
ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

D.I.S.T.A.R.T.

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque,
del Rilevamento e del Territorio

TESI DI LAUREA

in

PROGETTI DI STRUTTURE LS

MONITORAGGIO SISMICO E IDENTIFICAZIONE

CON SENSORI MEMS

DI UN EDIFICIO DELLA PROTEZIONE CIVILE

CANDIDATO:
NICOLETTA ZUCCHERI

RELATORE:
Chiar.mo Prof. MARCO SAVOIA

CORRELATORE:
Dott. Ing. LORIS VINCENZI

Anno Accademico 2008-2009

Sessione III

Parole chiave:

- *Identificazione dinamica*
- *Monitoraggio sismico*
- *Analisi modale sperimentale*
- *Modellazione*
- *Sensori MEMS*

INTRODUZIONE

La sicurezza e la gestione di edifici, ponti, gallerie, dighe ed altre importanti strutture richiedono un monitoraggio continuo, sia nel breve che nel lungo termine, per aumentare la conoscenza del comportamento dinamico della struttura e poter pianificare in maniera ottimale gli interventi di manutenzione e ristrutturazione. Spesso, infatti, nelle strutture in calcestruzzo compaiono fenomeni che possono provocare una diminuzione locale della resistenza e, nel lungo termine, influire sulla sicurezza strutturale del complesso.

Il monitoraggio continuo, dunque, si sta affermando come uno degli strumenti gestionali essenziali per garantire la sicurezza in servizio delle opere e per consentire una programmazione economica ed efficace degli interventi di manutenzione, specialmente nel caso di strutture che devono svolgere la loro funzione per molte decine di anni

e che vengono quindi utilizzate in condizioni fortemente variabili e spesso distanti da quelle inizialmente previste.

I seri danni e i collassi strutturali verificatisi nel corso degli anni Novanta hanno, inoltre, sottolineato la necessità di garantire una più efficace protezione delle costruzioni esistenti nei riguardi di eventi naturali eccezionali come i terremoti, al fine di mitigare anche le perdite connesse al verificarsi di tali eventi.

Questo lavoro si colloca in un contesto più ampio che vede coinvolto una parte del Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni della facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna. Il Centro Unificato di Protezione Civile (CUPC) in Granarolo dell'Emilia in provincia di Bologna, oggetto di questa tesi, è, infatti, al centro di un programma di **monitoraggio sismico**.

Alla luce delle precedenti osservazioni, nel Capitolo 1 vengono introdotti i concetti di “Protezione Sismica” e “Structural Health Monitoring” e ne vengono definiti i principi e gli obiettivi.

Le moderne tecniche di progettazione strutturale impongono, ormai, il ricorso sempre più massiccio a modelli matematici per la previsione del comportamento strutturale; fra questi, è abituale l'uso degli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati che si possono ottenere da queste modellazioni dipende, ovviamente, dalle ipotesi che si sono poste alla base delle stesse in termini, ad esempio, delle condizioni di vincolo, modalità di comportamento dei materiali, proprietà meccaniche, etc...D'altro canto non è sempre possibile riscontrare se le ipotesi assunte nel calcolo siano poi, di fatto,

verificate nella costruzione eseguita, in particolare per quel che riguarda le grandezze che caratterizzano il comportamento dinamico.

In questo contesto, assumono un'importanza significativa la **sperimentazione** delle strutture a cui è dedicata parte del Capitolo 1 e le tecniche di rielaborazione dei risultati che consentono la successiva identificazione dei parametri significativi, oggetto del Capitolo 2.

La necessità di realizzare un immobile che possa costituire un punto di riferimento per la gestione delle risorse umane e delle strutture logistiche disponibili sul territorio, o, in altri termini, la necessità di garantire la “Protezione Sismica” del CUPC presuppone, dunque, misurazioni dinamiche sulla struttura, i cui risultati in seguito potranno essere utilizzati per l'ottimizzazione del modello numerico.

Per conseguire questo scopo, si sono affrontate diverse **fasi preliminari**. In primo luogo si è realizzato il modello della struttura e attraverso la caratterizzazione numerica della sua risposta dinamica, è stato possibile investigare il range delle principali frequenze e verificare che queste ricadessero nell'intervallo di interesse. È noto che la **modellazione** della struttura costituisce uno step molto delicato dell'analisi specialmente nel caso di azione dinamica; non a caso le norme raccomandano particolare attenzione nel rappresentare in modo adeguato la distribuzione di masse e di rigidità suggerendo di considerare, laddove appropriato, il contributo di elementi non strutturali. Nel Capitolo 3 ci si è soffermati su tali aspetti.

Il successo di un'analisi modale sperimentale condotta su una struttura dipende anche dall'utilizzo di un'adeguata **strumentazione**.

Nel Capitolo 4 non ci si è limitati a descrivere una tipica architettura di un sistema di monitoraggio, ma si sono illustrate le caratteristiche di ciascuna componente. Dato che durante l'identificazione dinamica viene impiegata una grande quantità di sensori, l'acquisizione, la trasmissione e l'immagazzinamento dei dati rappresentano un'operazione molto delicata; negli ultimi decenni si è registrata, quindi, la necessità di sviluppare sistemi intelligenti in grado di andare oltre il puro accumulo di dati [Ubertini et al.2006]. In particolare, l'attenzione è stata rivolta ai **sensori a tecnologia MEMS**, dispositivi meccanici di dimensioni micrometriche, estremamente sofisticati che garantiscono un'elevata affidabilità, bassi consumi e costi ridotti.

Prima di utilizzare le registrazioni di campo, è stata affrontata un'ulteriore fase: la **validazione** di un software realizzato in ambiente MatLab che, ricevendo in input i dati numerici provenienti da analisi su modelli agli elementi finiti, consente di ottenere i modi propri di una struttura e di costruire il diagramma di stabilizzazione. I risultati, riportati nel Capitolo 5, confermano la capacità del modello scelto di ricavare correttamente le caratteristiche dinamiche ricercate. Si tratta di una delle parti più importanti di questa tesi, in quanto lo scopo della simulazione numerica è testare le procedure di identificazione; non a caso tutti gli aspetti visti in precedenza vengono ripresi e messi in relazione fra loro. Nell'ultima parte del Capitolo 5 si espongono anche i risultati di una prova numerica il cui scopo è simulare l'azione del vento sulla struttura.

Al fine di realizzare un'affidabile identificazione dinamica che consenta di valutare la **vulnerabilità sismica** del Centro Unificato di Protezione Civile, è risultato opportuno effettuare **campagne sperimentali** su elementi strutturali, descritte nel Capitolo 6. L'obiettivo principale è valutare la capacità dei sensori di cogliere deboli vibrazioni ambientali, nonostante il rumore intrinseco dei dispositivi. Questa fase si è avvalsa della preziosa collaborazione del Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica della facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna. Le prove sperimentali condotte sul solaio dell'altana della Fondazione Cassa di Risparmio, sita nella storica residenza di Casa Saraceni in Bologna, hanno rappresentato da un lato un'ottima occasione per testare lo strumento di misura, dall'altro un modo per avvallare le lamentele dei dipendenti dell'Istituto di Credito che hanno manifestato un certo disagio dovuto sia alle vibrazioni che al rumore, provenienti principalmente dal transito di mezzi di trasporto pubblico.

1 IDENTIFICAZIONE DINAMICA E MONITORAGGIO STRUTTURALE

1.1 Introduzione

Il territorio italiano risulta caratterizzato da un'elevata sismicità, per cui di grande interesse è lo sviluppo di misure di mitigazione attiva e passiva degli effetti dei terremoti. Del resto, le vaste aree urbanizzate presenti sul territorio risultano costituite, per una percentuale molto ampia, da costruzioni che hanno ormai superato i trent'anni di vita. Tali costruzioni risultano progettate e realizzate per dettagli costruttivi carenti e lo scadente stato di conservazione dei materiali e dei componenti ha ovvie ripercussioni sulle prestazioni globali [Fabbrocino, 2007]. E' proprio a causa di tali aspetti che la valutazione dello stato attuale delle costruzioni e la loro riabilitazione strutturale rappresentano sempre più spesso un momento assai delicato

nell'ambito dei processi di pianificazione e gestione urbana. I seri danni e i collassi strutturali verificatisi nel corso degli anni Novanta hanno, inoltre, sottolineato la necessità di garantire una più efficace protezione delle costruzioni esistenti nei riguardi di eventi naturali eccezionali come i terremoti, al fine di mitigare anche le perdite connesse al verificarsi di tali eventi.

Risulta, pertanto, assai vantaggiosa un'approfondita conoscenza della **risposta dinamica** delle costruzioni esistenti al fine di pervenire a linee guida in grado di assicurare un'efficace protezione delle strutture nei confronti di tali eventi e, contemporaneamente, anche una riduzione della probabilità di danno strutturale.

In tale contesto è evidente il ruolo fondamentale svolto dal **monitoraggio strutturale** per la valutazione delle prestazioni delle strutture civili nelle condizioni operative.

1.2 Identificazione dinamica: definizione e generalità

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

- *L'approccio analitico*: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle

caratteristiche dei materiali, la distribuzione di massa, rigidità e smorzamento della struttura è espressa tramite matrici di massa, rigidità e smorzamento; da qui è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali);

- *L'approccio sperimentale*: partendo dalla misura dell'input dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

Le varie tecniche di identificazione sperimentale sono nate inizialmente nel campo della ricerca aeronautica, allo scopo di studiare il comportamento dei velivoli sotto l'azione delle vibrazioni indotte dai carichi dinamici a cui essi sono sottoposti in esercizio; si sono poi estese a vari altri campi, dall'industria automobilistica alla robotica, alle costruzioni.

Si tratta di **tecniche non distruttive**, e in quanto tali possono essere applicate sia a strutture nuove, per esempio in fase di collaudo, sia a strutture esistenti o storiche.

1.2.1 Approccio sperimentale

Le tecniche di analisi modale trovano oggi sempre maggiore applicazione in campo ingegneristico: infatti, anche se l'avvento dei moderni computer, caratterizzati da prestazioni sempre più elevate,

consente la realizzazione di modelli, anche molto complessi, agli elementi finiti per analizzare le proprietà statiche e dinamiche delle strutture, accade spesso che le proprietà dinamiche calcolate con un'analisi agli elementi finiti differiscano da quelle effettive della struttura. Questa differenza è da imputarsi a varie cause:

- L'analisi agli elementi finiti è basata su una **discretizzazione** della realtà, intendendo con ciò che i campi di spostamento vengono approssimati attraverso funzioni di forma predefinite all'interno di ciascun elemento;

- Mentre le proprietà di massa e rigidità sono facilmente valutabili sulla base delle proprietà dei materiali e della geometria degli elementi, risulta molto più difficile tenere correttamente conto delle **proprietà di smorzamento** della struttura all'interno del modello: infatti, lo smorzamento strutturale è legato non solo alle proprietà dei materiali ma anche ad una serie di altri meccanismi difficili da modellare analiticamente (apertura e chiusura di microfessure nel calcestruzzo, interazione con elementi non strutturali, etc.);

- La **geometria** effettiva può essere diversa da quella considerata nel modello.

Per colmare il gap tra struttura reale e modello è necessario, allora, ricorrere a tecniche sperimentali al fine di confrontare i risultati del modello con quelli ottenuti dalle misure.

L'analisi modale sperimentale è nota anche come “problema inverso” (in analogia con il cosiddetto “problema diretto”, nel quale

sono noti l'input e la struttura, e si vuole conoscere la risposta), trattandosi di un problema nel quale sono noti, appunto, la risposta e ciò che la causa (l'input) e si vuole conoscere la struttura.

L'intero processo di identificazione sperimentale dei parametri dinamici di una struttura può essere sinteticamente illustrato tramite il seguente diagramma di flusso:

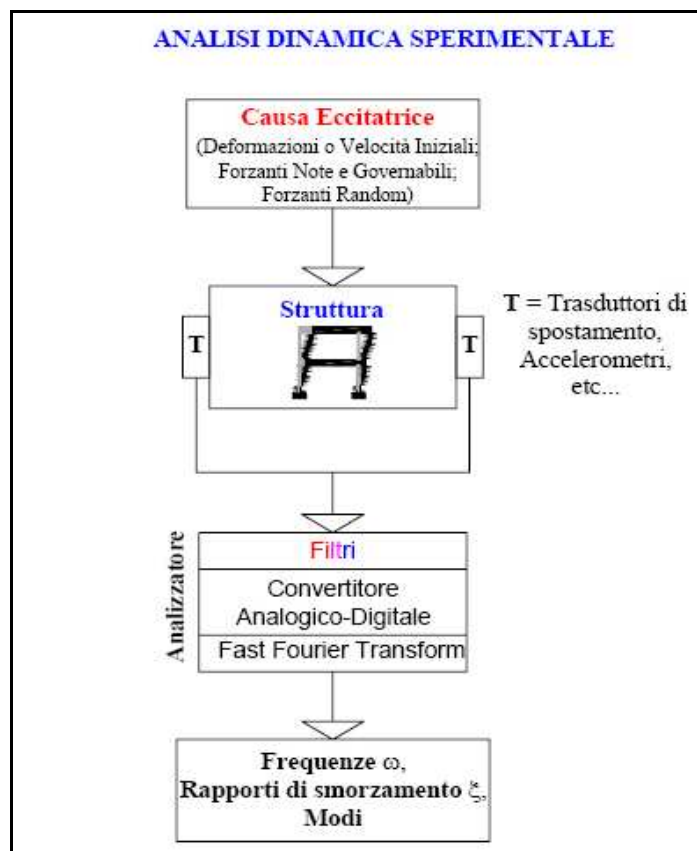


Figura 1.1. Processo di identificazione sperimentale.

Il principale motivo di interesse nei riguardi di questo tipo di analisi è legato alla considerazione che il comportamento dinamico di una struttura è una sorta di "impronta digitale", nel senso che esso dipende solo dalle sue caratteristiche intrinseche (masse, rigidzze,

smorzamenti, grado di vincolo, ecc...) e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato. Pertanto, se non intervengono modificazioni interne al manufatto (come, per esempio, dei danni strutturali), il comportamento della struttura rimane inalterato; in caso contrario, si noterà una variazione delle frequenze e dei modi propri di vibrare.

1.2.2 Confronti fra analisi modale sperimentale ed operativa

Nel paragrafo precedente, ci si è limitati a fornire la definizione di analisi modale sperimentale basata su un input noto e a elencarne i vantaggi. In particolare, questa tecnica si basa sull'applicazione di sistemi di **eccitazione artificiale** che, da un lato, permettono di misurare e controllare il moto della struttura, dall'altro, impongono l'interruzione dell'esercizio dell'opera per poter effettuare la prova.

Al fine di superare questo limite, agli inizi degli anni '90 la comunità scientifica internazionale ha cominciato a rivolgere la propria attenzione all'analisi modale sperimentale nel caso di **eccitazione naturale** e alle sue applicazioni su diverse opere di ingegneria civile.

Sebbene sia più corretto distinguere fra analisi modale nel caso di eccitazione forzata e analisi modale nel caso di eccitazione naturale, è consuetudine riferirsi alla prima con l'espressione "analisi modale sperimentale", la cui sigla è EMA (Experimental Modal Analysis) e utilizzare la definizione "analisi modale operativa" con riferimento alla seconda, in questo caso si parla di OMA (Operational Modal

Analysis). Le tecniche OMA si effettuano, appunto, nel caso di vibrazioni ambientali considerate come un rumore bianco; l'input sulla struttura, in questo caso, non è noto (non può, in genere, essere misurato) ma risulta comunque possibile valutare i parametri dinamici della struttura. I diversi metodi sviluppati lavorano, quindi, sfruttando i soli dati di output.

Le procedure OMA, come le classiche EMA, consentono di valutare frequenze naturali, modi naturali e rapporti di smorzamento; tuttavia, non è possibile calcolare anche i fattori di partecipazione modale essendo l'input incognito. L'**analisi modale operativa** permette, dunque, di sfruttare il rumore ambientale per l'identificazione strutturale evitando, così, il ricorso ad attrezzature particolari (vibrotrine, martelli strumentati, eccitatori oleodinamici o elettrodinamici) che eccitino direttamente la struttura. Ciò si traduce in una serie di vantaggi:

- La prova è rapida ed economica, dato che non sono necessarie attrezzature per l'eccitazione della struttura;
- Le misure vengono effettuate nelle effettive condizioni operative della struttura per cui i parametri modali che si ottengono sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle sue reali condizioni di utilizzo;
- La prova non interferisce con l'operatività della struttura (per cui, ad esempio, non è necessario chiudere al traffico un ponte quando esso viene analizzato).

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

La più grande differenza fra le tecniche EMA e OMA consiste nel fatto che mentre le prime operano in un contesto deterministico, le seconde in uno stocastico.

1.2.3 Classificazione dei metodi di analisi modale

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

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

I primi tre metodi sono quelli più usati.

Le prove sperimentali per la determinazione dei parametri modali sono basate sulla possibilità di descrivere il comportamento dinamico

della struttura o mediante un set di equazioni differenziali nel dominio del tempo, oppure mediante un set di equazioni algebriche nel dominio della frequenza. Le tecniche di identificazione dinamica possono, pertanto, essere raggruppate in tecniche nel **dominio del tempo** e tecniche nel **dominio della frequenza**. Questo argomento è oggetto del Capitolo 2.

1.2.4 Fasi di un'analisi modale

L'esecuzione di un'analisi modale prevede la realizzazione delle seguenti operazioni:

- Pianificazione ed esecuzione degli esperimenti: gli esperimenti vanno programmati sulla base di informazioni note a priori circa l'intervallo di frequenze, le forme modali, l'accessibilità dei punti di misura. Essendo il numero di sensori strettamente legato alle risorse finanziarie a disposizione è molto importante posizionare un numero minimo di dispositivi sulla struttura in modo da ottenere tutte le informazioni necessarie. Per raggiungere tale scopo, è necessario avere a priori un'idea approssimativa dei modi propri che si andrà ad individuare. Nella maggior parte dei casi la misura della risposta è limitata all'identificazione dei modi di vibrare fondamentali ed alla valutazione dell'ampiezza delle risposte della struttura nel suo complesso. In presenza di edifici non simmetrici, o sottoposti a carichi

non simmetrici, dovranno essere previste posizioni di misura atte a rilevare modi di vibrare torsionali dell'edificio stesso;

- Elaborazione dei dati e determinazione dei parametri modali;
- Validazione dei modelli modali.

