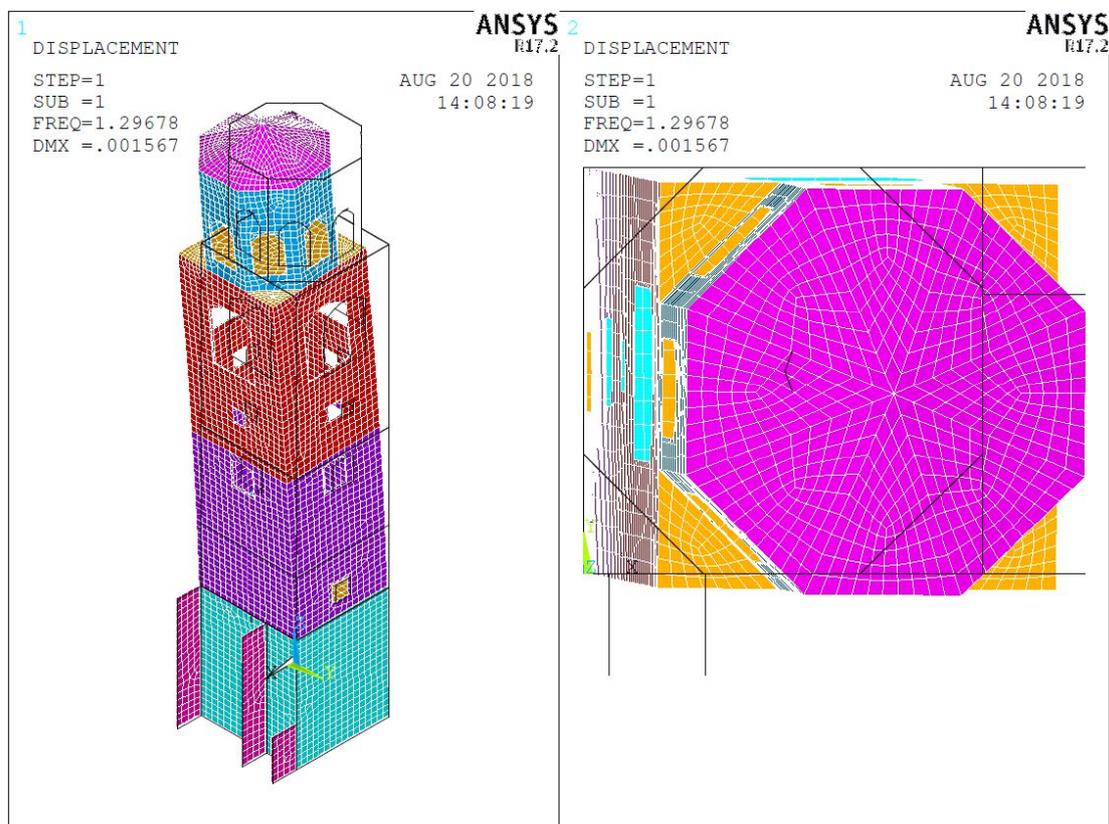


Figura 31 - 1° modo di vibrazione

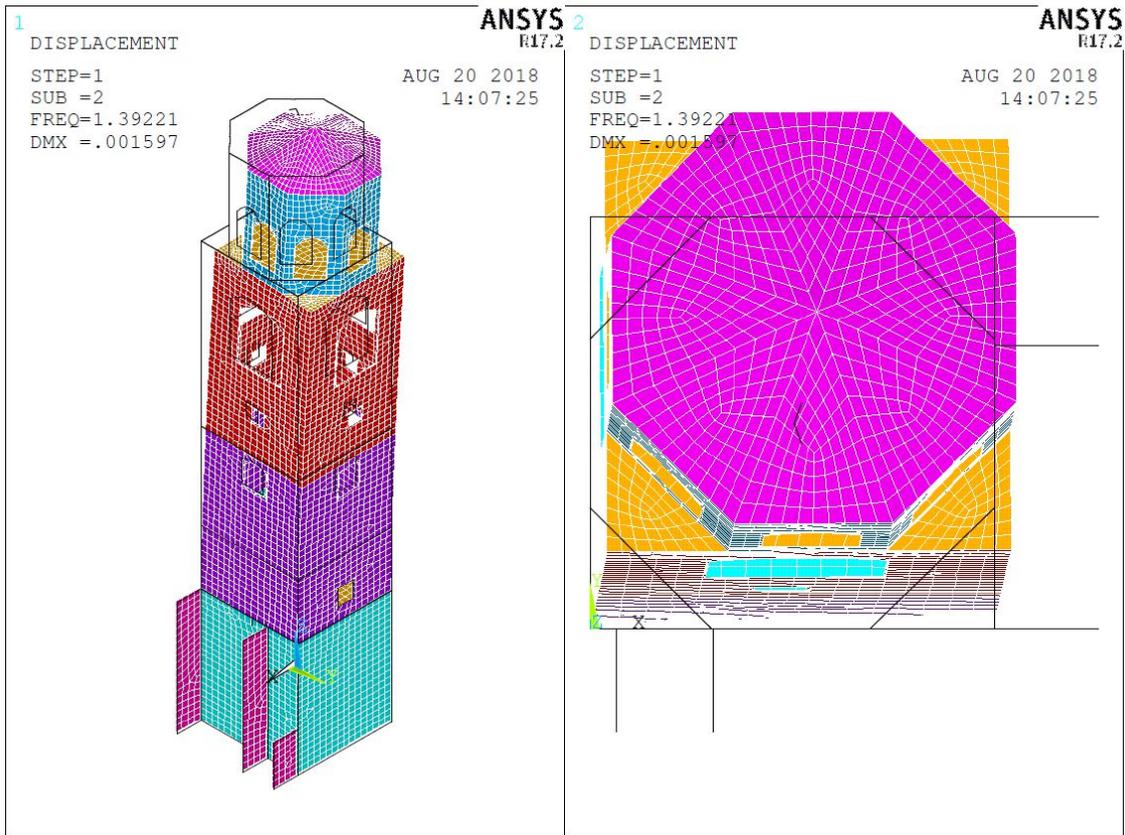


Figura 32 - 2° modo di vibrazione

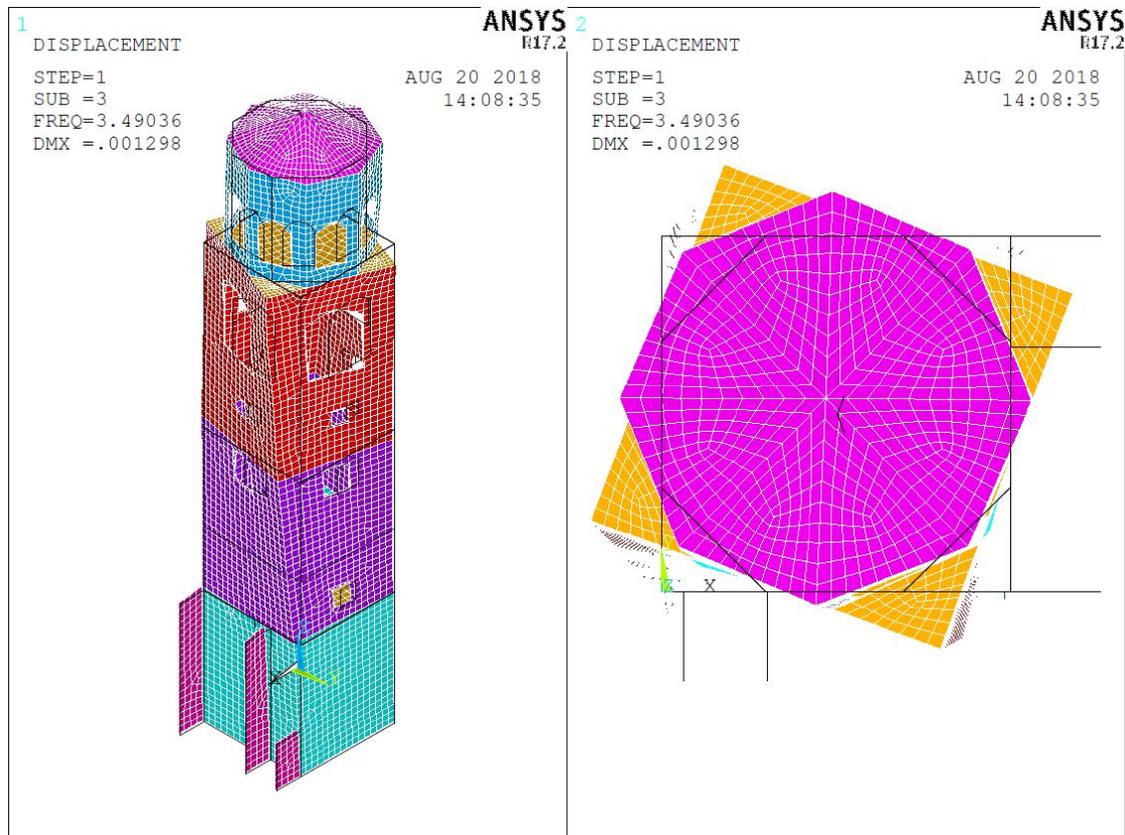


Figura 33 - 3° modo di vibrazione

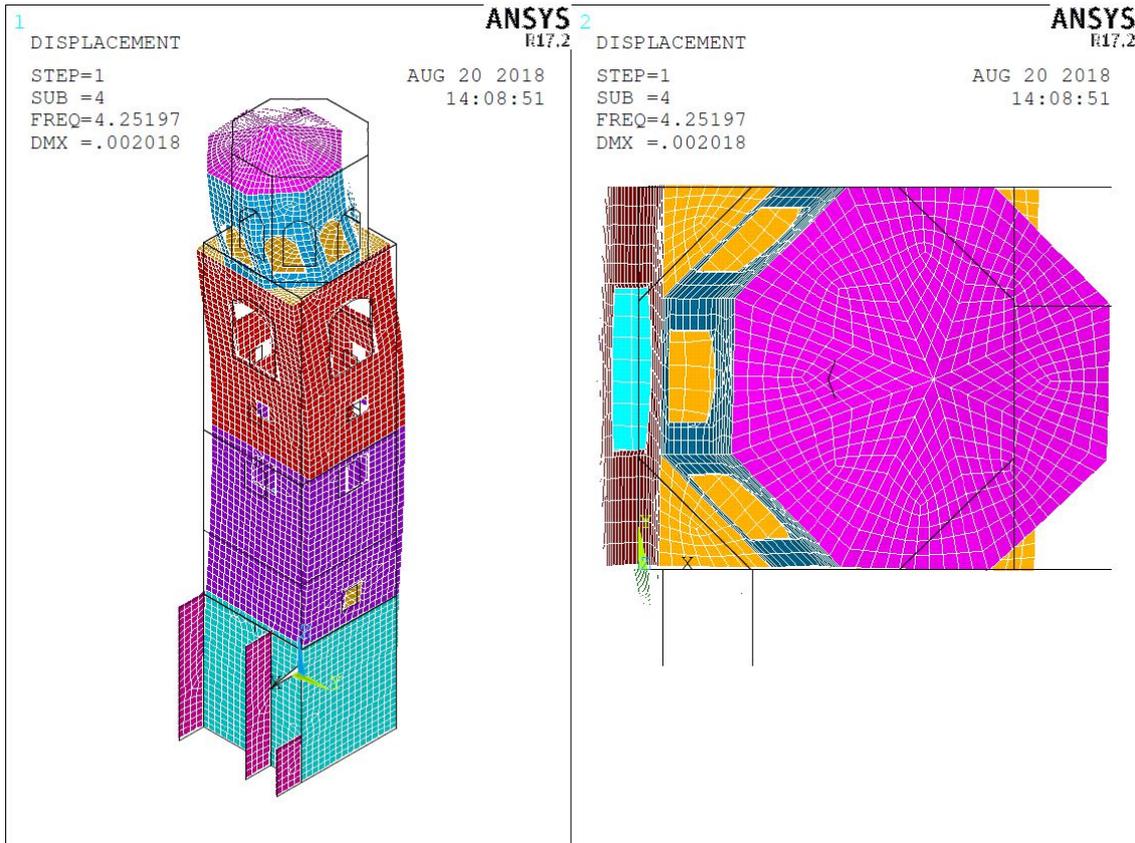


Figura 34 - 4° modo di vibrazione

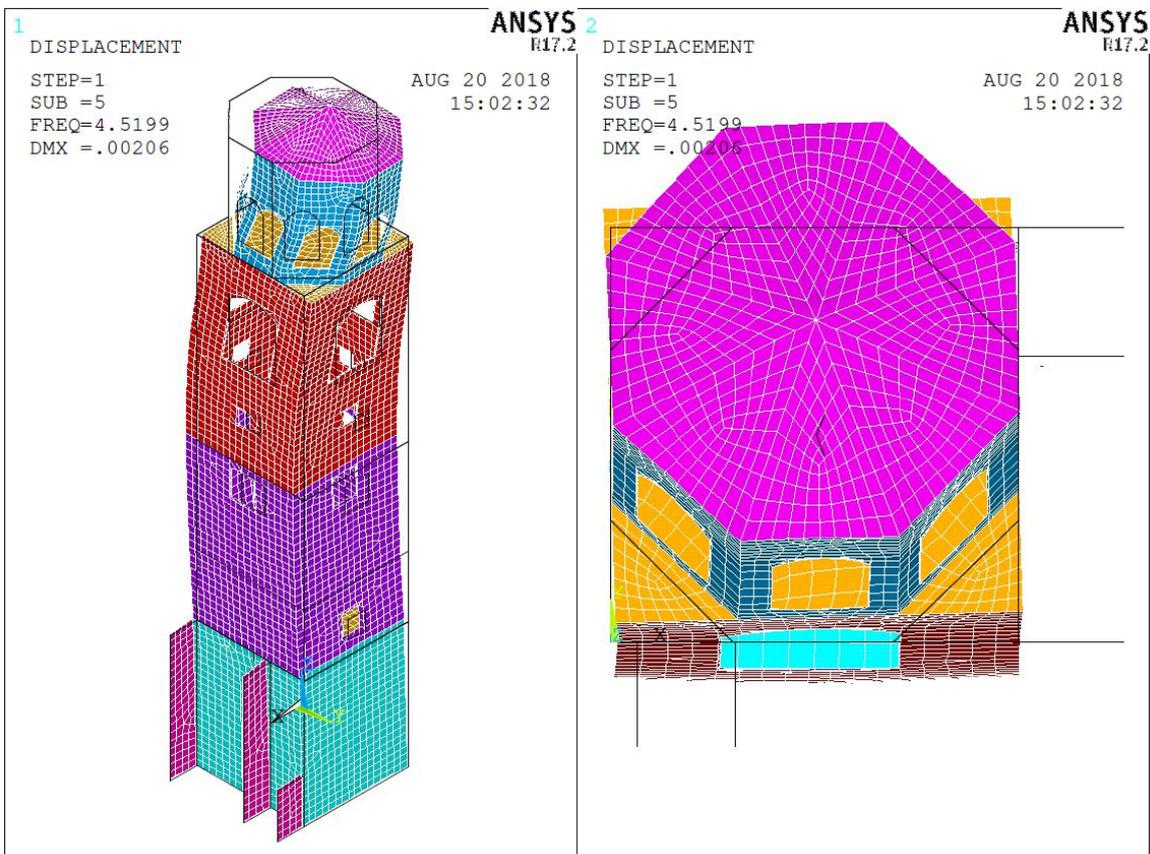


Figura 35 - 5° modo di vibrazione

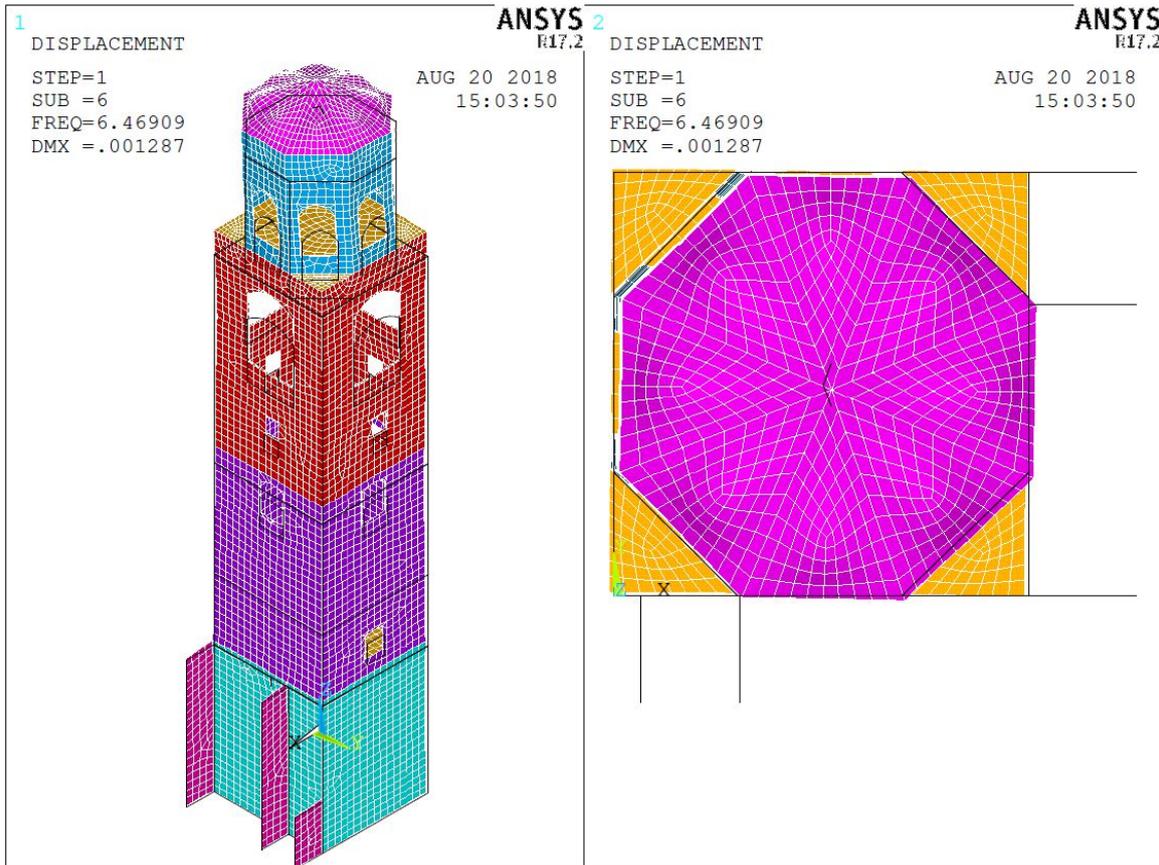


Figura 36 - 6° modo di vibrazione

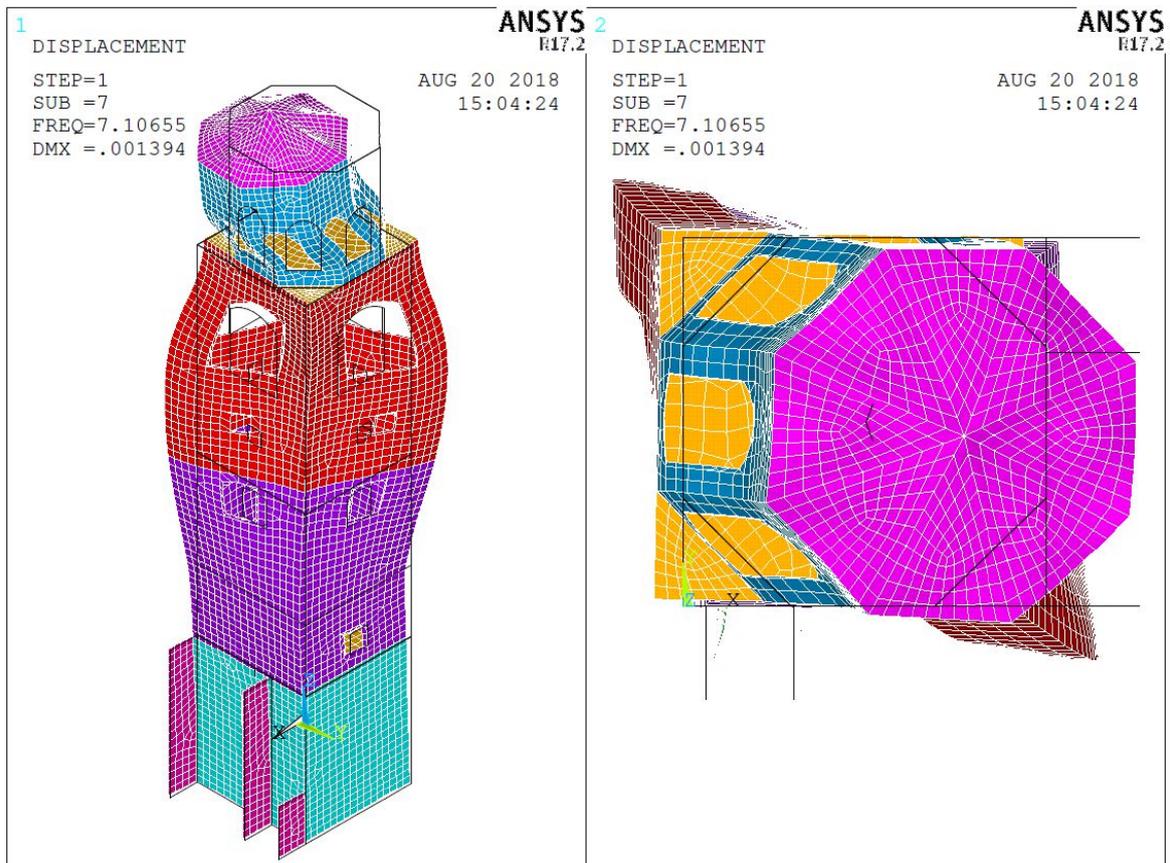


Figura 36 - 7° modo di vibrazione

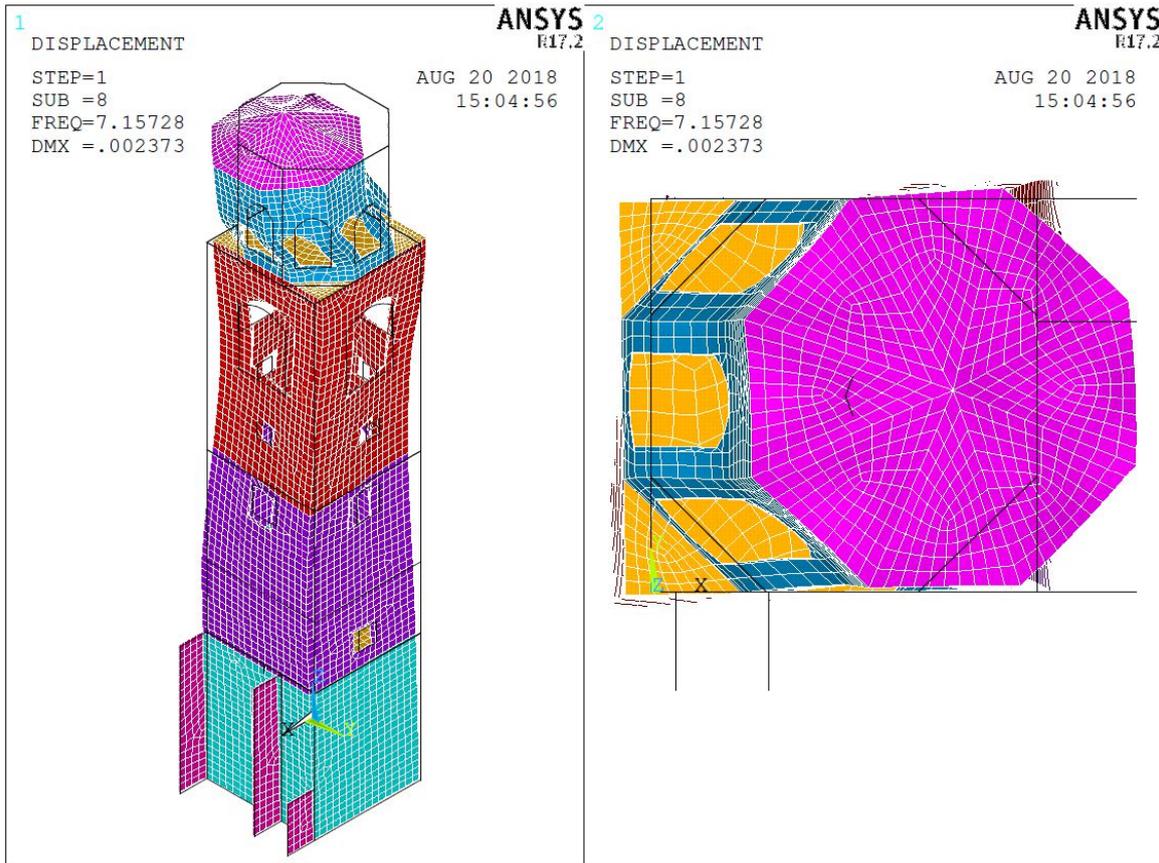


Figura 37 - 8° modo di vibrazione

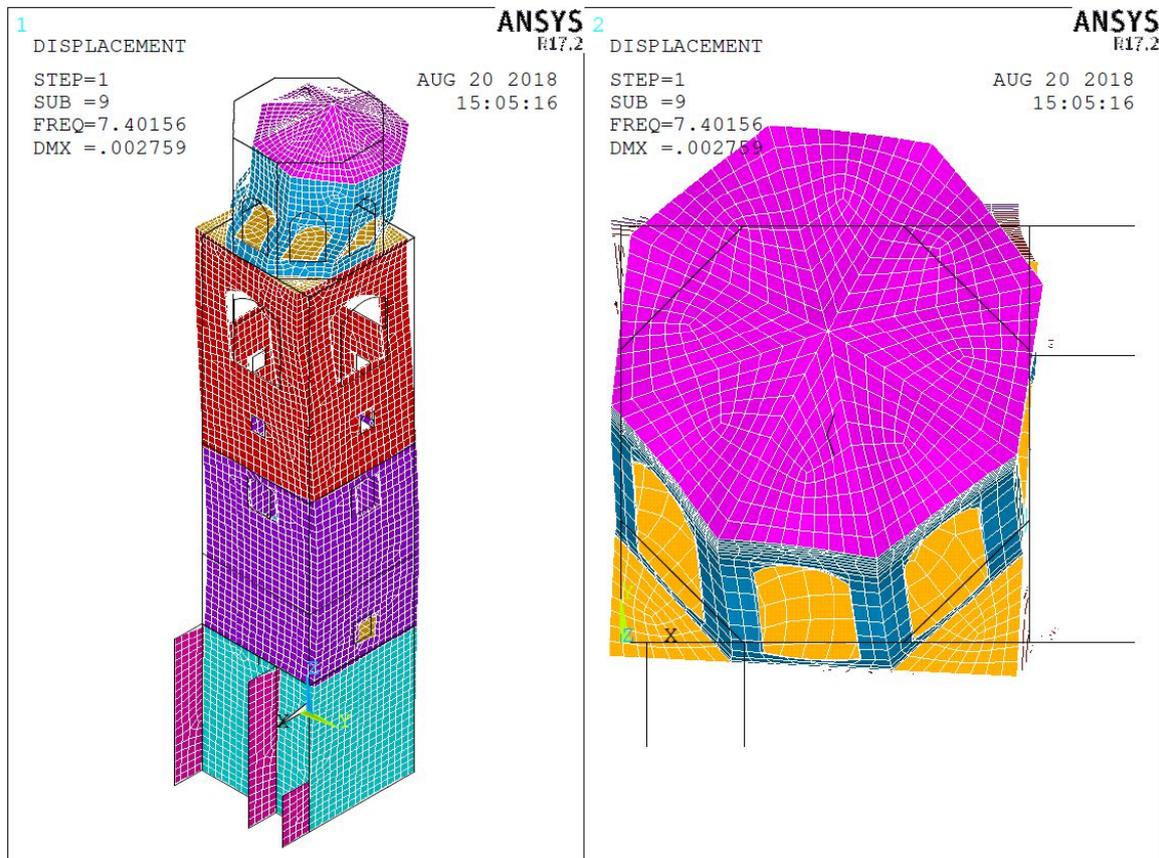


Figura 38 - 9° modo di vibrazione

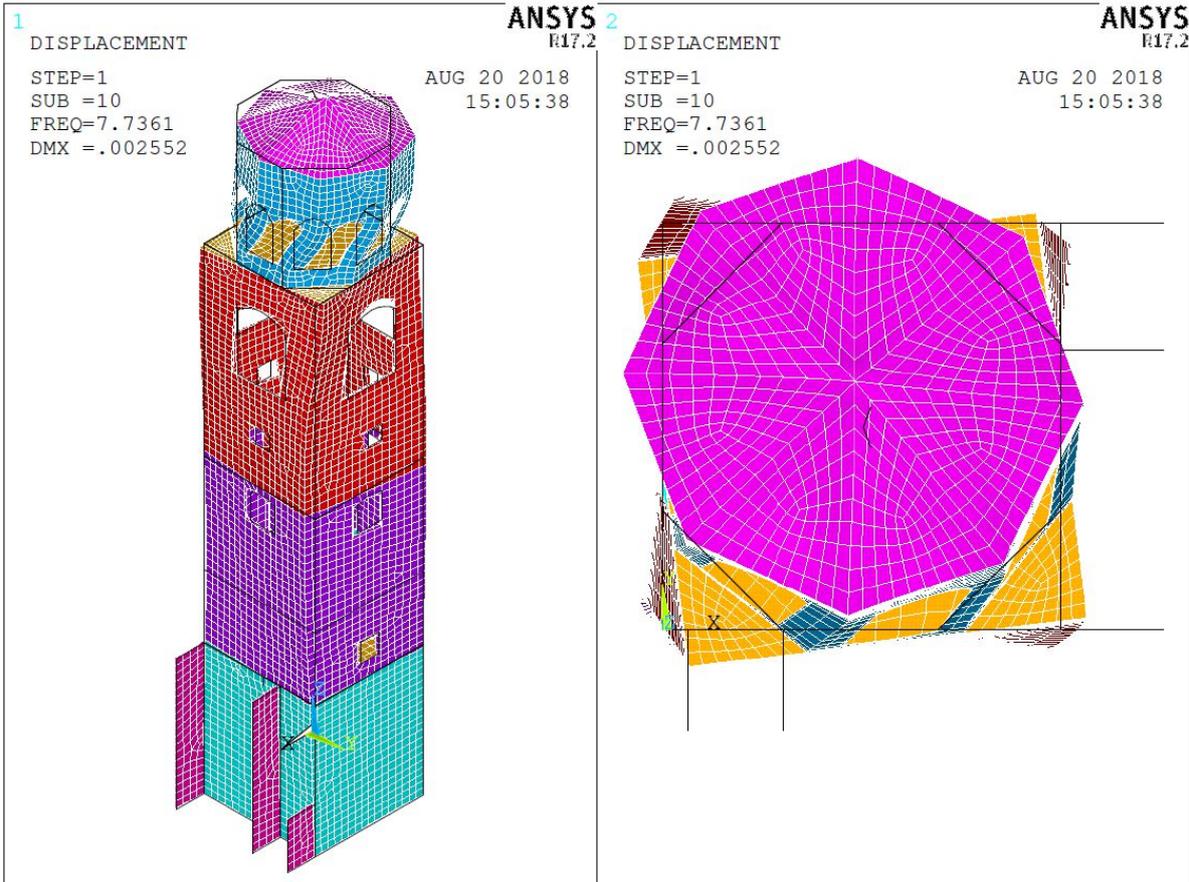


Figura 39 - 10° modo di vibrazione

I valori di partecipazione modale relativi all'analisi modale della torre nelle varie direzioni sono sotto riportati in tabelle (l'ultima colonna rappresenta la frazione di massa mobilitata da ogni singolo modo di vibrare, utile per definire i modi principali):

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - X DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS	
1	1,297	0,771	1250,5	1,000	1,6E+06	1,0E-06	4,4E-01	1,0E-06
2	1,392	0,718	274,3	0,219	7,5E+04	5,1E-06	2,1E-02	4,0E-06
3	3,490	0,287	15,4	0,012	2,4E+02	5,4E-06	6,7E-05	3,7E-07
4	4,252	0,235	-888,0	0,710	7,9E+05	5,6E-06	2,2E-01	1,8E-07
5	4,520	0,221	-20,1	0,016	4,1E+02	8,1E-05	1,1E-04	7,5E-05
6	6,469	0,155	0,3	0,000	7,5E-02	2,5E-01	2,1E-08	2,5E-01
7	7,107	0,141	225,2	0,180	5,1E+04	2,6E-01	1,4E-02	1,4E-02
8	7,157	0,140	382,8	0,306	1,5E+05	6,2E-01	4,1E-02	3,6E-01
9	7,402	0,135	33,0	0,026	1,1E+03	6,2E-01	3,1E-04	6,5E-04
10	7,736	0,129	-45,6	0,036	2,1E+03	6,2E-01	5,9E-04	1,2E-05

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - Y DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS	
1	1,297	0,771	-275,8	0,226	7,6E+04	2,7E-02	2,1E-02	2,7E-02
2	1,392	0,718	1219,1	1,000	1,5E+06	5,5E-01	4,2E-01	5,2E-01
3	3,490	0,287	-69,2	0,057	4,8E+03	5,5E-01	1,4E-03	1,7E-03
4	4,252	0,235	-2,0	0,002	4,0E+00	5,5E-01	1,1E-06	2,0E-06
5	4,520	0,221	-878,9	0,721	7,7E+05	8,2E-01	2,2E-01	2,7E-01
6	6,469	0,155	-6,0	0,005	3,6E+01	8,2E-01	1,0E-05	1,3E-05
7	7,107	0,141	-21,7	0,018	4,7E+02	8,2E-01	1,3E-04	1,6E-04
8	7,157	0,140	18,0	0,015	3,2E+02	8,2E-01	9,2E-05	1,1E-04
9	7,402	0,135	457,5	0,375	2,1E+05	8,9E-01	5,9E-02	7,3E-02
10	7,736	0,129	163,2	0,134	2,7E+04	9,0E-01	7,5E-03	9,3E-03

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - Z DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS	
1	1,297	0,771	11,1	0,007	1,2E+02	5,2E-05	3,4E-05	5,2E-05
2	1,392	0,718	-7,0	0,005	5,0E+01	7,3E-05	1,4E-05	2,1E-05
3	3,490	0,287	-10,6	0,007	1,1E+02	1,2E-04	3,2E-05	4,8E-05
4	4,252	0,235	-24,4	0,016	5,9E+02	3,7E-04	1,7E-04	2,5E-04
5	4,520	0,221	17,4	0,011	3,0E+02	5,0E-04	8,6E-05	1,3E-04
6	6,469	0,155	1.534,0	1,000	2,4E+06	1,0E+00	6,6E-01	1,0E+00
7	7,107	0,141	-13,2	0,009	1,8E+02	1,0E+00	4,9E-05	7,4E-05
8	7,157	0,140	-43,6	0,028	1,9E+03	1,0E+00	5,4E-04	8,0E-04
9	7,402	0,135	19,3	0,013	3,7E+02	1,0E+00	1,1E-04	1,6E-04
10	7,736	0,129	42,4	0,028	1,8E+03	1,0E+00	5,1E-04	7,6E-04

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTX DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATIO N FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION		
1	1,297	0,771	7819,2	0,223	6,1E+07	4,2E-02	4,2E-02	
2	1,392	0,718	-35085,0	1,000	1,2E+09	8,8E-01	8,4E-01	
3	3,490	0,287	30,3	0,001	9,2E+02	8,8E-01	0,0E+00	
4	4,252	0,235	-67,2	0,002	4,5E+03	8,8E-01	3,0E-06	
5	4,520	0,221	10365,0	0,295	1,1E+08	9,5E-01	7,3E-02	
6	6,469	0,155	5945,9	0,169	3,5E+07	9,8E-01	2,4E-02	
7	7,107	0,141	104,3	0,003	1,1E+04	9,8E-01	8,0E-06	
8	7,157	0,140	-316,1	0,009	1,0E+05	9,8E-01	6,8E-05	
9	7,402	0,135	-3869,8	0,110	1,5E+07	9,9E-01	1,0E-02	
10	7,736	0,129	-1784,3	0,051	3,2E+06	9,9E-01	2,2E-03	

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTY DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATIO N FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION		
1	1,297	0,771	35332,0	1,000	1,2E+09	8,5E-01	8,5E-01	
2	1,392	0,718	7783,0	0,220	6,1E+07	8,9E-01	4,2E-02	
3	3,490	0,287	-113,9	0,003	1,3E+04	8,9E-01	9,0E-06	
4	4,252	0,235	-9650,5	0,273	9,3E+07	9,6E-01	6,4E-02	
5	4,520	0,221	-372,9	0,011	1,4E+05	9,6E-01	-1,5E-03	
6	6,469	0,155	-6191,4	0,175	3,8E+07	9,8E-01	2,8E-02	
7	7,107	0,141	1956,4	0,055	3,8E+06	9,9E-01	2,6E-03	
8	7,157	0,140	3255,0	0,092	1,1E+07	9,9E-01	7,2E-03	
9	7,402	0,135	227,8	0,006	5,2E+04	9,9E-01	3,5E-05	
10	7,736	0,129	-575,0	0,016	3,3E+05	9,9E-01	2,3E-04	

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTZ DIRECTION								
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATIO N FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION		
1	1,297	0,771	-6243,7	0,896	3,9E+07	2,7E-01	2,7E-01	
2	1,392	0,718	3908,1	0,564	1,5E+07	3,7E-01	1,1E-01	
3	3,490	0,287	-6935,9	1,000	4,8E+07	7,0E-01	3,3E-01	
4	4,252	0,235	3208,7	0,463	1,0E+07	7,8E-01	7,1E-02	
5	4,520	0,221	-2948,2	0,425	8,7E+06	8,4E-01	6,0E-02	
6	6,469	0,155	12,5	0,002	1,6E+02	8,4E-01	1,0E-06	
7	7,107	0,141	-836,5	0,121	7,0E+05	8,4E-01	4,8E-03	
8	7,157	0,140	-1814,7	0,262	3,3E+06	8,6E-01	2,3E-02	
9	7,402	0,135	2816,0	0,406	7,9E+06	9,2E-01	5,5E-02	
10	7,736	0,129	-1946,4	0,281	3,8E+06	9,4E-01	2,6E-02	

## 4.7 ANALISI DEI RISULTATI

La scelta dei modi significativi è stata effettuata in base alla frazione di massa partecipante nelle varie direzioni, come si osserva nelle tabelle che seguono.