1.2.5 Tipi di eccitazione

In questo paragrafo si citano le tipologie di eccitazione comunemente usate nell'analisi modale sperimentale e operativa. Le prime possono essere suddivise in due principali categorie: i segnali contenenti una singola frequenza e i segnali contenenti uno spettro di frequenze. Questi ultimi, a loro volta, possono essere raggruppati in 3 famiglie : segnali periodici (periodic chirp, burst chip), non periodici (pure random) e transitori (impatto); i segnali appartenenti alla prima categoria sono invece di tipo sinusoidale (swept sine, stepped sine). In tutti i casi si parla di eccitazione forzata.

L'eccitazione ambientale include, invece, vibrazioni indotte dal traffico veicolare, tanto quello stradale che ferroviario, sia in superficie che in sotterraneo, dalle attività industriali, dal vento, infine dai terremoti. Queste si propagano preliminarmente attraverso il terreno, subendo di conseguenza fenomeni di filtraggio, riflessione e rifrazione, e, quindi, attraverso le fondazioni raggiungono la

sovrastuttura. Solitamente, l'eccitazione ambientale viene rappresentata attraverso un rumore bianco, questo è un particolare tipo di rumore caratterizzato dall'assenza di periodicità e da ampiezza costante su tutto lo spettro di frequenze.



Figura 1.2. Spettro di un rumore bianco.

1.2.6 OMA

L'espressione "analisi modale operazionale" è usata per indicare un gran numero di procedure di identificazione basate sulle sole informazioni in uscita (output-only). Come si accennava nei paragrafi precedenti, queste tecniche si applicano quando l'eccitazione è naturale, ovvero quando le strutture sono soggette a vibrazioni ambientali. In questo caso, si suppone che l'input incognito sia ben rappresentato da un rumore bianco con distribuzione gaussiana a valor medio nullo. Questa ipotesi implica che l'input sia caratterizzato da uno spettro piatto nel range di frequenze di interesse, di conseguenza tutti i modi risultano eccitati e lo spettro in uscita contiene tutte le informazioni relative alla struttura. Da un punto di vista matematico, i

segnali sono completamente descritti dalle loro funzioni di correlazione. La teoria dell'analisi modale operativa è basata sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- *Linearità*: il comportamento dinamico della struttura è lineare, per cui la risposta a una certa combinazione di ingressi al sistema è uguale alla medesima combinazione delle rispettive risposte, ossia è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti;

- *Stazionarietà*: le caratteristiche dinamiche della struttura non cambiano nel tempo; pertanto i coefficienti delle equazioni differenziali che reggono il problema sono costanti rispetto al tempo;

- *Osservabilità*: i dati necessari a determinare le caratteristiche dinamiche di interesse devono poter essere misurati (di qui la necessità di scegliere in maniera oculata i punti di misura, evitando di disporre gli strumenti di misura in quei punti, detti “nodi modali”, in cui l'osservabilità dei modi è nulla).

I sistemi presi in considerazione sono, dunque, lineari e stazionari: essi risultano completamente caratterizzati dalla loro risposta impulsiva $h(t)$ o dalla sua equivalente nel dominio della frequenza, la funzione di risposta in frequenza $H(f)$.

1.3 Monitoraggio strutturale

Per rispondere alle esigenze di protezione sismica del costruito e, in particolare, degli edifici strategici, diversi progetti di ricerca nel campo del monitoraggio sono stati intrapresi e hanno visto una loro concreta realizzazione nell'installazione di sistemi prototipo o di natura commerciale.

Il monitoraggio strutturale rappresenta, dunque, una tecnologia emergente nel campo dell'ingegneria civile; in particolare, si sta affermando come uno **strumento gestionale** essenziale per garantire la sicurezza in servizio delle strutture e per consentire una programmazione economica ed efficace degli interventi di manutenzione. Il monitoraggio delle opere civili non riguarda solo l'identificazione di danni improvvisi o progressivi ma anche l'osservazione continua delle prestazioni delle stesse nelle condizioni di esercizio o durante particolari condizioni ambientali quali i terremoti [Mufti, 2001]. Una delle principali finalità, dunque, è quella di seguire l'evoluzione nel tempo dello stato di salute di una costruzione. Questa esigenza nasce in risposta al continuo ed incessante degrado subito nel tempo da tutte le opere di ingegneria civile [Hong-Na Li et al., 2004]. Spesso, infatti, nelle strutture in calcestruzzo compaiono fenomeni che possono provocare una diminuzione locale della resistenza e, nel lungo termine, influire sulla sicurezza strutturale del complesso.

Il monitoraggio di strutture nuove o esistenti può essere eseguito sia dal punto di vista del materiale che da quello strutturale. Nel primo caso, il monitoraggio è concentrato sulle proprietà locali del materiale utilizzato (ad esempio calcestruzzo, acciaio, legno, materiali compositi,...) e si osserva il loro comportamento sotto azioni di carico, variazioni di temperatura, invecchiamento. Sensori di deformazione con base di misura maggiore della dimensione caratteristica dei materiali componenti, ma abbastanza piccola per poter considerare costante lo stato tensionale a livello macroscopico, sono i trasduttori ideali per questo tipo di approccio. Se viene installato un elevato numero di sensori in punti differenti, è possibile estrapolare informazioni sul comportamento dell'intera struttura a partire da queste misure locali.

Nel secondo tipo di approccio, la struttura è osservata da un punto di vista geometrico. Utilizzando sensori di deformazione con basi di misura molto più lunghe della dimensione caratteristica del materiale, è possibile ricavare informazioni sulle deformazioni dell'intera struttura ed estrapolarle al comportamento globale dei materiali di cui è composta. Il monitoraggio strutturale rileva il degrado del materiale come fessurazioni o deformabilità eccessive, solo se i suoi effetti hanno un impatto sulla forma della deformata della struttura.

Con l'espressione **“Structural health monitoring”** (SHM) o **“Monitoraggio dello stato di una struttura”** s'intende la misura continua o regolare e la successiva analisi dei parametri strutturali e

ambientali chiave in condizioni di esercizio con la finalità di identificare e localizzare danni e di effettuare interventi di manutenzione [Housner, 1997]. In sostanza, si tratta di rispondere ad una serie di interrogativi che mirano a definire l'esistenza del danno, la sua localizzazione, tipologia, estensione, e possibile previsione [Li, Cha et al.,2008].

1.3.1 Finalità del monitoraggio strutturale

Alla luce delle definizioni date, in questo paragrafo s'intende riassumere le finalità principali del monitoraggio. Si tratta, in definitiva, di uno strumento utile per accrescere le conoscenze sia sul comportamento dinamico delle strutture, sia nella fase post-sisma. Si è visto, infatti, che l'elaborazione dei dati provenienti dalle misure consente di individuare anomalie, fare valutazioni di lungo termine e ancora, creare un database nel caso di analisi di rischio sismico. Nella fase che precede un terremoto, queste informazioni possono essere analizzate per valutare la capacità della struttura di resistere agli eventi sismici sulla base di vibrazioni, come quelle indotte dal traffico o dovute al vento. Allo stesso tempo, è possibile migliorare i modelli strutturali disponibili aumentando la capacità degli stessi di effettuare previsioni affidabili circa le prestazioni sismiche della struttura; infine, di fondamentale importanza risulta anche la conoscenza delle caratteristiche sismiche del sito (quali zona dell'epicentro, sismicità,

etc..). Al crescere nel tempo del database, l'analisi tende a fornire risultati sempre più stabili e affidabili.

La conoscenza della sismicità e del comportamento della struttura sono utili per caratterizzare l'esatto comportamento della struttura e gli eventi che effettivamente si verificheranno, riducendo così il problema di un falso allarme.

1.3.2 Componenti e architettura tipica di un sistema di monitoraggio

Dato che durante il monitoraggio viene impiegata una grande quantità di sensori, l'acquisizione, la trasmissione e l'immagazzinamento dei dati rappresentano un'operazione molto delicata. Si registra quindi la necessità di sviluppare sistemi che vadano oltre il puro accumulo di dati [Ubertini et al.2006].

Dato che durante il monitoraggio viene impiegata una grande quantità di sensori, l'acquisizione, la trasmissione e l'immagazzinamento dei dati rappresentano un'operazione molto delicata. Si registra quindi la necessità di sviluppare sistemi che vadano oltre il puro accumulo di dati [Ubertini et al.2006].

Il passo successivo per una corretta attività di monitoraggio consiste in una corretta interpretazione delle informazioni provenienti dai diversi sensori al fine determinare un miglioramento in termini di allarmi e raccomandazioni.

Una tipica architettura è basata su sensori periferici direttamente connessi tramite cavi a un sistema di acquisizione dati centralizzato. Il ruolo di tale sistema è quello di aggregare, immagazzinare ed elaborare questi dati. Tuttavia, quando il numero di sensori diventa consistente, il sistema di acquisizione può risultare sovraccaricato. Un ulteriore limite di questo tipo di architettura risiede negli elevati costi di installazione e manutenzione, dovuti soprattutto all'impiego dei cavi [Lynch, 2002].

Attualmente, la tendenza è a sostituire i sistemi cablati con sensori wireless di basso costo e a distribuire la conoscenza sull'intera rete di monitoraggio. In tal modo, reti locali di misure correlate e rapide valutazioni di tali correlazioni possono rendere i sistemi più efficienti e ottimizzare i flussi di dati e le richieste per i sistemi di trasmissione. Inoltre, i rapidi progressi nel campo dell'identificazione del danno hanno portato alla nascita di algoritmi in grado di individuare con buona affidabilità esistenza, posizione e tipo di danno nella struttura sulla base delle sole misure della risposta strutturale [Lynch et al., 2002; Fujino et al., 2001].

1.3.3 Approccio alla "Protezione sismica" delle costruzioni

La protezione sismica ha come obiettivo prioritario la salvaguardia della vita umana. Nell'ultimo decennio si sono adottate diverse misure per garantire il raggiungimento di questo scopo:

- Prevenzione negli anni che precedono un terremoto, attraverso una corretta progettazione sismica e un rinforzo degli edifici, oppure l'installazione di sistemi di allarme sismico (EarthquakeEarly Warning), oppure di sistemi di reazione rapida di componenti e sistemi;

- Early Warning, rappresentato dalle azioni (evacuazione di edifici, spegnimento di sistemi critici) che possono essere compiute dal momento in cui un evento sismico è individuato, in un certo luogo, da una rete sismica che calcola in realtime i parametri sismici e, se la soglia è superata, trasmette un segnale di allarme ai destinatari interessati al fine di adottare le opportune contromisure;

- Gestione dell'emergenza, rappresentata da tutte le misure che devono essere adottate nelle prime ore del post-evento o, più in generale, ogni volta che le condizioni strutturali di edifici critici devono essere valutate per garantire le funzioni di soccorso o emergenza all'interno della costruzione [Rainieri, 2007].

2 TECNICHE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

2.1 Introduzione

Obiettivo del Capitolo 2 è la descrizione di alcuni metodi di identificazione per la determinazione delle caratteristiche dinamiche di opere civili. Si distingue, innanzitutto, fra tecniche definite nel dominio delle frequenze e nel dominio del tempo. Le prime operano ricavando le funzioni di risposta in frequenza (FRF), le seconde fanno riferimento, invece, alla matrice delle funzioni di risposta all'impulso (IRF).

2.2 Identificazione nel dominio delle frequenze

Gli algoritmi nel dominio delle frequenze prevedono l'acquisizione di accelerazioni da prove sperimentali e permettono di

ricavare informazioni sul comportamento dinamico di una struttura in termini di frequenze proprie, smorzamenti modali e forme modali [Balmes, 2000]. Numerosi sono i metodi che consentono di identificare i modi propri dalle FRF, i quali, pur utilizzando procedure molto diverse, partono tutti dalla stessa ipotesi: in vicinanza della frequenza di risonanza il contributo del modo che provoca la risonanza stessa è quella assolutamente prevalente della definizione del valore della funzione di risposta in frequenza, ovvero il contributo degli altri modi è trascurabile. Con questa supposizione, un sistema a N gradi di libertà può essere trasformato in N sistemi ad un grado di libertà ed operare così su un ristretto range di frequenze nell'intorno della frequenza r -esima.

2.3 Identificazione nel dominio del tempo

I modelli nel dominio del tempo costituiscono un potente strumento analitico per la descrizione e l'interpretazione di processi stocastici derivanti dall'osservazione di fenomeni dinamici. Essi sono stati inizialmente sviluppati in discipline quali l'ingegneria del controllo e la teoria dei sistemi. Le basi teoriche e le caratteristiche fondamentali sono descritte da Ljung (1999), Soderstrom & Stoica (1989) e da Van de Overschee & De Moore (1993). Negli ultimi anni tali modelli sono stati utilizzati da numerosi autori per la descrizione e l'identificazione di sistemi strutturali di opere civili (ponti, edifici,

etc...) soggetti ad eccitazione ambientale. Le risposte dinamiche, acquisite durante le prove sperimentali, possono essere considerate come serie temporali discrete e possono essere trattate in modo statistico mediante processi stocastici descriventi il fenomeno fisico in esame. Il trattamento delle risposte dinamiche delle strutture e la determinazione delle caratteristiche modali mediante algoritmi del dominio del tempo sono alla base di numerosi riferimenti scientifici [Alaggio et al.,2003; Garibaldi et al.,2003; Diotallevi et al.,2003].

I modelli matematici utilizzati sono costituiti da equazioni alle differenze nella variabile tempo al discreto, cui corrispondono equazioni differenziali che governano il moto dei sistemi vibranti a tempo continuo.

Tali modelli possono essere suddivisi in due grandi famiglie: i modelli a rappresentazione esterna ed i modelli a rappresentazione interna.

2.4 Modelli a rappresentazione esterna

2.4.1 Generalità

I modelli a rappresentazione esterna o modelli ingresso-uscita sono quelli nelle cui equazioni intervengono sole le variabili di ingresso e di uscita, senza ricorso a variabili ausiliarie [Bittanti, 2000].

La più semplice espressione che lega l'ingresso e l'uscita di un sistema lineare e tempo invariante, è dato dall'equazione alle differenze [Guidorzi, 2003]:

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \dots + \alpha_n y(k-n) + \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_n u(k-n) \quad (2.1)$$

Con la (2.1) si descrive l'uscita del modello $y(k)$ al tempo $t = k \cdot \Delta t$ tramite la combinazione lineare dei suoi valori assunti in istanti precedenti $y(k-1), \dots, y(k-n)$ e la combinazione lineare dei valori assunti dalla forzante negli istanti $u(k), \dots, u(k-n)$. Poiché a causa dell'inaccuratezza del modello rispetto al sistema reale e degli inevitabili errori nell'acquisizione delle misure, i valori osservati non saranno in pieno accordo con la modellazione analitica, viene introdotto il termine $e(k)$, detto errore d'equazione:

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \dots + \alpha_n y(k-n) + \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_n u(k-n) + e(k) \quad (2.2)$$

Se il modello rappresenta bene il sistema meccanico vibrante, il termine $e(k)$ è schematizzabile statisticamente attraverso un rumore bianco.

Dall'equazione generale (2.2) è possibile ottenere modelli più o meno complessi in base alla definizione di $e(k)$ e alla presenza o meno di $u(k)$, rappresentante la forzante. Nei modelli AR $e(k)$ è un rumore bianco a valore atteso $E[e(k)]$ nullo; rispetto a questi, i modelli ARX presentano anche la variabile di ingresso $u(k)$. I modelli ARMA

descrivono l'errore di equazione per mezzo di un processo MA (Moving Average). In maniera del tutto analoga, i modelli ARMAX contengono la variabile $u(k)$.

La complessità del modello specifico, che ne definisce la memoria, dipende infine dal parametro n , detto **ordine del modello** stesso, che indica quanti valori del segnale acquisito in istanti precedenti a quello considerato sono tenuti in considerazione per definire la risposta del sistema all'uscita attuale $y(k)$.

2.4.2 I modelli AR e ARMAV

In questo paragrafo si presentano i modelli AR(Auto-Regressive) e ARMAV(Auto-Regressive Moving Average Vector). I primi sono descritti dall'equazione alle differenze:

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \dots + \alpha_n y(k-n) + \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_n u(k-n) + e(k) \quad (2.3)$$

dove:

$e(k)$ è un rumore bianco a valore atteso $E[e(k)]$ nullo;

il numero naturale n definisce l'ordine del modello.

I secondi, invece, sono definiti dall'equazione:

$$y(k) = \sum_{n=1}^p \alpha_k y(k-n) + w(k) + \sum_{n=1}^q \beta_k w(k-n) \quad (2.4)$$

dove:

$w(k)$ è un rumore bianco a media nulla;

α_k e β_k sono matrici di dimensione $m \times m$, rispettivamente, autoregressivi e a media mobile [Guidorzi, 2003].

Inoltre, p e q indicano l'ordine del modello per la parte autoregressiva e a media mobile. I coefficienti autoregressivi descrivono le oscillazioni libere della struttura mentre la parte a media mobile è correlata al moto dovuto alle oscillazioni forzate, dovute alla presenza del rumore bianco.

I modelli ARMAV sono adatti per l'analisi di sistemi strutturali a più gradi di libertà che utilizzano esclusivamente segnali (serie temporali) misurati sulla struttura. Si dimostra che un modello ARMAV può interpretare e descrivere il comportamento dinamico di strutture soggette a forzanti assimilabili a rumori bianchi [Andersen, 1997; Larbi & Lardies, 2000], anche se, in alcuni casi, l'applicazione dei modelli ARMAV può essere estesa a differenti tipi di eccitazione introducendo la variabile esogena.

Attraverso tale approccio è possibile analizzare il comportamento dinamico della struttura senza conoscere l'eccitazione in ingresso [Rivella, 2004]. In tale modello, la risposta del sistema $y(k)$ al tempo $t = k \cdot \Delta t$ è quindi ottenuta combinando linearmente il segnale acquisito agli istanti precedenti $y(k - n)$ attraverso i parametri contenuti nelle matrici α_k e i valori assunti dai campioni estratti da un rumore bianco $w(k)$ agli istanti precedenti a t mediante le matrici β_k .

2.4.3 Predizione del segnale

Strettamente collegato all'identificazione è il problema della **predizione**, vale a dire il problema di individuare una legge che, a partire dall'elaborazione dei valori precedenti di una determinata variabile, consente di formulare una ragionevole predizione del valore futuro. Per valutare le proprietà modali della struttura occorre risolvere i modelli cercando i coefficienti propri. Il metodo di identificazione parametrica conosciuto come Prediction Error Method (PEM) [Andersen, 1997] consente di stimare tali parametri individuando una funzione "predittore" che fornisca, nota la storia temporale fino al tempo t , una valutazione il più possibile accurata del valore del segnale al tempo $t+1$. La funzione "errore di predizione" è definita come la differenza tra il valore del segnale in uscita rispetto al valore del segnale predetto attraverso il modello.

Dal momento che nei modelli AR, l'errore di equazione $e(k)$ viene assunto come un rumore bianco non correlato con la sequenza in ingresso $y(k)$, risulta che il predittore ottimo di un tale modello non dipende dalle predizioni effettuate in precedenza, ma è funzione dei valori precedenti misurati della variabile d'uscita. A partire da queste ipotesi, si dimostra che il predittore di un modello AR è lineare.

I parametri di un modello ARMAV sono stimati in modo che l'errore di predizione sia minimo. Si dimostra in questo caso che, poiché il predittore di un tale modello non è lineare, è necessaria una **minimizzazione numerica iterativa**. Il principale svantaggio di

questa tecnica pertanto deriva dalla necessità di un processo di ottimizzazione la cui convergenza non è garantita [Vincenzi, 2007].

2.5 Modelli a rappresentazione interna

I modelli a rappresentazione interna o modelli di stato si differenziano da quelli a rappresentazione esterna perché oltre a considerare le variabili di ingresso e di uscita, considerano anche variabili ausiliarie [Bittanti, 2002]. I modelli di stato possono essere convenientemente risolti mediante algoritmi a sottospazi; l'identificazione con questi metodi è basata sulla manipolazione di matrici [Vanover Schee & De Moore, 1996]. Tali matrici possono essere determinate direttamente dalla sola conoscenza dei segnali di uscita, senza la conoscenza a priori delle matrici caratterizzanti il modello [Peeters, 2000]. La predizione del segnale è accompagnata dalla costruzione dell'associato filtro di Kalman [Bittanti, 2000].

Il modello mediante rappresentazione di stato è dato dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\y(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t)\end{aligned}\tag{2.5}$$

dove:

$u(t)$ è l'ingresso del modello, rappresentante la forzante che agisce sulla struttura, di dimensione $p \times 1$;

$y(t)$ è l'uscita del modello, rappresentante la risposta alla sollecitazione fornita, di dimensione $q \times 1$;

$x(t)$ è la variabile di stato, di dimensione $n \times 1$;

A, B, C, D sono matrici di parametri.

Il numero intero n , che definisce il numero delle variabili ausiliarie, è l'ordine del sistema. La prima delle (2.5) è detta equazione di stato e descrive l'evoluzione del vettore degli stati $x(t)$ in base ai suoi valori passati e all'azione esercitata dall'input $u(t)$; la seconda è chiamata trasformazione d'uscita e descrive l'influenza esercitata dalla variabile di stato $x(t)$ e dall'ingresso $u(t)$ sull'uscita del modello $y(t)$.

Si dimostra che è possibile utilizzare i modelli con variabili di stato per descrivere il comportamento dinamico di un sistema vibrante e, quindi, ottenere, mediante le tecniche di risoluzione tipiche della disciplina della teoria dei sistemi, i parametri delle matrici dinamiche caratterizzanti il sistema meccanico.

Il problema di identificazione del modello consiste nella stima dei parametri contenuti in **A, B, C, D** adattando il modello alle registrazioni sperimentali degli andamenti delle variabili di ingresso e di uscita misurate in un certo intervallo di osservazione. Ottenute le matrici, è poi possibile risalire a frequenze proprie, smorzamenti e forme modali.

Per utilizzare le (2.5) in sede di identificazione, occorre introdurre i termini d'errore in ciascuna delle due equazione:

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + w(t) \\y(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t) + v(t)\end{aligned}\tag{2.6}$$

dove:

$w(t)$ è un vettore contenente processi bianchi di dimensione $2n \times 1$; $v(t)$ è un rumore bianco di dimensioni $q \times 1$. L' introduzione del rumore bianco $w(t)$ consente di tenere in conto l'inaccuratezza del modello mentre $v(t)$ rappresenta gli errori degli strumenti di misura. Per quanto riguarda la descrizione delle oscillazioni in assenza di forzante, la rappresentazione si stato assume la forma:

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= \mathbf{A}x(t) + w(t) \\y(t) &= \mathbf{C}x(t) + v(t)\end{aligned}\tag{2.7}$$

La (2.7) può essere interpretata anche come un modello la cui forzante è data dal rumore bianco. Nel caso in cui la forzante esterna non sia nota a priori, ma possa appunto essere assimilata ad un rumore bianco (tale supposizione risulta attendibile per forzanti tipo vento o traffico) i secondi addendi delle (2.6) possono essere inclusi nei terzi ottenendo la (2.7). In tal caso, i rumori w_k e v_k modellano sia l'azione della forzante che il contributo delle incertezze sulle misure. Per la risoluzione del modello e la determinazione delle matrici del sistema occorre uno strumento che consenta di stimare il segnale e lo stato. Nel seguito si espone la trattazione della stima secondo il filtro di

Kalman, che risulta avere una posizione centrale nella risoluzione del problema mediante algoritmi a sottospazi.

Determinate le matrici A e C che governano il sistema, è possibile ricavare le caratteristiche dinamiche del sistema vibrante.

2.6 Il Filtro di Kalman

2.6.1 Cenni storici

Il filtraggio può essere definito come una procedura il cui scopo è separare i dati utili (le informazioni) da quelli inutili (i disturbi). Un problema di grande importanza in molti campi dell'ingegneria consiste nel progettare filtri che riducano gli effetti del rumore sui segnali misurati. In questo contesto, il filtro agisce come un pre-processore il cui output restituisce una rappresentazione più accurata delle componenti pulite del segnale.

Se gli spettri del segnale e del rumore non si sovrappongono, è possibile progettare filtri che non influenzino il segnale bensì riducano gli effetti del rumore; il sistema che ne deriva, pertanto, è definito filtro passa-basso, passa-alto o passa-banda a seconda delle frequenze relative del segnale e del rumore.

Quando gli spettri del segnale e del rumore si sovrappongono, subentra, invece, un problema di separazione più complicato. Questo tema fu affrontato per la prima volta da Wiener. Nel 1942 l'autore considerò il problema della stima di un segnale continuo nel tempo, descritto come un processo stocastico affetto da rumore additivo, la

cui espressione è data dalla soluzione di un'equazione integrale conosciuta col nome di equazione di Wiener-Hopf che, con l'eccezione di qualche caso, richiede computazioni complesse.

Oggigiorno, si conosce molto di più circa il progetto dei filtri in casi semplici, per esempio quando il modello del segnale è lineare. In questo ambito rientra il filtro di Kalman, sviluppato, alla fine degli anni '50, dall'ingegnere di origine ungherese R. E. Kalman mentre lavorava presso la NASA allo sviluppo del programma spaziale americano.

La motivazione applicativa che portò al filtro fu lo sviluppo di algoritmi che permettessero di determinare posizione e velocità, con la maggior precisione possibile, dei satelliti. Nello sviluppo del filtro, grande attenzione venne dedicata agli aspetti implementativi, cercando di ottenere una soluzione a questo problema di stima che fosse computazionalmente economica e numericamente robusta.

L'interesse del filtro di Kalman non risiede tanto nell'aver risolto un importante problema applicativo, quanto nell'aver inquadrato brillantemente un problema di stima all'interno della Teoria dei Sistemi.

2.6.2 Definizione

Da un punto di vista dei contenuti, si tratta di una generalizzazione del filtro di Wiener; infatti risolve un problema di

stima per segnali non stazionari e per sistemi non lineari ed opera nel dominio del tempo. Come il filtro di Wiener, ha una versione tempo discreta e una versione tempo continua.

Dunque, il filtro di Kalman può essere definito come un algoritmo impiegato per la stima dello stato di un sistema lineare soggetto a disturbi di tipo stocastico, sulla base di una loro analisi statistica e sull'osservazione diretta di un certo numero di stati attraverso opportuni sensori. L'algoritmo combina i dati derivanti dai sensori, i dati derivanti da un modello del sistema che si intende ottimizzare ed informazioni di tipo stocastico relative ai disturbi che influenzano tanto la misura quanto la dinamica stessa del sistema. I disturbi sono da intendersi come processi aleatori di tipo gaussiano bianco, si suppone, inoltre, di disporre di una modellazione lineare efficiente del sistema del quale si intende ottimizzare la stima degli stati.

2.7 Metodi a sottospazio

Per la risoluzione dei modelli di stato si ricorre ai metodi a sottospazio, il cui nome riflette il fatto che le matrici contenenti il segnale misurato possono essere interpretate come uno spazio vettoriale dove le colonne rappresentano una base di vettori mentre le righe permettono di ottenere una sequenza di stime valutate mediante una batteria di filtri di Kalman. Tali matrici possono essere

determinate dalla sola conoscenza dei segnali di uscita, senza la conoscenza a priori delle matrici caratterizzanti il modello [Peeters, 2000]. Queste metodologie non necessitano di un'esplicita parametrizzazione del modello; ciò si traduce in una maggior efficienza computazionale e una semplicità dell'algoritmo da un punto di vista operativo. In questo contesto, le caratteristiche fondamentali sono ottenute mediante operazioni di algebra lineare, come la decomposizione (QR) e la singular value decomposition (SVD). Questi metodi, inoltre, non sono iterativi e non presentano quindi problemi di convergenza.

Il problema di identificazione in assenza di forzante nota (stochastic subspace identification) è definito nel modo seguente:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \mathbf{A}x_k + w_k \\ y_k &= \mathbf{C}x_k + v_k\end{aligned}\tag{2.8}$$

dove:

w_k e v_k sono rumori bianchi aventi media nulla e covarianza data da:

$$E = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} w_i \\ v_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_j^T & v_j^T \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{ij}\tag{2.9}$$

L'obiettivo è determinare le matrici del sistema \mathbf{A} e \mathbf{C} e le matrici di covarianza \mathbf{Q} , \mathbf{R} e \mathbf{S} , partendo dalla sola conoscenza dei valori dei

segnali di uscita. A tale scopo si assume che il processo sia stazionario.

2.8 Individuazione dei modi strutturale

Determinate le matrici \mathbf{A} e \mathbf{C} che governano il sistema, è possibile ricavare le caratteristiche dinamiche del sistema vibrante. Si è accennato in precedenza che la complessità del modello dipende dall'ordine n , che rappresenta il numero delle variabili ausiliarie utilizzate nel vettore $x(t)$. Attribuito un ordine al modello, si ottengono n autovettori della matrice \mathbf{A} , non tutti però corrispondono ai modi propri della struttura. Dovendo i modi propri essere funzioni delle caratteristiche della struttura ed indipendenti dal processo numerico, questi non devono mai variare con l'ordine del modello. Risulta possibile distinguere i modi strutturali da quelli puramente numerici aumentando l'ordine del modello e controllando la stabilità dei risultati ottenuti. Questa procedura è ottenuta mediante il diagramma di stabilizzazione [Rivella et al.,2004; Garibaldi et al., 2003].

La stabilità di un modo al variare dell'ordine è così definita:

- la stima della frequenza propria è considerata stabile se essa non ha variazione maggiore dell'1%.

- l'indice di smorzamento non deve differire dallo stesso calcolato con un modello avente ordine diverso non più del 15%.
- la forma modale con un certo ordine viene confrontata con la stessa ottenuta con un ordine minore tramite il Modal Assurance Criterion (MAC) [Ewins, 2000], che deve essere almeno pari al 90%.

Accanto ai criteri di stabilità dei parametri dinamici, nell'individuazione dei modi strutturali devono essere fatte alcune valutazioni di tipo fisico. Non saranno mai presi in considerazione indici di smorzamento superiori al 5%. Inoltre le strutture civili sono di norma sottosmorzate, le frequenze che ne regolano il comportano di conseguenza si dovranno presentare a coppie coniugate; le frequenze che non hanno la relativa coniugata saranno quindi legate a modi puramente numerici. In Tabella 2.1, si riportano tali criteri:

1	Frequenze	A coppie coniugate
2	Frequenze	Stabilità: 1%
3	Smorzamenti	Valore: <5%
4	Forme modali	MAC: > 90%
5	Smorzamenti	Stabilità: 15%

Tabella 2.1. Criteri di individuazione dei modi strutturali.

2.9 Modelli a errori nelle variabili

Finora si è accennato al metodo di predizione d'errore (PEM) che permette di trovare i parametri di un modello ARMAV tramite un processo iterativo e non lineare. Si è presentato, a questo proposito, tale modello, basato sull'ipotesi che la struttura si comporti in maniera lineare e sia tempo invariante e che la forzante in ingresso, incognita, possa essere modellata come un rumore bianco. Inoltre si è detto che i suoi parametri sono stimati in modo che l'errore di predizione sia minimo. Si dimostra che, poiché il predittore del modello ARMAV non è lineare, è necessaria una minimizzazione numerica iterativa.

Si sono descritti, in seguito, i modelli di stato che non necessitano di alcun algoritmo di ottimizzazione; essi infatti possono essere convenientemente risolti mediante algoritmi a sottospazi. L'identificazione con questi metodi si basa sulla determinazione dei parametri incogniti attraverso la risoluzione di un sistema lineare, o, in altri termini, sulla manipolazione di matrici, che possono essere determinate direttamente dalla sola conoscenza dei segnali di uscita. Per la risoluzione del modello e la determinazione delle matrici del sistema, si è introdotto, infine, il filtro di Kalman, strumento che consente di stimare il segnale e lo stato. Anche i metodi a sottospazio si basano sull'ipotesi che l'input sia assimilabile ad un rumore bianco.

Nella quasi totalità dei metodi classici di identificazione, si assume che la sola uscita del sistema sia affetta da rumore mentre l'ingresso è considerato sempre noto con esattezza. In molti casi tale

contesto non risulta essere il più realistico ed è quindi necessario considerare la presenza di rumori che agiscono anche sull'ingresso del sistema.

La classe di modelli da identificare viene detta, in questo caso, ad errori nelle variabili o errors-in-variables (EIV). Per tali modelli, i metodi tradizionali più efficienti come il metodo dell'errore di predizione, non forniscono più stime consistenti e si rende pertanto necessario lo studio di nuovi schemi. L'identificazione di modelli EIV è più complessa rispetto a quella dei tradizionali modelli ad errore di equazione e la letteratura sull'argomento è ancora relativamente limitata [Guidorzi et al., 2004].

Da quanto detto in precedenza, si deduce che gran parte dei problemi d'identificazione presenti nell'ingegneria fa uso di modelli stocastici nei quali l'ingresso si assume noto con esattezza mentre le incertezze si riferiscono a rumori additivi sulle uscite e ad ulteriori ingressi non noti con date proprietà statistiche. In tale contesto, nel quale rientra anche il filtro di Kalman, il problema del filtraggio consiste nel determinare la stima (a minima varianza) dello stato e delle uscite del sistema.

Sebbene realistico in molte applicazioni di controllo, il contesto stocastico risulta certamente meno idoneo quando errori di misura sono presenti su tutti i segnali in gioco e/o non è addirittura possibile una suddivisione a priori in ingressi ed uscite degli stessi segnali. Questo limite non è invece presente nei modelli EIV che trattano in maniera simmetrica tutte le variabili del problema.

2.9.1 Algoritmo basato su modelli inpu-output

I modelli EIV sono definiti da relazioni del tipo:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+1) &= A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t), \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + D\hat{u}(t), \\ y(t) &= \hat{y}(t) + \tilde{y}(t), \\ u(t) &= \hat{u}(t) + \tilde{u}(t),\end{aligned}\tag{2.10}$$

dove:

$\hat{x}(t) \in R^n$ rappresenta lo stato del processo;

$\hat{y}(t) \in R^m$ e $\hat{u}(t) \in R^r$ indicano le componenti incognite delle osservazioni non affette da rumori;

$\tilde{u}(t)$ e $\tilde{y}(t)$ sono i rumore aggiuntivi su $\hat{u}(t)$ e $\hat{y}(t)$.

Sotto l'ipotesi di completa osservabilità, i modelli EIV possono anche essere definiti ricorrendo alla scrittura in forma polinomiale:

$$Q(z)\hat{y}(t) = P(z)\hat{u}(t)\tag{2.11}$$

dove z indica l'operatore di ritardo unitario.

Nel seguito, la trattazione è limitata ai sistema SISO in modo che le matrici polinomiali $P(z)$ e $Q(z)$ possano essere ridotte ai polinomi $p(z)$ e $q(z)$, dati dalle seguenti espressioni:

$$q(z) = z^n - \alpha_n z^{n-1} - \dots - \alpha_2 z - \alpha_1$$

$$p(z) = \beta_{n+1}z^n + \beta_n z^{n-1} + \dots + \beta_2 z + \beta_1 \quad (2.12)$$

e la (2.11) possa essere scritta nella forma:

$$\hat{y}(t+n) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \hat{y}(t+k-1) + \sum_{k=1}^{n+1} \beta_k \hat{u}(t+k-1) \quad (2.13)$$

Inoltre, si assume che:

$$E[\tilde{u}(t)] = 0; E[\tilde{y}(t)] = 0. \quad (2.14)$$

Date le osservazioni dei rumori $u(t)$, $y(t)$ su un dato intervallo temporale $t = 1, \dots, L$, è possibile definire i seguenti problemi di interpolazione e filtraggio.

Problema 1(Interpolazione ottimale). Dato il modello del processo e le osservazioni $u(t)$ e $y(t)$, determinare una stima a minima varianza di $\hat{u}(t)$ e $\hat{y}(t)$.

Problema 2(Filtraggio ottimale). Dato il modello del processo e una sequenza crescente di osservazioni, effettuare, appena è disponibile una nuova osservazione di $u(t)$ e $y(t)$, una stima di $\hat{u}(t)$ e $\hat{y}(t)$.