6 MODI SIGNIFICATIVI							
MODE	FREQUENCY [Hz]	X	Y	Z	ROT-X	ROT-Y	ROT-Z
1	1,297	0,000	0,027	0,000	0,042	0,852	0,267
2	1,392	0,000	0,522	0,000	0,839	0,042	0,106
3	3,490	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,332
4	4,252	0,000	0,000	0,000	0,000	0,064	0,071
5	4,520	0,000	0,271	0,000	0,073	-0,001	0,060
6	6,469	0,247	0,000	0,998	0,024	0,028	0,000
7	7,107	0,014	0,000	0,000	0,000	0,003	0,005
8	7,157	0,359	0,000	0,001	0,000	0,007	0,023
9	7,402	0,001	0,073	0,000	0,010	0,000	0,055
10	7,736	0,000	0,009	0,001	0,002	0,000	0,026

MODE	FREQUENCY [Hz]	DESCRIZIONE DEI MODI SIGNIFICATIVI
1	1,297	1 MODO FLESSIONALE IN DIREZIONE Y
2	1,392	1 MODO FLESSIONALE IN DIREZIONE X
3	3,490	1 MODO FLESSIONALE IN DIREZIONE Z
5	4,520	1 MODO TRASLAZIONALE IN DIREZIONE Y
6	6,469	1 MODO TRASLAZIONALE IN DIREZIONE Z
8	7,157	1 MODO TRASLAZIONALE IN DIREZIONE X

# CAPITOLO 5 –

## OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

### 5.1 I MECCANISMI DI COLLASSO

L'esperienza acquisita a seguito dei numerosi eventi sismici del passato anche recente, mostra chiaramente che per gli edifici storici in muratura, in particolare gli edifici di culto, il collasso si manifesta attraverso la perdita di equilibrio di porzioni limitate (macroelementi) della costruzione. Nascono delle difficoltà nell'utilizzo delle procedure di verifica della sicurezza strutturale attraverso modelli globali: gli edifici spesso non manifestano un chiaro comportamento d'insieme e le geometrie complesse, l'assenza di impalcati rigidi, le pareti alte e snelle e la difficoltà di quantificare il comportamento degli ammorsamenti murari rendono difficoltosa e, in molti casi, poco attendibile, la verifica di sicurezza.

Inoltre tutte queste opere sono state realizzate al tempo senza ovviamente considerare azioni dinamiche o sismiche, ma solo per resistere ad azioni statiche, in conformità con gli standard tecnici del tempo, così che oggi è di fondamentale importanza valutare anche il loro comportamento dinamico.

Alla luce di queste osservazioni si è stabilito di progettare un sistema di monitoraggio che consentisse di tenere sotto controllo l'evoluzione, oltre che dei parametri modali e della stato fessurativo, anche dell'innescò dei meccanismi che potrebbero insorgere in conseguenza di un sisma, tenendo conto degli interventi di consolidamento realizzati.

I meccanismi di collasso che si sono immaginati possibili sono rappresentati nelle figure seguenti, dove la parte tratteggiata rappresenta la zona degradata, modellata attraverso una riduzione del modulo elastico (diminuzione del 10% per la torre o del 50% per le connessioni).

I livelli identificati sono:

- Livello 0: dal piano campagna all'altezza di 9,47 m;
- Livello 1: da 9,47 metri a 21,21 metri;
- Livello 2: da 21,21 a 34,58 metri;
- Cella campanaria: da 34,58 a 42,09 metri.

➤ Danno 1

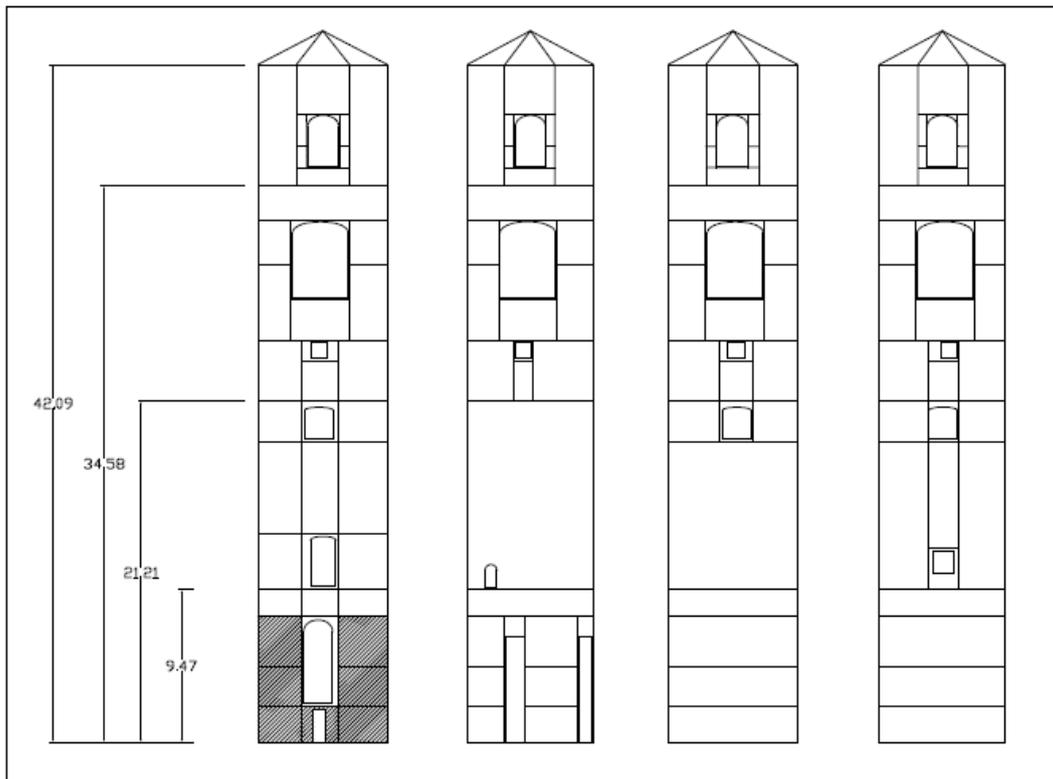


Figura 40 - Modulo elastico di 2367 N/mm<sup>2</sup> anziché 2690 N/mm<sup>2</sup> per il livello zero

➤ Danno 2

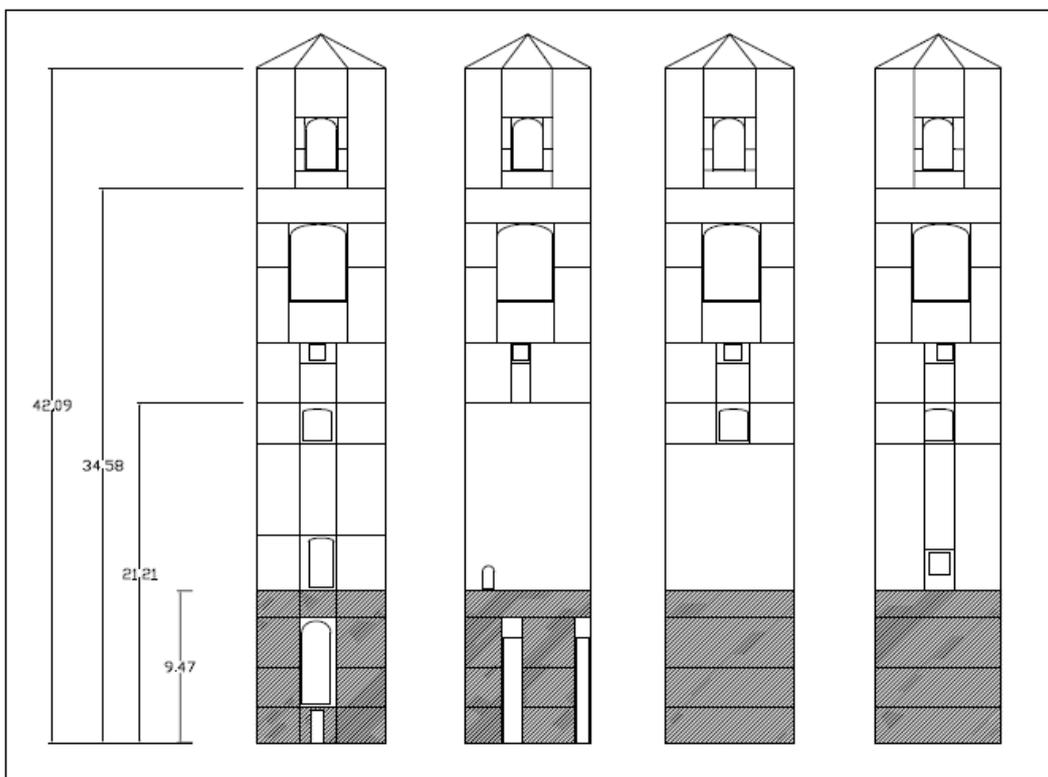


Figura 41 - Modulo elastico di 2367 N/mm<sup>2</sup> anziché 2690 N/mm<sup>2</sup> per il livello zero

➤ Danno 3

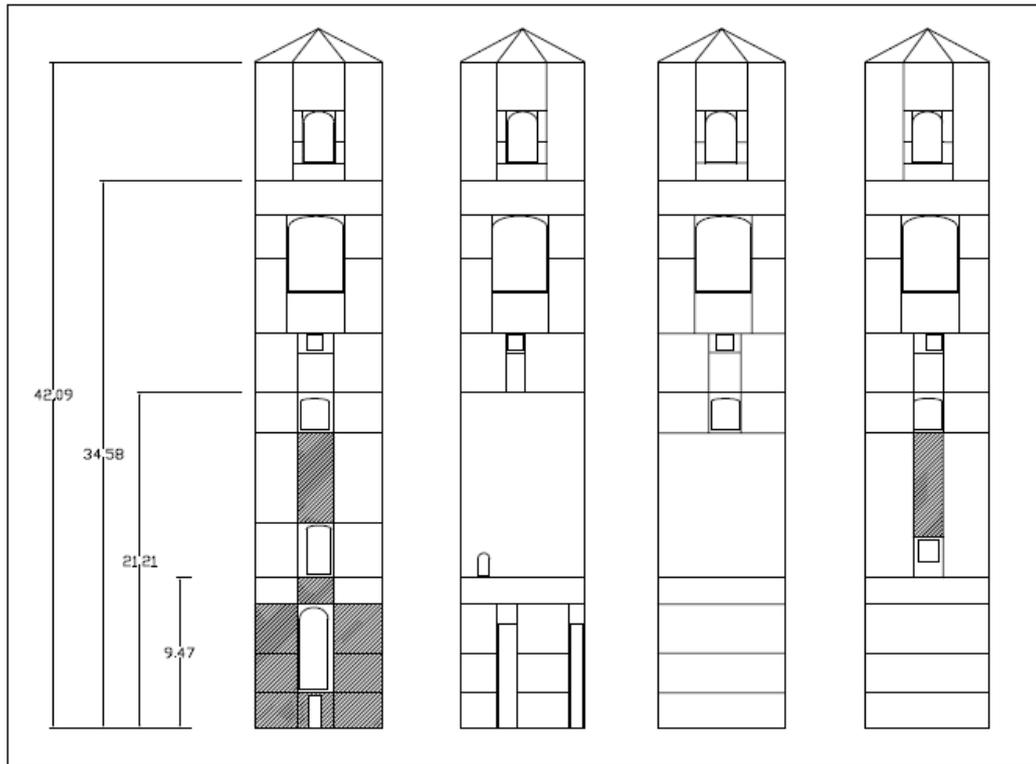


Figura 42 - Modulo elastico di 2367 N/mm<sup>2</sup> anziché 2690 N/mm<sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm<sup>2</sup> invece di 1320 N/mm<sup>2</sup> per il primo livello

➤ Danno 4

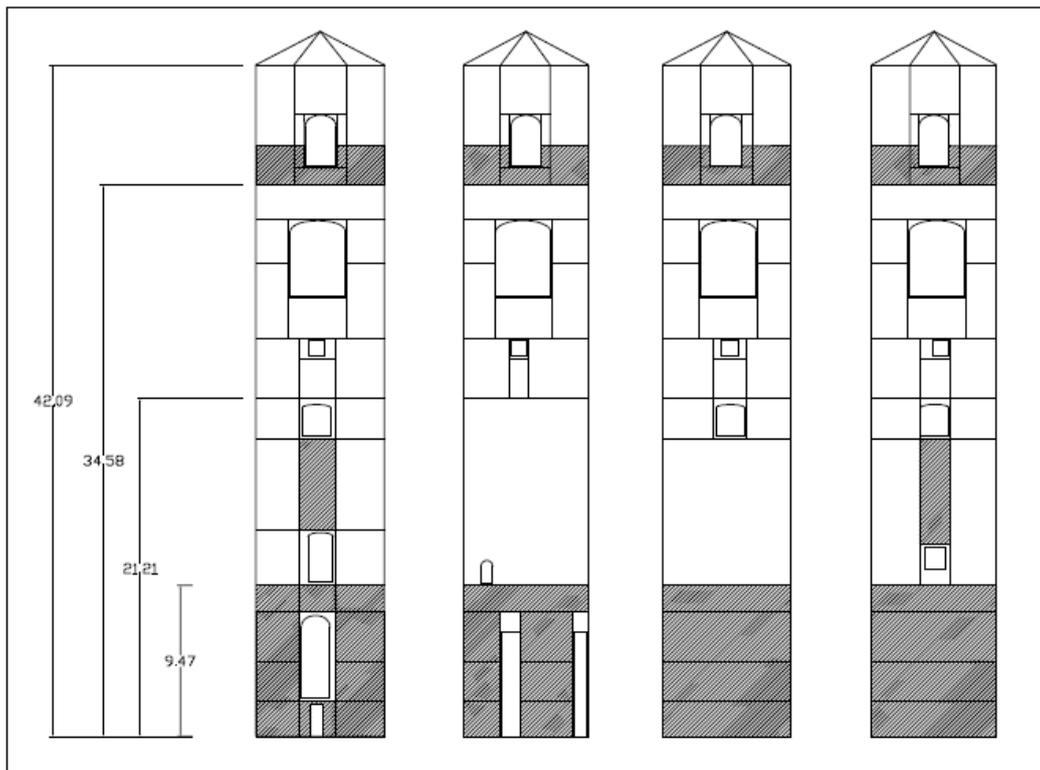


Figura 43 - Modulo elastico di 2367 N/mm<sup>2</sup> anziché 2690 N/mm<sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm<sup>2</sup> invece di 1320 N/mm<sup>2</sup> per il primo livello; modulo elastico di 2173 N/mm<sup>2</sup> anziché 2470 N/mm<sup>2</sup> per la cella campanaria

➤ Danno 5

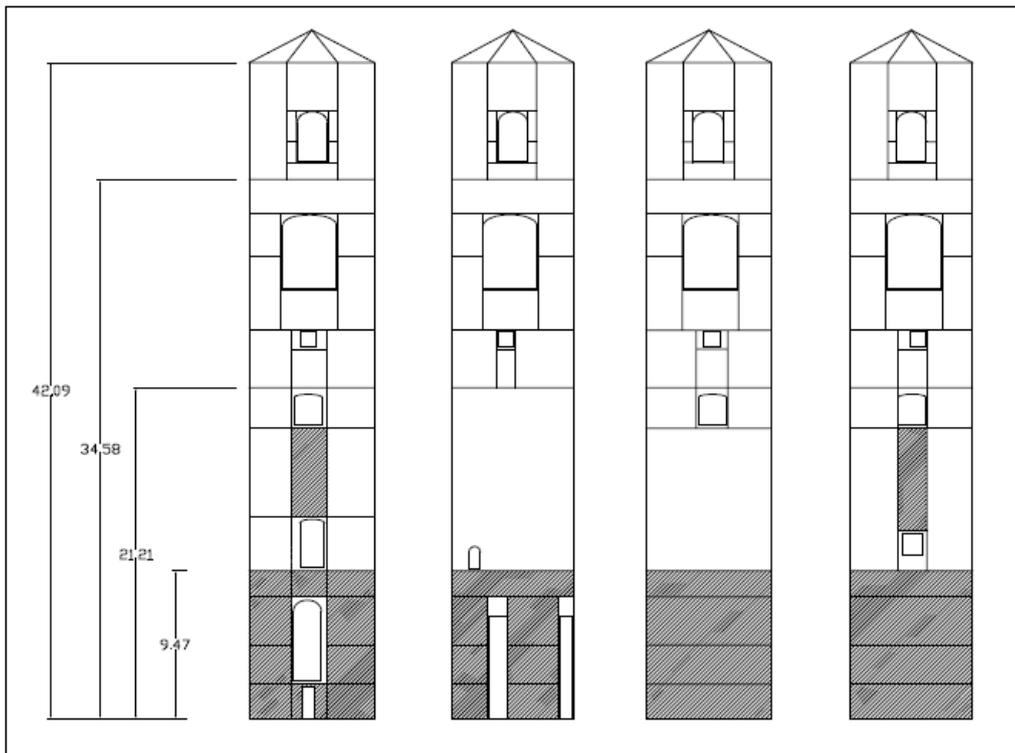


Figura 44 - Modulo elastico di 2367 N/mm<sup>2</sup> anziché 2690 N/mm<sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm<sup>2</sup> invece di 1320 N/mm<sup>2</sup> per il primo livello

➤ Danno 6

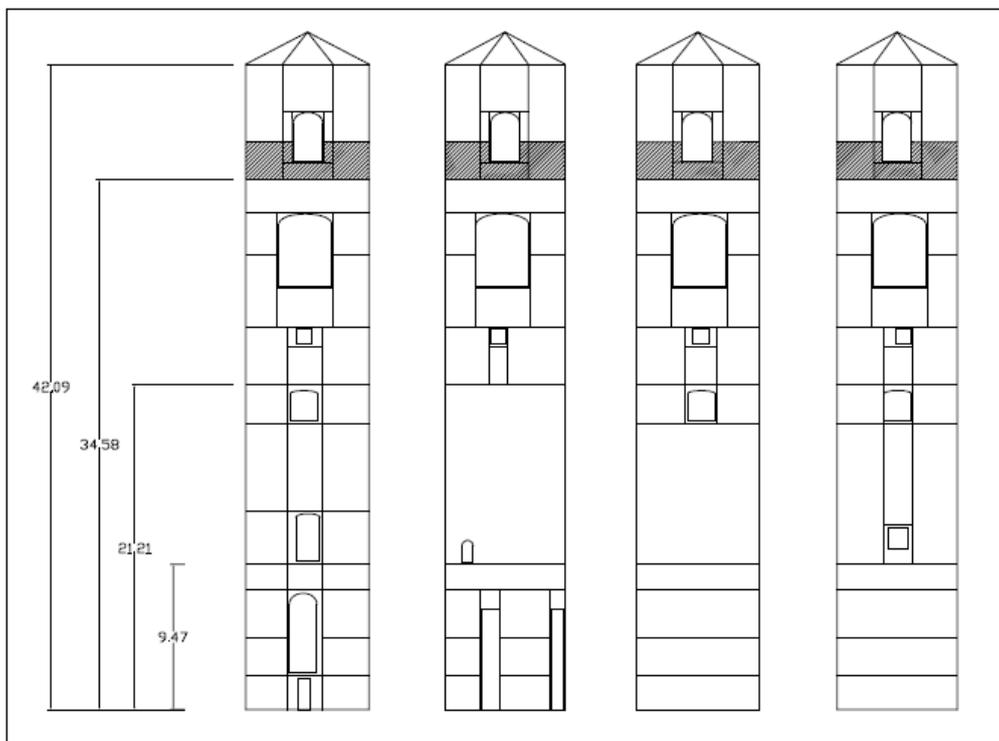


Figura 45 - Modulo elastico di 2173 N/mm<sup>2</sup> anziché 2470 N/mm<sup>2</sup> per la cella campanaria

➤ Danno 7

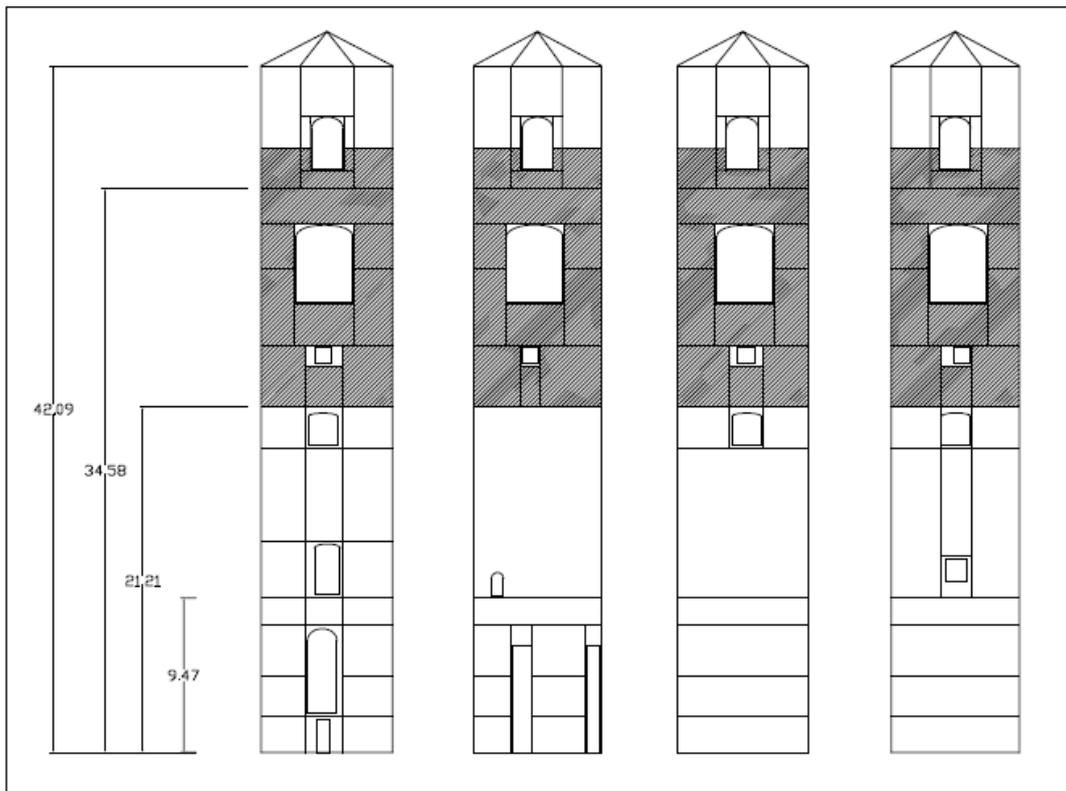


Figura 46 - Modulo elastico di 2173 N/mm<sup>2</sup> anziché 2470 N/mm<sup>2</sup> per la cella campanaria; modulo elastico di 1100 N/mm<sup>2</sup> invece di 1250 per il secondo livello

➤ Danno 8

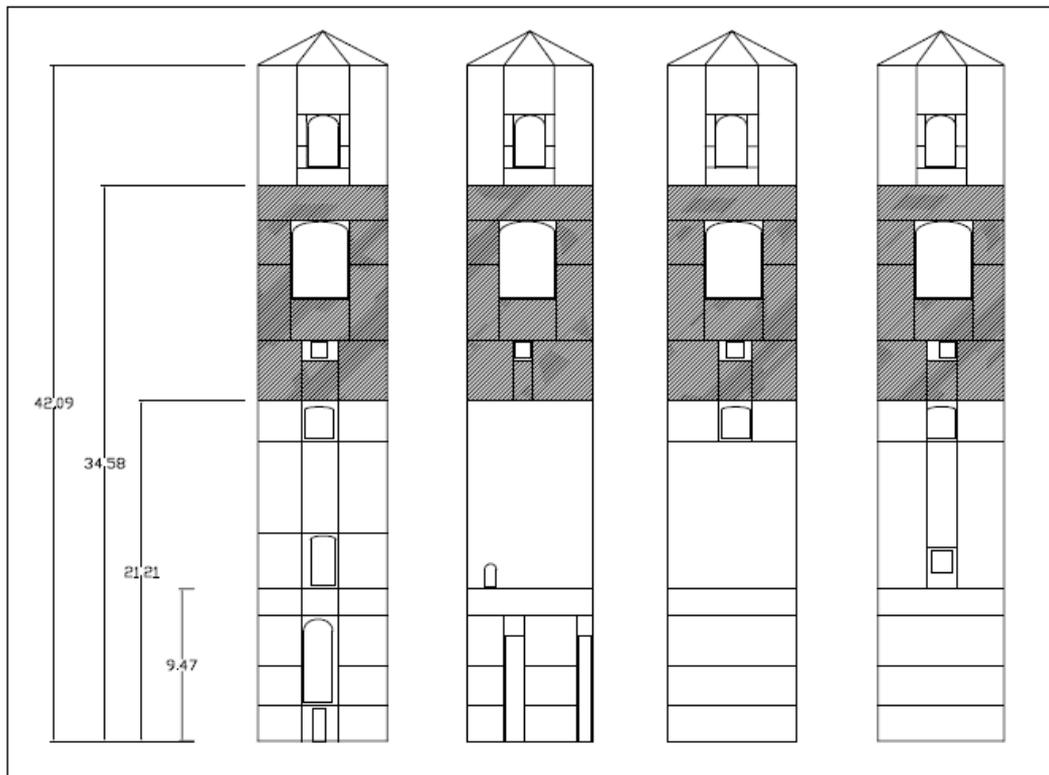


Figura 47 - Modulo elastico di 1100 N/mm<sup>2</sup> anziché 1250 N/mm<sup>2</sup> per il secondo livello

## ➤ Danno 9

Riduzione del modulo elastico dell'intera struttura del 10% rispetto alla struttura non danneggiata.

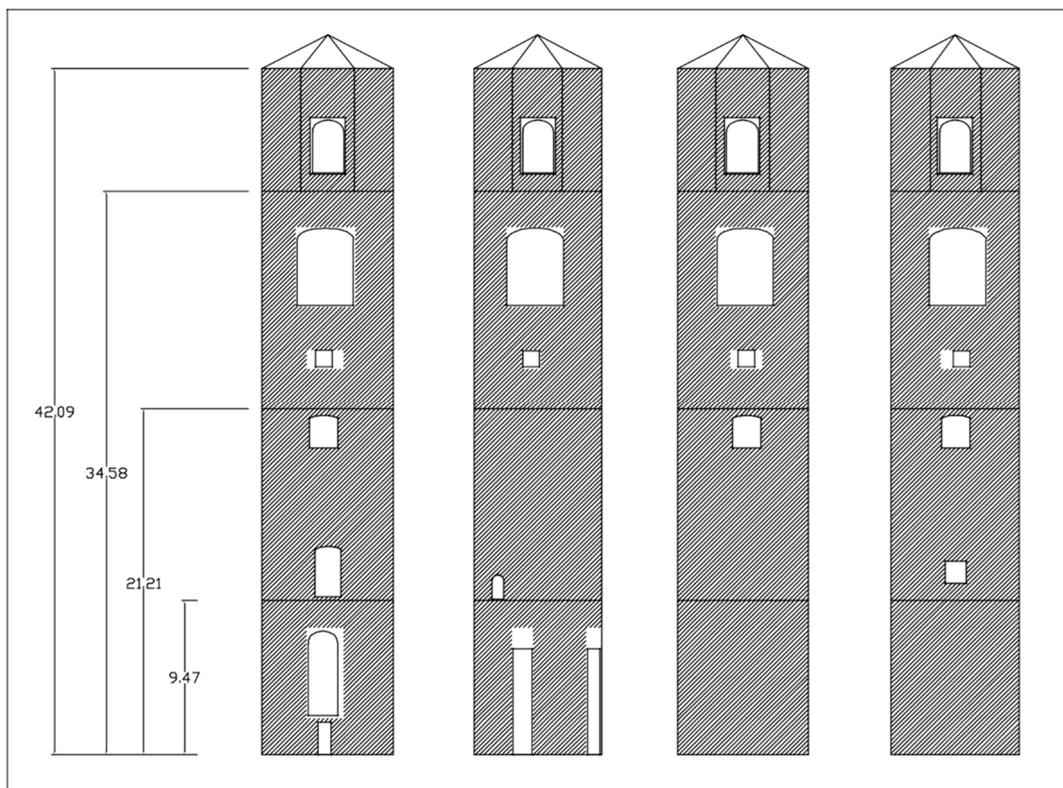


Figura 48 – Riduzione del modulo elastico del 10% di ogni parte della torre

## ➤ Danno 10

Riduzione del modulo elastico delle connessioni nelle direzioni x e y pari al 50% rispetto alla struttura integra.

## ➤ Danno 11

Riduzione del modulo elastico delle connessioni nella direzione x pari al 50% rispetto alla struttura integra.

## ➤ Danno 12

Riduzione del modulo elastico delle connessioni nella direzione y pari al 50% rispetto alla struttura integra.