Definita la matrice $\mathbf{G}(t)$ di dimensione $N \times 2(N+n)$:

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \alpha_n & \beta_n & -1 & \beta_{n+1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_1 & \beta_1 & \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \alpha_n & \beta_n & -1 & \beta_{n+1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -1 & \beta_{n+1} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots & \alpha_n & \beta_n & -1 & \beta_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

e il vettore di dimensione $2(N + n)$:

$$v(t) = [y(1)u(1) | y(2)u(2) | \dots | y(t)u(t)]^T, \quad (2.16)$$

dove:

N è legato al numero di campioni disponibili per $t > n$ dalla relazione $N = t - n$, si dimostra che la soluzione del problema dell'interpolazione ottimale è data da:

$$\hat{v}^*(t) = v(t) - \tilde{v}^*(t) = [I - R(t)]v(t), \quad (2.17)$$

dove:

$$R(t) = \sum (t)G^T(t)(G(t)\sum (t)G^T(t))^{-1}G(t) \quad (2.18)$$

e $\tilde{\Sigma}(t)$ è la matrice di dimensione $2(N + n) \times 2(N + n)$:

$$\tilde{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_y^2 & \tilde{\sigma}_{yu} & \cdots & 0 & 0 \\ \tilde{\sigma}_{yu} & \tilde{\sigma}_u^2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tilde{\sigma}_y^2 & \tilde{\sigma}_{yu} \\ 0 & 0 & \cdots & \tilde{\sigma}_{yu} & \tilde{\sigma}_u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_{yu} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \tilde{\Sigma}_{yu} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tilde{\Sigma}_{yu} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

La stima ottimale $\tilde{v}^*(t)$ di $\tilde{v}(t)$ è:

$$\tilde{v}^*(t) = E[\tilde{v}(t) | \Gamma(t)] \quad (2.20)$$

con:

$$\Gamma(t) = G(t)v(t). \quad (2.21)$$

Si osservi che nell'intera sequenza interpolata $\tilde{v}^*(t)$, solo gli ingressi $\hat{y}^*(t)$ e $\hat{u}^*(t)$ possono essere considerati filtrati in modo che un possibile modo di implementazione della procedura di filtraggio consista nel computare o aggiornare la (2.17) al crescere di t . Il corrispondente algoritmo di filtraggio a minima memoria consiste nelle seguenti relazioni dove il suffisso $2n + n$ si riferisce alle ultime $2n + n$ entrate per i vettori e alle due sottomatrici $(2n + 2) \times (2n + 2)$ in basso a destra per le matrici.

I passi dell'intera procedura possono essere riassunti come segue:

- (1) Al tempo $t = n + 1$, computa, facendo uso della (2.17), $\hat{v}^*(t)$ e di conseguenza $\hat{y}(t)$ e $\hat{u}(t)$.
- (2) Computa le seguenti quantità:

$$s(t) = \bar{m} \begin{bmatrix} (I - R(t))_{2n} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},$$
$$k(t) = 1/(s(t)\check{\Sigma}(n+1)\bar{m}^T), \quad (2.22)$$

dove:

$$\bar{m} = [\alpha_1 \beta_1, \dots, -1, \beta_{n+1}]. \quad (2.23)$$

-
- (3) Setta $t \leftarrow t + 1$ e computa le seguenti quantità:

$$\begin{aligned} \eta(t) &= -\bar{m} \begin{bmatrix} \hat{v}^*(t-1)_{2n} \\ y(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \\ \hat{v}^*(t)_{2n+2} &= \begin{bmatrix} \hat{v}^*(t-1)_{2n} \\ y(t) \\ u(t) \end{bmatrix} + k(t-1)\tilde{\Sigma}(n+1)s^T(t-1)\eta(t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

e, di conseguenza, $\hat{y}^*(t)$ e $\hat{u}^*(t)$.

- (4) Aggiorna:

$$R(t)_{2n} = \begin{bmatrix} R(t-1)_{2n} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{2n} + k(t-1)\tilde{\Sigma}(n)(s^T(t-1)s(t-1))_{2n}. \quad (2.25)$$

- (5) Torna al passo (2).

2.9.2 Algoritmo basato sui modelli di stato

Il problema del filtraggio per i processi EIV può anche essere risolto tramite una procedura alternativa facendo ricorso ai modelli di stato, basati sul filtro di Kalman. Dalla relazione (2.21) si deduce che $\Gamma(t)$ è costituito da una combinazione lineare di osservazioni $u(t)$ e $y(t)$ descritta dai coefficienti α_i e β_i del modello (2.13). Inoltre, poiché $G(t)\tilde{v}(t) = G(t)v(t)$, si può anche affermare che $\gamma(t)$ è un processo stocastico le cui caratteristiche statistiche sono completamente note; infatti, il processo è la somma di due processi MA. In particolare:

$$\begin{aligned}\gamma(t) &= p(z)u(t) - q(z)y(t) = p(z)\tilde{u}(t) - q(z)\hat{y}(t) \\ &= \alpha_1\hat{y}(t-n) + \dots + \alpha_n\hat{y}(t-1) - \hat{y}(t) + \beta_1\tilde{u}(t-n) + \dots + \beta_{n+1}\tilde{u}(t).\end{aligned}\quad (2.26)$$

La rappresentazione di stato di $\gamma(t)$ è data da:

$$\begin{aligned}\xi(t+1) &= A\xi(t) + Bw(t), \\ \gamma(t) &= C\xi(t) + Dw(t),\end{aligned}\quad (2.27)$$

dove:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \beta_n \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1], \quad D = [-1 \quad \beta_{n+1}],\quad (2.28)$$

$$w(t) = [\hat{y}(t) \quad \tilde{u}(t)]^T, \quad (2.29)$$

La matrice di covarianza di $w(t)$ è $\tilde{\Sigma}_{yu}$ definita in (2.19). L'associato filtro di Kalman che porta alla stima ottimale di $\xi(t)$ è descritta dalle relazioni:

$$\xi(t+1|t) = \left(A - \frac{BSC}{r} \right) \xi(t|t) + \frac{BS}{r} \gamma(t), \quad (2.30)$$

$$\xi(t|t) = \xi(t|t-1) + \kappa(t)(\gamma(t) - C\xi(t|t-1)), \quad (2.31)$$

$$\kappa(t) = \frac{P(t|t-1)C^T}{CP(t|t-1)C^T + r}, \quad (2.32)$$

$$P(t|t) = (I - \kappa(t)C)P(t|t-1), \quad (2.33)$$

$$P(t+1|t) = \left(A - \frac{BSC}{r}\right) P(t|t) \left(A - \frac{BSC}{r}\right)^T + B \left(\frac{Q - SS^T}{r}\right) B^T, \quad (2.34)$$

dove:

$$Q = \hat{\Sigma}_{yu}, \quad (2.35)$$

$$r = D\hat{\Sigma}_{yu}D^T = \beta_{n+1}^2 \hat{\sigma}_u^2 + \hat{\sigma}_y^2 - 2\beta_{n+1} \hat{\sigma}_{yu}, \quad (2.36)$$

$$S = \hat{\Sigma}_{yu}D^T = \begin{bmatrix} \beta_{n+1} \hat{\sigma}_{yu} - \hat{\sigma}_y^2 \\ \beta_{n+1} \hat{\sigma}_u^2 - \hat{\sigma}_{yu} \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Le stime a minima varianza di $\hat{y}(t)$ e $\hat{u}(t)$ sono date da:

$$\hat{y}^*(t) = y(t) - \hat{y}^*(t) = y(t) - \frac{\gamma(t) - C\hat{\xi}(t|t)}{r} (\beta_{n+1} \hat{\sigma}_{yu} - \hat{\sigma}_y^2), \quad (2.38)$$

$$\hat{u}^*(t) = u(t) - \hat{u}^*(t) = u(t) - \frac{\gamma(t) - C\hat{\xi}(t|t)}{r} (\beta_{n+1} \hat{\sigma}_u^2 - \hat{\sigma}_{yu}). \quad (2.39)$$

2.9.3 Un approccio innovativo

Finora si sono descritte le strutture di algoritmi esistenti basati rispettivamente sui modelli input-output e sui modelli di stato. Come si dimostra nel paragrafo seguente, i primi risultano essere molto efficienti anche nel caso in cui siano presenti alte percentuali di rumore correlato sulle misure. Tuttavia, gli autori Guidorzi & Soverini sostengono che la formulazione di una simile procedura, basata sul concetto di ortogonalità fra rumore e informazione, non sia stata sviluppata con lo scopo di ottimizzare la sua esecuzione temporale,

nonostante questa presenti una buona efficienza numerica. Per questo motivo, gli autori hanno concentrato i loro studi su una riformulazione del primo algoritmo illustrato che trae vantaggi dalla efficienza e dalla robustezza della fattorizzazione di Cholesky. Si dimostra che la nuova proposta, indicata nel seguito come *Algorithm 2* risulta essere più efficiente delle procedure di filtraggio EIV iniziali, *Algorithm 1* e addirittura migliore delle tecniche basate sui modelli di stato, *State-space algorithm*.

Il numero di operazioni totali richieste ad ogni passo dall'*Algorithm 1*, *State-space algorithm*, *Algorithm 2* sono rispettivamente $8n^2 + 12n + 12$, $3n^2 + 6n + 3$, $(n^2 + 9n)/2 + 6 + 1 \text{ square root}$.

L'efficienza delle tre procedure può essere facilmente valutata osservando la Figura 2.1 che mette a confronto il numero di operazioni richieste dai suddetti algoritmi per modelli il cui ordine varia da 1 a 40.

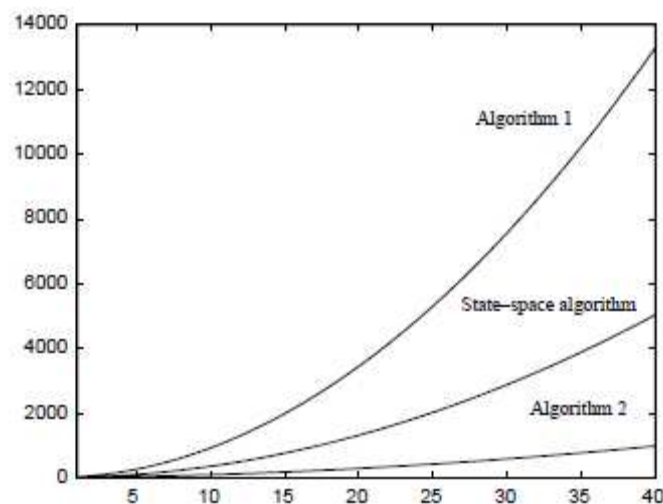


Figura 2.1. Confronto dell'efficienza degli algoritmi di filtraggio di modelli EIV.

2.9.4 Risultati di due simulazione di Monte Carlo

Le proprietà della procedura di filtraggio denominato *Algorithm 1* sono state testate facendo ricorso ad una simulazione di Monte Carlo effettuata su un sistema del 2° ordine dato da:

$$(z^2 - 0.6z + 0.45)\hat{y}(t) = 0.5381(z^2 + 0.3z - 0.4)\hat{u}(t) \quad (2.40)$$

Da sottolineare che l'uscita presenta la stessa varianza dell'ingresso al fine di semplificare la presentazione dei risultati.

La simulazione riportata consiste in 100 *run* e ha lo scopo di testare sia la procedura di interpolazione che di filtraggio. Ciascun *run* è stato eseguito utilizzando come input 200 valori di una sequenza dalla varianza unitaria generata tramite un processo ARMA. Le sequenze in ingresso e in uscita caratterizzate dall'assenza di rumore sono state "inquinare" aggiungendo rumori bianchi $\tilde{u}(\cdot), \tilde{y}(\cdot)$ con varianza pari a $\tilde{\sigma}_u^2 = 0.25$ e $\tilde{\sigma}_y^2 = 0.64$ e cross-covarianza pari a $\tilde{\sigma}_{yu} = 0.36$. Le Figure 2.2 e 2.3 mostrano i segnali in ingresso e in uscita senza rumore confrontati con i rispettivi segnali affetti da rumore in un tipico *run*.

I valori medi su tutti i *run* delle deviazioni standard delle differenze fra le sequenze di input e output interpolate e quelle senza rumore sono:

$$\begin{aligned} \sigma_{e_u} &= 0.3042 \pm 0.0113 \\ \sigma_{e_y} &= 0.3061 \pm 0.0221 \end{aligned} \quad (2.41)$$

che corrispondono ad errori del valore di 30.4% e 30.6%.

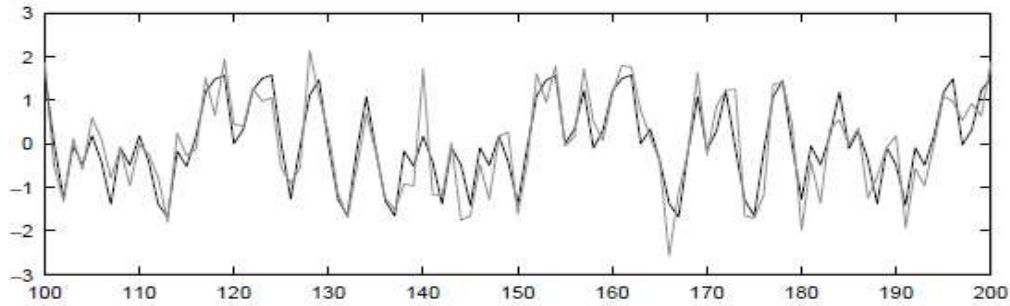


Figura 2.2. Confronto fra il segnale in input senza rumore e la sua osservazione.

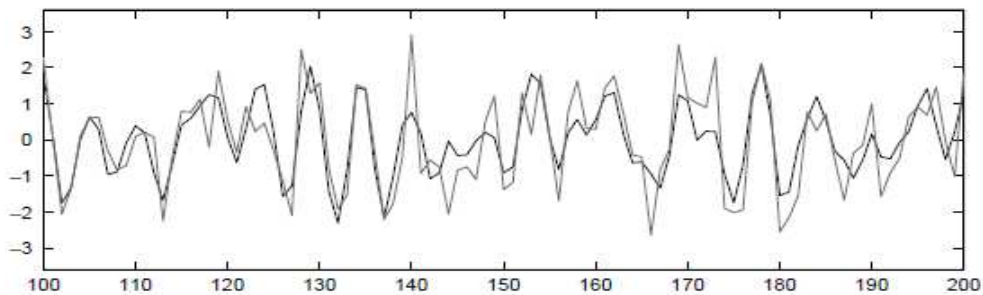


Figura 2.3. Confronto fra il segnale in output e la sua osservazione.

I valori medi su tutti i *run* delle deviazioni standard delle differenze fra le sequenze di input e output filtrate e quelle senza rumore sono:

$$\sigma_{ei} = 0.3410 \pm 0.0112$$

$$\sigma_{ey} = 0.3447 \pm 0.0249 \quad (2.42)$$

che corrispondono ad errori del valore di 34.1% e 34.5%.

Le Figure 2.4 e 2.5 mostrano i segnali in ingresso e in uscita senza rumore confrontati con i rispettivi segnali affetti filtrati in un tipico *run*.

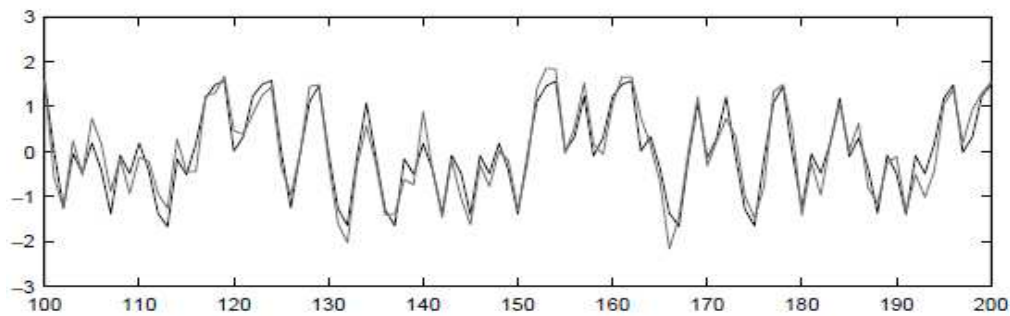


Figura 2.4. Confronto fra i dati in input senza rumore e filtrati.

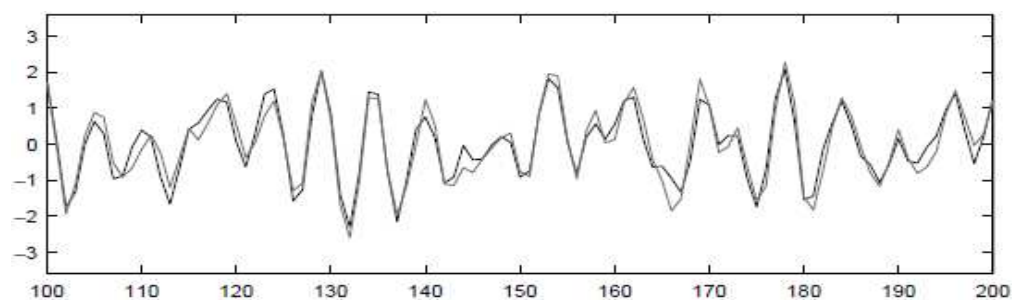


Figura 2.5. Confronto fra i dati in output senza rumore e filtrati.

I risultati ottenuti evidenziano la robustezza e la buona riuscita dell'algoritmo descritto; si può affermare che il filtro ottimale proposto consente di ottenere stime a minima varianza sia degli segnali in ingresso che in uscita e può essere facilmente implementato in una procedura ricorsiva che non richiede la soluzione dell'equazione di Riccati ad ogni step.

Anche le prestazione degli altri due algoritmi precedentemente illustrati sono state indagate e messe in relazione con quelle appena descritte attraverso un ulteriore simulazione di Monte Carlo. Tra i risultati interessanti, è emerso che lo *State-space algorithm* fornisce stime differenti ai primi step da imputarsi al suo stato iniziale, come suggerisce la Figura 2.6.

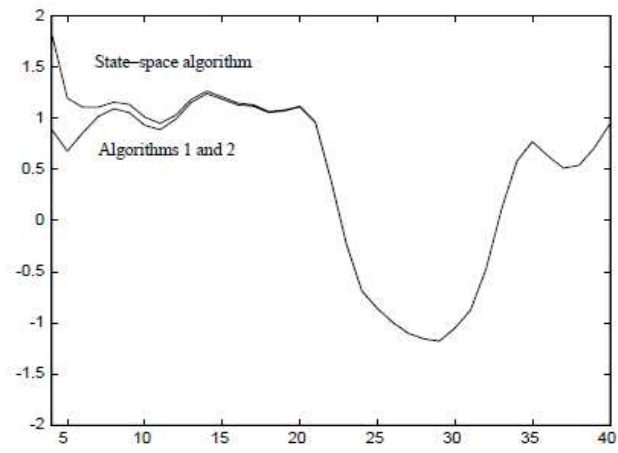


Figura 2.6. Output filtrato.

3 CARATTERIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E MODELLAZIONE

3.1 Introduzione

L'analisi di strutture complesse è comunemente condotta attraverso modelli agli elementi finiti (FEM). Un modello FEM simula il comportamento della struttura e può essere utilizzato per predirne la risposta ai carichi di servizio e per valutarne la sicurezza nel caso di sollecitazioni eccezionali quali gli eventi sismici.