Sottozona danneggiate	DENSITA'	POISSON	E	LIMITI E	
			NESSUN DANNO	E max (1,1*E nessun danno)	E min (0,8*E max)
	kg/m3	-	N/mm2	N/mm2	N/mm2
Tetto	2600	0,2	10000		
Cella campanaria	2000	0,3	2470	2717	2173,6
Regione livello 2	2000	0,3	1250	1375	1100
Regione livello 1	2000	0,3	1320	1452	1161,6
Regione livello 0	2000	0,3	2690	2959	2367,2
Connessioni lungo x	2000	0,4	500	550	440
Connessioni lungo y	2000	0,4	500	550	440

i valori di modulo elastico usati per le zone danneggiate, alle luce dei limiti della tabella precedente, sono i seguenti:

Sottozone danneggiate	DENSITA'	POISSON	E											
			DANNO 1	DANNO 2	DANNO 3	DANNO 4	DANNO 5	DANNO 6	DANNO 7	DANNO 8	DANNO 9	DANNO 10	DANNO 11	DANNO 12
	kg/m3	-	N/mm2	N/mm2	N/mm2									
Tetto	2600	0,2												
Cella campanaria	2000	0,3				2173,6			2173,6	2173,6		2223		
Regione livello 2	2000	0,3								1100	1100			
Regione livello 1	2000	0,3			1161,6	1161,6	1161,6					1188		
Regione livello 0	2000	0,3	2367,2	2367,2	2367,2	2367,2	2367,2					2421		
Connessioni lungo x	2000	0,4										450	250	250
Connessioni lungo y	2000	0,4										450	250	250

Valori e variazione della frequenza di ogni forma modale relativa a tutti gli scenari di danno immaginati:

FREQUENZE		MODO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DANNO	0	1,297	1,392	3,490	4,252	4,520	6,469	7,107	7,157	7,402	7,736
	1	1,290	1,390	3,487	4,244	4,517	6,450	7,105	7,154	7,400	7,727
	2	1,274	1,373	3,457	4,216	4,492	6,368	7,094	7,135	7,354	7,696
	3	1,251	1,380	3,462	4,198	4,491	6,346	7,098	7,130	7,383	7,655
	4	1,064	1,178	3,113	4,006	4,344	5,465	7,061	7,164	7,794	8,143
	5	1,130	1,253	3,223	4,012	4,340	5,665	6,867	7,041	7,109	7,493
	6	1,219	1,307	3,356	4,272	4,550	6,197	7,122	7,676	8,257	8,525
	7	1,176	1,261	3,222	4,175	4,434	5,965	7,084	7,478	7,874	8,130
	8	1,246	1,338	3,345	4,184	4,438	6,213	7,039	7,093	7,304	7,623
	9	1,246	1,334	3,335	4,063	4,312	6,205	6,760	6,814	7,056	7,372
	10	1,266	1,342	3,414	4,109	4,320	6,429	7,017	7,118	7,268	7,539
	11	1,274	1,387	3,456	4,139	4,504	6,456	7,039	7,126	7,354	7,692
12	1,290	1,348	3,453	4,229	4,341	6,443	7,099	7,144	7,295	7,612	

VARIAZIONE FREQUENZE [%]		MODO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DANNO	0										
	1	-0,537	-0,154	-0,107	-0,183	-0,075	-0,295	-0,018	-0,050	-0,027	-0,122
	2	-1,787	-1,376	-0,969	-0,853	-0,611	-1,556	-0,180	-0,308	-0,636	-0,524
	3	-3,493	-0,879	-0,802	-1,269	-0,637	-1,906	-0,115	-0,384	-0,252	-1,047
	4	-17,941	-15,377	-10,822	-5,783	-3,892	-15,514	-0,647	0,090	5,301	5,263
	5	-12,870	-9,973	-7,666	-5,638	-3,975	-12,422	-3,370	-1,620	-3,948	-3,136
	6	-6,027	-6,150	-3,840	0,482	0,670	-4,212	0,217	7,245	11,561	10,204
	7	-9,335	-9,458	-7,676	-1,815	-1,911	-7,788	-0,320	4,482	6,390	5,098
	8	-3,913	-3,920	-4,171	-1,600	-1,801	-3,964	-0,945	-0,903	-1,319	-1,456
	9	-3,881	-4,161	-4,453	-4,454	-4,610	-4,078	-4,875	-4,793	-4,672	-4,705
	10	-2,376	-3,613	-2,178	-3,353	-4,418	-0,616	-1,261	-0,551	-1,805	-2,542
	11	-1,723	-0,348	-0,977	-2,665	-0,346	-0,200	-0,950	-0,441	-0,638	-0,568
12	-0,532	-3,211	-1,083	-0,545	-3,954	-0,411	-0,106	-0,184	-1,435	-1,607	

Da queste tabelle si può immediatamente notare come riduzioni del 10/15% del modulo elastico di alcune zone della torre porti ad avere variazioni di frequenze molto elevate, anche intorno al 20%.

Di seguito vengono riportati i plot raffiguranti le differenze di movimento delle forme modali (soprattutto per i modi alti) quando è presente una variazione di modulo elastico rispetto alle forme della struttura integra:

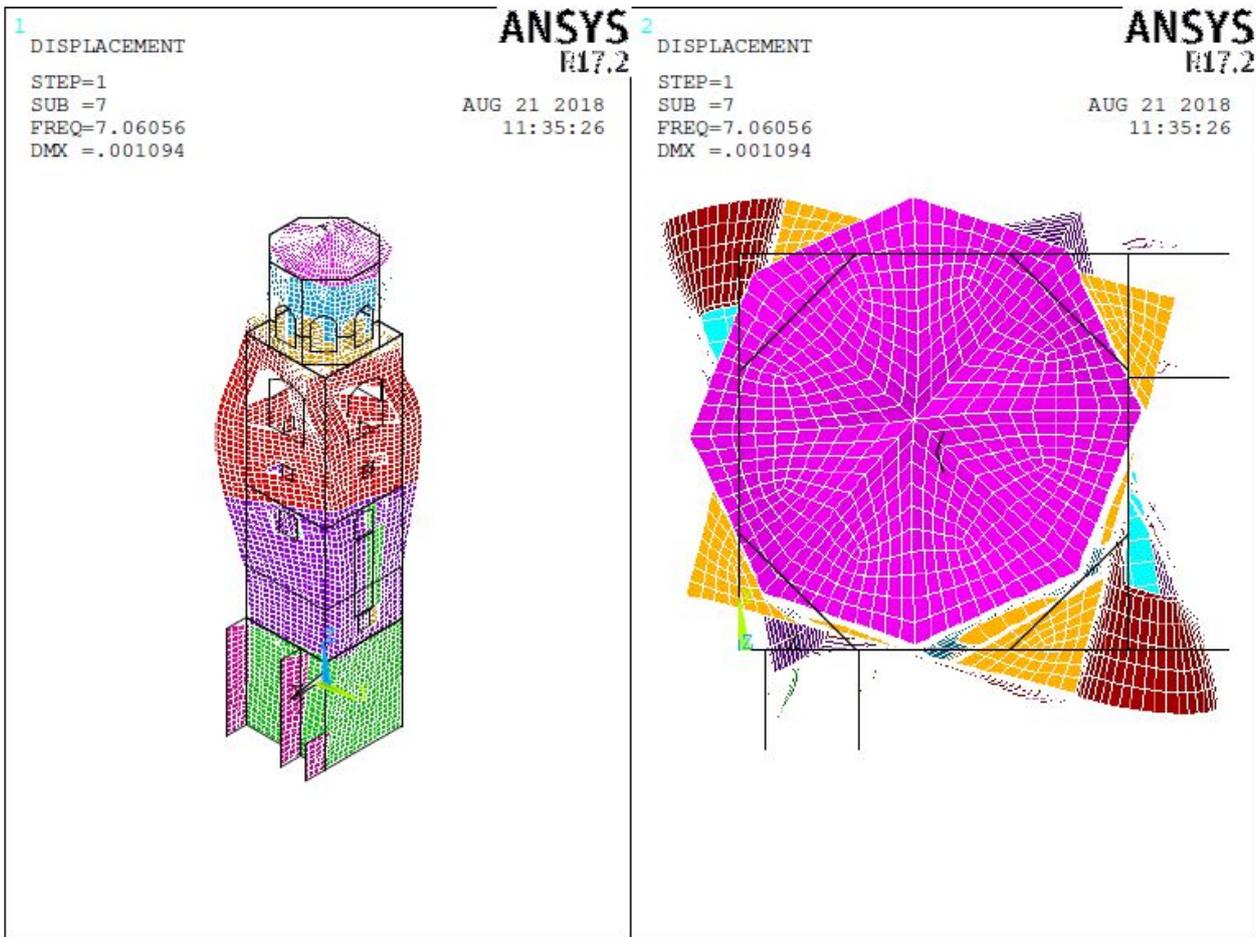
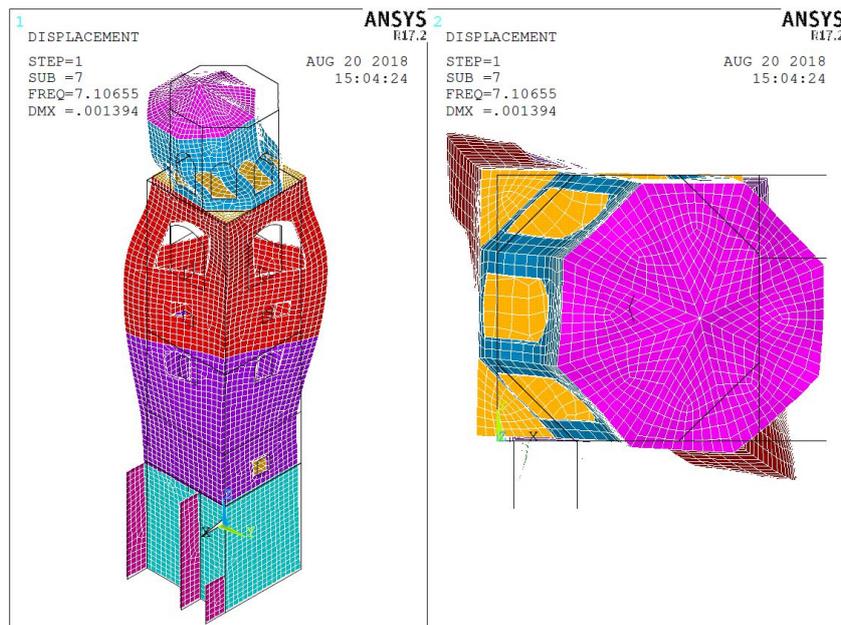


Figura 49 - 7° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto



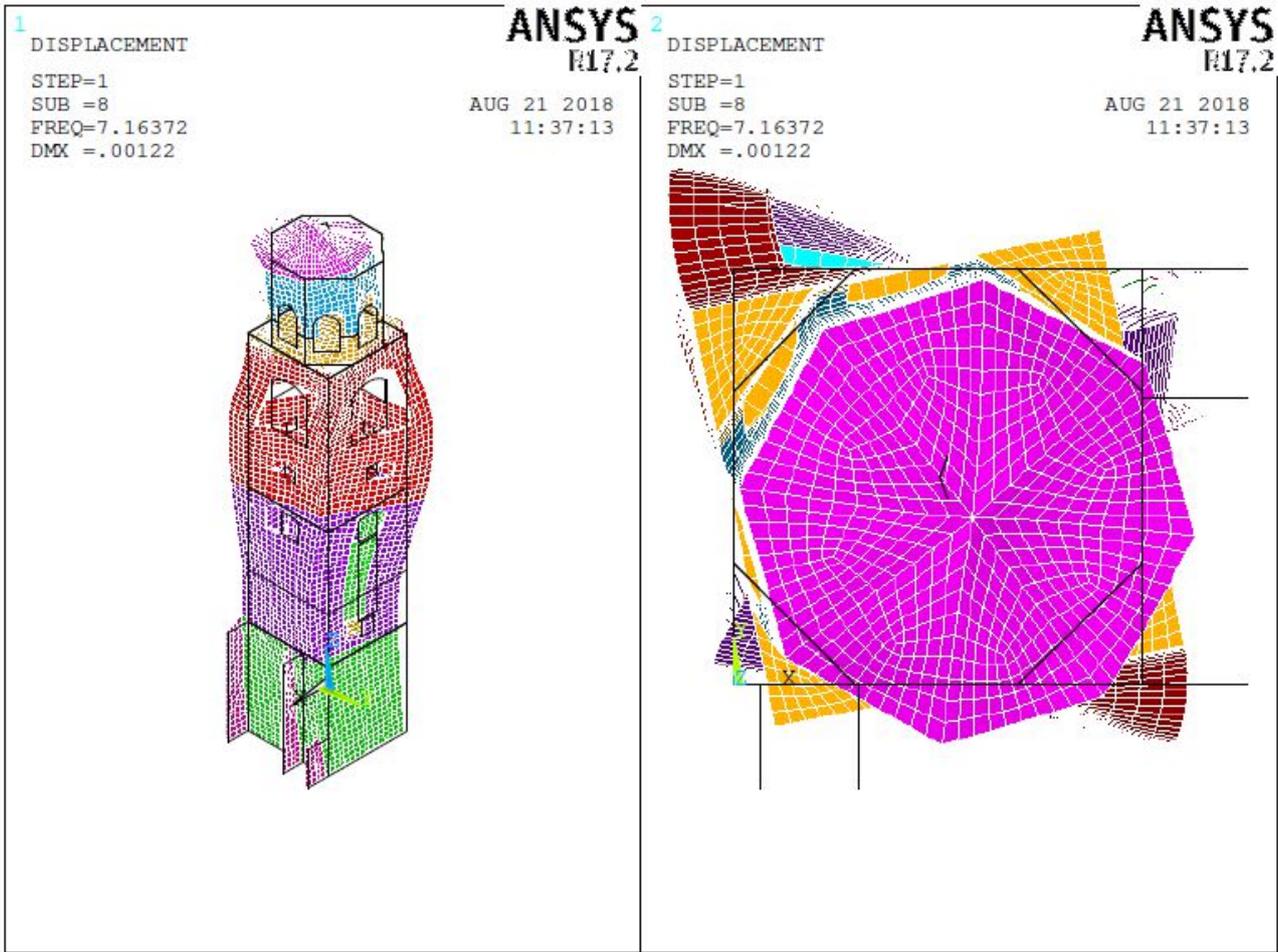
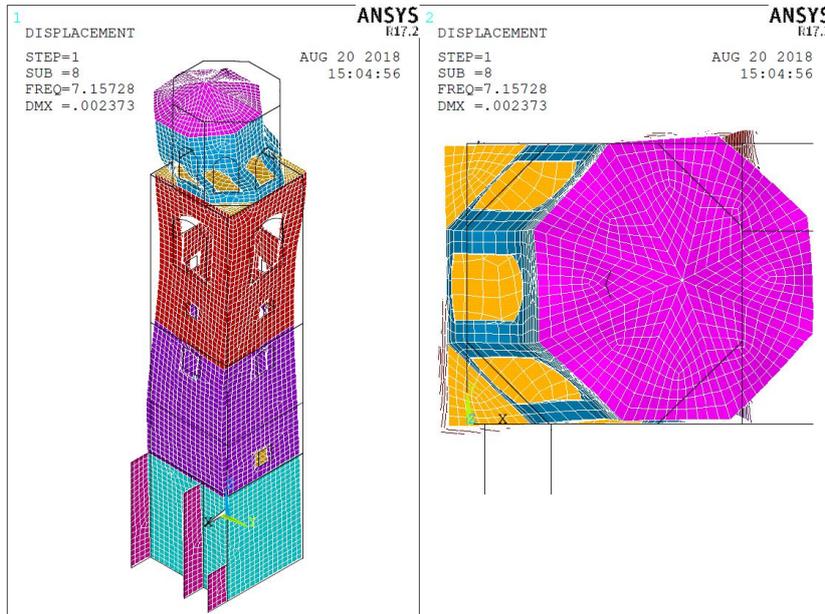


Figura 50- 8° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto



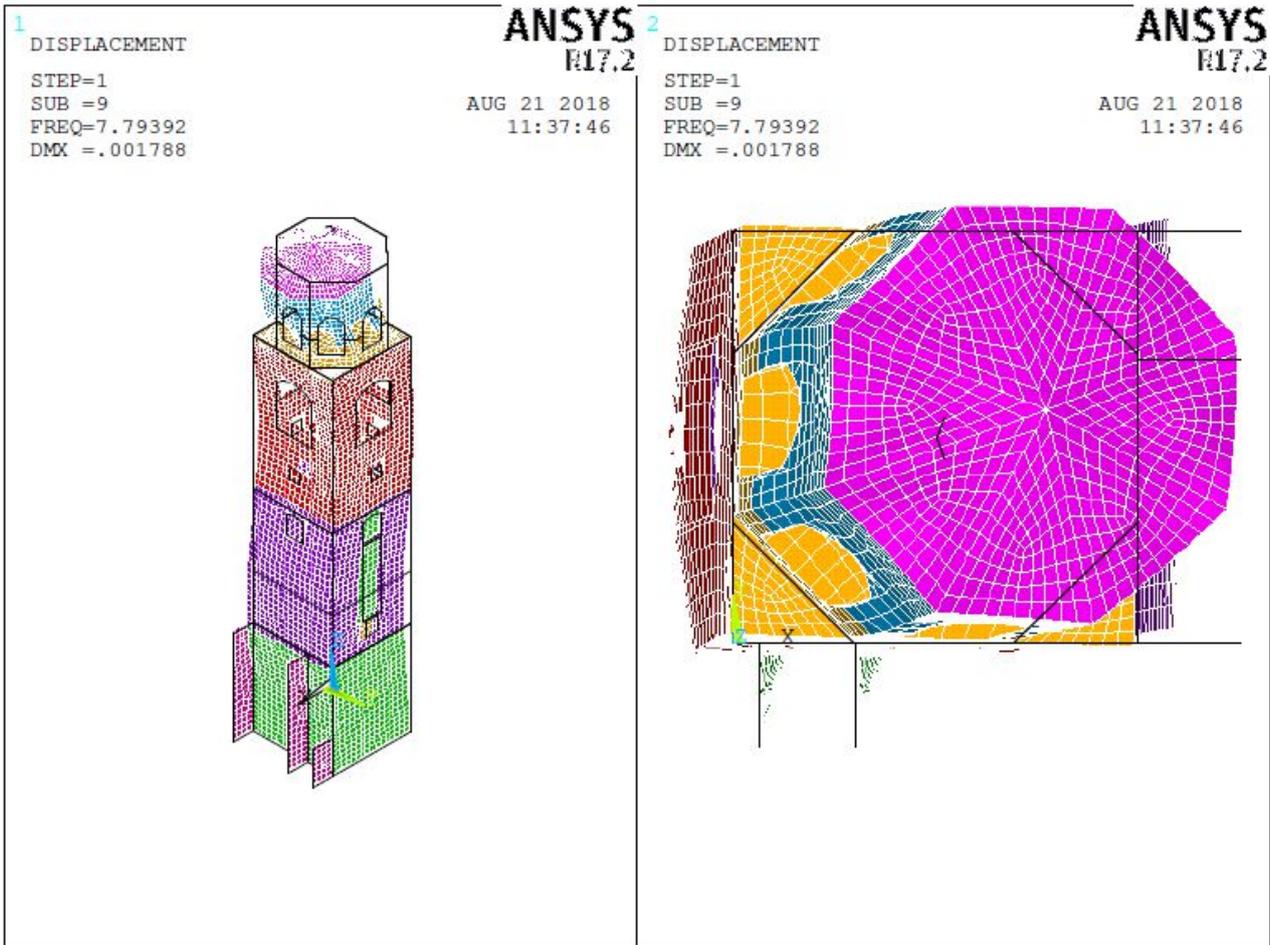
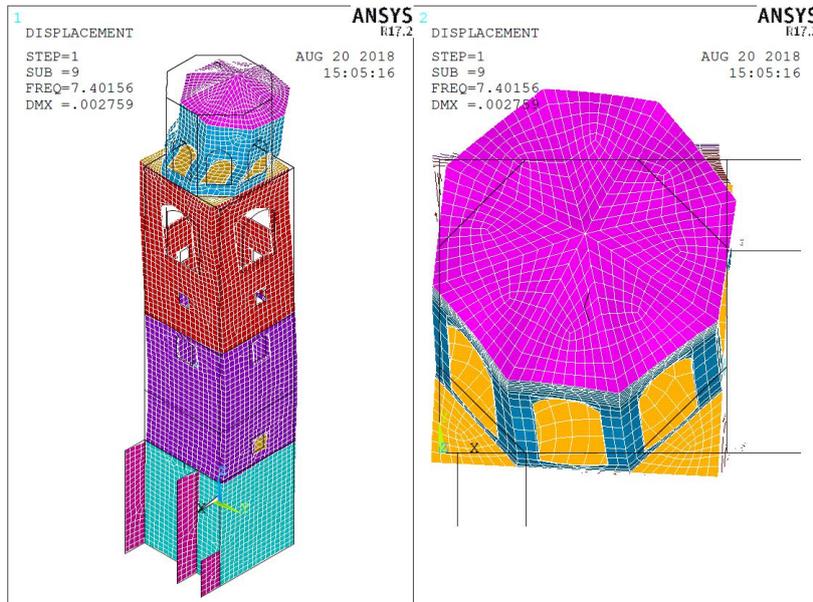


Figura 51- 8° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto



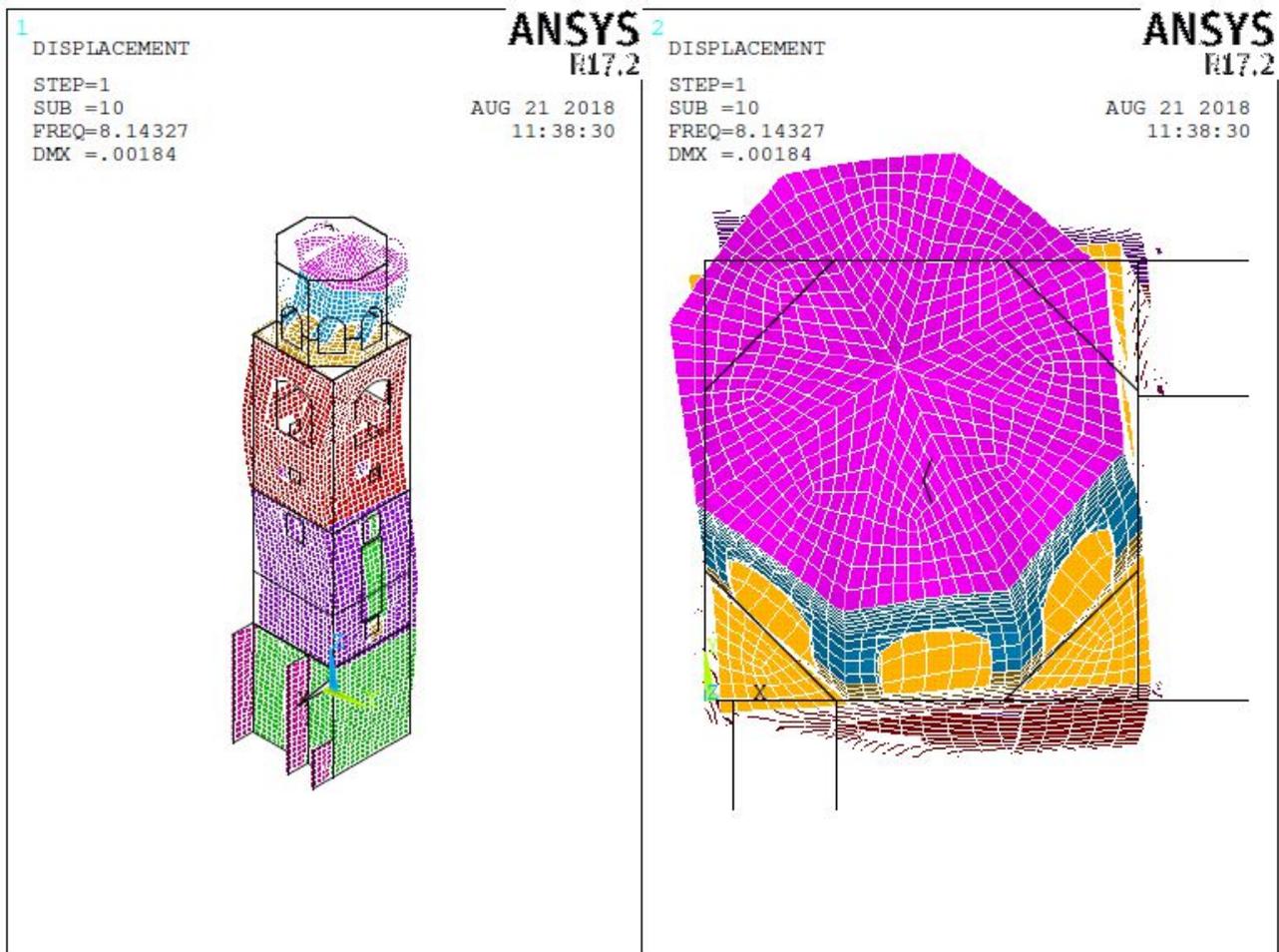
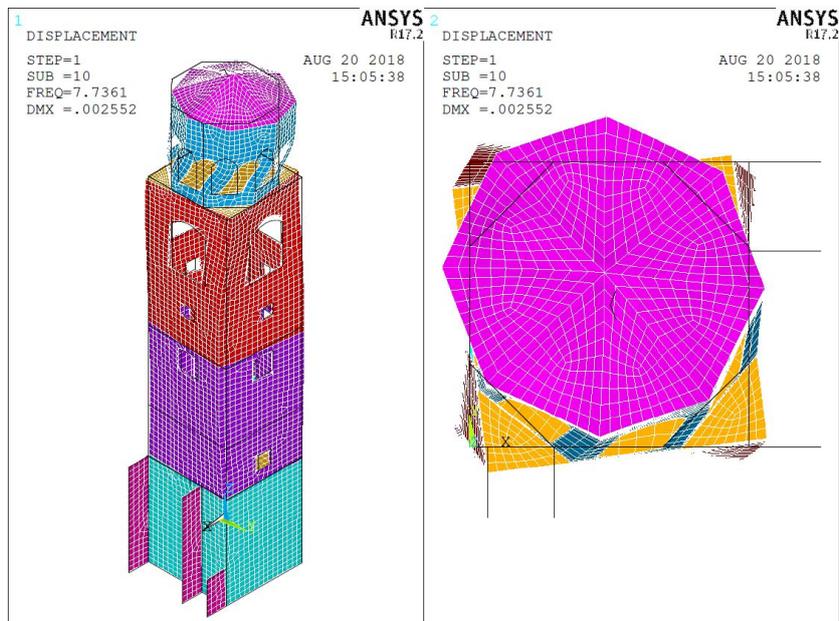


Figura 52- 10° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto



Da questi plot si possono notare importanti modifiche nelle deformazioni della struttura non appena si instaurano dei meccanismi di danneggiamento in alcune zone della torre campanaria, quindi è importante posizionare in maniera oculata i sensori affinché essi possano leggere i vari scenari di danno che si possono verificare durante la vita della struttura.

## 5.2 MAC (Modal Assurance Criterion)

Il problema dell'individuazione dei sensori su una struttura può essere guidato dall'obiettivo di massimizzare le informazioni di dati al fine di caratterizzare completamente il comportamento strutturale e dinamico. In questo caso l'obiettivo primario è la valorizzazione dei risultati dei test modali. Sono stati condotti diversi studi per far fronte a questo problema utilizzando a priori informazioni derivanti da un modello ad elementi finiti della struttura.

Inoltre si deve anche sottolineare che, a causa di considerazioni economiche, il numero di sensori disponibili è generalmente limitato e a volte anche insufficiente a soddisfare i requisiti delle tecniche di posizionamento ottimale dei sensori stessi.

In questo tipo di lavoro si è lavorato sullo studio delle correlazioni esistenti tra i valori modali ricavati sulla struttura integra e sulla struttura sottoposta a numerosi casi di danneggiamento o degrado di alcune zone della torre più facilmente soggette a questo tipo di situazione, sulla base di informazioni ricavate da letteratura riguardanti opere simili sia per periodo di costruzione che per tipo di materiale e tipologia costruttiva.

La correlazione tra i valori modali è stata studiata tramite il cosiddetto MAC (Modal Assurance Criterion), ossia una matrice dove vengono studiati i valori presenti sulla diagonale principale (traccia) e i valori al di fuori di essa (off-diag).

Le proprietà modali che solitamente vengono confrontate sono le frequenze naturali, le masse modali, vettori di forme modali ed energia cinetica. I confronti vengono fatti con i vettori delle caratteristiche modali contenenti tutti gli ordini del modello FEM o con vettori ridotti. L'aspetto essenziale è che ci sia comparazione tra le forme modali abbinate nell'analisi.

È utile confrontare:

- Forme modali misurate con vettori determinati analiticamente;
- Stime dello stesso vettore modale ottenute da posizioni differenti di eccitazioni;
- Stime dello stesso vettore modale ottenute tramite diversi parametri modali usando gli stessi test di identificazione;
- Test di forme modali ottenute prima e dopo un eventuale danneggiamento fisico della struttura

Il MAC è una delle principali strategie per comparazioni quantitative di forme modali.

Esso si calcola come prodotto scalare normalizzato tra due vettori  $\{\phi_A\}$  e  $\{\phi_B\}$ .

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\phi_A\}_r^T \{\phi_X\}_q|^2}{(\{\phi_A\}_r^T \{\phi_A\}_r)(\{\phi_X\}_q^T \{\phi_X\}_q)}$$

Il MAC può assumere valori compresi tra 0 (nessuna corrispondenza) e 1 (totale corrispondenza). Valori superiori a 0.9 indicano una forte correlazione, mentre valori piccoli rappresentano una povera corrispondenza tra le due forme modali.

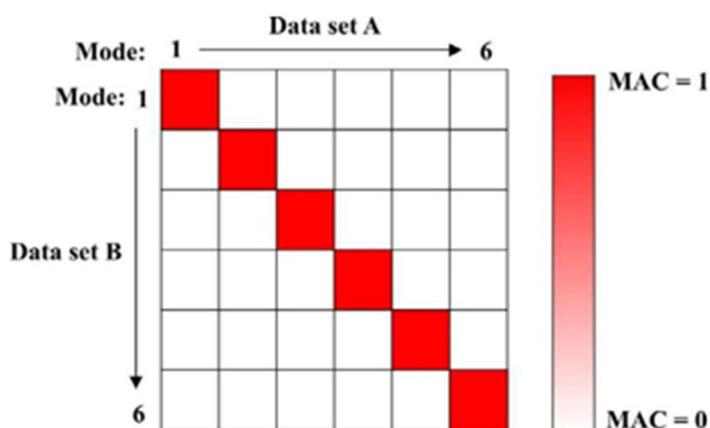
Il MAC può assumere valori vicini a 0 per i seguenti motivi:

- Il sistema è di tipo non stazionario, risultante da cambiamenti delle proprietà di massa, rigidezza, smorzamenti durante il test;
- Il sistema è non lineare;
- È presente rumore nelle forme modali identificate;
- La tecnica di estrazione dei parametri non è valida per quel determinato set di misure;
- Le forme modali sono linearmente indipendenti

Il MAC può assumere valori vicini all'unità per i seguenti motivi:

- Il numero di gradi di libertà è insufficiente per la distinzione tra forme modali indipendenti;
- Le forme modali rappresentano lo stesso movimento differito solo tramite uno scalare

Uno dei grandi cambiamenti nell'applicazione del MAC negli ultimi anni è stato soprattutto il modo in cui le informazioni vengono rappresentate. Oggi la maggior parte delle rappresentazioni sfruttano il colore come indicatore della magnitudo del MAC, tramite anche grafici 2-D o 3-D.



*Esempio di rappresentazione MAC 2-D*

## 5.2.1 CRITERIO AutoMAC

L'AutoMAC confronta quantitativamente tutte le possibili combinazioni di coppie di forma modale per ogni set di forme modale. Il calcolo assegna valore unitario al test relativo a forme modali che corrispondono esattamente. Valore 0 invece viene assegnato a quelle forme modali completamente indipendenti o non correlate.

Quindi valori tra 0 e 1 sono proporzionali al grado di correlazione tra le forme modali.

Nella tabella seguente è riportato un esempio di una trama di AutoMAC per una trave di acciaio in semplice appoggio. L'uso del diverso colore aiuta a comprendere i gradi di correlazione.

	27.242	76.130	138.403	225.096	335.860
27.242	1.000	0.439	0.003	0.031	0.001
76.130	0.439	1.000	0.046	0.031	0.009
138.403	0.003	0.046	1.000	0.016	0.025
225.096	0.031	0.031	0.016	1.000	0.011
335.860	0.001	0.009	0.025	0.011	1.000

Tabella 2. Matrice di AutoMAC

## 5.2.2 CRITERIO Cross MAC

Il CrossMAC è simile all' AutoMAC, tuttavia esso è determinato utilizzando due diversi insiemi di forme modali per le righe e le colonne della matrice.

Il CrossMAC può essere utilizzato per:

- Calcolare il MAC tra due differenti test modello;
- Calcolare il MAC tra un modello di test e un modello agli elementi finiti (FEM);
- Calcolare il MAC tra due modelli di analisi sviluppati utilizzando due algoritmi di analisi modale differente, e valori vicini a 1 rappresentano una forte correlazione tra le forme analizzate

La tabella seguente mostra il confronto delle frequenze naturali ottenute mediante l'utilizzo di due diversi accelerometri tramite il CrossMAC

	27.242	76.130	138.403	225.096	335.860
28.802	0.368	0.217	0.023	0.076	0.335
76.135	0.270	0.467	0.048	0.071	0.411
138.399	0.178	0.217	0.453	0.068	0.243
225.095	0.201	0.096	0.028	0.666	0.309
335.867	0.127	0.165	0.004	0.080	0.936

Tabella 3. Matrice di CrossMAC

Ulteriori esempi di matrici MAC e relative rappresentazioni in 2-D e 3-D:

*Table 1. Numerical presentation of MAC values.*

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.000	0.000	0.001	0.011	0.021	0.012	0.008	0.002	0.029	0.005	0.001	0.118	0.275	0.007
2	0.000	1.000	0.012	0.006	0.010	0.001	0.009	0.003	0.007	0.006	0.029	0.273	0.126	0.002
3	0.001	0.012	1.000	0.002	0.007	0.017	0.001	0.001	0.006	0.022	0.019	0.060	0.045	0.394
4	0.011	0.006	0.002	1.000	0.993	0.011	0.007	0.001	0.014	0.013	0.003	0.002	0.002	0.010
5	0.021	0.010	0.007	0.993	1.000	0.013	0.006	0.012	0.015	0.014	0.004	0.002	0.003	0.003
6	0.012	0.001	0.017	0.011	0.013	1.000	0.000	0.005	0.004	0.007	0.011	0.012	0.009	0.006
7	0.008	0.009	0.001	0.007	0.006	0.000	1.000	0.000	0.022	0.005	0.002	0.008	0.009	0.007
8	0.002	0.003	0.001	0.001	0.012	0.005	0.000	1.000	0.000	0.020	0.019	0.011	0.007	0.006
9	0.029	0.007	0.006	0.014	0.015	0.004	0.022	0.000	1.000	0.015	0.008	0.005	0.019	0.006
10	0.005	0.006	0.022	0.013	0.014	0.007	0.005	0.020	0.015	1.000	0.093	0.002	0.003	0.025
11	0.001	0.029	0.019	0.003	0.004	0.011	0.002	0.019	0.008	0.093	1.000	0.026	0.017	0.023
12	0.118	0.273	0.060	0.002	0.002	0.012	0.008	0.011	0.005	0.002	0.026	1.000	0.755	0.067
13	0.275	0.126	0.045	0.002	0.003	0.009	0.009	0.007	0.019	0.003	0.017	0.755	1.000	0.067
14	0.007	0.002	0.394	0.010	0.003	0.006	0.007	0.006	0.006	0.025	0.023	0.067	0.067	1.000

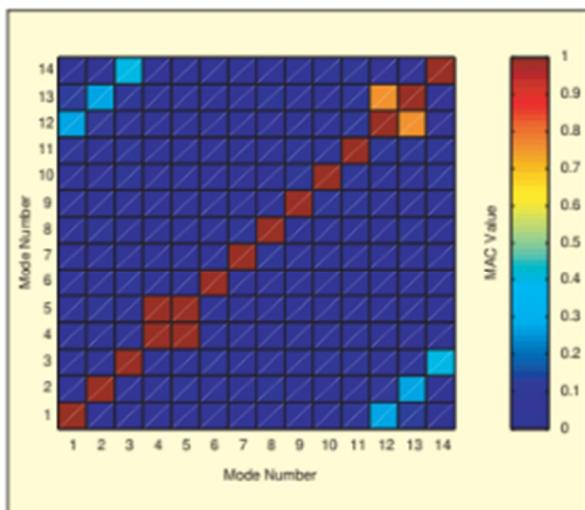


Figure 1. 2-D presentation of MAC Values.