La modellazione anche se raffinata può essere, tuttavia, una rappresentazione che differisce dalla struttura reale, in particolare nel caso di azioni dinamiche. In questa tesi si è già messa in evidenza la necessità di ricorrere a tecniche sperimentali al fine di verificare la **bontà** del modello numerico nel simulare il comportamento dinamico della struttura. A fronte dei risultati è possibile, inoltre, migliorare i modelli disponibili aumentando la capacità degli stessi di effettuare previsioni affidabili. La modellazione rappresenta inoltre una **fase**

preliminare fondamentale. Nel Capitolo 1 è emersa, infatti, l'importanza di avere un'idea dei modi propri della struttura e dell'intervallo di frequenze prima di effettuare un'analisi modale operativa.

Si evince, dunque, l'importante svolto dalla caratterizzazione numerica dell'opera dal punto di vista della configurazione strutturale e la sua modellazione.

In questo capitolo, pertanto, dopo aver introdotto i principi su cui si basano i modelli FEM e descritto brevemente le caratteristiche del programma di calcolo utilizzato, si presentano i risultati dell'analisi modale condotta sul modello agli elementi finiti dell'opera oggetto di studio.

Si vuole sottolineare che la realizzazione del modello è stata eseguita in modo da cogliere il comportamento globale della struttura, senza però trascurare importanti aspetti.

3.2 Il metodo degli elementi finiti

Quando si devono studiare sistemi continui - come sono le strutture - nella maggior parte dei casi di interesse pratico la forma geometrica e le condizioni al contorno sono troppo complesse per poter applicare procedimenti analitici; per analisi sia statiche sia dinamiche si deve allora fare ricorso ad altri metodi, per lo più basati sull'uso del calcolatore. Tra tali metodi, ampiamente impiegato è

quello degli elementi finiti che permette di risolvere il problema della determinazione dello stato di sforzo e di deformazione in elementi in condizioni di carico per le quali non è reperibile o ricavabile la soluzione analitica.

In questo metodo si discretizza il continuo, che ha infiniti gradi di libertà, con un insieme di elementi di dimensioni finite, tra loro interconnessi in punti predefiniti (nodi). È quindi possibile ridurre il problema in un sistema di equazioni algebriche con un numero finito di incognite (gli spostamenti nodali).

Nel metodo degli elementi finiti si assume una funzione di spostamento all'interno del singolo elemento, definendo cioè le componenti di spostamento del generico punto come una funzione, ipotizzata nota, degli spostamenti dei nodi: il problema, con tale assunzione, passa dal dominio continuo al dominio discreto visto che le nuove incognite sono gli spostamenti nodali. Una volta noti gli spostamenti nodali è immediato il passaggio alle deformazioni e, mediante la matrice di legame sforzi-deformazioni, si passa successivamente al tensore degli sforzi.

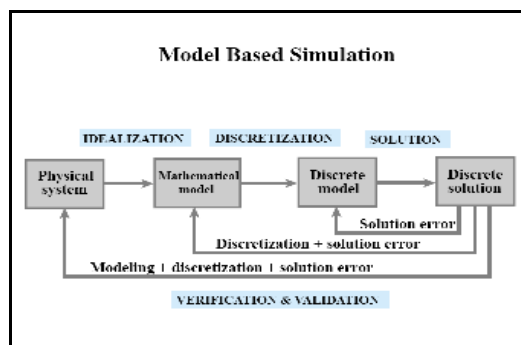


Figura 3.1. Fasi della modellazione.

Il procedimento su cui si basa il metodo degli elementi finiti, illustrato in Figura 3.1, è applicabile a tutte le equazioni dell'ingegneria. Esso consiste, dunque, nel risolvere problemi continui in modo approssimato, trasformando il problema differenziale in un problema algebrico. Pertanto, il metodo degli elementi finiti consente di schematizzare il comportamento di un sistema continuo ad infiniti gradi di libertà, mediante un insieme discreto di elementi, ciascuno caratterizzato da un numero limitato di parametri.

3.2.1 Il programma Straus7

Straus7 è un sistema generale per l'analisi ad elementi finiti, adatto a tutti gli ambienti e dimensioni industriali, nei settori dell'ingegneria aeronautica, civile, meccanica, navale, geotecnica, oltre che all'industria pesante e dei materiali. Il sistema ha concezione unitaria, comprendendo, oltre ai solutori, pre-processor e post-processor.

Tra i tipi di analisi che possono essere affrontati si ricordano:

- l'analisi statica, lineare e non lineare
- l'analisi dinamica nel transitorio lineare e non lineare
- la stabilità dell'equilibrio
- il calcolo delle frequenze naturali
- l'analisi della risposta armonica

-
- l'analisi della risposta spettrale
 - l'analisi del trasporto di calore in regime stazionario lineare e non lineare

I metodi di soluzione in ambito non lineare comprendono la non-linearità geometrica, per materiale e per condizioni al contorno.

L'ambiente di pre-processamento contiene una serie di strumenti molto potenti per la manipolazione sia della geometria che degli elementi, rendendo semplice la realizzazione del modello anche per strutture complesse, mentre l'ambiente di post-processamento è stato concepito per consentire la gestione dei risultati.

3.3 Descrizione dell'opera

L'opera, oggetto del monitoraggio sismico, appartiene al complesso di nuova realizzazione denominato "Centro Unificato di Protezione Civile" (CUPC) di Granarolo dell'Emilia, sito in via del Frullo nel Comune di Granarolo dell'Emilia (BO). La scelta progettuale riguarda la costruzione di un complesso in c.a. costituito da 2 corpi, e da un sistema di telai metallici, opportunamente controventato. Mentre uno dei corpi in c.a. funge da autorimessa, l'altro è sede di uffici pubblici; il sistema di telai metallici è concepito, invece, come blocco scala. In Figura 3.2 se ne può vedere una rappresentazione.



Figura 3.2. CUPC: sede della Protezione Civile in Granarolo dell'Emilia.

La realizzazione dell'opera si pone come obiettivo quello di fornire un immobile che possa costituire un punto di riferimento per la gestione delle risorse umane e delle strutture logistiche disponibili sul territorio allo scopo di fronteggiare in modo diretto ed organizzato le operazioni di soccorso in fase di emergenza.

3.3.1 Inquadramento normativo

Le Normative di riferimento sono richiamate di seguito:

- D.M. 14 gennaio 2008 Norme Tecniche per le costruzioni pubblicato su Gazzetta Ufficia n° 29 del 4 febbraio 2008;
- Art. 20 Decreto Legge n°248/2007 per quanto riguarda l'obbligo dell'utilizzo della nuova normativa per strutture di tipo strategico;

-
- CNR 10025/84 per il calcolo dei plinti a bicchiere.

Gli edifici risultano rispondenti alla Normativa sismica, considerando la Nuova classificazione prevista dal D.M. del 2008. Questa prevede “...in presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso...” che le costruzioni siano suddivise in classi d’uso. Il CUP rientra in Classe IV che comprende appunto: “..Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità...”.

La norma sismica sancisce, tra l’altro, che due edifici devono avere distacchi tali da evitare fenomeni di martellamento tra strutture contigue; per tale motivo i distacchi hanno dimensioni non inferiori alla somma degli spostamenti allo stato limite ultimo delle strutture medesime, amplificate per un coefficiente parziale coerente con il fattore di struttura adottato. L’Ordinanza 3274 e il D.M. 16/01/96 (al punto C.4) prevedono che due edifici non possano essere costruiti a contatto, a meno che essi non costituiscano un unico organismo statico, realizzando la completa solidarietà strutturale. Nel caso in cui due edifici formino organismi distaccati, essi devono essere forniti di giunto tecnico di dimensione non minore di:

$$d(h) = h/100$$

dove $d(h)$ è la distanza fra due punti affacciati, posti alla quota h a partire dallo spiccato delle strutture in elevazione.

La struttura prevede quindi la realizzazione di travi distanziate non meno di 15 cm dalle strutture esistenti, analogamente gli altri edifici strutturali, tale distanza verrà poi colmata mediante la localizzazione di idoneo giunto per solai e per pareti, in modo da poter collegare nel migliore dei modi i due edifici stesi, senza trascurare che i comportamenti in caso di sisma risultano indipendenti l'uno dall'altro.

3.3.2 Sistema strutturale

Si premette che si indicherà con l'espressione "direzione x" la direzione in cui il complesso si sviluppa trasversalmente, con "direzione z" la direzione in cui si sviluppa longitudinalmente.

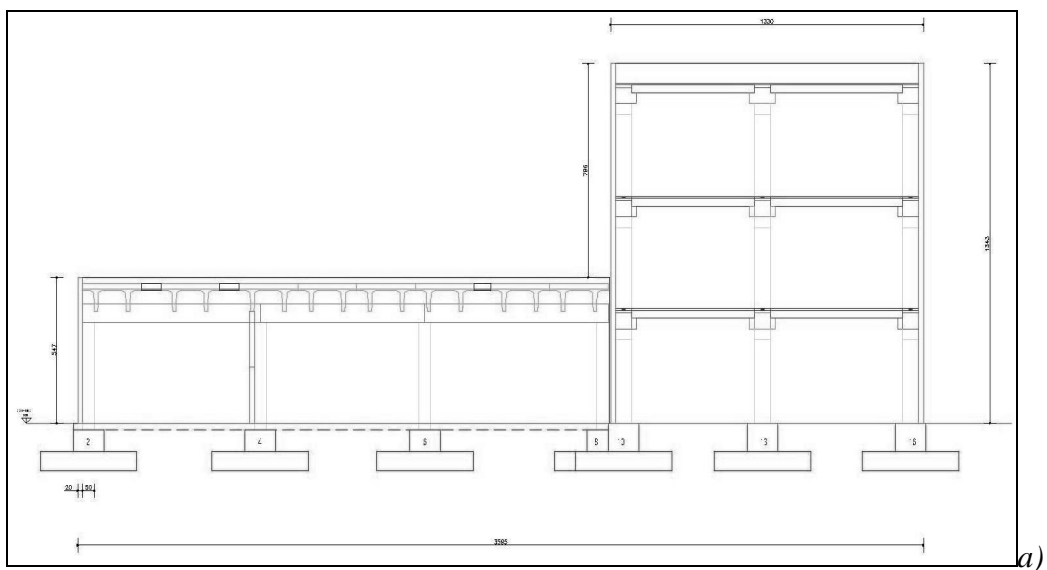
L'autorimessa consiste in un parallelepipedo a base rettangolare alto 5,47 m e i cui lati misurano 11,35 e 22,55 m, rispettivamente in direzione x e z.

Le opere di fondazione risultano costituite da plinti a bicchiere in c.a., opportunamente dimensionati, e collegati da un sistema di travi-cordolo atte a creare un idoneo scarico al suolo per la struttura in elevazione. Questa è composta da un solo impalcato, a sua volta costituito da travi e pilastri prefabbricati. Mentre le travi, disposte in direzione z, hanno sezione ad "L", tutti i pilastri hanno dimensioni pari a 50x50. Sulle travi si appoggiano tegoli di copertura "Alitex".

La palazzina presenta base quadrata il cui lato misura 12,20 m e risulta composta da 3 impalcati, costituiti da elementi prefabbricati, per un'altezza complessiva di 13,43 m. Lo schema strutturale prevede 3 telai piani disposti in direzione x e collegati trasversalmente. Le travi di bordo hanno sezione ad "L" mentre quelle disposte nelle campate di mezzeria a "T", tutti i pilastri hanno dimensioni 70x70.

Si è eseguito per i solai un getto di calcestruzzo prefabbricato C 20/25. Da sottolineare che il secondo e il terzo livello della palazzina risultano accessibili solo dall'esterno.

Anche gli elementi fondali di questo edificio sono plinti a bicchiere poggianti su un piano di posa di almeno 10 cm di magrone con C 12/15. ed aventi dimensione variabili con armatura S450c e calcestruzzo C 25/30. Tali plinti sono collegati mediante travi di collegamento realizzate con calcestruzzo C 25/30 e con armatura S450c, aventi tutte dimensione pari a 40x70 tranne una che ha dimensione pari a 50x70.



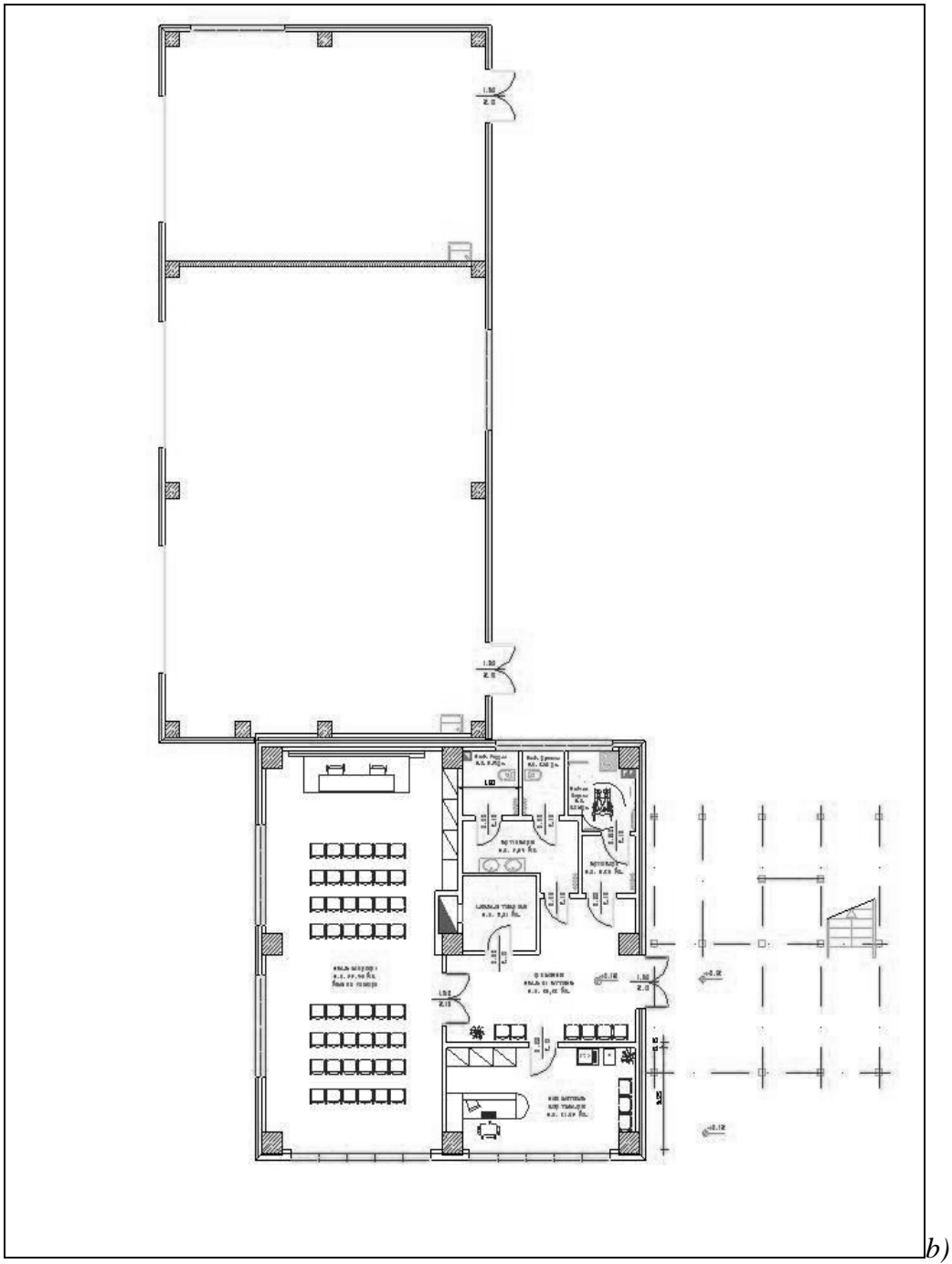
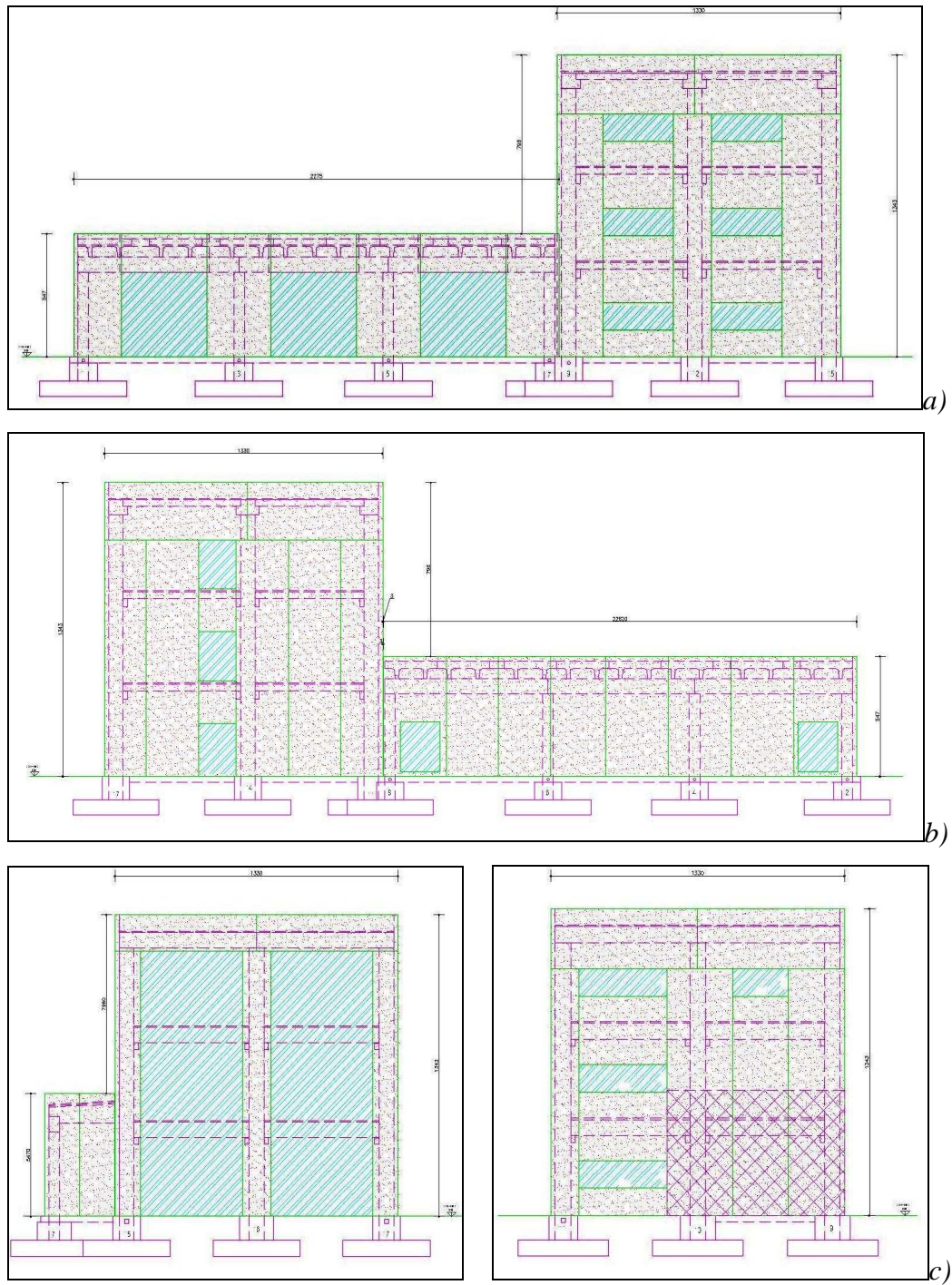


Figura 3.3.a) Sezione A-A; b) Pianta piano terra.