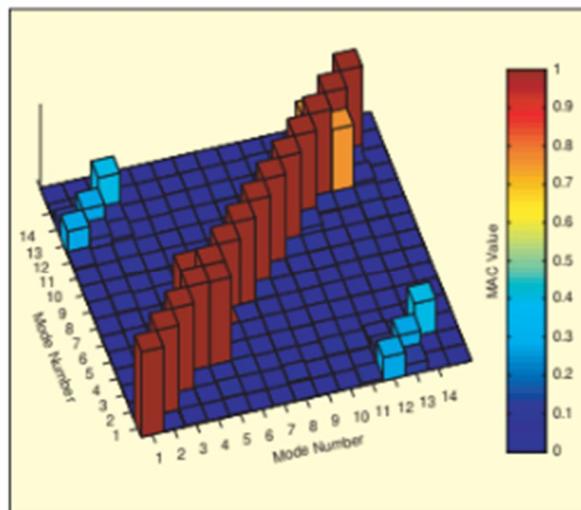


Figure 2. 3-D presentation of MAC Values.

Concludendo questa regressione sull'utilizzo del MAC, si può capire che il MAC è un metodo di facile utilizzo per il confronto e la correlazione quantitativa tra proprietà dinamiche misurate tramite prove modali. Negli ultimi due decenni, questo criterio è stato dimostrato essere un concetto statistico semplice, che può diventare uno strumento estremamente utile in analisi modali sperimentali.

Dato che il MAC non fornisce informazioni riguardanti la corrispondenza tra le frequenze, a volte potrebbe mostrare una buona correlazione tra le forme modali che hanno significativa differenza di frequenza, quindi è necessaria anche un confronto tra le frequenze.

## 5.3 SITUAZIONE DI PROGETTO ATTUALE DEL POSIZIONAMENTO DEGLI ACCELEROMETRI

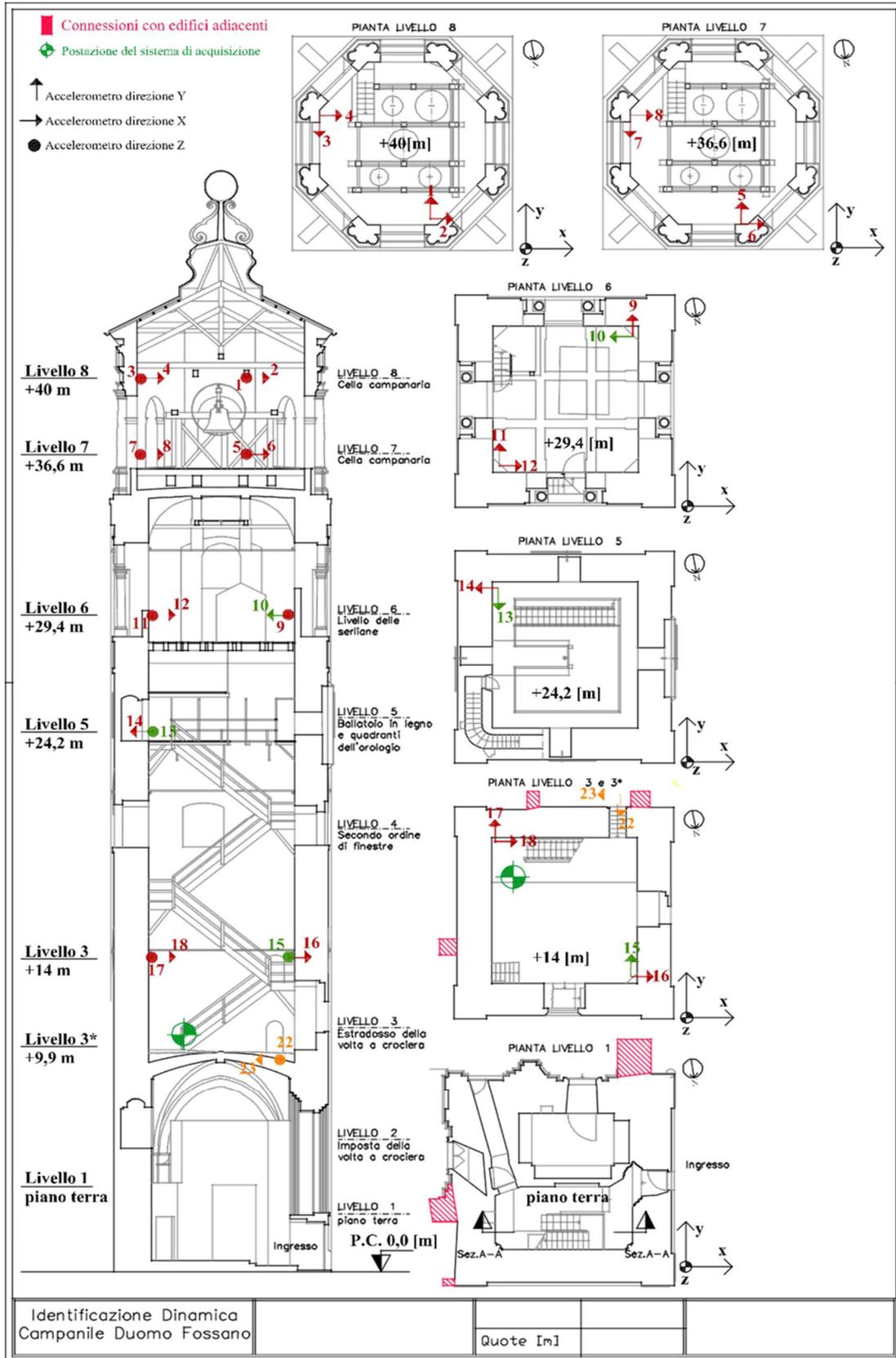


Figura 53 - Configurazione di sensori da progetto attuale

Analizzando la matrice di MAC sulla base delle forme modali lette dagli accelerometri immaginati presenti sulla torre si ottengono i risultati raccolti nella seguente tabella.

Si è deciso di inserire solo i valori maggiormente caratteristici, ossia le relazioni che intercorrono tra il caso danneggiato con se stesso, AutoMAC (prima tabella), il caso non danneggiato con i vari casi di danno, CrossMAC (seconda tabella), il caso di danno 4 con gli altri casi di degrado, CrossMAC (terza tabella).

Tabella 4 - Risultati dello studio del MAC relativo all'OSP originale

SETUP (danno i-	MAC Setup-Originale		SETUP (danno i-	MAC Setup-Originale		SETUP (danno i-	MAC Setup-Originale	
	OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA
0-0	13,38	10,00	0-1	13,55	9,99	4-1	13,36	6,68
1-1	13,73	10,00	0-2	13,52	9,85	4-2	13,39	6,69
2-2	13,52	10,00	0-3	13,94	9,72	4-3	13,72	6,38
3-3	14,42	10,00	0-4	13,25	6,72	4-5	13,19	7,00
4-4	9,29	10,00	0-5	15,16	7,68	4-6	9,57	8,79
5-5	13,01	10,00	0-6	12,74	6,83	4-7	9,95	8,76
6-6	8,05	10,00	0-7	13,47	6,94	4-8	13,48	6,56
7-7	9,01	10,00	0-8	13,40	9,46	4-9	13,22	6,67
8-8	12,85	10,00	0-9	13,32	9,99	4-10	13,09	6,17
9-9	13,24	10,00	0-10	13,10	8,77	4-11	12,81	6,66
10-10	11,20	10,00	0-11	12,83	9,11	4-12	13,78	6,20
11-11	11,36	10,00						
12-12	13,72	10,00						

Si è deciso anche di graficare le forme modali lette dai sensori direttamente in ambiente Matlab tramite fogli di calcolo appositamente realizzati.

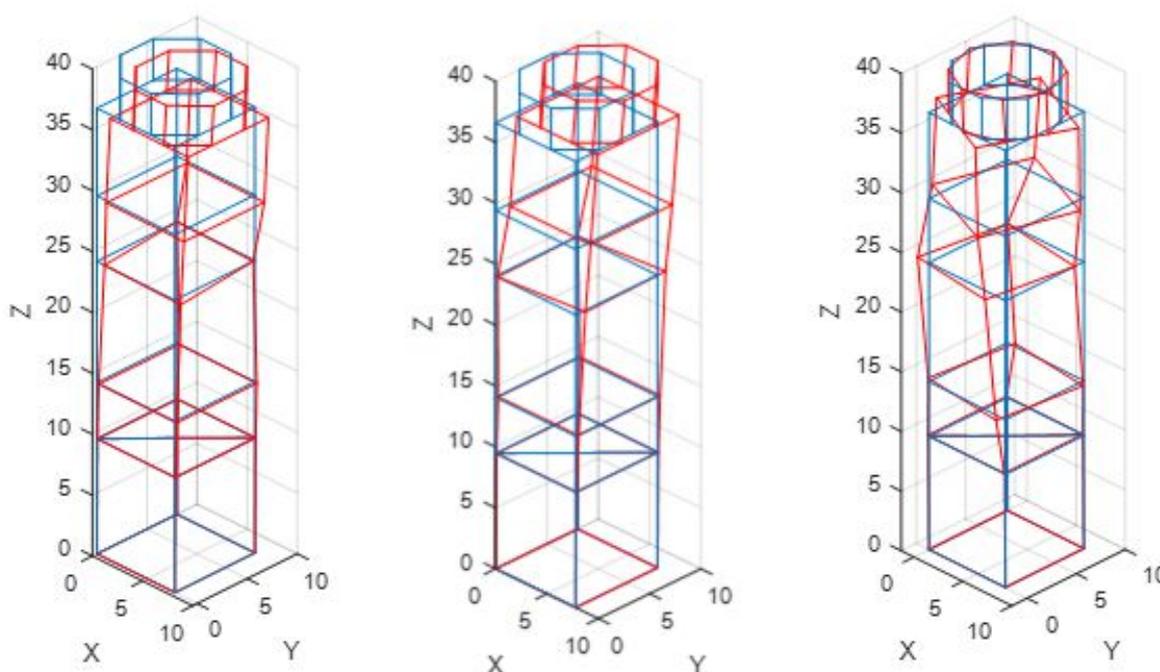


Figura 54 - Figure Matlab del 1°-2°-3° modo di vibrare nella condizione non danneggiata

Ora vengono mostrate alcune matrici complete di MAC, 2D e 3D, ottenute nei vari casi:

1	2,07E-05	0,034783	0,477541	0,030418	0,153121	0,279175	0,23499	0,000315	0,144273
2,07E-05	1	0,021626	0,016082	0,462451	0,028337	0,001348	0,028235	0,269842	0,118268
0,034783	0,021626	1	0,078304	0,030524	0,146403	0,035603	0,003907	0,026539	0,337599
0,477541	0,016082	0,078304	1	0,00388	0,32762	0,24957	0,548852	0,007355	0,094186
0,030418	0,462451	0,030524	0,00388	1	0,22617	0,004683	2,13E-05	0,408649	0,344963
0,153121	0,028337	0,146403	0,32762	0,22617	1	0,363252	0,255944	0,044902	0,415826
0,279175	0,001348	0,035603	0,24957	0,004683	0,363252	1	0,246845	0,000175	0,105582
0,23499	0,028235	0,003907	0,548852	2,13E-05	0,255944	0,246845	1	0,011823	0,029425
0,000315	0,269842	0,026539	0,007355	0,408649	0,044902	0,000175	0,011823	1	0,042956
0,144273	0,118268	0,337599	0,094186	0,344963	0,415826	0,105582	0,029425	0,042956	1

Figura 55 - Matrice MAC condizione non danneggiata - non danneggiata (0-0)

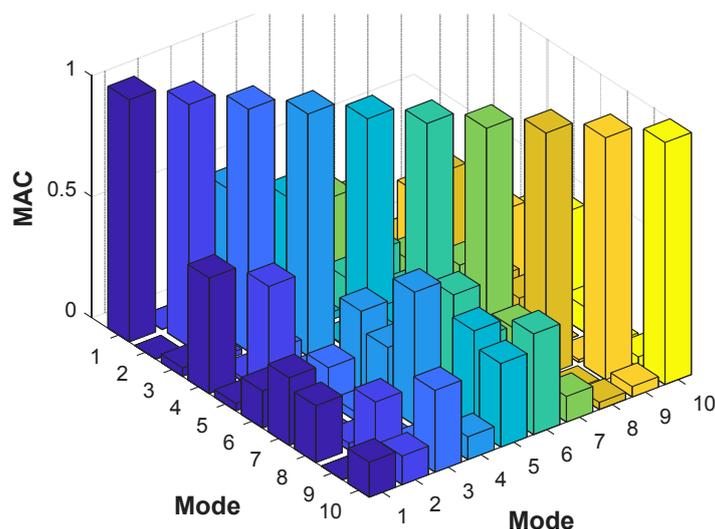


Figura 56 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (0-0)

0,991302	0,006661	0,016104	0,404211	0,025836	0,13638	0,05995	0,000775	0,227556	0,063687
0,008868	0,991965	0,01043	0,009006	0,388432	0,066185	0,00439	0,003142	0,040158	0,186351
0,041896	0,020866	0,98611	0,127279	0,061789	0,186089	0,216445	0,173753	0,054986	0,065059
0,43741	0,032125	0,050344	0,968543	0,00365	0,301462	0,000367	0,005523	0,442536	0,044956
0,052289	0,422665	0,009162	0,007289	0,969473	0,475461	0,000403	0,007742	0,00624	0,477849
0,155619	0,017749	0,102799	0,298384	0,224046	0,829226	0,070939	3,73E-05	0,282872	0,459045
0,276915	3,25E-05	0,025037	0,168	0,00268	0,141837	0,286471	0,185592	0,366054	0,059228
0,207427	0,042354	0,001037	0,402198	6,59E-05	0,147615	0,0501	0,001991	0,804906	0,039993
0,000592	0,258288	0,033125	0,00582	0,261209	0,092719	0,105264	0,140514	0,083265	0,433349
0,165975	0,095023	0,253127	0,107554	0,354464	0,480303	0,264882	0,230612	0,053764	0,611327

Figura 57 - Matrice MAC condizione non danneggiata - 4°scenario di danno (0-4)

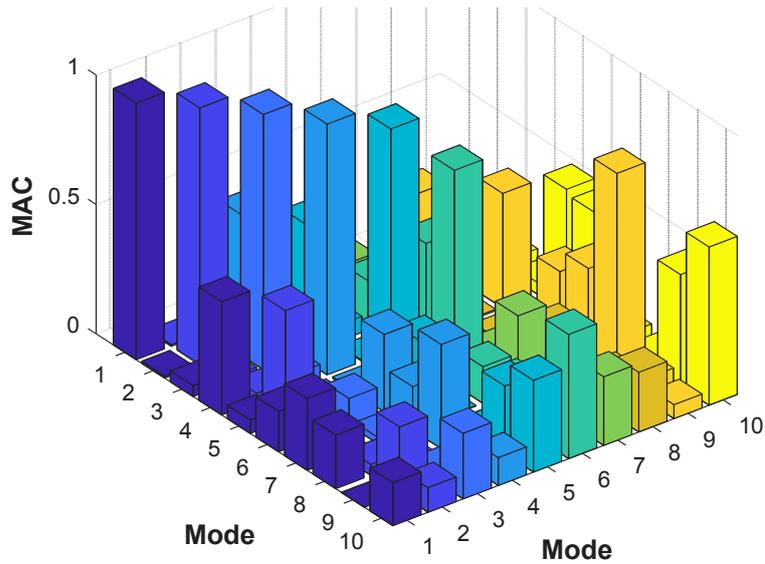


Figura 58 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (0-4)

0,99142	0,008686	0,048602	0,34421	0,036986	0,046698	0,041006	0,09182	0,199483	0,050271
0,006703	0,992272	0,026019	0,026329	0,33508	0,00398	0,006504	0,000891	0,038408	0,198516
0,016037	0,01038	0,981611	0,054866	0,005815	0,087419	0,016285	0,261444	0,024298	0,0163
0,400877	0,009073	0,135281	0,990533	0,005055	0,176956	0,003606	0,048565	0,317788	0,02183
0,025541	0,384678	0,071806	0,003353	0,987721	0,164712	0,001651	0,08729	0,000199	0,393123
0,134234	0,064778	0,199739	0,298642	0,4847	0,756782	0,001936	0,170133	0,165894	0,420877
0,060306	0,004449	0,211645	0,000364	5,16E-05	0,094354	0,617577	0,496265	4,01E-06	0,000523
0,000837	0,003045	0,16586	0,009032	0,017773	0,001144	0,270831	0,547377	0,000772	1,22E-05
0,223084	0,03946	0,056717	0,353879	0,004751	0,103416	0,000213	0,047932	0,966991	2,64E-06
0,062521	0,182499	0,072046	0,036194	0,407959	0,291882	8,97E-06	0,118982	0,032027	0,954929

Figura 59 - Matrice MAC relativa a 4°scenario di danno - 6° scenario di danno (4-6)

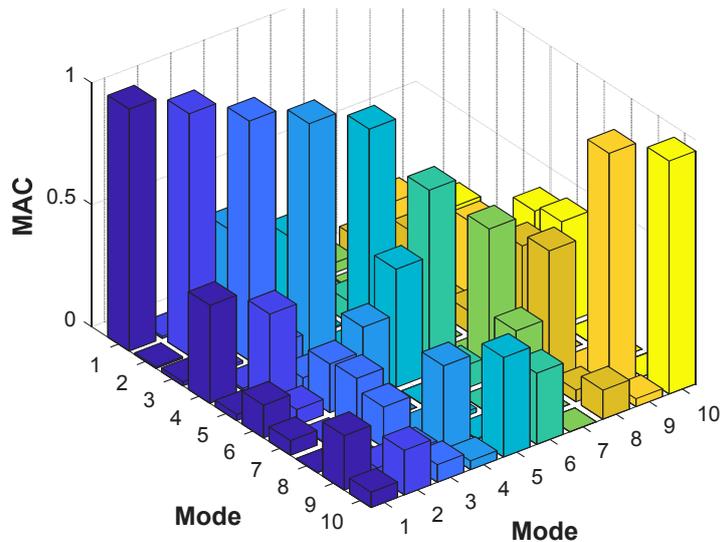


Figura 60 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (4-6)

## 5.4 APPLICAZIONI DEGLI ALGORITMI DI OSP AL CASO STUDIO

I risultati ottenuti dall'analisi modale, con riferimento alla scelta dei modi principali della struttura, costituiscono il punto di partenza per la prima ipotesi di posizionamento dei sensori. Infatti, nell'implementazione dei vari algoritmi bisogna sempre dapprima stabilire un set di possibili posizioni per gli accelerometri.

In particolare nel primo setup sono stati scelti 62 sensori così dislocati: ad ogni sezione fittizia del campanile, per tutta l'altezza, e ad intervalli di 3/4 metri, sono stati disposti 2 sensori di tipo biassiale, quindi con letture sia lungo x che lungo la direzione y.

Sulla base del primo setup di posizionamento dei sensori, è stata calcolata in ANSYS la matrice modale relativa ai gradi di libertà corrispondenti a tutte le possibili posizioni assumibili dagli accelerometri. In tal modo è stata ottenuta una matrice avente:

- Numero di righe pari al numero dei canali considerati (62);
- Numero di colonne pari al numero di modi considerati (10 modi di vibrare)

Tabella 5 - Risultati dello studio del MAC relativo alla configurazione di 62 sensori

SETUP (danno i-	MAC 62 accelerometri		SETUP (danno i-	MAC 62 accelerometri		SETUP (danno i-	MAC 62 accelerometri	
	OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA
0-0	9,37	10,00	0-1	9,55	9,99	4-1	10,04	6,24
1-1	9,74	10,00	0-2	9,74	9,85	4-2	10,1	6,29
2-2	9,96	10,00	0-3	10,16	9,71	4-3	10,43	6,02
3-3	10,8	10,00	0-4	9,94	6,27	4-5	10,01	6,87
4-4	6,55	10,00	0-5	11,59	7,56	4-6	7,01	8,57
5-5	9,75	10,00	0-6	9,38	6,66	4-7	7,24	8,47
6-6	5,6	10,00	0-7	10,03	6,79	4-8	10,08	6,19
7-7	6,19	10,00	0-8	9,78	9,47	4-9	9,88	6,20
8-8	9,68	10,00	0-9	9,26	9,99	4-10	9,96	5,84
9-9	9,13	10,00	0-10	9,4	8,77	4-11	9,63	6,28
10-10	8,09	10,00	0-11	9,31	9,10	4-12	10,46	5,76
11-11	8,29	10,00	0-12	9,69	9,69			
12-12	9,62	10,00						

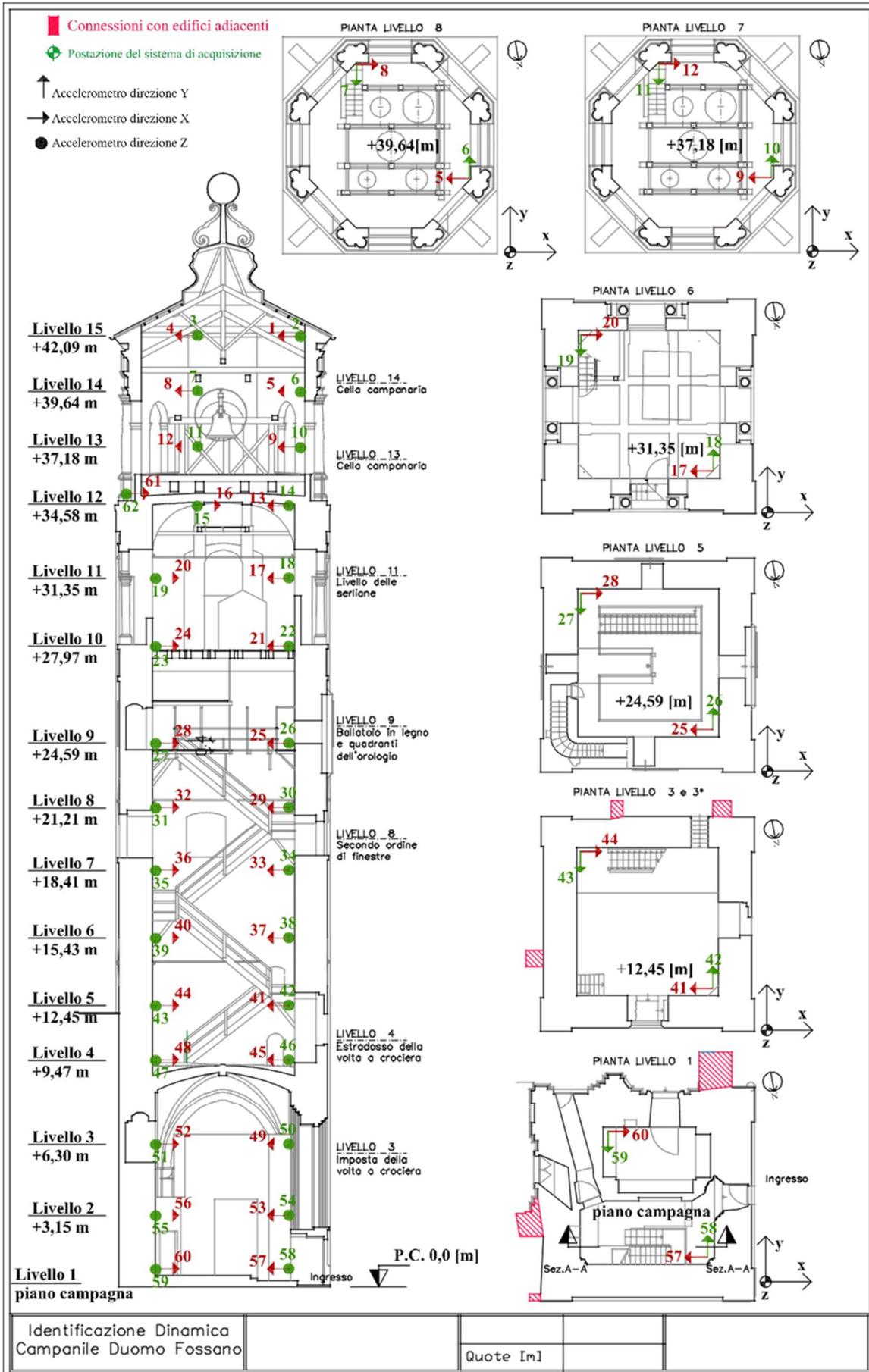


Figura 61 - Configurazione ipotetica di partenza (62 sensori) per scelta dei sensori ottimali (i sensori rossi sono quelli lungo la direzione x, mentre i sensori verdi sono quelli lungo y)

Tabella 6 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione

SETUP (danno i-	MAC Setup-Originale			MAC 62 accelerometri		$\Delta$ off-diag
	OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA	
0-0	13,38	10,00		9,37	10,00	-29,97
1-1	13,73	10,00		9,74	10,00	-29,06
2-2	13,52	10,00		9,96	10,00	-26,33
3-3	14,42	10,00		10,8	10,00	-25,10
4-4	9,29	10,00		6,55	10,00	-29,49
5-5	13,01	10,00		9,75	10,00	-25,06
6-6	8,05	10,00		5,6	10,00	-30,43
7-7	9,01	10,00		6,19	10,00	-31,30
8-8	12,85	10,00		9,68	10,00	-24,67
9-9	13,24	10,00		9,13	10,00	-31,04
10-10	11,20	10,00		8,09	10,00	-27,77
11-11	11,36	10,00		8,29	10,00	-27,02
12-12	13,72	10,00		9,62	10,00	-29,88
0-1	13,55	9,99		9,55	9,99	-29,52
0-2	13,52	9,85		9,74	9,85	-27,96
0-3	13,94	9,72		10,16	9,71	-27,12
0-4	13,25	6,72		9,94	6,27	-24,98
0-5	15,16	7,68		11,59	7,56	-23,55
0-6	12,74	6,83		9,38	6,66	-26,37
0-7	13,47	6,94		10,03	6,79	-25,54
0-8	13,40	9,46		9,78	9,47	-27,01
0-9	13,32	9,99		9,26	9,99	-30,48
0-10	13,10	8,77		9,4	8,77	-28,24
0-11	12,83	9,11		9,31	9,10	-27,44
0-12	13,80	9,69		9,69	9,69	-29,78
4-1	13,36	6,68		10,04	6,24	-24,85
4-2	13,39	6,69		10,1	6,29	-24,57
4-3	13,72	6,38		10,43	6,02	-23,98
4-5	13,19	7,00		10,01	6,87	-24,11
4-6	9,57	8,79		7,01	8,57	-26,75
4-7	9,95	8,76		7,24	8,47	-27,24
4-8	13,48	6,56		10,08	6,19	-25,22
4-9	13,22	6,67		9,88	6,20	-25,26
4-10	13,09	6,17		9,96	5,84	-23,91
4-11	12,81	6,66		9,63	6,28	-24,82
4-12	13,78	6,20		10,46	5,76	-24,09

Come si può notare dalla precedente tabella, con un ricco infittimento di sensori lungo l'altezza della torre, 62 sensori anziché 20, si ottiene ovviamente una migliore descrizione dell'analisi modale, riuscendo a cogliere in maniera ottimale gli spostamenti di essa. Questa verifica è stata eseguita basandosi sui valori di off-diag, ossia sulla somma dei termini della matrice di MAC fuori dalla diagonale principale, ricavata mettendo in relazione le due configurazioni di sensori.

A partire da questo setup, con 62 sensori dislocati su tutta l'altezza della torre si sono sviluppati diversi metodi di Optimal Sensor Placement in modo tale da ottenere configurazioni con pochi sensori, ma ugualmente efficienti.

I metodi analizzati, di cui in seguito verrà svolta la disamina, sono:

- The Effective Independence Method (EI);
- Eigenvalue Vector Product (EVP);
- Driving Point Residue Method (DPR);
- Algoritmo Genetico (GA);
- Algoritmo Genetico Multi-obiettivo

### 5.4.1 THE EFFECTIVE INDEPENDENCE METHOD (EI)

Il vettore delle risposte strutturali misurato e denotato da  $y_s$  può essere stimato come combinazione di forme modali  $N$  attraverso l'espressione:

$$y_s = \Phi q + w = \sum_{i=1}^N q_i \phi_i + w$$

Dove:

- $\phi$  è la matrice delle forme modali;
- $q$  è un vettore di coefficienti di risposta;
- $w$  è un vettore di rumore dei sensori che viene assunto stazionario con un valore medio pari a zero;
- $N$  è il numero di colonne della matrice  $\phi$

La matrice di covarianza dell'errore stimato è espressa come segue:

$$E(q - \hat{q})(q - \hat{q}) = \left[ \frac{1}{\sigma^2} \Phi^T \Phi \right]^{-1} = A^{-1}$$

Dove:

- $A$  è la matrice di Fisher e denota il valore atteso;
- $\hat{q}$  è un vettore che stima il vero vettore  $q$

Quindi la migliore stima di  $q$  si verifica quando  $A$  viene massimizzata, quindi la procedura migliore di selezione ottimale dei sensori è realizzata in modo tale da massimizzare il determinante della matrice di Fisher.

In pratica, l'analisi inizia risolvendo la seguente equazione agli autovalori:

$$[\Phi^T \Phi - \lambda I] \psi = 0$$

Dove:

- $\psi$  è la matrice degli autovettori di  $A$ ;
- $\lambda$  è la matrice associata degli autovalori

I coefficienti del metodo EI dei sensori candidati sono computati con la seguente relazione:

$$E_D = [\Phi \psi]^2 \lambda^{-1} \{1\}_k$$

Dove:

- $\{1\}_k$  è la somma di tutti i coefficienti appartenenti alla riga  $k$

Alternativamente l'indice  $E_d$  può essere valutato come la diagonale della seguente matrice:

$$E_D = \text{diag} (\phi[\phi^T\phi]^{-1}\phi^T)$$

Gli indici  $E_d$  rappresentano il contributo frazionale di ogni posizione del sensore nel rispetto dell'indipendenza delle forme modali.

Pertanto, per garantire la massimizzazione del determinante di  $A$ , viene sviluppato un algoritmo iterativo: ad ogni passo, il termine più piccolo di  $E_d$  viene rimosso, e quindi i corrispondenti elementi in  $\phi$  sono eliminati fino a quando si ottiene il numero di sensori necessario.

Innanzitutto si è effettuato lo studio della matrice MAC con 20 sensori (ugual numero a quelli presenti sulla torre) e data la bontà dei risultati si è deciso di ridurre ulteriormente il numero fino a 14 sensori, ottenendo ancora risultati migliori rispetto alla configurazione oggi presente.

## OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

Tabella 7 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP

SETUP (danno i-j)	MAC Setup-Originale		MAC EI 20 sensori		$\Delta$ off-diag [%]	MAC EI 14 sensori		$\Delta$ off-diag [%]
	OFF-DIAG	TRACCIA	OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA	
0-0	13,38	10,00	9,69	10	-27,58	10,48	10	-21,67
1-1	13,73	10,00	10,06	10	-26,73	11,05	10	-19,52
2-2	13,52	10,00	10,43	10	-22,86	11,58	10	-14,35
3-3	14,42	10,00	11,21	10	-22,26	12,67	10	-12,14
4-4	9,29	10,00	7,4	10	-20,34	8,34	10	-10,23
5-5	13,01	10,00	10,48	10	-19,45	12,99	10	-0,15
6-6	8,05	10,00	6,09	10	-24,35	6,72	10	-16,52
7-7	9,01	10,00	6,48	10	-28,08	6,97	10	-22,64
8-8	12,85	10,00	10,05	10	-21,79	10,56	10	-17,82
9-9	13,24	10,00	9,39	10	-29,08	10,08	10	-23,87
10-10	11,20	10,00	8,56	10	-23,57	8,74	10	-21,96
11-11	11,36	10,00	8,75	10	-22,98	8,6	10	-24,30
12-12	13,72	10,00	9,85	10	-28,21	11,25	10	-18,00
0-1	13,55	9,99	9,87	9,99	-27,16	10,76	9,99	-20,59
0-2	13,52	9,85	10,14	9,85	-25,00	11,08	9,85	-18,05
0-3	13,94	9,72	10,52	9,71	-24,53	11,66	9,73	-16,36
0-4	13,25	6,72	10,7	6,37	-19,25	11,52	6,21	-13,06
0-5	15,16	7,68	12,1	7,61	-20,18	13,57	7,6	-10,49
0-6	12,74	6,83	9,86	6,75	-22,61	10,77	6,53	-15,46
0-7	13,47	6,94	10,36	6,86	-23,09	11,1	6,68	-17,59
0-8	13,40	9,46	10,15	9,46	-24,25	10,77	9,48	-19,63
0-9	13,32	9,99	9,54	9,99	-28,38	10,28	9,99	-22,82
0-10	13,10	8,77	9,8	8,75	-25,19	10,39	8,69	-20,69
0-11	12,83	9,11	9,73	9,09	-24,16	9,93	9,07	-22,60
0-12	13,80	9,69	9,96	9,67	-27,83	11,13	9,62	-19,35
4-1	13,36	6,68	10,83	6,34	-18,94	11,72	6,21	-12,28
4-2	13,39	6,69	10,89	6,4	-18,67	11,79	6,23	-11,95
4-3	13,72	6,38	11,3	6,12	-17,64	12,33	6,08	-10,13
4-5	13,19	7,00	10,84	6,98	-17,82	12,77	6,5	-3,18
4-6	9,57	8,79	7,71	8,58	-19,44	8,45	8,47	-11,70
4-7	9,95	8,76	7,85	8,55	-21,11	8,52	8,35	-14,37
4-8	13,48	6,56	10,81	6,33	-19,81	11,38	6,13	-15,58
4-9	13,22	6,67	10,64	6,29	-19,52	11,41	6,15	-13,69
4-10	13,09	6,17	10,76	5,94	-17,80	11,07	5,9	-15,43
4-11	12,81	6,66	10,31	6,43	-19,52	10,73	6,12	-16,24
4-12	13,78	6,20	11,32	5,79	-17,85	12,16	5,88	-11,76

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

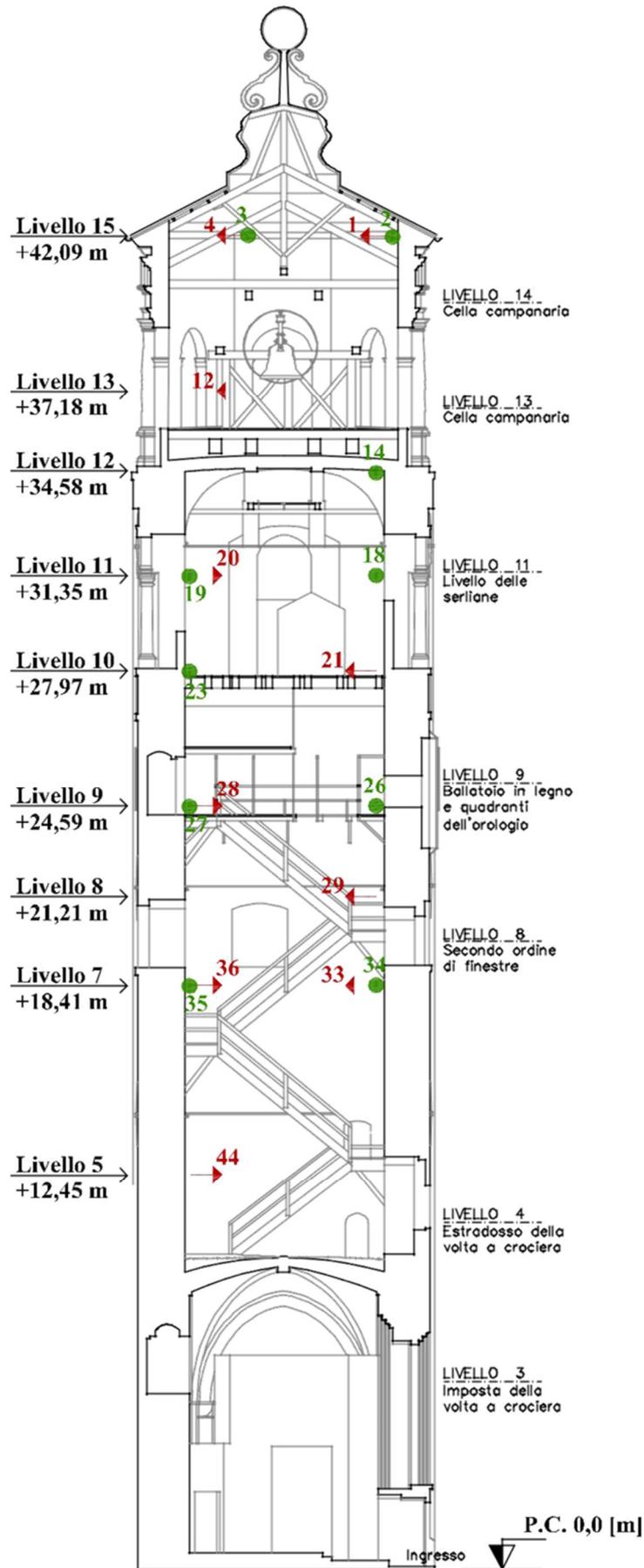


Figura 62 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo EI

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

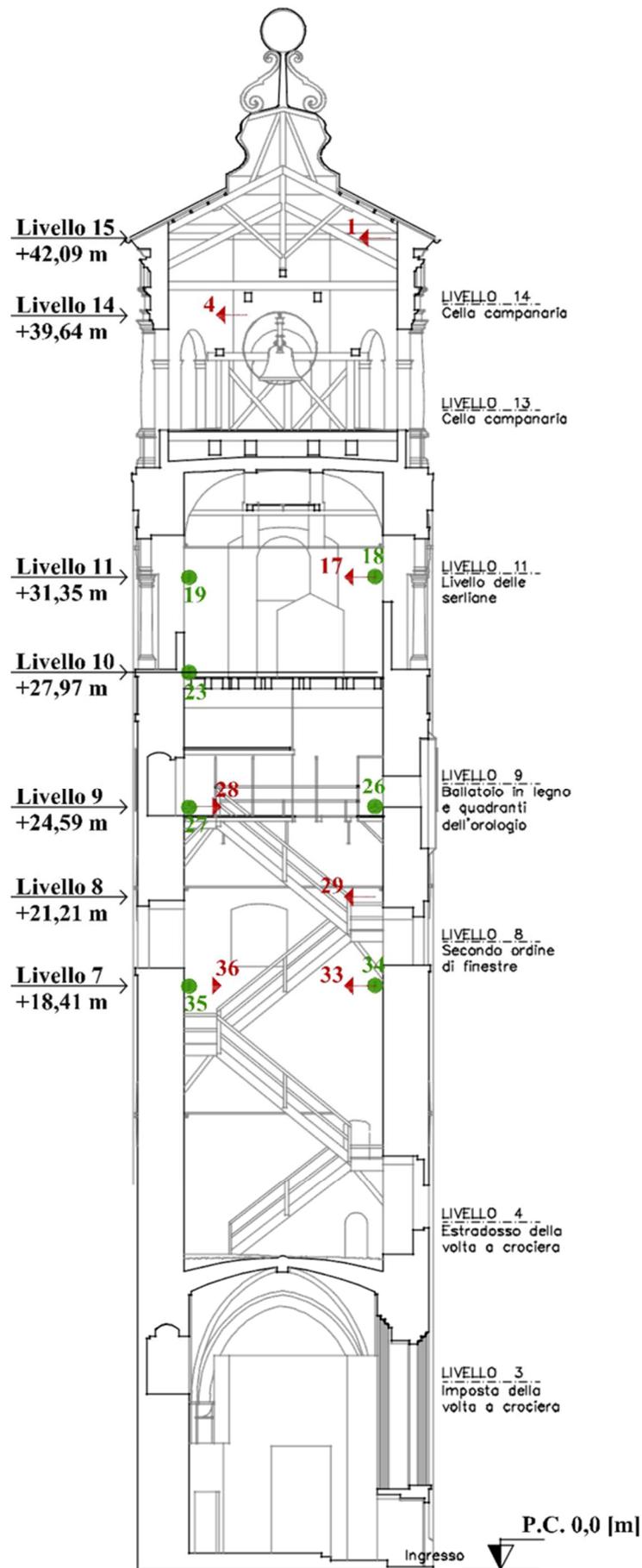


Figura 63 - Posizionamento dei 14 sensori ottenuti con metodo EI

## 5.4.2 EIGENVALUE VECTOR PRODUCT

Questo è un criterio di tipo meccanico e costituisce un indicatore consistente in valore assoluto del prodotto di ogni autovettore. Questo prodotto può essere scritto per l'i-esimo grado di libertà per il j-esimo modo di vibrare:

$$EVP_i = \prod_{j=1}^N |\phi_{ij}|$$

Questa tecnica consente di selezionare i sensori con i valori maggiori di EVP.

Tabella 8 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP

SETUP (danno i-j)	MAC Setup-Originale		MAC EVP 20 sensori		Δ off-diag
	OFF-DIAG	TRACCIA	OFF-DIAG	TRACCIA	
0-0	13,38	10,00	18,64	10,00	39,31
1-1	13,73	10,00	19,03	10,00	38,60
2-2	13,52	10,00	19,2	10,00	42,01
3-3	14,42	10,00	19,71	10,00	36,69
4-4	9,29	10,00	15,47	10,00	66,52
5-5	13,01	10,00	18,66	10,00	43,43
6-6	8,05	10,00	12,98	10,00	61,24
7-7	9,01	10,00	13,36	10,00	48,28
8-8	12,85	10,00	18,43	10,00	43,42
9-9	13,24	10,00	18,29	10,00	38,14
10-10	11,20	10,00	16,25	10,00	45,09
11-11	11,36	10,00	16,44	10,00	44,72
12-12	13,72	10,00	18,91	10,00	37,83
0-1	13,55	9,99	18,83	9,99	38,97
0-2	13,52	9,85	18,94	9,90	40,09
0-3	13,94	9,72	19,23	9,76	37,95
0-4	13,25	6,72	19,11	6,49	44,23
0-5	15,16	7,68	20,05	8,01	32,26
0-6	12,74	6,83	17,69	6,68	38,85
0-7	13,47	6,94	18,15	6,79	34,74
0-8	13,40	9,46	18,57	9,59	38,58
0-9	13,32	9,99	18,47	9,99	38,66
0-10	13,10	8,77	18,77	8,85	43,28
0-11	12,83	9,11	17,64	9,24	37,49
0-12	13,80	9,69	18,97	9,68	37,46
4-1	13,36	6,68	19,22	6,45	43,86
4-2	13,39	6,69	19,11	6,55	42,72
4-3	13,72	6,38	19,41	6,20	41,47
4-5	13,19	7,00	18,94	6,99	43,59
4-6	9,57	8,79	15,21	8,53	58,93
4-7	9,95	8,76	15,34	8,56	54,17
4-8	13,48	6,56	18,77	6,42	39,24
4-9	13,22	6,67	19,05	6,40	44,10
4-10	13,09	6,17	18,5	5,91	41,33
4-11	12,81	6,66	18,04	6,50	40,83
4-12	13,78	6,20	19,67	5,84	42,74

Dalla tabella si nota aver ottenuto valori di Off-Diag molto elevati. Questo significa che con questo numero di sensori e con tale distribuzione si crea maggior incertezza nella distinzione i modi di vibrare della struttura, rischiando appunto di confondere i modi tra di loro.

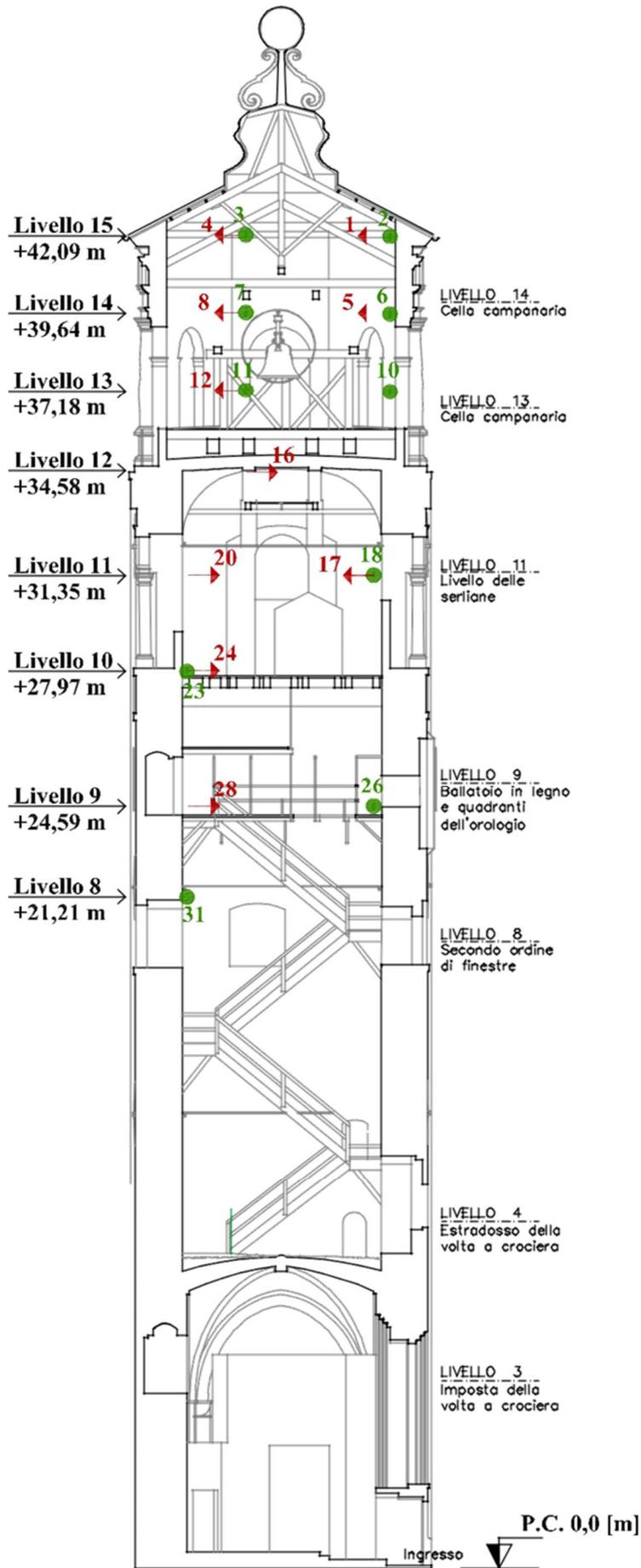


Figura 64 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo EVP

Con questo metodo servirebbero almeno 25 sensori per arrivare a risultati paragonabili a quelli della configurazione originale, divenendo così un'ottimizzazione antieconomica.

Inoltre dalla figura del setup si può notare una dislocazione spaziale di tali sensori non ottima.

### 5.4.3 DRIVING POINT RESIDUE METHOD

Questo metodo è un criterio di ottimizzazione meccanico (Worden e Burrows 2001). Il DPR per l'*i*-esimo grado di libertà può essere valutato utilizzando la seguente espressione:

$$DPR = \sum_{j=1}^N \frac{\phi_{ij}^2}{w_j}$$

Dove:

- $w_j$  è la frequenza relativa al *j*-esimo modo di vibrare;
- $\phi_{ij}^2$  è l'*i*-esimo spostamento nodale del *j*-esimo modo di vibrare

In questo caso i sensori possono trovarsi dove il punto nodale con grado di libertà è caratterizzato dalla massima risposta.

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

Tabella 9 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP

SETUP (danno i-j)	MAC Setup-Originale			MAC DPR 20 sensori		Δ off-diag
	OFF-DIAG	TRACCIA		OFF-DIAG	TRACCIA	
0-0	13,38	10,00		18,64	10,00	39,31
1-1	13,73	10,00		19,03	10,00	38,60
2-2	13,52	10,00		19,2	10,00	42,01
3-3	14,42	10,00		19,71	10,00	36,69
4-4	9,29	10,00		15,47	10,00	66,52
5-5	13,01	10,00		18,66	10,00	43,43
6-6	8,05	10,00		12,98	10,00	61,24
7-7	9,01	10,00		13,36	10,00	48,28
8-8	12,85	10,00		18,43	10,00	43,42
9-9	13,24	10,00		18,29	10,00	38,14
10-10	11,20	10,00		16,25	10,00	45,09
11-11	11,36	10,00		16,44	10,00	44,72
12-12	13,72	10,00		18,91	10,00	37,83
0-1	13,55	9,99		18,83	9,99	38,97
0-2	13,52	9,85		18,94	9,90	40,09
0-3	13,94	9,72		19,23	9,76	37,95
0-4	13,25	6,72		19,11	6,49	44,23
0-5	15,16	7,68		20,05	8,01	32,26
0-6	12,74	6,83		17,69	6,68	38,85
0-7	13,47	6,94		18,15	6,79	34,74
0-8	13,40	9,46		18,57	9,59	38,58
0-9	13,32	9,99		18,47	9,99	38,66
0-10	13,10	8,77		18,77	8,85	43,28
0-11	12,83	9,11		17,64	9,24	37,49
0-12	13,80	9,69		18,97	9,68	37,46
4-1	13,36	6,68		19,22	6,45	43,86
4-2	13,39	6,69		19,11	6,55	42,72
4-3	13,72	6,38		19,41	6,20	41,47
4-5	13,19	7,00		18,94	6,99	43,59
4-6	9,57	8,79		15,21	8,53	58,93
4-7	9,95	8,76		15,34	8,56	54,17
4-8	13,48	6,56		18,77	6,42	39,24
4-9	13,22	6,67		19,05	6,40	44,10
4-10	13,09	6,17		18,5	5,91	41,33
4-11	12,81	6,66		18,04	6,50	40,83
4-12	13,78	6,20		19,67	5,84	42,74

Si può notare che i risultati ottenuti sono molto simili all’algoritmo precedente, quindi anche questo metodo risulta non ottimale per effettuare un Optimal Sensor Placement sulla struttura studiata.

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

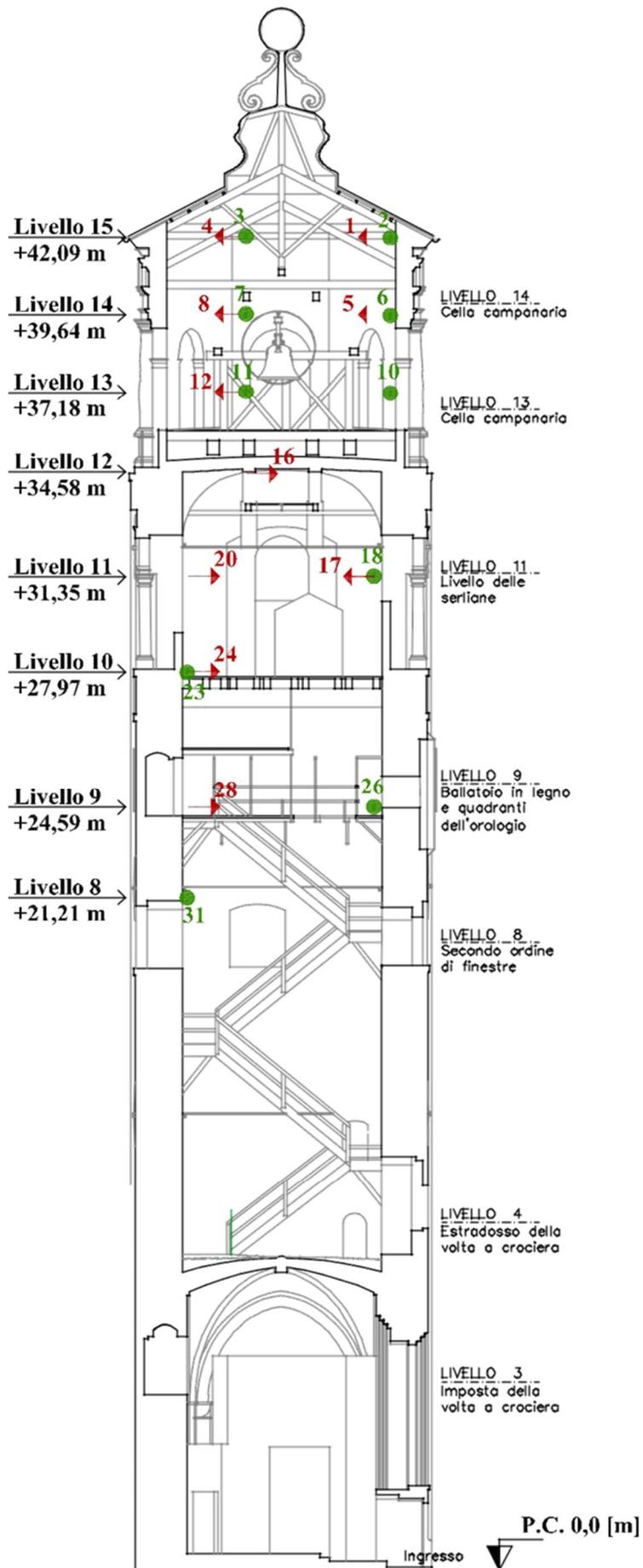


Figura 65 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo DPR

## 5.4.4 ALGORITMI GENETICI DI OSP

Un'importante famiglia di strategie di ottimizzazione di OSP si basa sull'uso di algoritmi genetici (GA), offrendo un criterio semplice e robusto per la soluzione del problema del posizionamento ottimale degli accelerometri.

L'uso degli algoritmi genetici non è recente in quanto compaiono esempi di questi metodi nella letteratura di ingegneria dal fine degli anni Ottanta (Goldberg 1989). Grazie al loro sviluppo e alla loro semplicità, essi sono raccomandati negli studi di complesse opere civili. Forse il primo uso di GA per il problema di posizionamento dei sensori è presentato nel documento (Yao, Sethares e Kammer 1993), ma molti altri studi sono stati condotti successivamente (Liu, et al. 2008), (Lin, et al. 2009), (Chow, et al. 2011), (Zhu et al. 2016).

Gli algoritmi genetici sono algoritmi di ottimizzazione che sviluppano soluzioni in maniera analoga al principio di Darwin relativo alla selezione naturale, dove i membri della popolazione competono per sopravvivere e riprodursi, mentre i più deboli rimangono esclusi nell'evoluzione. Ad ogni individuo viene assegnato un valore di fitness secondo quanto in maniera ottimale riesce a soddisfare l'obiettivo da raggiungere, legato in questo caso alla posizione ottimale dei sensori. Ogni possibile soluzione, cioè ogni set di parametri possibili nello spazio soluzione, viene codificato come un gene. Il passo successivo è quello di generare in modo casuale una popolazione iniziale di possibili soluzioni. Il numero di geni in una popolazione dipende da diversi fattori, tra cui la dimensione di ogni singolo gene, che a sua volta dipende dalle dimensioni dello spazio soluzione (Worden e Burrows, 2011).

Dopo aver generato una popolazione casuale di geni (accelerometri), è necessario decidere quali di essi sono più adatti a produrre le migliori soluzioni al problema. Per effettuare questa operazione, è necessaria una funzione di fitness che opera sui geni codificati e restituisce un singolo numero che fornisce una misura dell'adeguatezza della soluzione. Questi geni più adatti saranno utilizzati per l'accoppiamento per creare la prossima generazione di geni che eventualmente fornirà le migliori soluzioni al problema. Dopo aver selezionato un numero sufficiente di geni per l'accoppiamento, essi sono accoppiati in modo casuale per produrre una nuova coppia di geni. Il metodo più comune di combinazione utilizzato è chiamato *crossover*.



Figura 66 - Schema di funzionamento di un algoritmo genetico

La funzione obiettivo utilizzata nel problema di ottimizzazione utilizzato nel caso studio affrontato in questo lavoro di tesi, si basa sul concetto di MAC, cioè una matrice contenente indici che esprimono la correlazione di due vettori modali. Infatti gli elementi della matrice possono assumere valori tra 0 (indica vettori privo di correlazione) e 1 (indica vettori uguali).

L'obiettivo di OSP è quello di ridurre al minimo valore possibile gli elementi fuori diagonale della matrice MAC. L'algoritmo genetico cerca il miglior insieme di posizioni che consentono di ridurre al minimo ogni termine  $MAC_{ij}$  ( $i \neq j$ ). Questo permette di distinguere i modi della struttura per essere monitorati sulla base di un determinato numero di accelerometri. La funzione obiettivo utilizzata per risolvere il problema dell'OSP è basata sulle definizioni di cui sopra indicate, ottenuta dalla semplice sottrazione dei termini del MAC calcolato usando la matrice modale (MAC\_R) con quelli di MAC ideale (MAC\_I) e diviso il numero degli elementi della matrice ottenuto dal numero di modi selezionati della struttura.

Si fa questo confronto con la matrice identità perché l'intento dell'algoritmo è quello di ridurre gli elementi fuori diagonale.

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)}$$

$$MAC_{Ideale} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$error = \frac{\sum_i \sum_j (MAC_R - MAC_I)}{n}$$

## OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

Tabella 10 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP

SETUP (danno i-j)	MAC Setup-Originale		MAC GENETICO 20 sensori (danno4)				MAC GENETICO 16 sensori (danno3)			
	OFF-DIAG	TRACCIA	OFF-DIAG	TRACCIA	$\Delta$ off-diag [%]	error	OFF-DIAG	TRACCIA	$\Delta$ off-diag [%]	error
0-0	13,38	10,00	4,26	10	-68,16		4,71	10	-64,80	
1-1	13,73	10,00	4,29	10	-68,75		4,68	10	-65,91	
2-2	13,52	10,00	4,23	10	-68,71		4,65	10	-65,61	
3-3	14,42	10,00	4,24	10	-70,60		4,51	10	-68,72	
4-4	9,29	10,00	3,19	10	-65,66		4,45	10	-52,10	
5-5	13,01	10,00	4,09	10	-68,56		4,71	10	-63,80	
6-6	8,05	10,00	3,08	10	-61,74		3,98	10	-50,56	
7-7	9,01	10,00	3,28	10	-63,60		4,25	10	-52,83	
8-8	12,85	10,00	4,16	10	-67,63		4,5	10	-64,98	
9-9	13,24	10,00	4,27	10	-67,75		4,74	10	-64,20	
10-10	11,20	10,00	4,09	10	-63,48		4,62	10	-58,75	
11-11	11,36	10,00	4,23	10	-62,76		4,69	10	-58,71	
12-12	13,72	10,00	4,12	10	-69,97		4,73	10	-65,52	
0-1	13,55	9,99	4,28	9,99	-68,41	0,033	4,7	9,99	-65,31	0,035
0-2	13,52	9,85	4,44	9,81	-67,16	0,03	4,87	9,8	-63,98	0,034
0-3	13,94	9,72	4,46	9,69	-68,01	0,032	4,8	9,65	-65,57	0,024
0-4	13,25	6,72	5,66	6,44	-57,28	0,026	5,66	6,31	-57,28	0,035
0-5	15,16	7,68	6,82	6,96	-55,01	0,032	7,53	6,63	-50,33	0,037
0-6	12,74	6,83	5,67	6,85	-55,49	0,029	6,54	6,87	-48,67	0,033
0-7	13,47	6,94	6,18	6,96	-54,12	0,03	6,94	7,11	-48,48	0,03
0-8	13,40	9,46	4,9	9,29	-63,43	0,033	5,3	9,29	-60,45	0,032
0-9	13,32	9,99	4,28	9,99	-67,87	0,032	4,74	9,98	-64,41	0,035
0-10	13,10	8,77	5,42	8,67	-58,63	0,031	5,9	8,68	-54,96	0,037
0-11	12,83	9,11	5,23	8,97	-59,24	0,032	5,69	8,97	-55,65	0,033
0-12	13,80	9,69	4,44	9,69	-67,83	0,033	4,97	9,69	-63,99	0,03
4-1	13,36	6,68	5,65	6,43	-57,71		6,52	6,32	-51,20	
4-2	13,39	6,69	5,65	6,53	-57,80		6,58	6,34	-50,86	
4-3	13,72	6,38	5,66	6,33	-58,75		6,55	6,28	-52,26	
4-5	13,19	7,00	5,97	6,51	-54,74		6,98	6,51	-47,08	
4-6	9,57	8,79	4,09	8,57	-57,26		5,17	8,46	-45,98	
4-7	9,95	8,76	4,16	8,36	-58,19		5,24	8,09	-47,34	
4-8	13,48	6,56	5,64	6,44	-58,16		6,52	6,15	-51,63	
4-9	13,22	6,67	5,67	6,38	-57,11		6,52	6,25	-50,68	
4-10	13,09	6,17	5,91	6,24	-54,85		6,81	5,92	-47,98	
4-11	12,81	6,66	5,69	6,55	-55,58		6,57	6,17	-48,71	
4-12	13,78	6,20	5,86	6,14	-57,47		6,81	6,06	-50,58	

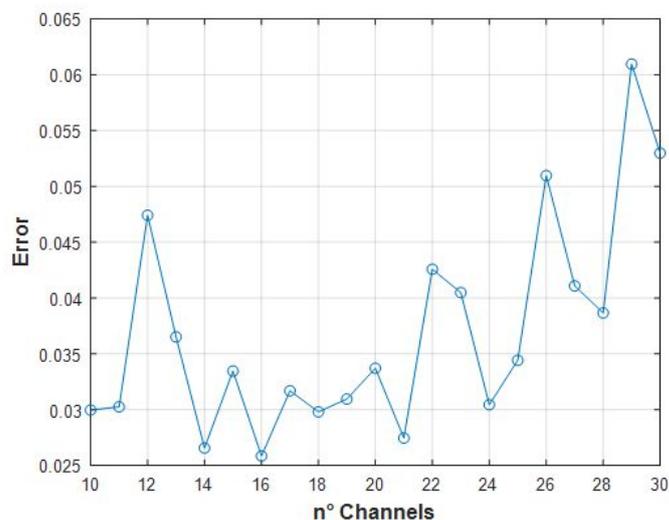


Figura 67 - Grafico dell'andamento della funzione errore in base al numero di sensori utilizzato

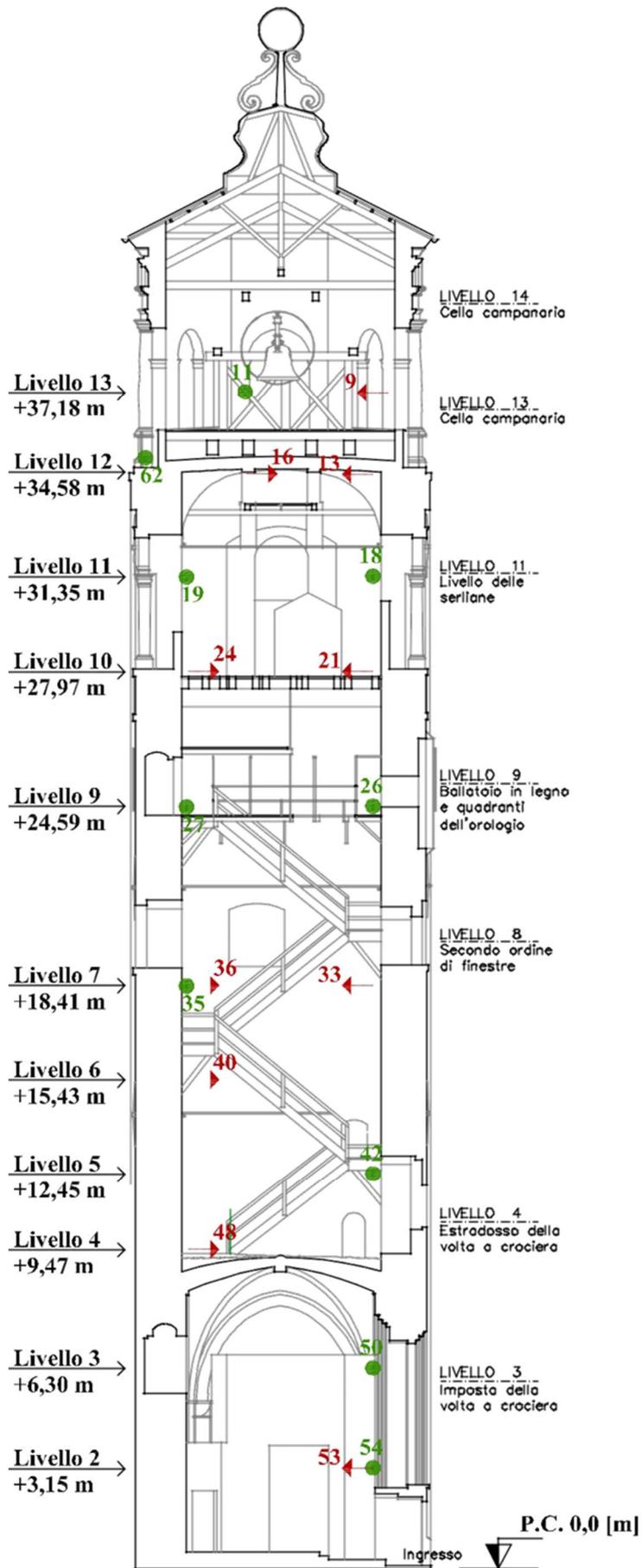


Figura 68 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con l' algoritmo genetico

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

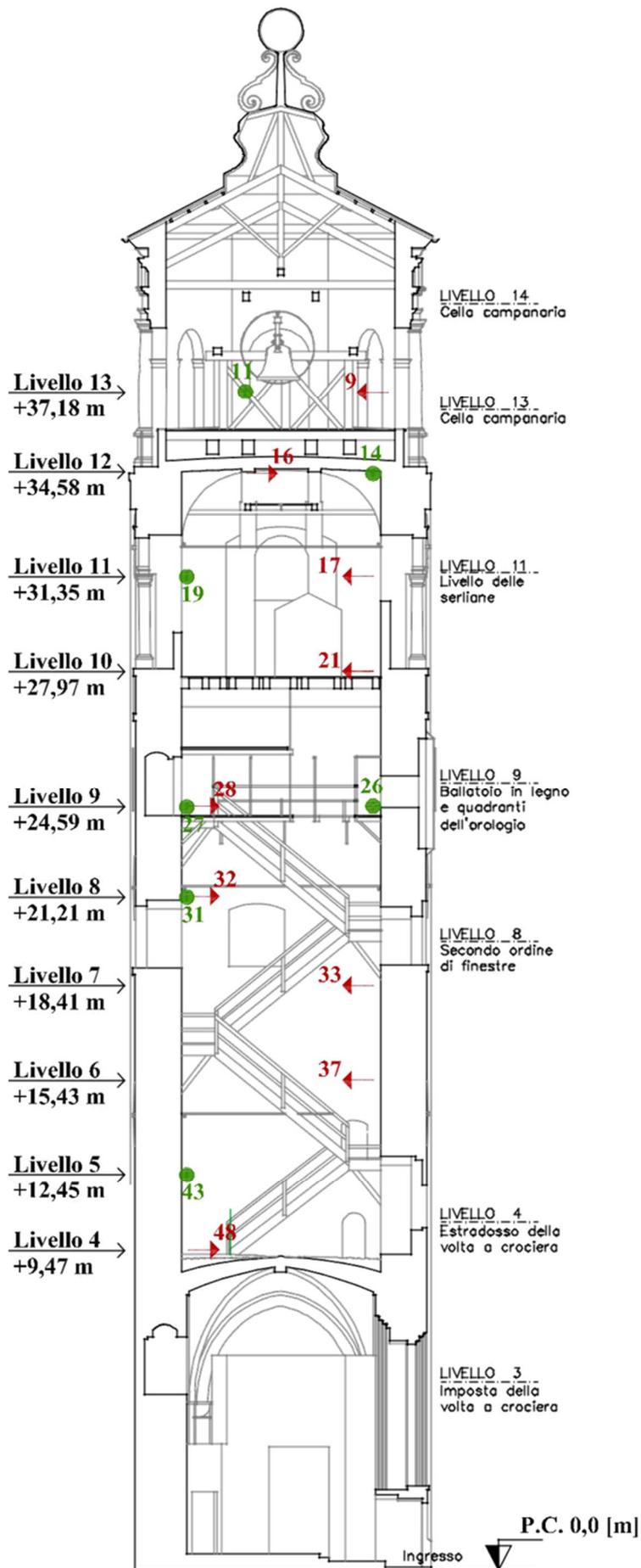


Figura 69 - Posizionamento dei 16 sensori ottenuti con l' algoritmo genetico

### Perché i GA funzionano?

Il processo evolutivo della popolazione di cromosomi corrisponde ad una ricerca nello spazio delle soluzioni potenziali. Tale ricerca richiede l'equilibrio di due finalità apparentemente in contrasto: lo sfruttamento delle soluzioni migliori e l'esplorazione dello spazio delle soluzioni. È principalmente questa capacità di bilanciamento a distinguere gli algoritmi genetici da altre metodologie che invece sfruttano costantemente le soluzioni migliori trovate, rinunciando all'esplorazione dello spazio delle soluzioni o la ricerca casuale, che, al contrario, esplora tale spazio senza dare alcun peso alle regioni dimostrate più promettenti. Gli algoritmi genetici effettuano una ricerca multi-direzionale mantenendo una popolazione di soluzioni potenziali e incoraggiando lo scambio di informazione.