I prospetti est, nord e sud dell' autorimessa sono prevalentemente chiusi da pannelli. Il prospetto ovest è caratterizzato, invece, dalla presenza di ampie finestrate (Figura 3.4).



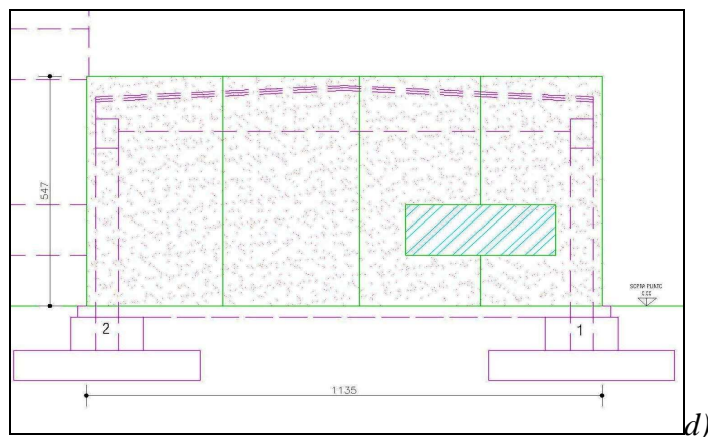


Figura 3.4. *a)Prospetto Ovest; b)Prospetto Est; c)Prospetto Nord e Sud, palazzina; d)Prospetto Nord, autorimessa.*

Per quanto riguarda la parte in elevazione del blocco scala si sono utilizzati profilati di tipo standard di varie sezioni in acciaio S275. I solai sono costituiti da grigliati metallici antitacco mentre la copertura risulta composta da semplice lamiera grecata. Il sistema strutturale prevede un sistema controventante orizzontale posizionato al livello 1 e al livello 2 e un sistema controventante di parete posizionato in una direzione e su due fronti opposti. In Figura 3.5 sono illustrati i prospetti del blocco scala.

Le fondazioni utilizzate per il blocco scala, invece, sono costituite da un reticolo di travi rovesce a sezione rettangolare 40x80 opportunamente dimensionato in modo tale da distribuire con valori sufficientemente regolari le pressioni sul terreno indotte dai carichi trasmessi dalla struttura sovrastante. Tale accorgimento consente di ridurre al minimo eventuali cedimenti differenziali che potrebbero far

sorgere eventuali mal funzionamenti della struttura metallica. Questi tipi di fondazione sono stati scelti tenendo conto delle dimensioni dei fabbricati e dei risultati delle prove penetrometriche statiche (CPT).

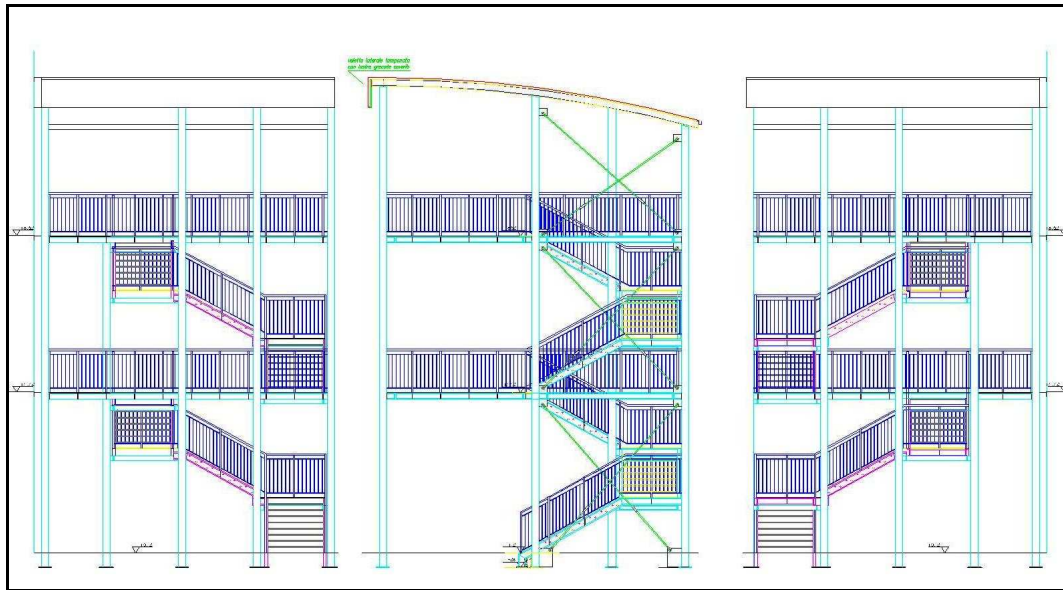


Figura 3.5. Prospetti blocco scala.

3.3.3 Risultati delle prove geotecniche

Dalla relazione geologica grazie alle prove effettuate fino ad una profondità di mt. 30 dal p.c. si trae che il sito di fondazione è costituito in modo uniforme dalla presenza di depositi alluvionali quaternari caratterizzati essenzialmente da materiali prevalentemente limosi leggermente argillosi; allontanandosi dal dosso fluviale antico, i materiali presentano granulometrie via via sempre più fini. Le prove hanno evidenziato terreni con caratteristiche prevalentemente medie (generalmente argille limi) mentre scendendo in profondità, attorno a

–14 m sono presenti materiali con granulometrie più grossolane (limi sabbiosi, sabbie) a cui corrisponde un incremento della resistenza all'infissione.

3.4 Modellazione

Gli elaborati grafici e le relazioni strutturali di progetto sono stati attentamente analizzati per la realizzazione della geometria. Il primo aspetto considerato è stata ovviamente la creazione dei nodi in corrispondenza di ogni vincolo e di ogni estremità di trave.

Si è poi passati alla creazione degli elementi: in particolare, travi, pilastri e tegoli sono stati modellati come elementi “beam2”, ossia elementi monodimensionali a 2 nodi con 6 gradi di libertà per nodo.

L'operazione successiva è stata la definizione delle proprietà delle sezioni: ad ogni elemento è stata attribuita la geometria e il materiale costituente. Merita attenzione la modellazione dei tegoli di copertura (Figura 3.6), per la quale è stato necessario importare la geometria nel modello di lavoro e discretizzare la sezione con elementi “Quad4”, non essendo questa disponibile di default.

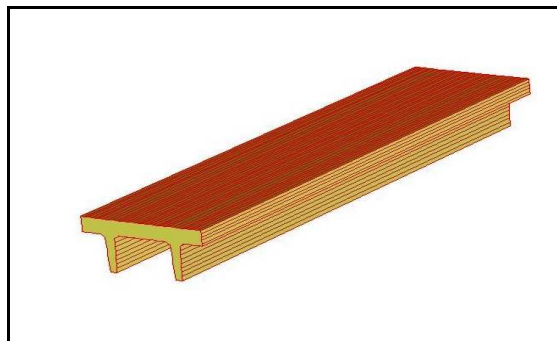


Figura 3.6. Modellazione del tegolo di copertura.

È noto che negli edifici i **solai** svolgono un ruolo fondamentale soprattutto durante l'evento sismico. Ad essi è generalmente affidato il compito di ridistribuire le forze di inerzia indotte dal sisma sugli elementi verticali e di assicurare che gli elementi resistenti collaborino nel sopportare l'azione orizzontale. Per fare questo un solaio deve avere resistenza e rigidezza. Mentre la resistenza è necessaria per cautelarsi contro eventuali danni indotti dalle forze di inerzia nell'orizzontamento, una sufficiente rigidezza nel piano dei solai, tale da permettere loro di comportarsi da diaframmi rigidi, è generalmente auspicabile in quanto permette di ridistribuire le forze orizzontali proporzionalmente alle rigidezze degli elementi verticali.

Nel caso in esame, si è ipotizzato che i solai fossero infinitamente rigidi nel proprio piano. Avendo a disposizione diverse possibilità di modellazione dei piani rigidi, si è scelto di collegare i nodi con tratti rigidi ad un nodo di riferimento comunemente definito "nodo master" (Figura 3.7). In questo modo a tutti i nodi del piano si sono imposte relazioni di corpo rigido nel piano, relazioni definite appunto "master-slave".

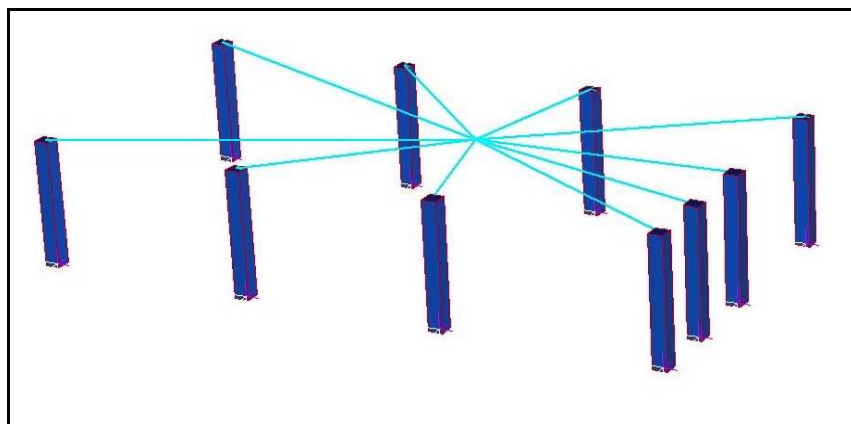


Figura 3.7. Modellazione del solaio come elemento infinitamente rigido.

Un aspetto molto importante su cui ci si è soffermati è stata la modellazione delle **tamponature**. Le strutture intelaiate, nel passato, erano tradizionalmente progettate trascurando la presenza di questi elementi, realizzati allo scopo di chiudere e ripartire gli ambienti all'interno dell'edificio. Tale schematizzazione, comunemente accettata, era conseguente alle limitate conoscenze e possibilità di calcolo e conduceva ad un'analisi semplificata della struttura. In realtà, specialmente in presenza di azioni orizzontali, l'esistenza di elementi di tamponatura può determinare importanti alterazioni nella risposta sia statica che dinamica. Queste sono principalmente legate ad azioni torcenti derivanti da irregolare distribuzione delle rigidezze in pianta, ad eccessive deformazioni a livello di alcuni piani dovute all'irregolarità in elevazione, alla diversa risposta strutturale dovuta all'aumento di rigidezza ed ai possibili effetti locali dovuti all'interazione telaio-tamponamento (come ad esempio il collasso di colonne snelle sotto l'azione di taglio dovuta al comportamento a puntone della parete in muratura). Sono altresì importanti gli aspetti positivi delle tamponature sul comportamento strutturale. Queste ultime, infatti, se dimensionate e realizzate in modo opportuno conducono sia ad un aumento di resistenza che di rigidezza nei riguardi delle azioni orizzontali.

Sebbene i più recenti codici di progettazione antisismica mettano in evidenza il ruolo svolto dai pannelli, tuttavia non danno indicazioni su come considerarli nella modellazione. L'Ordinanza 3274 recita: *“..Il modello della struttura su cui verrà effettuata l'analisi dovrà*

rappresentare in modo adeguato la distribuzione di rigidezza effettiva considerando, laddove appropriato, il contributo degli elementi non strutturali...”, mentre nell’Eurocodice 8 si legge: “Il modello dell’edificio deve rappresentare adeguatamente la distribuzione delle rigidezze [...]. Di norma vanno considerati gli elementi non strutturali che possono sulla influenzare la risposta degli elementi strutturali...”.

Numerosi studi sono stati compiuti circa la modellazione di questi elementi. Risulta possibile, comunque, ricorrere a metodi semplificati in cui i pannelli vengono sostituiti da bielle equivalenti disposti lungo le diagonali, come suggerisce la Figura 3.8

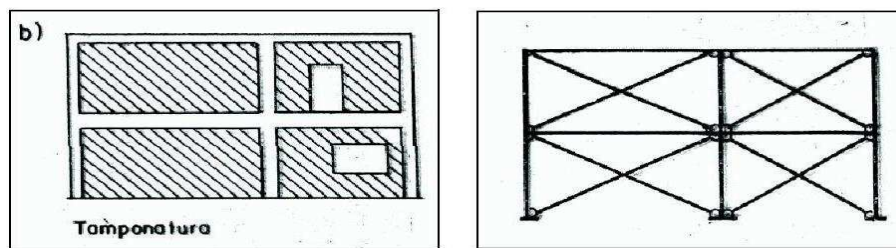


Figura 3.8. Modellazione delle tamponature.

Per definire le caratteristiche delle bielle si calcola la rigidezza elastica laterale K_t della tamponatura con la seguente formula approssimata:

$$K_t = \frac{1}{\frac{L_t^3}{12E_c J} + \frac{L_t}{A_s G_c}} \quad (3.1)$$

dove con L_t si è indicata la dimensione della tamponatura, con J il momento di inerzia della sezione, con A_s l’area di taglio, con E_c il

modulo elastico del calcestruzzo e con G_c il modulo elastico a taglio. Quindi si uguaglia K_t alla rigidezza assiale elastica della biella equivalente K_b :

$$K_b = \frac{E_b A_b}{L_b} \rightarrow A_b = \frac{L_b K_t}{E_b} \quad (3.2)$$

dove A_b è l'area della sezione della biella, E_b è il modulo elastico del materiale della biella e L_b è la lunghezza della biella. Si ottiene quindi un'equazione lineare nell'incognita A_b che viene facilmente risolta.

In alternativa, in letteratura si trovano numerosi suggerimenti circa le caratteristiche dell'elemento equivalente: questa deve essere costituita dallo stesso materiale di cui è composta la tamponatura, deve avere spessore pari a quello del pannello e lunghezza uguale a quella della diagonale. La larghezza, invece, è definita in funzione della lunghezza:

- M.Pagano $0.20 l_d < b < 0.25 l_d$
- B. Stafford Smith $0.15 l_d < b < 0.30 l_d$
- D.M. 2/7/81 $b = 0,1 l_d$

L'attribuzione dei carichi ha visto in primo luogo la creazione di "load patches" (aree di carico). Queste permettono di ripartire in modo automatico un carico di superficie sulle travi di bordo. In questo caso (Figura 3.9) il solaio viene modellato come un elemento "plate"

fittizio, ossia privo di alcuna proprietà strutturale, a cui viene attribuito un carico di superficie.

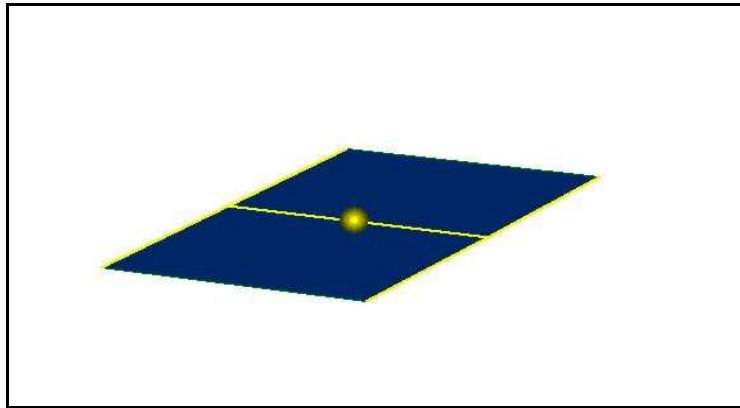


Figura 3.9. Modellazione del solaio come “load patch”.

La Tabella 3.1 mostra i risultati dell’analisi dei carichi.

IMPALCATO 2-3	
PESO PROPRIO SOLAIO PREFABBRICATO	450 KG/MQ
MASSETTO ALLEGGERITO	130 KG/MQ
INTONACO	20 KG/MQ
PAVIMENTAZIONE	40 KG/MQ
TRAMEZZATURE	80 KG/MQ
ACCIDENTALE USO UFFICIO	300 KG/MQ
TOTALE	1020 KG/MQ

IMPALCATO 1-4	
PESO PROPRIO SOLAIO PREFABBRICATO	450 KG/MQ
MASSETTO ALLEGGERITO	150 KG/MQ
INTONACO	20 KG/MQ
ISOLAMENTO	10 KG/MQ
ACCIDENTALE NEVE	130 KG/MQ
TOTALE	760 KG/MQ

Tabella 3.1. Analisi dei Carichi.

La modalità di ripartizione del carico sulle travi è stata definita ogni volta in funzione dell’orditura dei solai (Figura 3.10).

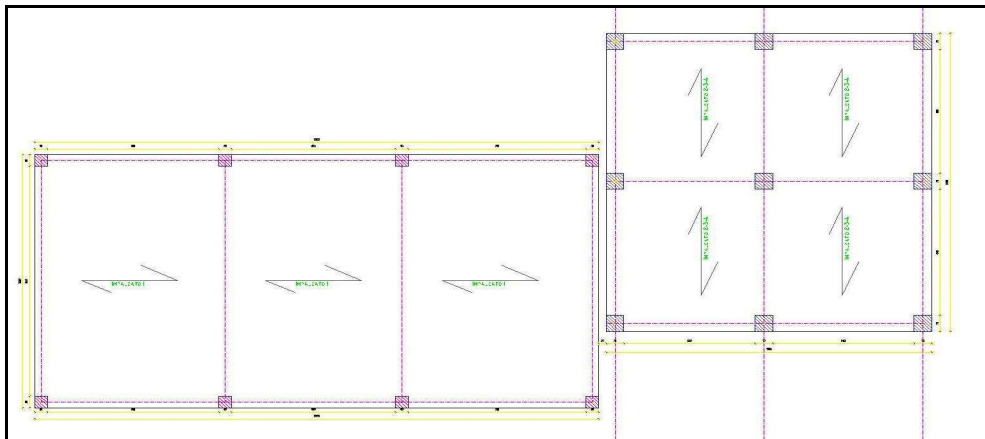


Figura 3.10. Orditura dei solai.