L'evoluzione può essere vista come una ricerca nello spazio di tutti gli organismi possibili, rappresentato nel piano della figura seguente. L'operazione di incrocio (in rosso) agisce in modo creativo, combinando di quando in quando caratteristiche disparate e saltando verso nuove regioni dello spazio degli organismi dove risiede la maggior parte degli individui più adatti. La mutazione (in verde), al contrario, tende quasi sempre a cercare il miglior organismo tra i "primi vicini".

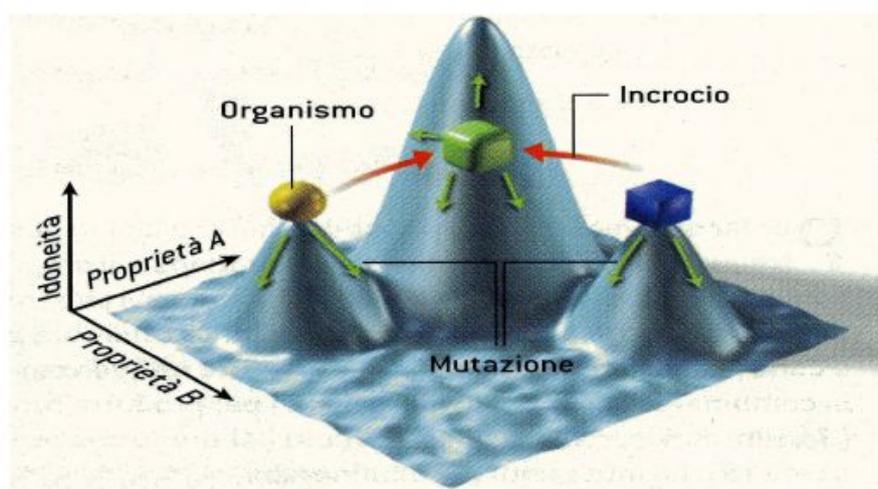


Figura 70 – Schema di funzionamento dell'algoritmo genetico (figura tratta da Wikipedia)

## 5.4.5 ALGORITMI GENETICI CON OTTIMIZZAZIONE MULTIOBIETTIVO

L'ottimizzazione multi obiettivo, o MOOP (Multi Objective Optimisation) è un processo che mira a trovare la soluzione ottima di un problema costituito da molteplici obiettivi. I primi studi su come risolvere i MOP (Multi Objective Problem) sono iniziati nella seconda metà del '900 e sono aumentati notevolmente con il passare degli anni. Ciò è dovuto al fatto che quasi la totalità dei problemi reali non può essere ricondotta ad un SOP (Single Objective Problem), in quanto ci sono spesso molteplici aspetti di cui tener conto, il più delle volte in contrasto tra loro. I primi approcci che furono applicati per la risoluzione dei MOP consistono nel ricondurre il problema ad un SOP, eventualmente sfruttando informazioni come l'ordine di preferenza degli obiettivi. Quando si affronta un MOP ottenere una soluzione univoca è possibile solo qualora gli obiettivi non sono in conflitto tra loro, ma nella maggior parte dei casi reali questo non accade. Quindi nella MOOP si ha a che fare con un insieme di soluzioni, e non più una soluzione univoca.

Per il caso studio esaminato, l'algoritmo di ottimizzazione multiobiettivo implementato riguarda due funzioni obiettivo:

- Minimizzare la somma dei termini fuori diagonale (Off-diag) della matrice di AUTOMAC;
- Minimizzare l'intera matrice di CROSSMAC.

Tabella 11 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP

SETUP (danno i-j)	MAC Setup-Originale		MAC GENETICO 14 sensori (Multiobject)			
	OFF-DIAG	TRACCIA	OFF-DIAG	TRACCIA	$\Delta$ off-diag	error
0-0	13,38	10,00	4,08	10	-69,51	
1-1	13,73	10,00	4,11	10	-70,07	
2-2	13,52	10,00	4	10	-70,41	
3-3	14,42	10,00	4,3	10	-70,18	
4-4	9,29	10,00	3,53	10	-62,00	
5-5	13,01	10,00	4,25	10	-67,33	
6-6	8,05	10,00	3,55	10	-55,90	
7-7	9,01	10,00	3,73	10	-58,60	
8-8	12,85	10,00	3,95	10	-69,26	
9-9	13,24	10,00	4,1	10	-69,03	
10-10	11,20	10,00	4,06	10	-63,75	
11-11	11,36	10,00	4,04	10	-64,44	
12-12	13,72	10,00	4,1	10	-70,12	
0-1	13,55	9,99	4,1	9,99	-69,74	0,0889
0-2	13,52	9,85	4,2	9,81	-68,93	0,082
0-3	13,94	9,72	4,39	9,64	-68,51	0,0739
0-4	13,25	6,72	6,06	6,16	-54,26	0,0819
0-5	15,16	7,68	6,83	6,55	-54,95	0,0765
0-6	12,74	6,83	6,16	6,88	-51,65	0,0815
0-7	13,47	6,94	6,49	6,93	-51,82	0,0838
0-8	13,40	9,46	4,63	9,31	-65,45	0,0758
0-9	13,32	9,99	4,1	9,99	-69,22	0,0729
0-10	13,10	8,77	5,1	8,71	-61,07	0,0673
0-11	12,83	9,11	4,91	9	-61,73	0,0548
0-12	13,80	9,69	4,28	9,66	-68,99	0,0663
4-1	13,36	6,68	6,08	6,14	-54,49	
4-2	13,39	6,69	6,04	6,26	-54,89	
4-3	13,72	6,38	6,34	6,03	-53,79	
4-5	13,19	7,00	6,33	6,5	-52,01	
4-6	9,57	8,79	4,55	8,33	-52,46	
4-7	9,95	8,76	4,6	8,09	-53,77	
4-8	13,48	6,56	6,06	6,17	-55,04	
4-9	13,22	6,67	6,09	6,08	-53,93	
4-10	13,09	6,17	6,33	5,97	-51,64	
4-11	12,81	6,66	6,02	6,32	-53,01	
4-12	13,78	6,20	6,37	5,82	-53,77	

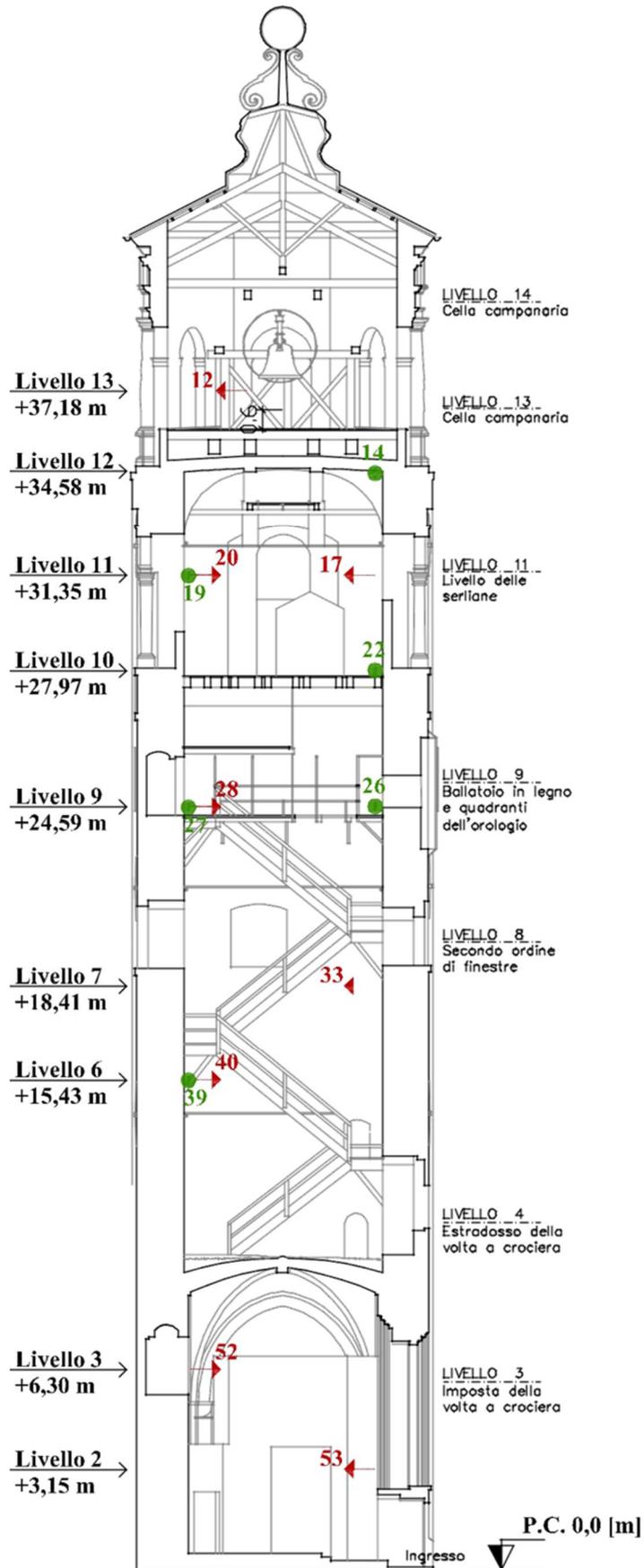


Figura 71 - Posizionamento dei 14 sensori ottenuti con l'algoritmo genetico multi-obiettivo

## 5.5 CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON I METODI DI OSP

### ➤ Metodi tradizionali

SETUP i-j	MAC ORIGINALE		MAC EI 20 sens.			MAC EI 14 sens.			MAC EVP/DPR 20 sens.		
	traccia	off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag
4-4	10	9,29	10	7,4	-20,34%	10	8,34	-10,23%	10	15,47	66,52%
0-4	6,72	13,25	6,37	10,7	-19,25%	6,21	11,52	-13,06%	6,49	19,11	44,23%
4-6	8,79	9,57	8,58	7,71	-19,44%	8,47	8,45	-11,70%	8,53	15,21	58,93%

### ➤ Metodi innovativi

SETUP i-j	MAC ORIGINALE		MAC GENETICO 20 sens.			MAC GENETICO 16 sens.			MAC GENETICO Multiobject 14 sens.		
	traccia	off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag	traccia	off-diag	$\Delta$ off-diag
4-4	10	9,29	10	3,19	-65,66%	10	4,45	-52,10%	10	3,53	-62,00%
0-4	6,72	13,25	6,44	5,66	-57,28%	6,31	5,66	-57,28%	6,16	6,06	-54,26%
4-6	8,79	9,57	8,57	4,09	-57,26%	8,46	5,17	-45,98%	8,33	4,55	-52,46%

Tra i metodi classici di Optimal Sensor Placement, EI, EVP, DPR, si nota che in questo caso studio, il metodo più performante è il metodo Effective Independence. Infatti come si può notare dalla tabella sopra riportata, con questo metodo, si ottengono sostanziali riduzioni dei valori fuori diagonale della matrice di MAC a parità di numero di sensori (con una diversa dislocazione), ma anzi, si ottengono ancora ottimi risultati con un numero ridotto di accelerometri, consentendo un eventuale risparmio in termini economici. Fino ad un numero di 14 sensori si sono ottenuti risultati maggiormente performanti rispetto alla condizione attuale di progetto di 20 sensori.

Implementando però anche altri metodi di OSP più innovativi o comunque di applicazioni civili più recenti, quali gli Algoritmi genetici o Algoritmi di ottimizzazione Multiobiettivo, si nota un'ulteriore miglioramento, sia in termini di matrici di MAC, sia una migliore dislocazione dei sensori sulla torre.

Anche tramite questi ultimi algoritmi genetici si è raggiunti un numero di sensori pari a 14, ma con una diversa dislocazione rispetto al posizionamento derivante dal metodo EFI, e con risultati ancor più performanti.

## 5.6 PROGETTO ESECUTIVO DI OSP

Il confronto dei risultati ottenuti ci ha indirizzato a scegliere come setup di sensori ottimali quello ottenuto con il metodo di ottimizzazione genetico, il quale ha fornito 16 sensori ottimali e soprattutto in posizioni maggiormente accessibili rispetto a quelli ottenuti con altri metodi e in punti più sensibili della struttura.

Il progetto finale prevede 16 canali (2 accelerometri biassiali e 12 accelerometri monoassiali), rispettivamente nelle seguenti direzioni:

- 9 canali in direzione X;
- 7 canali in direzione Y.

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT SULLA TORRE CAMPANARIA

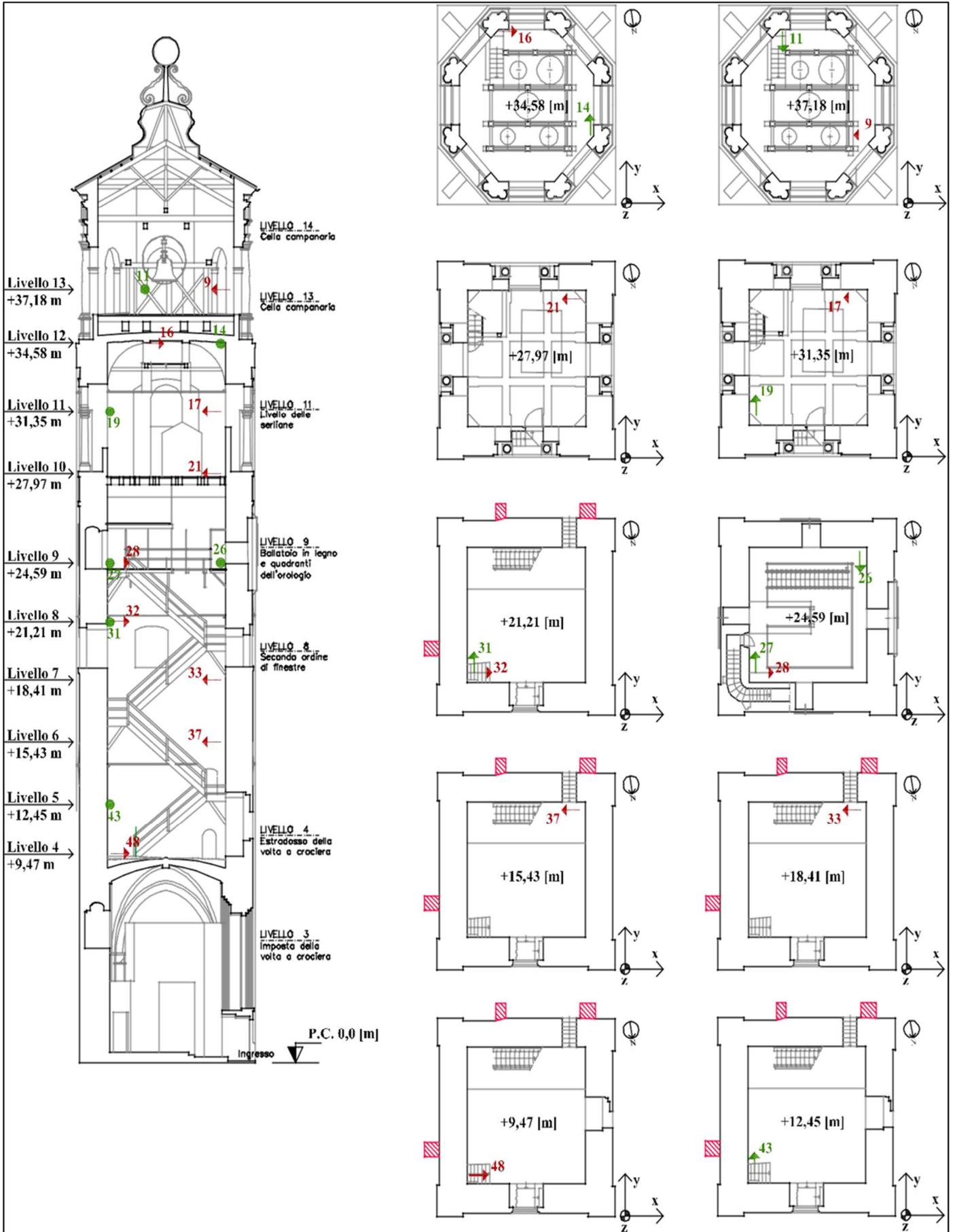


Figura 72 - Setup accelerometri progetto definitivo

## 6 CONCLUSIONI

Il sistema di monitoraggio installato su un edificio storico di interesse rilevante è di grande utilità perché consente di valutare lo stato di sicurezza oltre che facilitarne la programmazione della manutenzione. La migliore interpretazione dei risultati è possibile anche basandosi sulla modellazione che ne è stata fatta, frutto dell'accurata ricognizione della documentazione tecnica disponibile, di rilievi in situ e delle relazioni tecniche di dettaglio sui materiali costituenti la struttura.

Nella presente tesi è stata condotta un'analisi approfondita della torre campanaria del Duomo di Fossano, con il fine di ottenere una possibile e razionale proposta di un sistema di monitoraggio dinamico.

Nelle fasi iniziali del lavoro sono state illustrate le problematiche legate alla conservazione del patrimonio architettonico, oggetto di studi e dibattiti estremamente attuali. La conservazione dell'architettura presente sul territorio, infatti, è ormai entrata a pieno titolo nella più vasta cultura disciplinare della conservazione.

Il monitoraggio strutturale è uno degli strumenti più efficaci per la tutela del patrimonio costruito. Attraverso l'impiego di questi sistemi si è in grado di controllare il comportamento globale degli edifici, per poi poterne applicare le strategie di conservazione più adeguate.

A seguito di un'analisi conoscitiva del manufatto oggetto di studio, è stato realizzato un modello geometrico dell'edificio, per poi successivamente costruirne uno ad elementi finiti in ambiente ANSYS, da cui sono state ricavate le informazioni, dinamiche in questo lavoro di tesi, necessarie alla successiva fase di progettazione del sistema di monitoraggio.

Un'ipotesi progettuale di un sistema di monitoraggio dinamico è stata ottenuta ottimizzando in ambiente Matlab un algoritmo genetico, che ha restituito una possibile posizione ottimale dei sensori minimizzando le funzioni di errore prefissate, costituita da 14 o 16 sensori al massimo, contro i 20 della configurazione di progetto ad oggi proposta, ottenendo un'importante riduzione di costi della strumentazione.

Come emerso dai risultati precedentemente riportati, l'influenza di parti di campanile danneggiate e la loro interazione non possono essere trascurati quando si progetta un sistema di monitoraggio dinamico. In particolare, è stato osservato che quando porzioni di struttura subiscono danni sismici o di degrado, possono influenzare significativamente la risposta dinamica globale.

L'identificazione modale è un importante strumento per la valutazione della risposta della struttura e può essere utilizzata per la valutazione delle caratteristiche dinamiche della costruzione, per successive modellazioni numeriche, per valutare gli effetti di vibrazioni ambientali (per esempio dovute al traffico o al vento) e monitorare l'evoluzione del danno sulla struttura. Per la stima dei parametri modali, le analisi *output-only* sembrano essere valide tecniche con un campo di applicabilità a differenti tipologie di strutture. Queste tecniche richiedono un'eccitazione casuale nel dominio del tempo e nello spazio fisico della struttura e, specialmente nel campo delle costruzioni in muratura, questa analisi rappresenta una soluzione ottimale per l'investigazione del comportamento dinamico e delle proprietà meccaniche dei materiali della struttura, avendo bassi costi di applicazione e richiedendo brevi periodi di studio, ma soprattutto avendo una bassa invasività nel rispetto dei principi del restauro e della conservazione. Poiché, inoltre, le misure vengono effettuate nelle effettive condizioni operative della struttura i parametri modali che si ottengono sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle sue reali condizioni di utilizzo.

Come precedentemente detto, i parametri modali forniscono indicazioni relative al comportamento strutturale degli edifici ed eventuali variazioni di tali parametri nel tempo influenzano la risposta dinamica della struttura, nel dettaglio, l'abbassarsi delle frequenze proprie, la modifica delle forme modali e la variazione dello smorzamento sono sintomi della presenza di fenomeni di danno all'interno della struttura.

Va considerato che anche la variazione di temperatura e umidità induce variazione sui parametri modali, anche di entità superiore degli stessi parametri attesi in caso di presenza di danneggiamento strutturale. Perciò anche il monitoraggio delle suddette caratteristiche sarebbe necessario per permettere di valutare la loro variazione sotto gli effetti ambientali, potendo così meglio definire l'effettivo stato di danno della struttura.

Quindi, come intervento futuro che potrebbe essere programmato sulla cella campanaria, si potrebbe pensare all'installazione di strumenti integrativi agli accelerometri, quali termometri, per rilevare anche le variazioni di temperatura e umidità per studiare l'eventuale correlazione tra questi parametri e il comportamento dinamico globale della struttura.

# 7 INDICE FIGURE

Figura 1 - Rappresentazione delle fasi e dello schema funzionale del processo del monitoraggio.....	21
Figura 2 - Sensori, monitoraggio strutturale .....	32
Figura 3 - Pendolo diretto e rovescio .....	33
Figura 4 - Inclinometro da parete.....	33
Figura 5 – Inclinometro fisso da foro.....	33
Figura 6 - Celle di carico.....	34
Figura 7 - Celle di pressione idrauliche.....	34
Figura 8 - Schema di funzionamento di un accelerometro piezoelettrico .....	35
Figura 9- Schema di funzionamento di un accelerometro capacitivo .....	35
Figura 10 - Identificazione dinamica: approccio analitico e sperimentale .....	41
Figura 11 - Esempio di errore di aliasing: a) campionamento insufficiente; b) campionamento corretto .....	44
Figura 12- a) spettro reale; b) effetto leakage .....	44
Figura 13 - Classificazione dei metodi di identificazione.....	45
Figura 14 - Sistema smorzato SDOF.....	46
Figura 15 - Sistema smorzato MDOF .....	46
Figura 16 - Procedura adottata durante la correlazione tra test dinamici e il modello FEM .....	50
Figura 17 - Stralcio del progetto originale del Quarini (1771).....	52
Figura 18 - (a) Prospetto principale della struttura da Via Roma; (b) Vista interna della torre campanaria con scala in legno a sostituzione della scala a spessore di muratura esterna. ....	53
Figura 19 - Piante e sezione trasversale della struttura del campanile.....	54
Figura 20 - Stato attuale con intervento di cerchiatura esterna della struttura .....	55
Figura 21 - Particolare dei carotaggi effettuati sulla muratura del campanile .....	56
Figura 22 - Valori dei moduli elastici assunti nel modello agli elementi finiti.....	57
Figura 23 - Geometria Elemento shell281 (raffigurata anche la triangular option, non raccomandata) .....	59
Figura 24 - Stress Output dell'elemento shell281 .....	59
Figura 25 - Geometria dell'elemento Link180 .....	60
Figura 26 - Vista assonometrica del campanile (ANSYS) .....	61
Figura 27 - Vista laterale del campanile (ANSYS) .....	61
Figura 28 - Vista obliqua del campanile (ANSYS).....	61
Figura 29 - - Suddivisione a colori dei macroelementi con differenti caratteristiche di modulo elastico.....	62
Figura 30 - Meshatura del campanile.....	63
Figura 31 - 1° modo di vibrazione.....	64
Figura 32 - 2° modo di vibrazione.....	65
Figura 33 - 3° modo di vibrazione.....	65
Figura 34 - 4° modo di vibrazione.....	66
Figura 35 - 5° modo di vibrazione.....	66
Figura 36 - 7° modo di vibrazione.....	67
Figura 37 - 8° modo di vibrazione.....	68
Figura 38 - 9° modo di vibrazione.....	68
Figura 39 - 10° modo di vibrazione.....	69
Figura 40 - Modulo elastico di 2367 N/mm <sup>2</sup> anziché 2690 N/mm <sup>2</sup> per il livello zero.....	74
Figura 41 - Modulo elastico di 2367 N/mm <sup>2</sup> anziché 2690 N/mm <sup>2</sup> per il livello zero.....	74
Figura 42 - Modulo elastico di 2367 N/mm <sup>2</sup> anziché 2690 N/mm <sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm <sup>2</sup> invece di 1320 N/mm <sup>2</sup> per il primo livello.....	75

Figura 43 - Modulo elastico di 2367 N/mm <sup>2</sup> anziché 2690 N/mm <sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm <sup>2</sup> invece di 1320 N/mm <sup>2</sup> per il primo livello; modulo elastico di 2173 N/mm <sup>2</sup> anziché 2470 N/mm <sup>2</sup> per la cella campanaria.....	75
Figura 44 - Modulo elastico di 2367 N/mm <sup>2</sup> anziché 2690 N/mm <sup>2</sup> per il livello zero; modulo elastico di 1161 N/mm <sup>2</sup> invece di 1320 N/mm <sup>2</sup> per il primo livello.....	76
Figura 45 - Modulo elastico di 2173 N/mm <sup>2</sup> anziché 2470 N/mm <sup>2</sup> per la cella campanaria.....	76
Figura 46 - Modulo elastico di 2173 N/mm <sup>2</sup> anziché 2470 N/mm <sup>2</sup> per la cella campanaria; modulo elastico di 1100 N/mm <sup>2</sup> invece di 1250 per il secondo livello.....	77
Figura 47 - Modulo elastico di 1100 N/mm <sup>2</sup> anziché 1250 N/mm <sup>2</sup> per il secondo livello.....	77
Figura 48 – Riduzione del modulo elastico del 10% di ogni parte della torre.....	78
Figura 49 - 7° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto.....	80
Figura 50- 8° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto.....	81
Figura 51- 8° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto.....	82
Figura 52- 10° modo relativo alla quarta configurazione di danno (sopra); struttura integra sotto.....	83
Figura 53 - Configurazione di sensori da progetto attuale.....	88
Figura 54 - Figure Matlab del 1°-2°-3° modo di vibrare nella condizione non danneggiata.....	89
Figura 55 - Matrice MAC condizione non danneggiata - non danneggiata (0-0).....	90
Figura 56 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (0-0).....	90
Figura 57 - Matrice MAC condizione non danneggiata - 4°scenario di danno (0-4).....	90
Figura 58 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (0-4).....	91
Figura 59 - Matrice MAC relativa a 4°scenario di danno - 6° scenario di danno (4-6).....	91
Figura 60 - Rappresentazione grafica matrice MAC precedente (4-6).....	91
Figura 61 - Configurazione ipotetica di partenza (62 sensori) per scelta dei sensori ottimali (i sensori rossi sono quelli lungo la direzione x, mentre i sensori verdi sono quelli lungo y).....	93
Figura 62 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo EI.....	98
Figura 63 - Posizionamento dei 14 sensori ottenuti con metodo EI.....	99
Figura 64 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo EVP.....	101
Figura 65 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con metodo DPR.....	104
Figura 66 - Schema di funzionamento di un algoritmo genetico.....	105
Figura 67 - Grafico dell'andamento della funzione errore in base al numero di sensori utilizzato.....	107
Figura 68 - Posizionamento dei 20 sensori ottenuti con l'algoritmo genetico.....	108
Figura 69 - Posizionamento dei 16 sensori ottenuti con l'algoritmo genetico.....	109
Figura 70 – Schema di funzionamento dell'algoritmo genetico (figura tratta da Wikipedia).....	110
Figura 71 - Posizionamento dei 14 sensori ottenuti con l'algoritmo genetico multi-obiettivo.....	112
Figura 72 - Setup accelerometri progetto definitivo.....	114

## 8 INDICE TABELLE

Tabella 1 - Parametri di rigidezza della struttura ottenuti dal modello agli elementi finiti update .....	57
Tabella 2. Matrice di AutoMAC .....	86
Tabella 3. Matrice di CrossMAC .....	86
Tabella 4 - Risultati dello studio del MAC relativo all'OSP originale .....	89
Tabella 5 - Risultati dello studio del MAC relativo alla configurazione di 62 sensori.....	92
Tabella 6 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione .....	94
Tabella 7 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP.....	97
Tabella 8 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP.....	100
Tabella 9 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP.....	103
Tabella 10 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP.....	107
Tabella 11 - Riepilogo dei risultati di alcuni setup ottenuti dallo studio della matrice di MAC e relativa variazione usando diversi OSP.....	111

## 9 BIBLIOGRAFIA

- A. Mita, *Emerging needs in Japan for health monitoring technologies in civil and building structures*. In Proc. 2nd Int. workshop on structural health monitoring, Stanford University, 1999.
- Abruzzese D., Angelaccio M., Buttarazzi B., Giuliano R., Miccoli L., Long Life Monitoring of Historical Monuments via Wireless Sensors Network, International Symposium on Wireless Communication Systems, IEEE, 2009, pp. 570-574.
- Agnoli F.M., *Le pasque veronesi*, Rimini, 2013.
- Aktan, A. E., Chase, S., Inman, D. & Pines, *Monitoring and managing the health of infrastructure systems*. In Proc. SPIE 4337, xi–xxi, 2001.
- Aktan, A.E., Ciloglu, S.K. Grimmeisman, Pan, Q. and Catbas, F.N., *Opportunities and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis*, Proc. of International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Bordeaux, France, 2005.
- Allemang, R.J., Brown, D.L., *A correlation coefficient for modal vector analysis*, Proceedings of the 1st SEM International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA, 1982.
- Amador S., *Operational Modal Analysis Studio Toolbox - User's guide*, Porto, Portugal, 2010
- Andersen, P., Brincker, R., Goursat, M., Mevel L., *Automated Modal Parameter Estimation For Operational Modal Analysis of Large Systems*, Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, Vol. 1, pp. 299-308, 2007.
- Ans, B., Héroult, J., Jutten, C., *Adaptive neural architectures: detection of primitives*, 1985, COGNITIVA '85, pp. 593-597.
- Barbetta G., *Le mura e le fortificazioni di Verona*, Verona, 1970.
- Bartoli G., Blasi C., *Il sistema di monitoraggio della cupola di Santa Maria del Fiore: problematiche relative al funzionamento degli strumenti ed alla gestione dei dati*, Università di Firenze, Firenze, 1993.
- Beccaro E., Milan C., *SHM (Structural Health Monitoring) di strutture storiche: analisi statica e dinamica dell'Arena di Verona*, Università di Padova, 2011.
- Beconcini M.L., Croce P., Mengozzi M., Caratterizzazione dinamica del campanile di San Nicolain Pisa, Attidi convegno workshop WONDERmasonry, DICEA Firenze, 2006, pp. 100- 112.
- Belouchrani, A., Abed-Meraim, K., Cardoso, J.F., Moulines, E., *A blind source separation technique using second-order statistics*, 1997, IEEE Transactions on Signal Processing, pp. 434-444.
- Bettinali F., Galimberti C., Meghella M., Talvacchia, *The dynamic analysis of large structures as a method for structural investigation*, ENEL/CRIS report 4002fb, 1990.
- Bocca M., Cosar E. I., Salminen J., Eriksson L.M., *A Reconfigurable Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring*; 4<sup>th</sup> International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligence Infrastructure, Zurich, Switzerland, 2009.
- Bozzetto L.V., *Castelvecchio e il ponte scaligero*, a cura del Commando Forze Terrestri Alleate del Sud Europa, Siena - Verona, 1995.

- Brederode P., De Winter P., Van Staalduinen P., Segers W., Dynamic offshore structure test (DOST) project—a new approach to quality assessment of offshore structures, in Proc. Inspection, repair and maintenance IRM/AODC86, Aberdeen, 1986.
- Brincker, R., Andersen, P., Jacobsen, N.J., *Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis*, Proceedings of the 25th SEM International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA, 2007.
- Brownjohn J. M. W., P. Moyo P., Rizos C., Tjin S. C., *Practical issues in using novel sensors in SHM of civil infrastructure: problems and solutions in implementation of GPS and fibre optics*, In Proc. 4th Int. workshop on structural health monitoring, Stanford University, Destech Publications Inc., USA, 2003, pp. 499-506.
- Brownjohn J., Tjin S.C., Tan G.H., Tan B.L., Chakraboorty S., *A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure*, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, United Kingdom, June 28 – July 1, 2004
- Brownjohn J.M.W., *Structural health monitoring of civil infrastructure*, Phil. Trans. R. Soc. A, p.589, 2007
- Brownjohn J.M.W., *Structural health monitoring of civil infrastructure*, in Phil. Trans. R. Soc. 2007, pp.610-613.
- Caccin P., *Sviluppo di procedure automatiche di trattamento e analisi dei dati statici per il monitoraggio strutturale*, Università di Padova, 2012
- Casarin F., Bello E., *Structural Monitoring*, atti di Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, 2010.
- Celebi M., *Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings)*, Technical Report No. 0-7460-68170, United States Geological Survey, Menlo Park, CA, 2002.
- Ceravolo R., Pescatore M., De Stefano A., *Symptom-based reliability and generalized repairing cost in monitored bridges*, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2007.
- Chang F. K. , *A summary report of the 2nd workshop on structural health monitoring held*, at Stanford University on September 8–10, 1999.
- Coppolino R. N., Rubin S., *Detectability of structural failure in offshore platforms by ambient vibration monitoring*, in Proc. OTC12, vol. 4,, Houston, Texas, 1980, pp. 101– 110.
- Dalglish W. A., Rainer J. H., *Measurements of wind induced displacements and accelerations of a 57-storey building in Toronto, Canada*, In Proc. 3rd Colloquium On industrial Aerodynamics, Aachen, Building Aerodynamics, pt.2, 1978, pp.67–78.
- Darbre G. R., Proulx J., *Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin*, in Earthquake Eng. Struct. Dyn. 31, 2002, pp. 475–480.
- Del Grosso A., Inaudi D., Lanata F., *Strain and Displacement Monitoring of a Quay Wall in the Port of Genoa by Means of Fibre Optic Sensors*, 2nd European Conference on Structural Control, Paris, France, July 3–7, 2000.
- Del Grosso A., Lanata F., *Model Data analysis and Interpretation for Long-term Monitoring of Structures*, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 7, 2001, pag.285–300.

- DelGrosso A., Lanata F., Torre A., *Recent Structural Health Monitoring applications in Italy*, 3rd European Structural Health Monitoring, 2006, pag.439 – 446.
- Del Grosso A., Lanata F., Inaudi D., Posenato D., *Data management and damage identification for continuous static monitoring of structures*, 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, 11-13 jul 2006
- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G., Kullaa, J., *Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, pp. 34-56, 2008.
- Det Norske Veritas, *Rules for the design, construction and inspection of offshore structures*, Norway, DNV, 1977.
- DETR, *List of Panel Engineers: Reservoirs Act 1975*, Department of the Environment, Transportation and the Regions, 2001.
- Devriendt, C., De Troyer, T., De Sitter, G., Guillaume, P., *Automated operational modal analysis using transmissibility functions*, Proceedings of ISMA 2008, Leuven, Belgium, 2008.
- Dyke S. J., Bernal D., Beck J., Ventura C., *Experimental phase 2 of the structural health monitoring benchmark problem*, In Proc. ASCE Engineering Mechanics Conference, WA, 2003
- Fabbrocino G., C.Ranieri, G.M. Verderame, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*.
- Farrar C. R., Ph.D., P.E., *New Trends in Vibration-Based Structural Health Monitoring: A Statistical Pattern Recognition Paradigm for SHM*, 2006.
- Farrar C.R., K. Worden, *An introduction to structural health monitoring*, Phil. Trans. R. Soc., pp. 303-306, 2007
- Fattoretto M., *Sviluppo di procedure automatiche di stima dei parametri modali per il monitoraggio strutturale*, Università di Padova, 2012
- Flint A. R., Smith B. W., *Strengthening and refurbishment of Severn Crossing*, Proc. Institution of Civil Engineers, Structures and buildings, 1992.
- Ghosh D., Sharman R., Rao H.R., Upadhyaya S., *Self-healing systems - survey and synthesis*, Decision Support System, Buffalo, 2007
- Guan, H., Karbhari, V.M., Sikorski, C.S., *Timedomain output only modal parameter extraction and its application*, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, pp. 577-584, 2005.
- Han B. G., Yu Y., Han B. Z., and Ou J. P., *Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors*, Sensors and Actuators: A physical, 2008, pp. 536-543.
- Hudson D. E., *Dynamic tests on full-scale structures*, In Proc. ASCE EMD Specialty Conf., UCLA, 1977, pp.1–39.
- Inaudi D., *SOFO sensors for static and dynamic measurements*, in Symp. on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, 2004.
- Jear, A. P., Ellis B. R., *Vibration tests on structures at varied amplitudes*, In Proc. ASCE EMD specialty conference-dynamic response of structures, Atlanta, Georgia, 1981, pp.281–294.

- Kijewski T. L., Correa, Kareem A., *The Chicago monitoring project: a fusion of information technologies and advanced sensing for civil infrastructure*, in *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures*, vol. 2, ed. Z. Wu & M. Abe., Amsterdam, 2003, pp. 1003– 1010.
- Kim J.T., Ryu Y.S., Cho H.M., Stubbs N., *Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-based Method vs Mode-shape-based Method*, *Engineering Structures*, 2003, 25, 57–67.
- Kiremidjian A., Straser E., *A modular wireless damage monitoring system for structures*, Report TR128, Blume Centre, Stanford CA, 1998
- Kullaa J., *Functions of a Structural Health Monitoring System*, 2008.
- Lanata F., *Damage detection algorithms for continuous static monitoring of structures*, PhD Thesis, University of Genoa, DISEG, Italy, 2005.
- Lanslots, J., Rodiers, B., Peeters, B., *Automated Pole-Selection: Proof-of-Concept and Validation*, *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, 2004.
- Li H., Xiao HG., Ou J.P., *Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition*, *Composites Science and Technology*, 2008, pp. 2114-2119
- Li X., Peng G. D., Rizos C., Tamura Y., Yoshida A., *Seismic response of a tower as measured by an integrated RTK-GPS system*, in *Symposium on engineering surveys for construction works and structural engineering*, Nottingham, UK, 2004
- List D., *Rejuvenating the Tamar Bridge. A review of the strengthening and widening project and its effect on operations*, In *Proc. 4th Int. Cable Supported Bridge Operators' Conference*, Copenhagen, 2004.
- Littler J. D., Ellis B. R., *Interim findings from full-scale measurements at Hume Point*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 36, 1990, pp. 1181–1190.
- Lynch, J.P. and Law, K.H., *Energy of Civil Engineering Structures*, Bordeaux, France, 2005.
- Magalhães, F., Cunha, A., Caetano, E., *Permanent monitoring of “Infante D. Henrique” bridge based on FDD and SSI-COV methods*, *Proceedings of ISMA2008*, Leuven, Belgium, 2008.
- Maguire J. R., *Condition monitoring of structures: a briefing note for clients and authors*. In *Proc. Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings* 134, pp. 279–280, 1999.
- Marinelli S., *Castelvecchio e le collezioni*, in *Carlo Scarpa a Castelvecchio* a cura di Magagnato L., pp. 133-148, 1982.
- Marini P, *Castelvecchio*, in *Suggerimenti dal passato immagini di Verona Scaligera* a cura di Boschi R., Vecchiato M., Verona, 2001.
- Marotto M., *Indagini sperimentali, monitoraggio e modellazione strutturale per la valutazione della sicurezza sismica dell’Arca di Cansignorio della Scala*, Verona, Università di Padova, 2008.
- Masri S.F., Sheng L.H., Caffrey J.P., Nigbor R.L., Wahbeh M., Abdel-Ghaffar A.M., *Application to a Web-enabled Real-time Structural Health Monitoring System for Civil Infrastructure Systems*, *Smart Materials and Structures*, 13, 2004, pag. 1269–1283.
- Mita A., *Emerging needs in Japan for health monitoring technologies in civil and building structures*, In *Proc. 2nd Int. workshop on structural health monitoring*, Stanford University, 1999

- Mita A., Inamura T., Yoshikawa S., *Structural health monitoring system for buildings with automatic data management system*, 4th International Conference on Earthquake Engineering Taipei, Taiwan October 12-13, 2006
- Mizuno Y., Monroig E., Fujino Y., *Wavelet decomposition-based approach for fast damage detection of civil structures*, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 14, No. 1, 2008, pp. 27-32.
- Modena C., Casarin F., Valluzzi M. R., Da Porto F., *Structural monitoring for the evaluation of the dynamic response of historical monuments, Masonry and Timber Structures*, Publisher RILEM Publications, 2008.
- Mufti, A. 2001 *Guidelines for structural health monitoring*. ISIS Design Manual No. 2. ISIS Canada.
- Murphy R., *Carlo Scarpa & Castelvechio*, Londra, 1991.
- Omenzetter P., Brownjohn J.M.W., *Applications of Time Series Analysis for Bridge Monitoring*, Smart Materials and Structures, 15(1), 2006, pag.129–138.
- Omenzetter P., Brownjohn J.M.W., Moyo P., *Identification of Unusual Events in Multi Channel Bridge Monitoring Data*, Mechanical Systems & Signal Processing, 2004, pag.409– 430.
- Ou J.P., Han B.G., *Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, pp. 329-336.
- Peeters B., De Roeck G., *Stochastic system identification for operational modal analysis: a review*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 123, 2001, pp. 659–667.
- Poncelet, F., Kerschen, G., Golival, J.C. , *In-orbit vibration testing of spacecraft structures*, *Proceedings of ISMA 2008*, Leuven, Belgium, 2008.
- Poncelet, F., Kerschen, G., Golival, J.C., Verhelst, D., *Output-only modal analysis using blind source separation techniques*, 2007, Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 2335-2358.
- Pozzi M., Zonta D., Zanon P., *Monitoring Heritage Buildings with Wireless Sensor Networks: The Torre Aquila Deployment*, Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, San Francisco (CA, USA), April 13-16, 2009.
- Qiao G.F., Ou J.P., *Corrosion Monitoring of Reinforcing Steel in Cement Mortar by EIS and ENA*, Electrochimica Acta, 2007, pp. 8008-8019.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G., *ARES, una procedura ibrida per l'identificazione dinamica automatica e il monitoraggio strutturale*, 2011, ANIDIS, Bari, Italy.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E., *Automated Operational Modal Analysis as structural health monitoring tool: theoretical and applicative aspects*. *Key Engineering Materials*. Vol. 347. pp. 479-484, 2007.
- Rainieri, C., *Operational Modal Analysis for Seismic Protection of Structures*, Ph.D thesis, Naples, Italy, 2008.
- Reynders E., De Roeck G., *Fully automated modal parameter estimation for Structural Health Monitoring*, 2011, EVACES, pp. 477-184.
- Robert-Nicoud Y., Raphael B., Burdet O., Smith I.F.C., *Model Identification of Bridges Using Measurement Data*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 20(2), 2005, pag.118–131.
- Ross R. M., Matthews S. L., *Discussion: in-service structural monitoring - a state of the art review*, 1995, pp .214–217.

- Ross, R. M. & Matthews, *In-service structural monitoring—a state of the art review*. Struct. Eng. 73, 23–31, 1995.
- Rucker, W., Rohrmann, R. G. & Hille, F. 2006 *Guidelines for monitoring and assessment - a SAMCO initiative as a basis for international standardization*. In Proc. SHMII-2, structural health monitoring and intelligent infrastructures, vol. 2 (ed. J. Ou, H. Li and Z. Duan), pp. 1671–1676. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Rytter A., *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993
- Serino G., Spizzuoco M., Marsico M. R., *Application of structural isolation and health monitoring The ‘Our Lady of Tears Shrine’ in Syracuse (Italy)*, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009
- Severn R. T., Jeary A. P., Ellis B. R., *Forced vibration tests and theoretical studies on dams*, in Proc. Inst. Civil Eng., 1981, pp. 575–595.
- Shahrivar F., Bouwkamp J. G., *Damage detection in offshore platforms using vibration information*, in Proc. 3rd Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, New Orleans, vol. 2, pp. 174–185, 1980.
- Sikorsky C., *Development of a Healthy Monitoring System for Civil Structures Using a Level IV Non-destructive Damage Evaluation Method*, F. K. Chang, *Structural Health Monitoring*, 2000, pag. 68–81.
- Smarsly K., *An autonomous computing approach towards monitoring of civil engineering structures*, *Asian Journal of civil engineering (building and housing)*, vol. 11, no. 2, 2010, pag. 149–163
- Soderstrom, T., *On model structure testing in system identification*, *Automatica*, 11, pp. 537–541, 1975.
- Sohn H., Czarneski J. A., Farrar C. R., *Structural Health Monitoring Using Statistical Process Control*, *Journal of Structural Engineering*, 126(11), 2000, pag. 1356–1363.
- Spencer B. F. Jr, Agha G., *ISHMP: Matlab-based GUI User’s Guide*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011
- Ubertini F., Gentile C., Materazzi A. L., *On the automatic identification of modal parameters by subspace methods*, 2011, EVACES, pp. 493–503.
- Van Overschee, P., De Moor, B. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory – Implementation – Applications*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P., and Van Overmeire, M., *Autonomous structural health monitoring – Part I: modal parameter estimation and tracking*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(4), pp. 637–657, 2002.
- Wong K. Y., Man K. L., Chan W. Y., *Real-time kinematic spans the Gap GPS world*, July, 2001.
- Worden K., Manson G.; *Structural Health Monitoring using Pattern Recognition*; in *New Trends in Vibration-Based SHM*, CISM, Udine, September, 2008.
- Worden S. K., Farrar C. R., Manson G. and Park G.; *The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring*, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Issue*, June, 2007.

# 10 ALLEGATO A - listato ANSYS

```

/prep7
/vup,1,z
shpp,off,,nowarn

!Gravità
!ACEL,0,0,-9.81,

!
*****
*****
*****
! GEOMETRIA
!
*****
*****
*****
*****
! NODI DEL CAMPANILE
*****
*****
*****
! livello zero
k,1,0,0,0
k,2,7.79,0,0
K,3,7.79,7.99,0
k,4,0,7.99,0

! livello zero
k,5,0,0,9.47

k,6,7.79,0,9.47
K,7,7.79,7.99,9.47
k,8,0,7.99,9.47

! livello prima serie tiranti
(altezza 14.06)
k,9,0,0,14.06

k,10,7.79,0,14.06
K,11,7.79,7.99,14.06
k,12,0,7.99,14.06

! livello seconda serie tiranti
(altezza 21.21)
k,13,0,0,21.21

k,14,7.79,0,21.21
K,15,7.79,7.99,21.21
k,16,0,7.99,21.21

! livello terza serie tiranti (altezza
32.45)
k,17,0,0,32.45

k,18,7.79,0,32.45
K,19,7.79,7.99,32.45
k,20,0,7.99,32.45

! livello secondo solaio cella
campanaria
k,21,0,0,34.58
k,22,2.33,0,34.58
k,23,5.40,0,34.58
k,24,7.79,0,34.58
k,25,7.79,2.34,34.58
k,26,7.79,5.62,34.58
K,27,7.79,7.99,34.58
K,28,5.40,7.99,34.58
K,29,2.33,7.99,34.58
k,30,0,7.99,34.58
k,31,0,5.62,34.58
k,32,0,2.34,34.58

! livello tetto cella campanaria
(altezza 42.09)
k,33,2.33,0,42.09
k,34,5.40,0,42.09
k,35,7.79,2.34,42.09
k,36,7.79,5.62,42.09
K,37,5.40,7.99,42.09
K,38,2.33,7.99,42.09
k,39,0,5.62,42.09
k,40,0,2.34,42.09

! colmo tetto (altezza 44.19)
k,41,3.93,3.98,44.19

!IMMISSIONE PUNTI
ENRICO_INFITTIMENTO AREE
SULLA FACCIATA 3
k,201,0.00,3.00,0.00
k,202,0.00,5.30,0.00
! k,203,0.00,0.00,2.20
k,204,0.00,3.00,2.20
k,205,0.00,5.30,2.20
! k,206,0.00,7.99,2.20
! k,207,0.00,0.00,4.70
k,208,0.00,3.00,4.70
k,209,0.00,5.30,4.70
! k,210,0.00,7.99,4.70
k,211,0.00,3.00,7.80
k,212,0.00,5.30,7.80
k,213,0.00,3.00,9.47
k,214,0.00,5.30,9.47
k,215,0.00,3.00,12.90
k,216,0.00,5.30,12.90
k,217,0.00,3.00,18.60
k,218,0.00,5.30,18.60
k,219,0.00,3.00,21.21
k,220,0.00,5.30,21.21
k,221,0.00,3.00,23.70
k,222,0.00,5.30,23.70
! k,223,0.00,0.00,24.90
k,224,0.00,2.30,24.90
k,225,0.00,3.00,24.90
k,226,0.00,5.30,24.90
k,227,0.00,5.95,24.90
! k,228,0.00,7.99,24.90
k,229,0.00,2.30,27.50
k,230,0.00,5.95,27.50
! k,231,0.00,0.00,29.65
k,232,0.00,2.30,29.65
k,233,0.00,5.95,29.65
! k,234,0.00,7.99,29.65
! k,235,0.00,0.00,32.40
k,236,0.00,2.30,32.40
k,237,0.00,5.95,32.40
! k,238,0.00,7.99,32.40
k,239,0.00,2.34,35.70
k,240,0.00,2.90,35.70
k,241,0.00,4.95,35.70
k,242,0.00,5.62,35.70
k,243,0.00,2.34,37.00
k,244,0.00,2.90,37.00
k,245,0.00,4.95,37.00
k,246,0.00,5.62,37.00
k,247,0.00,2.34,39.00
k,248,0.00,2.90,39.00
k,249,0.00,4.95,39.00
k,250,0.00,5.62,39.00

```

	k,350,3.60,0.00,7.80	!!IMMISSIONE PUNTI
	! k,351,7.79,0.00,7.80	ENRICO_INFITTIMENTO AREE
!!IMMISSIONE PUNTI		SULLA FACCIATA 2 ( Y fissa a
ENRICO_INFITTIMENTO AREE		7.99m )
SULLA FACCIATA 1	!!IMMISSIONE PUNTI	
k,301,0.00,0.00,2.20	ENRICO_INFITTIMENTO AREE	k,501,0.00,7.99,2.20
k,302,7.79,0.00,2.20	SULLA FACCIATA 4 ( X fissa a	k,502,7.79,7.99,2.20
k,303,0.00,0.00,4.70	7.79m )	k,503,0.00,7.99,4.70
k,304,7.79,0.00,4.70		k,504,7.79,7.99,4.70
k,305,0.00,0.00,7.80	k,401,7.79,0.00,2.20	k,505,0.00,7.99,7.80
k,306,6.80,0.00,7.80	! k,402,7.79,7.99,2.20	k,506,7.79,7.99,7.80
k,307,2.90,0.00,21.21	k,403,7.79,0.00,4.70	k,507,2.90,7.99,9.47
k,308,4.10,0.00,21.21	! k,404,7.79,7.99,4.70	k,508,4.80,7.99,9.47
k,309,2.90,0.00,23.70	k,405,7.79,0.00,7.80	k,509,2.90,7.99,12.00
k,310,4.10,0.00,23.70	! k,406,7.79,7.99,7.80	k,510,4.80,7.99,12.00
k,311,0.00,0.00,24.90	k,407,7.79,3.20,9.47	k,511,2.90,7.99,18.60
k,312,1.95,0.00,24.90	k,408,7.79,5.20,9.47	k,512,4.80,7.99,18.60
k,313,2.90,0.00,24.90	k,409,7.79,3.20,18.60	k,513,2.90,7.99,21.21
k,314,4.10,0.00,24.90	k,410,7.79,5.20,18.60	k,514,4.80,7.99,21.21
k,315,5.50,0.00,24.90	k,411,7.79,3.20,21.21	k,515,2.90,7.99,23.70
! k,316,7.79,0.00,24.90	k,412,7.79,5.20,21.21	k,516,4.80,7.99,23.70
k,317,1.95,0.00,27.50	k,413,7.79,3.20,23.70	k,517,0.00,7.99,24.90
k,318,5.50,0.00,27.50	k,414,7.79,5.20,23.70	k,518,1.90,7.99,24.90
k,319,0.00,0.00,29.65	k,415,7.79,0.00,24.90	k,519,2.90,7.99,24.90
k,320,1.95,0.00,29.65	k,416,7.79,2.30,24.90	k,520,4.80,7.99,24.90
k,321,5.50,0.00,29.65	k,417,7.79,3.20,24.90	k,521,5.50,7.99,24.90
! k,322,7.79,0.00,29.65	k,418,7.79,5.20,24.90	k,522,7.79,7.99,24.90
k,323,0.00,0.00,32.40	k,419,7.79,5.90,24.90	k,523,1.90,7.99,27.50
k,324,1.95,0.00,32.40	! k,420,7.79,7.99,24.90	k,524,5.50,7.99,27.50
k,325,5.50,0.00,32.40	k,421,7.79,2.30,27.50	k,525,0.00,7.99,29.65
! k,326,7.79,0.00,32.40	k,422,7.79,5.90,27.50	k,526,1.90,7.99,29.65
k,327,2.33,0.00,35.70	k,423,7.79,0.00,29.65	k,527,5.50,7.99,29.65
k,328,2.90,0.00,35.70	k,424,7.79,2.30,29.65	k,528,7.79,7.99,29.65
k,329,4.85,0.00,35.70	k,425,7.79,5.90,29.65	k,529,0.00,7.99,32.40
k,330,5.40,0.00,35.70	! k,426,7.79,7.99,29.65	k,530,1.90,7.99,32.40
k,331,2.33,0.00,37.00	k,427,7.79,0.00,32.40	k,531,5.50,7.99,32.40
k,332,2.90,0.00,37.00	k,428,7.79,2.30,32.40	k,532,7.79,7.99,32.40
k,333,4.85,0.00,37.00	k,429,7.79,5.90,32.40	k,533,2.33,7.99,35.70
k,334,5.40,0.00,37.00	! k,430,7.79,7.99,32.40	k,534,2.95,7.99,35.70
k,335,2.33,0.00,39.00	k,431,7.79,2.34,35.70	k,535,4.85,7.99,35.70
k,336,2.90,0.00,39.00	k,432,7.79,2.95,35.70	k,536,5.40,7.99,35.70
k,337,4.85,0.00,39.00	k,433,7.79,4.95,35.70	k,537,2.33,7.99,37.00
k,338,5.40,0.00,39.00	k,434,7.79,5.62,35.70	k,538,2.95,7.99,37.00
	k,435,7.79,2.34,37.00	k,539,4.85,7.99,37.00
k,340,2.30,0.00,0.00	k,436,7.79,2.95,37.00	k,540,5.40,7.99,37.00
k,341,3.60,0.00,0.00	k,437,7.79,4.95,37.00	k,541,2.33,7.99,39.00
k,342,6.80,0.00,0.00	k,438,7.79,5.62,37.00	k,542,2.95,7.99,39.00
k,343,2.30,0.00,2.20	k,439,7.79,2.34,39.00	k,543,4.85,7.99,39.00
k,344,3.60,0.00,2.20	k,440,7.79,2.95,39.00	k,544,5.40,7.99,39.00
k,345,6.80,0.00,2.20	k,441,7.79,4.95,39.00	
k,346,2.30,0.00,4.70	k,442,7.79,5.62,39.00	!FINE IMMISSIONE PUNTI PER
k,347,3.60,0.00,4.70		INFITTIMENTO AREE_ENRICO
k,348,6.80,0.00,4.70		
k,349,2.30,0.00,7.80		

! AREE DEL CAMPANILE  
CAMPANILE

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

! perimetro base spessore 1,65  
metri

- ! a,1,2,6,5
- ! a,2,3,7,6
- ! a,3,7,8,4
- ! a,1,4,8,5

! a,5,9,10,6

! perimetro superiore spessore  
1,45 metri

- ! a,6,10,11,7
- ! a,7,11,12,8
- ! a,5,9,12,8

- ! a,9,10,14,13
- ! a,10,11,15,14
- ! a,11,15,16,12
- ! a,9,13,16,12

- ! a,13,14,18,17
- ! a,14,15,19,18
- ! a,15,16,20,19
- ! a,13,16,20,17

- ! a,17,21,22,23,24,18
- ! a,18,24,25,26,27,19
- ! a,19,27,28,29,30,20
- ! a,20,30,31,32,21,17

!AREE FACCIATA 3\_ENRICO

- a,4,202,205,501
- a,202,201,204,205
- a,201,1,301,204
- a,501,205,209,503
- ! a,205,204,208,211,212,209
- a,204,301,303,208
- a,503,209,212,505
- a,212,211,213,214
- a,208,303,305,211
- a,8,214,216,218,220,16

- a,214,213,215,216
- a,213,5,13,219,217,215
- a,216,215,217,218
- a,218,217,219,220
- a,16,220,222,226,227,517
- a,220,219,221,222
- a,222,221,225,226
- a,219,13,311,224,225,221
- a,517,227,230,233,525
- a,227,226,225,224,229,230
- a,224,311,319,232,229
- a,525,233,237,529
- a,230,229,232,236,237,233
- a,232,319,323,236
- a,529,237,236,323,21,32,31,30
- a,31,32,239,240,241,242
- a,242,241,245,246
- ! a,241,240,244,248,249,245
- a,240,239,243,244
- a,246,245,249,250
- a,244,243,247,248
- a,250,249,248,247,40,39

- a,241,240,244,245
- a,245,244,248,249
- a,205,204,208,209
- a,209,208,211,212
- a,505,212,214,8
- a,211,305,5,213

!AREE FACCIATA 1\_ENRICO

- a,1,340,343,301
- a,301,343,346,303
- a,303,346,349,305
- !
- a,340,341,344,347,350,349,346,343
- a,341,342,345,344
- a,344,345,348,347
- a,347,348,306,350
- ! a,342,2,405,306,348,345
- a,305,349,350,306,405,6,5
- a,5,6,14,13
- a,13,307,309,313,312,311
- a,307,308,310,309
- a,309,310,314,313
- a,308,14,415,315,314,310
- a,311,312,317,320,319
- a,312,313,314,315,318,317
- a,315,415,423,321,318
- a,317,318,321,325,324,320

- a,319,320,324,323
- a,321,423,427,325
- a,323,324,325,427,24,23,22,21
- a,22,23,330,329,328,327
- a,327,328,332,331
- a,331,332,336,335
- a,329,330,334,333
- a,333,334,338,337
- ! a,328,329,333,337,336,332
- a,335,336,337,338,34,33
- a,340,341,344,343
- a,343,344,347,346
- a,346,347,350,349
- a,342,2,401,345
- a,345,401,403,348
- a,348,403,405,306
- a,328,329,333,332
- a,332,333,337,336

!AREE FACCIATA 4\_ENRICO

- a,2,3,502,401
- a,401,502,504,403
- a,403,504,506,405
- a,405,506,7,408,407,6
- a,6,407,409,411,14
- a,407,408,410,409
- a,409,410,412,411
- a,408,7,15,412,410
- a,14,411,413,417,416,415
- a,411,412,414,413
- a,413,414,418,417
- a,412,15,522,419,418,414
- a,415,416,421,424,423
- a,416,417,418,419,422,421
- a,419,522,528,425,422
- a,421,422,425,429,428,424
- a,423,424,428,427
- a,425,528,532,429
- a,427,428,429,532,27,26,25,24
- a,25,26,434,433,432,431
- a,431,432,436,435
- a,435,436,440,439
- ! a,432,433,437,441,440,436
- a,433,434,438,437
- a,437,438,442,441
- a,439,440,441,442,36,35
- a,432,433,437,436
- a,436,437,441,440

!AREE FACCIATA 4\_ENRICO

a,3,4,501,502	!	k,48,6.91,0,6.5
a,502,501,503,504	a,32,22,327,331,335,33,40,247,2	k,49,7.69,0,6.5
a,504,503,505,506	43,239	! a,46,48,49,47
a,506,505,8,507,508,7	!	k,954,6.91,0.00,2.20
a,7,508,510,512,514,15	a,23,25,431,435,439,35,34,338,3	k,955,7.69,0.00,2.20
a,508,507,509,510	34,330	k,956,6.91,0.00,4.70
a,510,509,511,512	!	k,957,7.69,0.00,4.70
a,512,511,513,514	a,26,28,536,540,544,37,36,442,4	
a,507,8,16,513,511,509	38,434	a,46,47,955,954
a,15,514,516,520,521,522	!	a,954,955,957,956
a,514,513,515,516	a,29,31,242,246,250,39,38,541,5	a,956,957,49,48
a,516,515,519,520	37,533	
a,513,16,517,518,519,515		k,50,1.1,0,9.56
a,522,521,524,527,528	!FINE AREE_ENRICO, cella	k,51,1.83,0,9.56
a,521,520,519,518,523,524	campanaria, pareti oblique	k,52,1.1,0,10.66
a,524,523,526,530,531,527		k,53,1.83,0,10.66
a,518,517,525,526,523	! tetto ligneo	k,54,1.46,0,11.03
a,528,527,531,532		spline,52,54,53
a,526,525,529,530		l,53,51
a,532,531,530,529,30,29,28,27	a,33,40,41	l,51,50
a,28,29,533,534,535,536	a,40,39,41	l,50,52
a,536,535,539,540	a,39,38,41	! al,89,90,91,92,93
a,540,539,543,544	a,38,37,41	
! a,535,534,538,542,543,539	a,37,36,41	! al,366,365,364,363,367
a,534,533,537,538	a,36,35,41	
a,538,537,541,542	a,35,34,41	al,357,356,355,354,358
a,544,543,542,541,38,37	a,34,33,41	
		!SPLINE
a,535,534,538,539		k,55,3,0,23.84
a,539,538,542,543		k,56,4,0,23.84
	! PORTE E FINESTRE	k,57,3,0,24.84
!FINE AREE_ENRICO	*****	k,58,4,0,24.84
	*****	a,55,56,58,57
	! facciata1	k,59,2,0,27.6
! perimetro cella campanaria		k,60,5.46,0,27.6
spessore 0,45 metri	k,42,2.37,0,0	k,61,2,0,31.6
	k,43,3.56,0,0	k,62,5.46,0,31.6
! a,32,22,33,40	k,44,2.37,0,6.5	k,63,3.73,0,32.34
! a,22,23,34,33	k,45,3.56,0,6.5	spline,61,63,62
! a,23,25,35,34	! a,42,44,45,43	l,59,61
! a,25,26,36,35	k,950,2.37,0.00,2.20	l,59,60
! a,26,28,37,36	k,951,3.56,0.00,2.20	l,60,62
! a,29,28,37,38	k,952,2.37,0.00,4.70	! al,98,99,102,101,100
! a,29,31,39,38	k,953,3.56,0.00,4.70	
! a,31,32,40,39		! al,375,376,373,372,374
	a,42,43,951,950	al,366,367,364,363,365
!AREE_ENRICO, cella campanaria,	a,950,951,953,952	SPLINE
pareti oblique	a,952,953,45,44	
		! finestra cella
	k,46,6.91,0,0	
	k,47,7.69,0,0	

k,64,2.96,0,35.74	k,79,4.84,7.99,35.74	
	k,80,2.96,7.99,38.24	k,96,0,3.38,2.4
k,65,4.84,0,35.74	k,81,4.84,7.99,38.24	k,97,0,5.18,2.4
k,66,2.96,0,38.24	k,82,3.9,7.99,38.94	k,98,0,3.38,6.86
k,67,4.84,0,38.24	spline,80,82,81	k,99,0,5.18,6.86
k,68,3.9,0,38.94	! l,78,80	k,100,0,4.32,7.59
spline,66,68,67	! l,79,81	spline,98,100,99
! l,64,66	! l,78,79	! l,98,96
! l,64,65	! al,119,117,118,120,121	! l,96,97
! l,65,67		! l,97,99
! al,103,104,107,106,105	k,963,2.96,7.99,37.00	! al,136,139,138,137,135
	k,962,4.84,7.99,37.00	
	a,79,78,963,962	k,965,0.00,3.38,4.70
k,958,2.96,0.00,37.00	l,962,963	k,964,0.00,5.18,4.70
k,959,4.84,0.00,37.00	l,962,81	a,97,96,965,964
a,64,65,959,958	l,963,80	l,964,965
l,958,959		l,964,99
l,958,66	! al,395,393,391,392,394	l,965,98
l,959,67		
	al,389,392,385,386,391	! al,412,411,409,410,413
! al,380,381,378,377,379		
	!SPLINE	al,410,413,406,407,412
al,372,375,369,368,374		
	k,83,3.21,7.99,10.51	!SPLINE
!SPLINE	k,84,4.5,7.99,10.51	
! facciata2	k,85,3.21,7.99,11.85	k,101,0,3.18,9.68
	k,86,4.5,7.99,11.85	k,102,0,4.75,9.68
k,69,3,7.99,23.84	a,83,84,86,85	k,103,0,3.18,12.53
k,70,4,7.99,23.84		k,104,0,4.75,12.53
k,71,3,7.99,24.84	k,87,2.98,7.99,18.81	k,105,0,3.96,12.78
k,72,4,7.99,24.84	k,88,4.72,7.99,18.81	spline,103,105,104
a,69,70,72,71	k,89,2.98,7.99,20.61	l,102,104
	k,90,4.72,7.99,20.61	l,101,102
k,73,2,7.99,27.6	k,91,3.85,7.99,20.81	l,101,103
k,74,5.46,7.99,27.6	spline,89,91,90	! al,140,141,142,143,144
k,75,2,7.99,31.6	l,87,89	
k,76,5.46,7.99,31.6	l,88,87	! al,417,418,414,415,416
k,77,3.73,7.99,32.34	l,90,88	
spline,75,77,76	! al,126,127,130,129,128	al,417,418,414,415,416
l,73,75		!SPLINE
l,74,76	! al,403,402,400,401,404	
l,73,74		k,106,0,3.36,18.81
! al,112,115,116,113,114	al,400,399,397,398,401	k,107,0,5.1,18.81
		k,108,0,3.36,20.62
! al,390,388,386,387,389	!SPLINE	k,109,0,5.1,20.62
		k,110,0,4.22,20.80
al,384,382,380,381,383		spline,108,110,109
	! facciata3	l,107,109
!SPLINE		l,106,107
	k,92,0,3.78,0	l,108,106
! finestra cella	k,93,0,4.58,0	! al,149,148,147,146,145
	k,94,0,3.78,2	
	k,95,0,4.58,2	! al,422,423,419,420,421
k,78,2.96,7.99,35.74	a,92,93,95,94	

al,422,423,419,420,421	! facciata4	k,966,7.79,3.00,37.00
!SPLINE	k,125,7.79,3.36,18.81	k,967,7.79,4.93,37.00
k,111,0,3.71,23.85	k,126,7.79,5.1,18.81	a,139,140,967,966
k,112,0,4.72,23.85	k,127,7.79,3.36,20.62	l,966,967
k,113,0,3.71,24.85	k,128,7.79,5.1,20.62	l,966,141
k,114,0,4.72,24.85	k,129,7.79,4.22,20.80	l,967,142
a,113,111,112,114	spline,127,129,128	! al,455,456,453,452,454
k,115,0,2.42,27.6	l,127,125	al,459,462,456,455,461
k,116,0,5.86,27.6	l,125,126	!SPLINE
k,117,0,2.42,31.66	l,126,128	! aree da sottrarre nella cella
k,118,0,5.86,31.66	! al,165,164,166,167,168	campanaria sulle pareti inclinate
k,119,0,4.14,32.33	! al,441,442,439,438,440	cksp,11,0,23,25,31
spline,117,119,118	al,444,445,442,441,443	! sistema riferimeno locale
l,118,116	!SPLINE	k,144,0.63,0,1.15
l,116,115	k,130,7.79,3.71,23.85	k,145,2.51,0,1.15
l,115,117	k,131,7.79,4.72,23.85	k,146,0.63,0,3.64
! al,154,155,156,157,158	k,132,7.79,3.71,24.85	k,147,2.51,0,3.64
! al,431,432,428,429,430	k,133,7.79,4.72,24.85	k,148,1.57,0,4.36
al,431,432,428,429,430	a,130,131,133,132	spline,146,148,147
!SPLINE	k,134,7.79,2.42,27.6	! l,146,144
k,120,0,3,35.74	k,135,7.79,5.86,27.6	! l,144,145
finestra cella	k,136,7.79,2.42,31.66	! l,145,147
k,121,0,4.93,35.74	k,137,7.79,5.86,31.66	! al,184,183,185,186,187
k,122,0,3,38.24	k,138,7.79,4.14,32.33	k,701,0.60,0.00,1.12
k,123,0,4.93,38.24	spline,136,138,137	k,702,2.55,0.00,1.12
k,124,0,4,38.95	l,136,134	k,703,0.60,0.00,2.42
spline,122,124,123	l,134,135	k,704,2.55,0.00,2.42
! l,121,123	l,135,137	k,705,0.60,0.00,4.42
! l,121,120	! al,174,173,175,176,177	k,706,2.55,0.00,4.42
! l,120,122	! al,450,451,448,447,449	k,970,0.63,0.00,2.42
! al,161,162,163,159,160	al,453,454,451,450,452	k,971,2.51,0.00,2.42
k,960,0.00,4.93,37.00	!SPLINE	a,330,701,703,334
k,961,0.00,3.00,37.00	k,139,7.79,3,35.74	a,334,703,705,338
a,121,120,961,960	! finestra cella	a,701,702,704,703
l,960,961	k,140,7.79,4.93,35.74	a,703,704,706,705
l,961,122	k,141,7.79,3,38.24	a,702,431,435,704
l,960,123	k,142,7.79,4.93,38.24	a,704,435,439,706
! al,436,437,433,434,435	k,143,7.79,4,38.95	a,338,705,706,439,35,34
al,437,439,433,434,440	spline,141,143,142	a,330,701,702,431,25,23
!SPLINE	! l,141,139	a,144,145,971,970
	! l,139,140	l,970,971
	! l,140,142	l,971,147
	! al,179,178,180,181,182	

l,970,146	k,154,0.63,0,1.15	k,903,0.60,0.00,2.42
! al,460,461,458,457,459	k,155,2.51,0,1.15	k,904,2.55,0.00,2.42
al,481,483,464,463,484	k,156,0.63,0,3.64	k,905,0.60,0.00,4.42
!SPLINE	k,157,2.51,0,3.64	k,906,2.55,0.00,4.42
cskp,12,0,26,28,22	k,158,1.57,0,4.36	k,976,0.63,0.00,2.42
! sistema riferimeno locale	spline,156,158,157	k,977,2.51,0.00,2.42
k,149,0.63,0,1.15	! l,154,156	a,159,160,977,976
k,150,2.51,0,1.15	! l,154,155	l,976,977
k,151,0.63,0,3.64	! l,155,157	l,976,161
k,152,2.51,0,3.64	! al,194,193,195,196,197	l,977,162
k,153,1.57,0,4.36	k,801,0.60,0.00,1.12	a,239,901,902,327,22,32
spline,151,153,152	k,802,2.55,0.00,1.12	a,239,901,903,243
! l,151,149	k,803,0.60,0.00,2.42	a,243,903,905,247
! l,149,150	k,804,2.55,0.00,2.42	a,247,905,906,335,33,40
! l,150,152	k,805,0.60,0.00,4.42	a,901,902,904,903
! al,189,188,190,191,192	k,806,2.55,0.00,4.42	a,903,904,906,905
k,972,0.63,0.00,2.42	k,974,0.63,0.00,2.42	a,902,327,331,904
k,973,2.51,0.00,2.42	k,975,2.51,0.00,2.42	a,904,331,335,906
a,149,150,973,972	a,154,155,975,974	! al,475,476,473,472,474
l,972,973	l,974,975	al,533,536,530,529,535
l,972,151	l,974,156	!SPLINE
l,973,152	l,975,157	! solai
k,601,0.60,0.00,1.12	a,533,801,802,242,31,29	a,9,10,11,12
k,602,2.55,0.00,1.12	a,533,801,803,537	a,29,30,31
k,603,0.60,0.00,2.42	a,537,803,805,541	a,21,22,32
k,604,2.55,0.00,2.42	a,541,805,806,250,39,38	a,23,24,25
k,605,0.60,0.00,4.42	a,801,802,804,803	a,26,27,28
k,606,2.55,0.00,4.42	a,803,804,806,805	a,29,31,32,22,23,25,26,28
a,434,601,603,438	a,802,242,246,804	! SOTTRAZIONE PORTE E
a,438,603,605,442	a,804,246,250,806	FINESTRE
a,442,605,606,544,37,36	! al,470,471,468,467,469	*****
a,434,601,602,536,28,26	al,511,514,508,507,513	*****
a,601,602,604,603	!SPLINE	
a,603,604,606,605	cskp,14,0,32,22,29	
a,602,536,540,604	! sistema riferimeno locale	! asba,4,49
a,604,540,544,606	k,159,0.63,0,1.15	! asba,69,48
! al,465,466,463,462,464	k,160,2.51,0,1.15	! asba,1,37
al,489,492,486,485,491	k,161,0.63,0,3.64	! asba,48,38
!SPLINE	k,162,2.51,0,3.64	! asba,5,39
cskp,13,0,29,31,26	k,163,1.57,0,4.36	! asba,8,50
! sistema riferimeno locale	spline,161,163,162	! asba,7,46
k,901,0.60,0.00,1.12	! l,161,159	! asba,11,47
k,902,2.55,0.00,1.12	! l,159,160	! asba,12,51
	! l,160,162	! asba,10,55
	! al,199,198,200,201,202	! asba,14,56
		! asba,10,57
		! asba,15,43
		! asba,10,44
		! asba,16,52