Infine, si sono introdotti i vincoli; per semplicità, si è supposto le strutture fossero incastrate alla base, considerando le modeste sollecitazioni a cui sarà soggetta la struttura durante il monitoraggio. Si mostrano in Figura 3.11 i modelli definitivi.

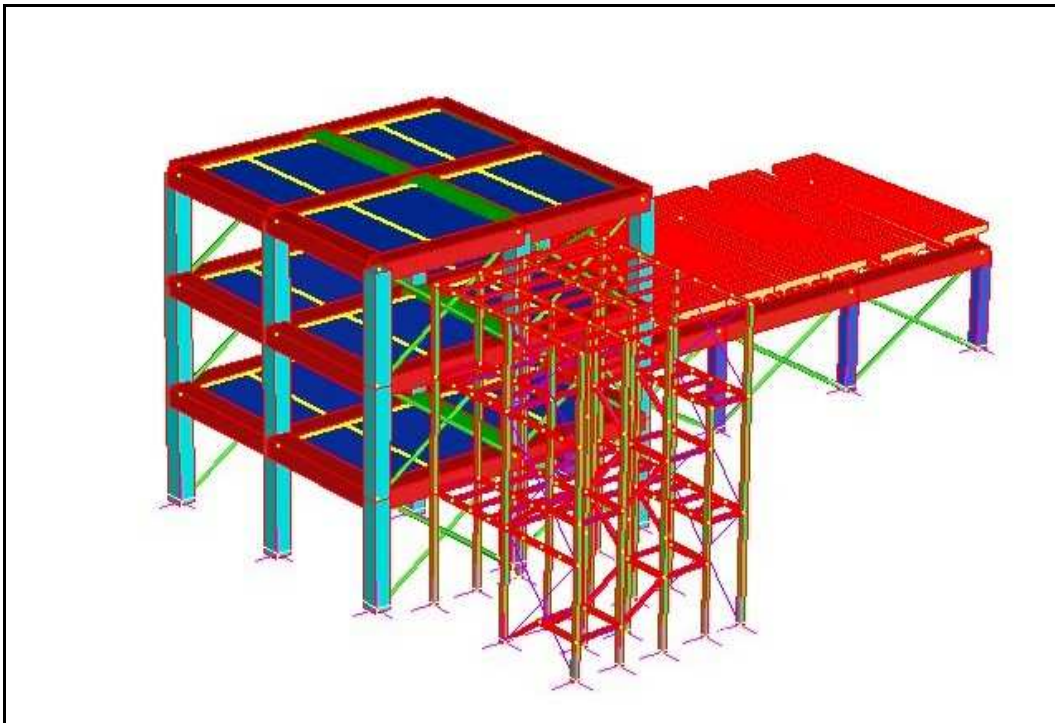


Figura 3.11. Modello agli elementi finiti.

3.5 Solutori

3.5.1 Natural frequency analysis

Il solutore dell'analisi modale è utilizzato per calcolare le frequenze naturali e i corrispondenti modi propri di una struttura non smorzata. Il problema è retto dalla seguente equazione:

$$[\mathbf{K}]\{x\} = \omega^2 [\mathbf{M}]\{x\} \quad (3.3)$$

dove:

$[\mathbf{K}]$ è la matrice di rigidezza globale;

$[\mathbf{M}]$ è la matrice di massa globale;

ω^2 è la frequenza naturale circolare;

$\{x\}$ è il vettore dei modi di vibrare.

In Tabella 3.2 si leggono i risultati dell'analisi modale in termini di frequenze di vibrazione, massa modale e fattore di partecipazione; di seguito, invece, si mostrano le deformate modali corrispondenti ai primi tre modi di vibrare.

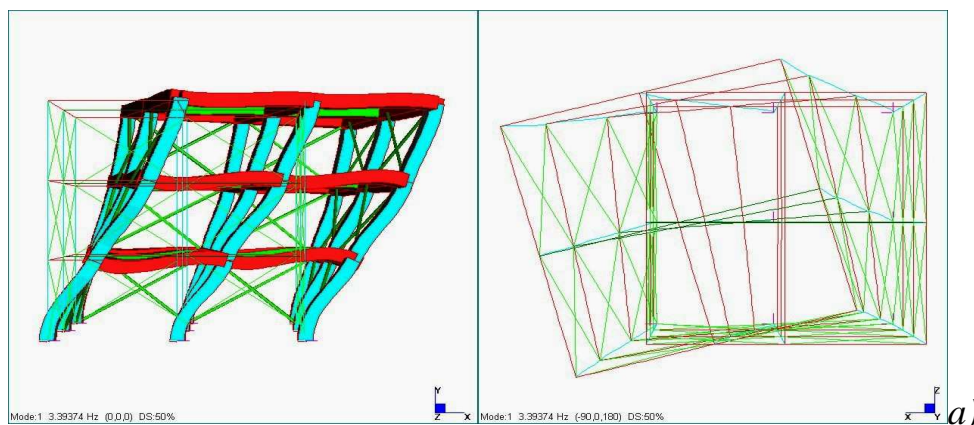
Si anticipa soltanto che il primo modo è traslazionale in direzione x , vibra a 3.39 Hz ed è in grado di eccitare circa il 77% della massa modale. Come si nota dalla Figura 3.12a), la deformata non è simmetrica; questo è dovuto ad una distribuzione irregolare in pianta delle tamponature. Mobilita l'88% della massa modale il secondo modo che è traslazionale in direzione z e a cui corrisponde una

frequenza di 4.16 Hz. Infine il terzo modo è torsionale e vibra a 5.24 Hz.

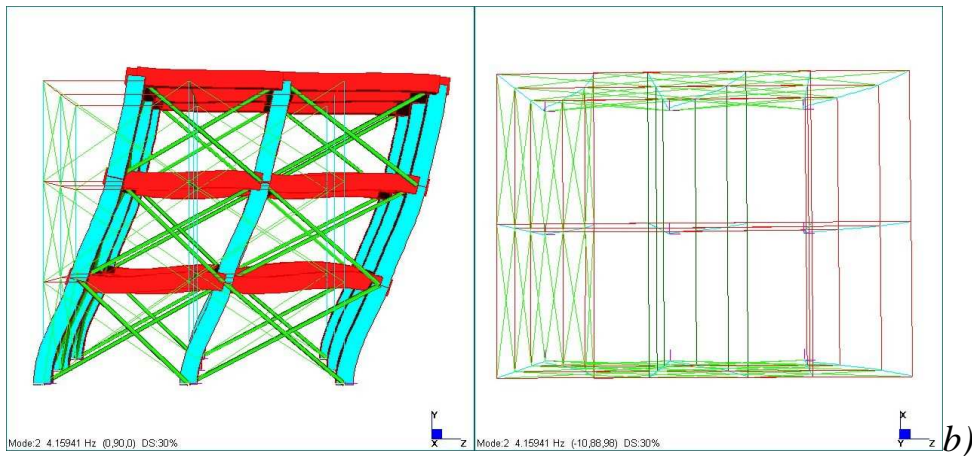
Mode	Frequency [Hz]	Modal Mass [Engineering]	PF-X [%]	PF-Y [%]	PF-Z [%]
1	3.39	2.76×10^5	76.85	0.000	0.000
2	4.16	4.52×10^5	0.000	0.000	88.10
3	5.24	3.10×10^5	10.76	0.000	0.000
4	10.27	3.67×10^5	9.14	0.000	0.000
5	12.35	5.72×10^5	0.000	0.000	9.83
6	13.13	1.38×10^4	0.000	0.20	0.000
7	13.58	1.38×10^4	0.000	3.91	0.000
8	15.09	3.75×10^5	1.01	0.000	0.000

<i>TOTAL MASS PARTICIPATION FACTORS</i>	97.70	4.11	97.93
--	--------------	-------------	--------------

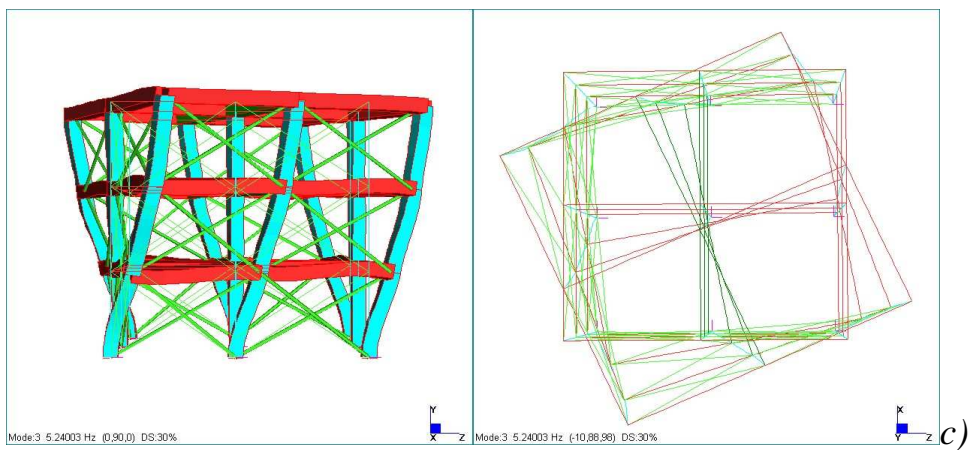
Tabella 3.2. Risultati in termini di frequenze, massa modale e fattore di partecipazione dell'analisi modale.



Prima frequenza propria: 3.39Hz



Seconda frequenza propria: 4.16Hz



Terza frequenza propria: 5.24 Hz

Figura 3.12. Deformate modali corrispondenti a: a) Primo modo; b) Secondo modo; c) Terzo modo.

3.5.2 Linear transient analysis

Il solutore dell'analisi dinamica nel transitorio lineare fornisce la storia temporale della risposta dinamica di una struttura soggetta ad una forzante arbitraria e a determinate condizioni iniziali. Le

equazioni dell'equilibrio dinamico in ambito lineare si presentano nella forma:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{R(t)\} \quad (3.4)$$

dove:

$[M]$ è la matrice delle masse;

$[C]$ è la matrice di smorzamento;

$[K]$ è la matrice di rigidità;

$\{x(t)\}$ è il vettore degli spostamenti nodali;

$\{\dot{x}(t)\}$ è il vettore delle velocità nodali;

$\{\ddot{x}(t)\}$ è il vettore delle accelerazioni nodali;

$\{R(t)\}$ è il vettore dei carichi.

Il Capitolo 5 è dedicato alla presentazione dei risultati che confermano la capacità delle procedure di identificazione scelte di ottenere i parametri modali della struttura. Per conseguire questo scopo sono state svolte diverse analisi dinamiche nel transitorio lineare la cui soluzione, come si vedrà nel dettaglio, costituisce i dati in ingresso. In questo paragrafo, si darà soltanto un accenno dei criteri adottati per lo svolgimento delle suddette analisi.

Per ottenere la risposta della struttura ai vari piani, sono state applicate diverse forzanti. Al fine di eccitare il numero desiderato di modi propri di vibrare della struttura, si è imposto che l'azione avesse contenuto spettrale distribuito su una larga banda di frequenze. Inizialmente si è applicata alla base un'eccitazione sinusoidale di

equazione: $F(t) = \sin(2\pi \bar{f} t)$, successivamente una forzante tipo rumore bianco che ben rappresenta vibrazioni di origine ambientale (Figura 3.13).

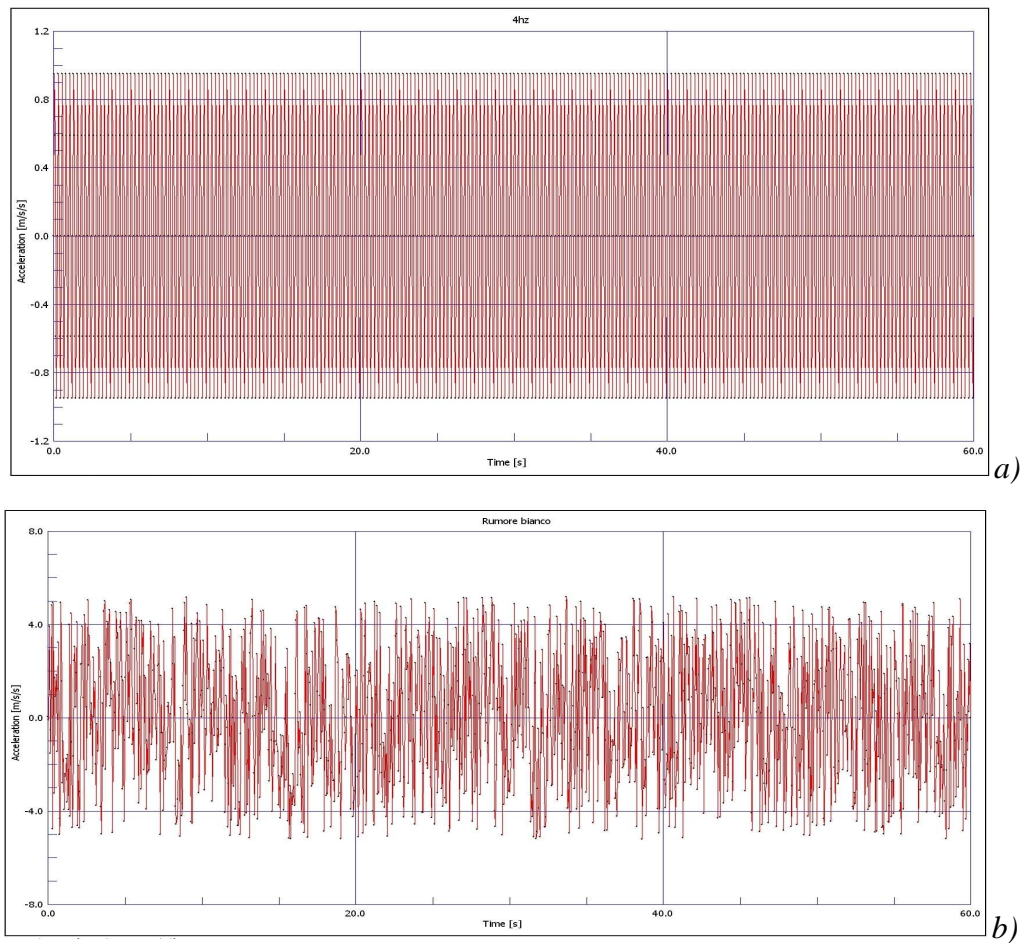


Figura 3.13. Forzanti. a) Segnale sinusoidale; b) Rumore bianco.

Entrambe sono state applicate alla base, in direzione x e con un coefficiente di amplificazione pari a 1. Si è ipotizzato che la loro durata fosse di 60 secondi e che la frequenza di campionamento fosse fissata a 20 Hz, per un passo temporale pari così a 0.05 secondi. La scelta del rumore bianco è motivata dal fatto che, essendo il suo

spettro in entrata uniforme, lo spettro del segnale uscente esprime direttamente la banda passante.

Si è imposto che il rumore bianco avesse media nulla e una determinata **deviazione standard**. Questa esprime un indice di dispersione dei dati intorno al valore atteso, avente la stessa unità di misura dei valori osservati. In fisica, è un ottimo indice dell'errore casuale della misurazione di una grandezza fisica; per tale motivo si è fissato un valore della deviazione standard pari a 3 che, come esposto nel Capitolo 4, rappresenta il rumore presente nelle misura in mm/s^2 qualora si limiti la banda passante degli strumenti da 0 a 20 Hz.

4 STRUMENTI DI MISURA

4.1 Introduzione

Il successo di un'analisi modale operativa condotta su una struttura dipende anche dall'utilizzo di un'adeguata strumentazione. Sostanzialmente, questa risulta costituita da:

- trasduttori ;
- sistema di acquisizione dati;
- sistema di analisi dati.

In Figura 4.1 è illustrato un esempio di catena di misura.

I trasduttori misurano gli spostamenti e le accelerazioni convertendo tali grandezze in segnali elettrici, a loro volta questi vengono registrati e trattati dal sistema di analisi che consente l'estrazione delle proprietà modali del manufatto. Se ne deduce che un buon processo di identificazione dinamica in condizioni output-only (sinonimo di deboli vibrazioni ambientali nel caso di opere civili) non

può prescindere da attente valutazioni riguardanti gli strumenti di misura.

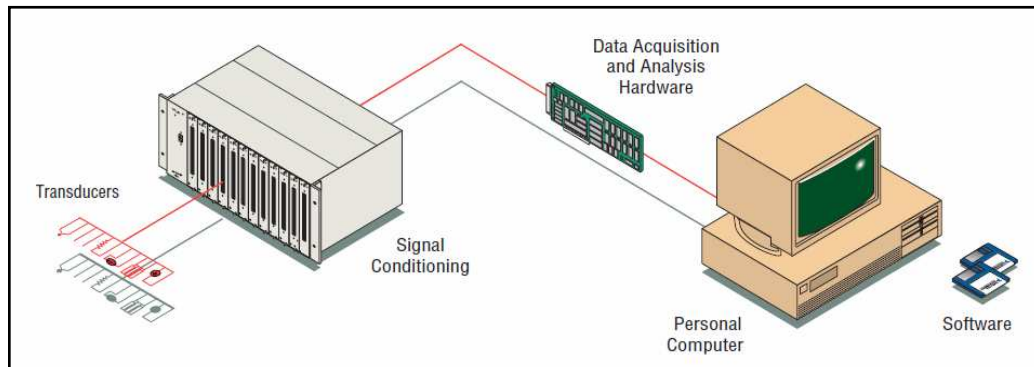


Figura 4.1. Esempio di catena di misura.

Nel Capitolo 1 si è soltanto accennato all'architettura tipica di un sistema di monitoraggio; nei prossimi paragrafi si intende fornire, invece, una descrizione dettagliata delle componenti e allo stesso tempo, si vogliono esporre le osservazioni fatte per la realizzazione di un sistema di monitoraggio dalle caratteristiche ottimali.

4.2 Componenti

4.2.1 Trasduttori

Il trasduttore di vibrazione risulta costituito essenzialmente da un sensore per rilevare la vibrazione, da un amplificatore, infine da un indicatore o registratore. In particolare, un sensore è un sistema di

misura che converte una grandezza fisica in una grandezza elettronica con uscita analogica o digitale. In base alla natura dei sensori si hanno diversi tipi di trasduttori. Per esempio, quelli che misurano accelerazioni relative prendono il nome di accelerometri. Si tratta degli strumenti di misura maggiormente utilizzati nelle analisi modali sia le loro ridotte dimensioni sia perché le altre grandezze (velocità e spostamenti) possono essere ottenute con semplici procedimenti di integrazione. Il loro impiego è particolarmente indicato nelle prove in cui l'eccitazione è di tipo ambientale anche se negli ultimi anni sono aumentate le applicazioni che prevedono l'uso dei geofoni [Brinckler et al., 2005; Schmidt, 2007].