! asba,10,53	agluae,all	a,1195,42,1193,1194
! asba,13,40		aptn,173,174,179,183,39
! asba,10,41	! MODELLAZIONE CHIESA	
! asba,21,62	*****	a,6,7,8,5,1179,1195
! asba,22,42	*****	
! asba,23,59	*****	
! asba,24,58		ALLSEL,ALL
! asba,25,60		! incollaggio di tutte le aree del
! asba,26,45	cskp,15,0,1,42,92	campanile e chiesa
! asba,27,61	! sistema riferimento coincidente	agluae,all
! asba,28,54	globale	
asba,2,150	K,1164,7.79,7.99,3.3	! ELEMENTI MESH e REAL
asba,33,151	! parete retrostante spessore 0.3	COSTANT
asba,34,152	m altezza 3.3 m	*****
asba,10,153	K,1165,9.79,7.99,0	*****
asba,13,154	K,1166,9.79,7.99,3.3	
asba,16,155	a,3,1164,1166,1165	ET,1,SHELL281 ! elementi shell
asba,22,156	APTN,70,71,9	mesh
asba,31,157		
asba,32,158	K,1167,7.79,5.5,0	R,1,1.65 ! 1.65
asba,199,194	! muro perimetrale lato	spessore pareti campanile livello
asba,200,203	retrostante ingresso spessore 0.6	0
asba,62,133	m	R,2,1.45 ! 1.45
asba,63,134	K,1168,7.79,5.5,9.47	spessore pareti campanile livello
asba,64,135	K,1169,9.79,5.5,0	1
asba,65,136	K,1170,9.79,5.5,9.47	R,3,1.45 ! 1.45
asba,66,137	a,1167,1168,1170,1169	spessore pareti campanile livello
asba,67,138	APTN,70,12,72,73,9	2
asba,44,139		R,4,0.45 ! 0.45
asba,47,140	K,1171,9.79,0,0	spessore pareti cella campanaria
asba,52,141	! arcata cappella laterale	(livello 3)
asba,68,142	spessore 0.6 m	
asba,69,143	K,1172,9.79,0,9.47	R,5,1 ! 1
asba,166,172	a,2,6,1172,1171	spessore parete chiesa (vincolo
asba,167,173	aptn,67,71,74,105,9	dir x)
asba,76,159		
asba,80,160	k,1177,0.5,0,0	
asba,85,161	! arcata ingresso chiesa spessore	R,6,0.6 ! 0.6 spessore
asba,95,162	1 m	parete chiesa (vincolo dir y)
asba,96,163	k,1178,0.5,-2,0	R,7,0.4 ! 0.4 spessore
asba,179,174	k,1179,0.5,0,9.47	solette
asba,180,183	k,1180,0.5,-2,9.47	R,8,0.03 ! 0.03 spessore
asba,102,148	a,1177,1178,1180,1179	tetto
asba,104,149	aptn,37,38,39,43,9	R,9,0.60 ! 0.6 spessore
asba,108,144		parete chiesa (vincolo dir x)
asba,112,145	k,1185,0.5,0,14.06	R,10,0.30 ! 0.3
asba,123,146	k,1186,0.5,-2,14.06	spessore parete chiesa (vincolo
asba,124,147	a,1179,1180,1186,1185	dir x)
asba,189,184	aptn,166,9	
asba,190,193		
	k,1193,2.37,-2,0	ET,2,LINK180
!GLUE aree del campanile	k,1194,2.37,-2,9.47	!elementi tirante
ALLSEL,ALL	k,1195,2.37,0,9.47	

```

KEYOPT,2,2,1      !
sezione invariata con la
deformazione
R,11,0.002826,,1      ! Cross-
sectional area (diametro 6 cm),
Added mass (mass/length)
!
TENSKEY Tension or
compression-only option
! 0
Tension and compression
(default)
! 1
Tension only
!-1
Compression only!*

! MATERIALI
*****
*****
*****

mp,ex,7,1.8e12 ! SOLETTE
RIGIDE
mp,dens,7,2200
mp,nuxy,7,0.30

mp,ex,8,10000e6 ! COPERTURA
mp,dens,8,2600
mp,nuxy,8,0.20

mp,ex,11,200e9 ! ACCIAIO
mp,dens,11,7800
mp,nuxy,11,0.30

! sottolivello 32
ASEL,A,,4
ASEL,A,,2
ASEL,A,,5

! ATTRIBUZIONE
MESH/MATERIALE/GEOMETRIA
*****
*****
**

!APLOT
AATT,1,1,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

campanile livello 0

mp,ex,1,2690e6 ! MURATURA
livello 0
mp,dens,1,2000
mp,nuxy,1,0.30

! sottolivello 1
ASEL,S,,97
!ASEL,A,,1
!ASEL,A,,210
!ASEL,A,,3
ASEL,A,,70
ASEL,A,,173
ASEL,A,,151
ASEL,A,,152
ASEL,A,,40
ASEL,A,,64
ASEL,A,,134
ASEL,A,,67
ASEL,A,,75

! sottolivello 3
ASEL,S,,99
!ASEL,A,,6
!ASEL,A,,33
!ASEL,A,,8
ASEL,A,,73
ASEL,A,,179
ASEL,A,,183
ASEL,A,,193
ASEL,A,,42
ASEL,A,,66
ASEL,A,,74
ASEL,A,,77

mp,ex,2,1320e6 ! MURATURA
livello 1
mp,dens,2,2000
mp,nuxy,2,0.30

mp,ex,3,1250e6 ! MURATURA
livello 2
mp,dens,3,2000
mp,nuxy,3,0.30

! sottolivello 31
ASEL,A,,1
ASEL,A,,210
ASEL,A,,3

mp,ex,4,2470e6 ! MURATURA
cella campanaria (livello 3)
mp,dens,4,2000
mp,nuxy,4,0.30

! sottolivello 33
ASEL,A,,6
ASEL,A,,33
ASEL,A,,8

mp,ex,5,500e6 ! MURATURA
vincoli chiesa direzione x
mp,dens,5,2000
mp,nuxy,5,0.40

!APLOT
AATT,1,1,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

mp,ex,6,500e6 ! MURATURA
vincoli chiesa direzione y
mp,dens,6,2000
mp,nuxy,6,0.40

! sottolivello 2
ASEL,S,,189
!ASEL,A,,4
!ASEL,A,,2

! sottolivello 4
ASEL,S,,100
ASEL,A,,35
ASEL,A,,36

```

```

ASEL,A , ,172
ASEL,A , ,43
ASEL,A , ,184
ASEL,A , ,105
ASEL,A , ,101

!APLOT
AATT,1,1,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 5
ASEL,S , ,7

!APLOT
AATT,1,1,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

!
campanile livello 1

! sottolivello 6
ASEL,S , ,141
ASEL,A , ,142

!APLOT
AATT,2,2,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 7
ASEL,S , ,147
ASEL,A , ,148

!APLOT
AATT,2,2,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 21
ASEL,S , ,145
ASEL,A , ,144
ASEL,A , ,190
ASEL,A , ,156
ASEL,A , ,146

ASEL,A , ,157
ASEL,A , ,137
ASEL,A , ,159
ASEL,A , ,158
ASEL,A , ,139
ASEL,A , ,160
ASEL,A , ,161
ASEL,A , ,102
ASEL,A , ,149
ASEL,A , ,34
ASEL,A , ,154
ASEL,A , ,153
ASEL,A , ,155
ASEL,A , ,10
ASEL,A , ,194
ASEL,A , ,204
ASEL,A , ,37

!APLOT
AATT,2,2,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

!campanile livello 2

! sottolivello 8
ASEL,S , ,18
ASEL,A , ,19
ASEL,A , ,20
ASEL,A , ,16
ASEL,A , ,21
ASEL,A , ,23
ASEL,A , ,24
ASEL,A , ,14
ASEL,A , ,15
ASEL,A , ,17
ASEL,A , ,13

!APLOT
AATT,3,3,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 9
ASEL,S , ,45
ASEL,A , ,46
ASEL,A , ,48
ASEL,A , ,44
ASEL,A , ,49

ASEL,A , ,50
ASEL,A , ,51
ASEL,A , ,47
ASEL,A , ,53
ASEL,A , ,54
ASEL,A , ,55

!APLOT
AATT,3,3,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 10
ASEL,S , ,78
ASEL,A , ,79
ASEL,A , ,76
ASEL,A , ,81
ASEL,A , ,82
ASEL,A , ,83
ASEL,A , ,84
ASEL,A , ,80
ASEL,A , ,86
ASEL,A , ,87
ASEL,A , ,88

!APLOT
AATT,3,3,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 11
ASEL,S , ,106
ASEL,A , ,107
ASEL,A , ,109
ASEL,A , ,104
ASEL,A , ,110
ASEL,A , ,111
ASEL,A , ,113
ASEL,A , ,108
ASEL,A , ,114
ASEL,A , ,115
ASEL,A , ,116

!APLOT
AATT,3,3,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

```

```

!campanile livello 3 cella
campanaria
! sottolivello 12
ASEL,S,,25
ASEL,A,,26
ASEL,A,,22
ASEL,A,,27

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 16
ASEL,S,,195
ASEL,A,,196
ASEL,A,,32
ASEL,A,,201

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 13
ASEL,S,,56
ASEL,A,,57
ASEL,A,,52
ASEL,A,,59

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 17
ASEL,S,,171
ASEL,A,,164
ASEL,A,,69
ASEL,A,,168

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 14
ASEL,S,,89
ASEL,A,,90
ASEL,A,,85
ASEL,A,,92

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 18
ASEL,S,,178
ASEL,A,,175
ASEL,A,,96
ASEL,A,,181

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 15
ASEL,S,,117
ASEL,A,,118
ASEL,A,,112
ASEL,A,,120

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 19
ASEL,S,,185
ASEL,A,,186
ASEL,A,,124
ASEL,A,,191

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

! sottolivello 20
ASEL,S,,28
ASEL,A,,31
ASEL,A,,29
ASEL,A,,30
ASEL,A,,197
ASEL,A,,150
ASEL,A,,202
ASEL,A,,198
ASEL,A,,58
ASEL,A,,68
ASEL,A,,60
ASEL,A,,61
ASEL,A,,165
ASEL,A,,136
ASEL,A,,169
ASEL,A,,170
ASEL,A,,91
ASEL,A,,95
ASEL,A,,93
ASEL,A,,94
ASEL,A,,176
ASEL,A,,138
ASEL,A,,182
ASEL,A,,177
ASEL,A,,119
ASEL,A,,123
ASEL,A,,121
ASEL,A,,122
ASEL,A,,187
ASEL,A,,140
ASEL,A,,192
ASEL,A,,188

!APLOT
AATT,4,4,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S,,125
campanile tetto
ASEL,A,,126
ASEL,A,,127
ASEL,A,,128
ASEL,A,,129
ASEL,A,,130
ASEL,A,,131
ASEL,A,,132

!APLOT

```

```

AATT,8,8,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,205      !
campanile soletta cella
campanaria
ASEL,A, , ,206
ASEL,A, , ,207
ASEL,A, , ,208
ASEL,A, , ,209

!APLOT
AATT,7,7,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,203      !
campanile soletta volta crociera

!APLOT
AATT,7,7,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,11      ! pareti
chiesa spessore 0,3 direzione X

!APLOT
AATT,5,10,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,167      ! pareti
chiesa spessore 0,6 direzione X

!APLOT
AATT,5,9,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,180      ! pareti
chiesa spessore 0,6 direzione Y
ASEL,A, , ,199

ASEL,A, , ,9

!APLOT
AATT,6,6,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ASEL,S, , ,12      ! pareti chiesa
spessore 1 direzione X

!APLOT
AATT,5,5,1
!MSHAPE,1,2D
!ESIZE,0.7,0,
!AMESH,ALL

ESIZE,0.5,0,
MSHAPE,0,2D
mshkey,2
Allsel,all
amesh,all

!*Vincoli*
!*****
NSEL,S,LOC,Z,0 !vincolo di
incastro alla base

NSEL,A,LOC,x,9.79 !vincolo di
incastro nelle pareti

NSEL,A,LOC,y,-2 !vincolo di
incastro nelle pareti
D,All, , , , ,ALL, , , ,
!*****
*****

! DEFINIZIONE VARIABILI
*****
*****
NUMMOD = 10      !
numero di modi da estrarre
NUMPOS = 24      !
numero di possibili posizioni degli
accelerometri

!*****
*****
*****

!*****
*****
*****

/POST1
shell,mid      !risultati su
layer medio

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!ANALISI STATICA
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

/SOLU
ALLSEL
ANTYPE,STATIC,NEW
OUTRES,ALL,ALL
acel,0,0,9.81
LSWRITE,1
/SOLU
SOLVE,1
FINISH

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!ANALISI MODALE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

/SOL
outres,all,all
ANTYPE,2
MODOPT,LANB,10
EQSLV,SPAR
MXPAND,10, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,10,0,100, ,OFF
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

```

! ESTRAZIONE FORME MODALI

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

!

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

/POST1

! POSIZIONE POSSIBILI  
ACCELEROMETRI (x,y,z)\*\*\*\*\*  
\*\*\*

N1=NODE(2.70,7.41,40.00)

N2=NODE(2.70,7.41,40.00)

N3=NODE(7.45,2.83,40.00)

N4=NODE(7.45,2.83,40.00)

N5=NODE(2.69,7.68,36.60)

N6=NODE(2.69,7.68,36.60)

N7=NODE(7.45,2.83,36.60)

N8=NODE(7.45,2.83,36.60)

N9=NODE(1.00,1.10,29.40)

N10=NODE(1.00,1.10,29.40)

N11=NODE(6.71,6.88,29.40)

N12=NODE(6.71,6.88,29.40)

N13=NODE(6.72,0.91,24.02)

N14=NODE(6.72,0.91,24.02)

N15=NODE(1.05,6.86,14.06)

N16=NODE(1.05,6.86,14.06)

N17=NODE(6.84,0.84,14.06)

N18=NODE(6.84,0.84,14.06)

N19=NODE(1.05,6.86,14.06)

N20=NODE(6.72,0.91,24.02)

! insieme a N13/N14

N21=NODE(4.29,3.90,9.47)

N22=NODE(1.47,1.32,9.47)

N23=NODE(1.47,1.32,9.47)

N24=NODE(1.00,1.10,29.40)

! insieme a N9/N10

! DEFINIZIONE DELLE FORME  
MODALI ANALITICHE\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*DIM,MODE\_MATRIX\_X,ARRAY,  
NUMPOS,NUMMOD\*DIM,MODE\_MATRIX\_Y,ARRAY,N  
UMPOS,NUMMOD\*DO,ii,1,NUMMOD  
SET,1,ii

! \*GET,UXN1,NODE,N1,U,X

\*GET,UXN2,NODE,N2,U,X

! \*GET,UXN3,NODE,N3,U,X

\*GET,UXN4,NODE,N4,U,X

! \*GET,UXN5,NODE,N5,U,X

\*GET,UXN6,NODE,N6,U,X

! \*GET,UXN7,NODE,N7,U,X

\*GET,UXN8,NODE,N8,U,X

! \*GET,UXN9,NODE,N9,U,X

\*GET,UXN10,NODE,N10,U,X

! \*GET,UXN11,NODE,N11,U,X

\*GET,UXN12,NODE,N12,U,X

! \*GET,UXN13,NODE,N13,U,X

\*GET,UXN14,NODE,N14,U,X

! \*GET,UXN15,NODE,N15,U,X

\*GET,UXN16,NODE,N16,U,X

! \*GET,UXN17,NODE,N17,U,X

\*GET,UXN18,NODE,N18,U,X

! \*GET,UXN19,NODE,N19,U,X

! \*GET,UXN20,NODE,N20,U,X

! \*GET,UXN21,NODE,N21,U,X

! \*GET,UXN22,NODE,N22,U,X

\*GET,UXN23,NODE,N23,U,X

! \*GET,UXN24,NODE,N24,U,X

\*GET,UYN1,NODE,N1,U,Y

! \*GET,UYN2,NODE,N2,U,Y

\*GET,UYN3,NODE,N3,U,Y

! \*GET,UYN4,NODE,N4,U,Y

\*GET,UYN5,NODE,N5,U,Y

! \*GET,UYN6,NODE,N6,U,Y

\*GET,UYN7,NODE,N7,U,Y

! \*GET,UYN8,NODE,N8,U,Y

\*GET,UYN9,NODE,N9,U,Y

! \*GET,UYN10,NODE,N10,U,Y

\*GET,UYN11,NODE,N11,U,Y

! \*GET,UYN12,NODE,N12,U,Y

\*GET,UYN13,NODE,N13,U,Y

! \*GET,UYN14,NODE,N14,U,Y

\*GET,UYN15,NODE,N15,U,Y

! \*GET,UYN16,NODE,N16,U,Y

\*GET,UYN17,NODE,N17,U,Y

! \*GET,UYN18,NODE,N18,U,Y

! \*GET,UYN19,NODE,N19,U,Y

! \*GET,UYN20,NODE,N20,U,Y

! \*GET,UYN21,NODE,N21,U,Y

\*GET,UYN22,NODE,N22,U,Y

! \*GET,UYN23,NODE,N23,U,Y

! \*GET,UYN24,NODE,N24,U,Y

!scrive le autodeformate in x e y  
attenzione max 18 elementi per  
vettoreMODE\_MATRIX\_X(1,ii)=UXN2,UX  
N4,UXN6,UXN8,UXN10,UXN12,U  
XN14,UXN16,UXN18,UXN23MODE\_MATRIX\_Y(1,ii)=UYN1,UY  
N3,UYN5,UYN7,UYN9,UYN11,UY  
N13,UYN15,UYN17,UYN22

!

MODE\_MATRIX\_Z(1,ii)=UZN19,U  
ZN20,UZN21,UZN24!normalizzazione sul primo  
spostamento al posto di 13 (24)  
mettere il numero di nodi  
selezionato!\*VOPER,MODE\_MATRIX\_X(1:10,  
ii),MODE\_MATRIX\_X(1:10,ii),DIV,  
UXN1!\*VOPER,MODE\_MATRIX\_Y(1:10,  
ii),MODE\_MATRIX\_Y(1:10,ii),DIV,  
UYN1!\*VOPER,MODE\_MATRIX\_Z(1:4,ii  
) ,MODE\_MATRIX\_Z(1:4,ii),DIV,UZ  
N1

\*ENDDO

! DEFINIZIONE DELLE FREQUENZE  
ANALITICHE\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*\*DIM,FREQUENCY,TABLE,NUMM  
OD,1

\*DO,ii,1,NUMMOD

SET,,,,,ii

\*GET,FREQUENCY(ii,1),ACTIVE,0,  
SET,FREQ

\*ENDDO

```

! DEFINIZIONE DEL FATTORE DI
PARTECIPAZIONE MODALE
*****
*****
*****
*DIM,pfactorX,TABLE,NUMMOD,
1
*DO,ii,1,NUMMOD
SET,,,,,ii
*GET, Par, Entity, ENTNUM,
Item1, IT1NUM, Item2, IT2NUM
*GET,pfactorX(ii,1),MODE,ii,PFAC
T,,DIREC,X
*ENDDO

```

```

%G, %G, %G, %G, %G, %G, %G,
%G, %G, %G
/OUTPUT,TERM

```

```

!scrive le frequenze nel file
frequenze
!This is the line to modify (Name
of the results files):
/OUTPUT,'frequenze','txt'
*VWRITE,FREQUENCY(1)
%G,
/OUTPUT,TERM

```

```

! SCRITTURA SU FILE
*****
*****
*****
*****

```

```

!scrive IL FATTORE DI
PARTECIPAZIONE MODALE
!This is the line to modify (Name
of the results files):
/OUTPUT,'PartecipazioneFactorX'
,'txt'
*VWRITE,pfactorX(1)
%G,
/OUTPUT,TERM

```

```

!scrive le FORME MODALI nel file
modi, prima le x poi le y,
attenzione al max 18 elementi
!This is the line to modify (Name
of the results files): attenzione
inserire tante colonne quanti
sono i modi NUMMOD e anche
%G pari a NUMMOD

```

```

FINISH

```

```

/OUTPUT,'modiX','txt'
*VWRITE,MODE_MATRIX_X(1,1),
MODE_MATRIX_X(1,2),MODE_M
ATRIX_X(1,3),MODE_MATRIX_X(1
,4),MODE_MATRIX_X(1,5),MODE
_MATRIX_X(1,6),MODE_MATRIX
_X(1,7),MODE_MATRIX_X(1,8),M
ODE_MATRIX_X(1,9),MODE_MAT
RIX_X(1,10)
%G, %G, %G, %G, %G, %G, %G,
%G, %G, %G
/OUTPUT,TERM

```

```

/OUTPUT,'modiY','txt'
*VWRITE,MODE_MATRIX_Y(1,1),
MODE_MATRIX_Y(1,2),MODE_M
ATRIX_Y(1,3),MODE_MATRIX_Y(1
,4),MODE_MATRIX_Y(1,5),MODE
_MATRIX_Y(1,6),MODE_MATRIX
_Y(1,7),MODE_MATRIX_Y(1,8),M
ODE_MATRIX_Y(1,9),MODE_MATR
IX_Y(1,10)

```

# 11 ALLEGATO B - listato algoritmi MATLAB

## ALGORTIMO GENETICO

```
close all; clear all; clc
```

```
% PERCORSO OVE SI TROVANO I FILE EXCEL
```

```
dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\fossano_giusto_mio\15032018\Enrico'; % inserire il nome della cartella ove ci sono i segnali
```

```
% caricare i xls
```

```
cd(dirENR)
```

```
Folder=cd;
```

```
tipo = '2016_08_26_ID24_DANNO marco multiobiettivo Enrico ';
```

```
filetype='emf';
```

```
SignChange= 1*ones(14,1);
```

```
num_danneggiamenti=12; %12 danneggiamenti
```

```
for z1=0:12 %num_danneggiamenti che sono 12
```

```
    dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\fossano_giusto_mio\15032018\Enrico';
```

```
    cd(dirENR)
```

```
    Folder=cd;
```

```
    tipo = '2016_08_26_ID24_DANNO lenticchia Enrico ';
```

```
    NameFile = [tipo,num2str(z1),'.xls']
```

```
    for k=1:10 %10 forme modali
```

```
        cd(dirENR);
```

```
        mode_number=k
```

```
        modal_shape(mode_number,NameFile,Folder,SignChange,z1,filetype);
```

```
    end
```

```
end
```

```
%rientro nella cartella principale
```

```
dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\fossano_giusto_mio\15032018\Enrico';
```

```
cd(dirENR)
```

```
Folder=cd;
```

```
%parte aggiuntiva per forme modali
```

```
tipo = '2016_08_26_ID24_DANNO marco multiobiettivo Enrico ';
```

```
for ei=0:12 %NUM DANNEGGIAMENTI
```

```
    dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\fossano_giusto_mio\15032018\Enrico';
```

```
    cd(dirENR)
```

```
    Folder=cd;
```

```
    tipo = '2016_08_26_ID24_DANNO marco multiobiettivo Enrico ';
```

```
    NAME =[tipo,num2str(ei),'.xls'];
```

```
    fullName=[Folder,'\',NAME]
```

```
    d = dir(fullName);
```

```
    N_File=numel(d.name);
```

```
    e = actxserver ('Excel.Application');
```

```

[~,sheetname] = xlsfinfo(fullName);
M=size(sheetname,2);
ExcelWorkbook = e.workbooks.Open(fullfile(Folder,d.name));

for ii=1:M-1
    Sheet=ExcelWorkbook.Sheets.Item(ii);
    Range=Sheet.UsedRange;
if iscell(Range.Value)
    eval([sheetname{ii}, ' = cell2mat(Range.Value);']);
else
    eval([sheetname{ii}, '=[];']);
end
end

ExcelWorkbook.Close;
e.Quit;
e.delete;

%Normalise modal shapes:
MODES(3:end,:)=MODES(3:end,:)./repmat(max(abs(MODES(3:end,:))),size(MODES,1)-2,1);

U1=MODES(3:16,:);

for fi=ei:12
    dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\fossano_giusto_mio\15032018\Enrico';
    cd(dirENR)
    Folder=cd;
    tipo = '2016_08_26_ID24_DANNO marco multiobiettivo Enrico ';
    NAME =[tipo,num2str(fi),'.xls'];
    fullName=[Folder,'\',NAME]
    d = dir(fullName);
    N_File=numel(d.name);
    e = actxserver ('Excel.Application');
    [~,sheetname] = xlsfinfo(fullName);
    M=size(sheetname,2);
    ExcelWorkbook = e.workbooks.Open(fullfile(Folder,d.name));

for ii=1:M-1
    Sheet=ExcelWorkbook.Sheets.Item(ii);
    Range=Sheet.UsedRange;
if iscell(Range.Value)
    eval([sheetname{ii}, ' = cell2mat(Range.Value);']);
else
    eval([sheetname{ii}, '=[];']);
end
end
ExcelWorkbook.Close;
e.Quit;
e.delete;

MODES(3:end,:)=MODES(3:end,:)./repmat(max(abs(MODES(3:end,:))),size(MODES,1)-2,1);

U2=MODES(3:16,:);

[MAC_MATRIX, off_DIAG, traccia] = solv_MAC(U1,U2)

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function modal_shape(mode_number,NameFile,Folder,SignChange,z1,filetype)
% modal_shape Plot modal shapes of a structure
% mode_number: number of the mode to be plotted
% NameFile: setup file name
% SignChange: vector used to reorder the sign of experimental
% modal shapes
% filetype: deformed picture to be saved in file format: e.g.
% 'jpg','emf'...

AMP=1.5;

%%%%%%%%%%%%%%IMPORT DATA FROM XLS FILE%%%%%%%%%%%%%%
%Read sheetnames from xls file

fullName=[Folder,'\',NameFile]

d = dir(fullName);

N_File=numel(d.name);
e = actxserver ('Excel.Application');

[~,sheetname] = xlsinfo(fullName);
M=size(sheetname,2);

%%%READ FROM EXCEL FILE (FAST METHOD)
ExcelWorkbook = e.workbooks.Open(fullfile(Folder,d.name));

for ii=1:M-1
    Sheet=ExcelWorkbook.Sheets.Item(ii);
    Range=Sheet.UsedRange;
    if iscell(Range.Value)
        eval(['sheetname{ii}, ' = cell2mat(Range.Value);']);
    else
        eval(['sheetname{ii}, '=[];']);
    end
end
ExcelWorkbook.Close;
e.Quit;
e.delete;

%Normalise modal shapes:
MODES(3:end,:)=MODES(3:end,:)./repmat(max(abs(MODES(3:end,:))),size(MODES,1)-2,1); %#ok<NODEF>

% U1=MODES(13:22,:);
% U2=MODES(13:22,:);

SETUP(isnan(SETUP)==1)=0; %#ok<NODEF>
ARCHES(isnan(ARCHES)==1)=0; %#ok<NODEF>

%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%
%PLOT UNDEFORMED GEOMETRY:

```

```

% h=figure('Units','normalized','OuterPosition',[0.2,0.2,0.6,0.7]);
h=figure
hold on

% save PROVA
%PLOT LINES
for ii=1:size(CONN,1)
    line([NODE(CONN(ii,1),2) NODE(CONN(ii,2),2)],[NODE(CONN(ii,1),3) NODE(CONN(ii,2),3)],[NODE(CONN(ii,1),4)
NODE(CONN(ii,2),4)]) %#ok<NODEF>
end

hold on

%PLOT ARCHES
%for ii=1:size(SPLINE,1) %#ok<NODEF>
% XYZ=NODE(SPLINE(ii,:),2:4);

% [x,y,z,R]=draw_3point_arch_space(XYZ);

% fnplt(cscvn([x;y;z]),'b',1);
%end
% xh=xlabel('X');
% yh=ylabel('Y');
% zh=zlabel('Z');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PLOT DEFORMED GEOMETRY:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%PLOT MODAL SHAPES:

%MODAL SHAPE

FREQ=MODES(1,:);
DAMP=MODES(2,:);
SHAPE=AMP.*MODES(3:end,:);

%ALL THE CHANNELS, APPLY SIGNCHANGE IF NEEDED:
SHAPE=repmat(SignChange,1,length(FREQ)).*SHAPE;

SETUP(SETUP==0)=size(SHAPE,1)+1;
SHAPE=[SHAPE;zeros(1,length(FREQ))];
SHAPE_NODE(:,1)=SHAPE(SETUP(:,2),mode_number);
SHAPE_NODE(:,2)=SHAPE(SETUP(:,3),mode_number);
SHAPE_NODE(:,3)=SHAPE(SETUP(:,4),mode_number);

%DEFORMED GEOMETRY, DEFORMATION OF LINES:
M_NODE=[NODE(:,1),NODE(:,2:4)+SHAPE_NODE];

```



```

%%

%%
% dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\materiale OSP_Lenticchia_enrico\SETUP1_1_enrico';
dirENR = 'C:\Users\user\Desktop\materiale OSP_enrico\SETUP1_1_enrico';
cd(dirENR)
Folder=cd;
%%
U_FEM1=load ('danno0.txt');
max=length(U_FEM1);
U_FEM2=load ('danno1.txt');

%%

for num_parametri=10:27
    %Modificare il valore in () in funzione di num_parametri
    X(num_parametri-9)=num_parametri;

    parmin=ones(1,num_parametri);
    parmax=max*ones(1,num_parametri);

    % opt = gaoptimset(...
    % 'PopulationSize', 200, ...
    % 'Generations', 150, ...
    % 'EliteCount', 10, ...
    % 'TolFun', 1e-8);
    %
    % rng(0, 'twister');

    options = optimoptions('gamultiobj','PlotFcn',@gaplotpareto,'PlotFcn',{@gaplotpareto,@gaplotscorediversity});
    rng default

    %Modificare il valore in {} in funzione di num_parametri
    [par2{num_parametri-9},error{num_parametri-
9}]=gamultiobj(@funzione,num_parametri,[],[],[],[],parmin,parmax,options);
    %unfortunately IntCon seems not to work with gamultiobj
    %par2 is par rounded

    num_parametri %check here the number of parameters used

    fprintf('The number of points on the Pareto front was: %d\n', size(par2{num_parametri-9},1))

    par2{num_parametri-9} = round(par2{num_parametri-9});

end

%% since the problem is mixed-integer, but the optimisation is not,
%% most of the equivalent solutions in reality are the same.
%% hence here we get rid of useless double copies

for w=size(par2{1, 1},2)-9:1:size(par2{1, end},2)-9
    true_par2{w}=unique(par2{w},'rows');
end

%%

```