L'**accelerometro** può essere definito un sensore elettronico in grado di rilevare l'accelerazione su diversi assi fra loro ortogonali x , y , z restituendo un segnale proporzionale all'accelerazione. Si tratta di un piccolo sistema vibrante massa-molla che, subendo uno spostamento del suo involucro, collegato alla struttura, inizia ad oscillare. Gli accelerometri, di cui in Figura 4.2 se ne può osservare una rappresentazione schematica, sono apparecchiature piuttosto rigide e molto leggere il cui posizionamento non modifica il comportamento della struttura e il cui range di utilizzo comprende frequenze fino ad una decimo della loro risonanza.

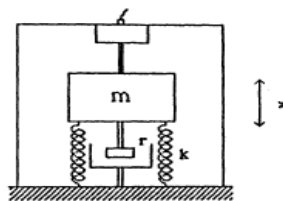


Figura 4.2. Rappresentazione schematica di un accelerometro.

Si distingue fra accelerometri piezoelettrici e capacitivi. I primi sono costituiti da un elemento piezoelettrico, generalmente delle ceramiche policristalline o dei cristalli di quarzo, che subendo una deformazione genera una differenza di carica fra le sue facce. Questa differenza viene convertita poi in un segnale, in termini di tensione, da un amplificatore di carica. Il principale svantaggio è che i cavi che collegano l'amplificatore al sensore sono molto sensibili ad influenze esterne. Questi strumenti sono caratterizzati da una banda a 3 dB più ampia; gli accelerometri capacitivi sono, invece, in grado di misurare anche componenti a frequenza molto bassa ma sono caratterizzati da una banda più stretta e spesso presentano un rumore più elevato.

Le seguenti curve (Figura 4.3) sono relative ad accelerometri di tipo capacitivo:

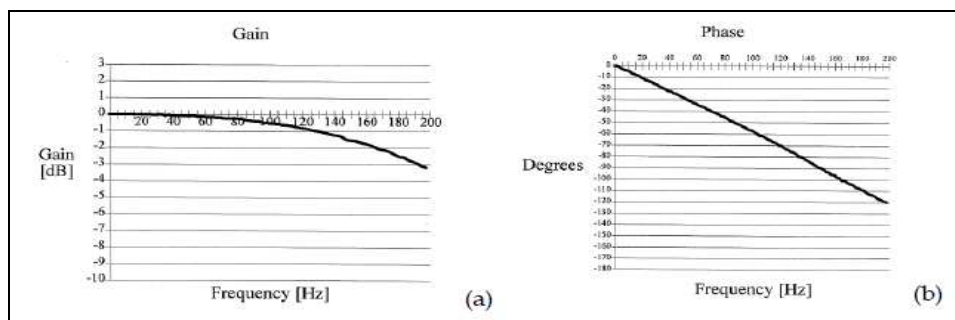


Figura 4.3. Esempio di risposta in frequenza di accelerometri capacitivi.

Si nota che il segnale registrato risulta praticamente indistorto fino a frequenze dell'ordine di 50 Hz. Poiché le principali frequenze proprie delle strutture ricadono abbondantemente in questo intervallo, non risulta necessario correggere le distorsioni indotte dallo strumento

alle frequenze più alte. Se si volessero eliminare le componenti frequenziali indesiderate, si potrebbe ricorrere al **filtraggio**: il segnale in entrata ha un certo spettro di frequenza, il filtro permette il passaggio solo di certe componenti. Un filtro passa-basso, ad esempio, permette il passaggio delle sole componenti a frequenza più bassa: il risultato è allora il segnale iniziale, in cui sono state eliminate le componenti alle frequenze più alte. In sintesi, nella scelta di un sensore, occorre tener presente i seguenti parametri: il campo di frequenza della vibrazione, la temperatura di esercizio, la sensibilità, data dal suo guadagno (per esempio 10 V/g), infine la banda, spesso espressa in dB.

I segnali in uscita ai sensori sono in corrente alternata e in genere richiedono la presenza di un amplificatore che deve avere una risposta in frequenza nello stesso campo di funzionamento del sensore. Particolarmente temibili sono i rumori che presentano una banda equivalente nello stesso campo di frequenza del sensore.

4.2.2 Sensori MEMS

Con la definizione “microsistemi elettromeccanici” (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) si individua, in senso lato, un insieme di dispositivi di varia natura (meccanici, elettrici, ottici, termici, chimici, etc.) integrati in forma altamente miniaturizzata su uno stesso substrato. Data la varietà e la numerosità delle applicazioni

è inopportuno parlare di MEMS in riferimento a un particolare dispositivo o sistema, mentre è più corretto riferire questo acronimo a una vera e propria tecnologia; l'ufficio Microsystems Technology del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti (DARPA) riporta la seguente definizione: “*MEMS is a way of making things*”. La loro nascita risale agli anni '50, insieme con la scoperta dei semiconduttori presso i Bell Laboratories.

Il funzionamento di un MEMS si può descrivere considerando il circuito integrato come il “cervello” del sistema che rende possibile il monitoraggio dell'ambiente circostante tramite gli altri dispositivi ("sensi" e "braccia") presenti sullo stesso chip. In questo modo il sistema raccoglie le informazioni misurando fenomeni meccanici, termici, biologici, ottici e magnetici; l'elettronica elabora le informazioni derivate dai sensori e reagisce abilitando gli attuatori a rispondere tramite movimenti, posizionamenti, filtraggi anche riverificando, tramite gli stessi sensori, le variazioni avvenute nell'intervallo di tempo nell'ambiente circostante. Si ha quindi un sistema in grado di captare informazioni dall'ambiente, di prendere decisioni e, infine, di attuare le azioni opportune.

I MEMS, dispositivi piccoli e sofisticati, in grado di agire, “sentire” e comunicare, stanno dunque gradualmente sostituendo le loro controparti di dimensioni standard in molte applicazioni tradizionali

Si anticipa che gli strumenti utilizzati nel progetto di monitoraggio sismico del complesso in esame sono accelerometri a

tecnologia MEMS, ovvero dispositivi meccanici di dimensioni micrometriche incorporati nei chip a semiconduttore. Si tratta di sensori estremamente avanzati dal punto di vista tecnologico che garantiscono un'elevata affidabilità, bassi consumi, dimensioni e costi ridotti. L'integrazione sullo stesso circuito stampato del sensore (accelerometrico) con un microcontrollore (unità di elaborazione) consente di gestire l'acquisizione e la preelaborazione dei dati acquisiti dal sensore in loco, mentre l'integrazione con una unità di trasmissione consente l'invio di tali dati preelaborati all'unità di acquisizione ed elaborazione dati centrale.

4.2.3 Sistema di acquisizione dati

Il compito del sistema di acquisizione consiste nella raccolta dei segnali. La configurazione più semplice prevede un PC su cui sono installate una o più schede di acquisizione dati.

I parametri fondamentali che caratterizzano una scheda di acquisizione dati sono la risoluzione della scheda, il range di misura, il guadagno, la frequenza di campionamento. In particolare, l'*intervallo di misura* riguarda i valori di tensione minimi e massimi consentiti dalla scheda (in genere da 0 a 10 V, o da -5 V a 5 V); questo consente di adattare il range dell'acquisitore al range del segnale, in modo da misurare il segnale con la massima risoluzione possibile. Il *guadagno* sta ad indicare una qualunque operazione di amplificazione o di

attenuazione del segnale prima che esso venga digitalizzato. Se ad esempio il segnale in ingresso è compreso tra 0 e 5 V e la scheda di acquisizione ha un range che varia tra 0 e 10 V, occorre amplificare il segnale con un guadagno di 2; in questo modo la scheda, nella conversione A/D, utilizza interamente la sua capacità di risoluzione. Infine, la *frequenza di campionamento* è la frequenza con cui ha luogo la conversione A/D.

Per effettuare questa operazione, nell'installazione hardware è presente un convertitore analogico digitale (A/D), uno strumento che rileva il valore istantaneo del segnale a intervalli regolari di tempo, trasformandolo in un insieme discreto di numeri (segnale digitale). In questo modo in uscita si hanno dei numeri che possono essere gestiti da un calcolatore. Questa fase viene chiamata appunto **campionamento** (Figura 4.4)

L'intervallo di tempo Δt_c tra due acquisizioni successive è detto intervallo di campionamento; il suo inverso $f_c = 1/ \Delta t_c$ è definito frequenza di campionamento. L'operazione permette un'analisi del segnale veloce e sofisticata, ma occorre che la f_c sia adeguata per non alterare il segnale.

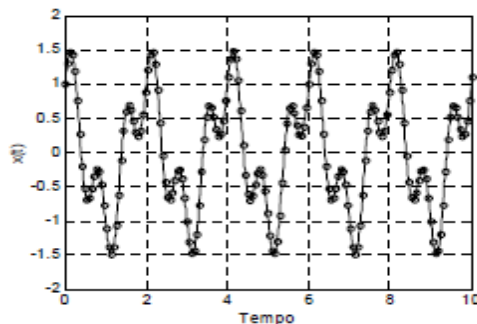


Figura 4.4. Campionamento.

Supponiamo, per esempio, che il segnale sia sinusoidale: effettuandone il campionamento con una f_c troppo bassa, il segnale viene interpretato come un segnale a frequenza più bassa. Qualsiasi analisi successiva dà allora risultati errati, perché è fatta su un segnale diverso da quello effettivo. Questo fenomeno è detto **aliasing** (alterazione).

Per evitare l'aliasing deve essere soddisfatto il Teorema di Shannon o del campionamento, secondo il quale deve essere:

$$f_c \geq 2 f_{c \max} \quad (4.1)$$

dove:

f_{\max} la più alta frequenza contenuta nel segnale.

Dato che non si conosce a priori il contenuto in frequenza del segnale da analizzare, affinché sia soddisfatta tale condizione bisogna usare un filtro antialiasing (AA), che è un filtro passa-basso che lascia passare solo le componenti con frequenza inferiore alla frequenza massima di interesse f_{\max} . La frequenza di campionamento dovrà essere non inferiore a $2 f_{\max}$. Solitamente si assume $f_c = 2.5 f_{\max}$.

Valgono le seguenti relazioni:

$$T^* = N * \Delta t_c = N * \frac{1}{f_c} = \frac{1}{\Delta f} \quad (4.2)$$

dove:

Δf è la risoluzione dello spettro;

f_c è la frequenza di campionamento, che in pratica vale 2.5 volte la massima frequenza di interesse;

T^* è il tempo di acquisizione;

Δt_c è l'intervallo di campionamento;

N è il numero di campioni.

È importante sottolineare che la frequenza Δf non è (in generale) una frequenza del segnale, ma dipende solo dal tempo di acquisizione T^* . Non è detto che tale frequenza, o qualcuno dei suoi multipli, siano effettivamente presenti nel segnale. Supponiamo, ad esempio, di avere una struttura che vibra: essa avrà una certa frequenza f_I del primo modo, f_{II} del secondo modo e così via. Se si rileva il segnale mettendo il trasduttore sulla struttura, tali frequenze saranno presenti nel segnale. Se si rileva il segnale per un tempo T^* , nello spettro compaiono componenti alle frequenze pari ad un multiplo intero della frequenza fondamentale $\Delta f = 1/T^*$. Di regola succederà che f_I e f_{II} non siano dei multipli di Δf : nello spettro si trova allora solo un “addensamento” attorno a tali valori. In corrispondenza delle componenti f_I e f_{II} , che non si ritrovano perché hanno una frequenza che non esiste sullo spettro discreto, compaiono allora delle componenti a frequenze vicine (vedi figura 4.4), la cui energia totale coincide con quella delle componenti f_I e f_{II} . Questo fenomeno, rappresentato in Figura 4.5, è detto **leakage** (dispersione): poiché si rileva la funzione in un tempo T^* finito, cioè guardando il segnale attraverso una finestra rettangolare, le frequenze effettivamente

presenti si “disperdono” nelle frequenze prossime ad esse, ma sempre multiple di $\Delta f=1/T^*$.

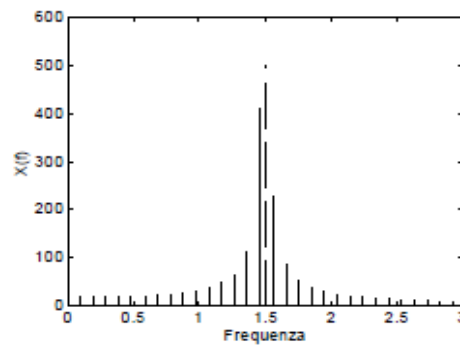


Figura 4.5. Dispersione.

Per diminuire la dispersione si utilizzano finestre di forma diversa; uno dei tipi più usati è la finestra Hanning, che ha la proprietà di annullare il segnale all’inizio e alla fine dell’acquisizione, per cui si elimina la discontinuità che altrimenti si avrebbe all’inizio del periodo.

4.2.4 Sistema di analisi dati

Il compito del sistema di analisi consiste nell’elaborazione dei segnali raccolti al fine di estrarre i parametri modali della struttura.

Una volta acquisito il segnale, tuttavia, prima di passare al trattamento vero e proprio dei dati, vanno effettuati alcuni controlli preliminari per riconoscerne la stazionarietà, la presenza di armoniche spurie e la distribuzione statistica. In primo luogo. Per ogni singolo

canale, va eliminata la media, dato che non ha alcun significato fisico essendo gli accelerometri montati su strutture caratterizzate da un'accelerazione netta nulla. Va verificato inoltre che non siano presenti trend anomali. Generalmente i dati sono anche standardizzati per controllare che siano normalmente distribuiti e che possano essere correttamente utilizzati per gli scopi dell'analisi modale non essendo presenti anomalie.

A questo punto, i dati sono pronti per essere sottoposti all'identificazione, sfruttando le tecniche descritte nel Capitolo 2.

4.3 Problematiche affrontate

In questa sezione della tesi si elencano gli aspetti presi in considerazione per le scelte più appropriate al fine di realizzare un sistema di monitoraggio dalle caratteristiche ottimali. Per avere un'idea chiara delle problematiche affrontate, relative agli strumenti di misura, si sono illustrati dapprima alcuni concetti fondamentali riguardanti la telematica e l'elettronica.

4.3.1 Trasmissione delle informazioni

In termini del tutto generali, una rete è costituita da linee e nodi. Le linee rappresentano una connessione fisica diretta tra due nodi, i quali in base alla loro funzionalità, si possono distinguere in:

-
- *Intermediate System*, se svolgono il compito di trasferire informazioni all'interno della rete;
 - *End System*; se sono la sorgente o la destinazione finale delle informazioni trasmesse.

È noto che ciascun mezzo trasmissivo (per esempio i cavi, le fibre ottiche, lo spazio stesso) lasci passare soltanto certe frequenze comprese fra un valore minimo ed uno massimo. La differenza fra questi due valori è detta **banda passante**.

Si definisce, invece, **velocità di trasmissione** il numero di bit trasferiti dalla sorgente del messaggio al destinatario nell'unità di tempo.

Un problema che caratterizza tutte le reti consiste nel disciplinare l'accesso ad un mezzo di trasmissione, usato da tutti i terminali che vi sono connessi. Sebbene i **metodi di accesso** siano diversificati, essi sono fondamentalmente riconducibili a tre tipi base. Si parla di "contesa" (Figura 4.6) quando ogni strumento prima di comunicare, ascolta se sulla linea è presente un segnale elettrico, segno che un altro sensore la sta utilizzando; se non c'è segnale, allora inizia la propria trasmissione, altrimenti aspetta un intervallo di tempo casuale ed ascolta di nuovo. Ciò malgrado, può capitare che due strumenti inizino a trasmettere contemporaneamente, si verifica perciò una **collisione** dei due segnali, che determina la perdita dell'informazione. I sensori però riconoscono questo fenomeno e

provvedono a ripetere la trasmissione, non subito però, ma dopo aver aspettato per un intervallo di tempo la cui durata è stabilita casualmente per ciascuno, di modo che la collisione non si ripeta.

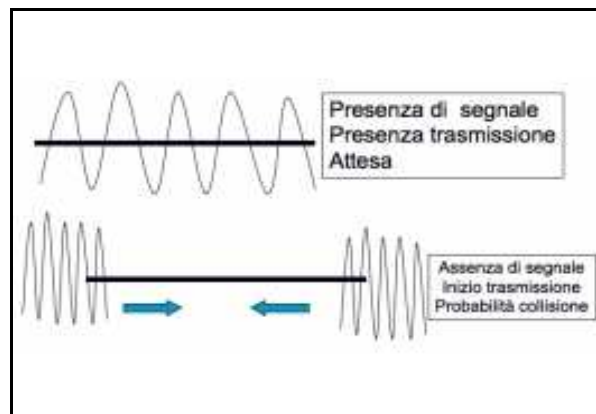


Figura 4.6. Contesa.

La tecnica “token passing” si basa su un particolare messaggio detto ‘token’, che viene trasferito ciclicamente da uno strumento ad un altro, solo quello che riceve il token è abilitato a trasmettere.

Si ha infine il “polling selecting” che è un metodo di accesso adottato di solito quando c’è un mainframe, al quale sono connessi numerosi terminali. In questo caso nessuno dei terminali può iniziare una trasmissione di sua iniziativa. Il mainframe interroga (polling) ciclicamente ciascuno dei terminali, chiedendo se hanno dati da trasmettere, in caso di risposta affermativa di un terminale, questo è abilitato ad effettuare la sua trasmissione. Quindi il mainframe passa ad interrogare il terminale successivo. Data la rapidità con cui si ripete il ciclo di polling sui terminali, si ha comunque l’impressione di essere costantemente connessi al mainframe.

4.3.2 Rumore

Il rumore in elettronica è l'insieme di segnali in tensione o corrente elettrica indesiderati che si sovrappongono al segnale utile. Esso consiste in “fluttuazioni” dovute a proprietà fondamentali della materia e in quanto tali di origine interna e non eliminabili. Queste fluttuazioni che si osservano a livello macroscopico derivano da fluttuazioni a livello microscopico e si manifestano nella forma di segnali casuali il cui andamento nel tempo non è descrivibile analiticamente, ma solo in termini statistici.

Lo studio del rumore affonda le radici nella termodinamica statistica. Si pensi alle particelle di un gas che, in un qualsiasi sistema, si trovano in equilibrio termodinamico. Esse si muovono nello spazio senza una direzione preferenziale; questo fenomeno si può tradurre nel fatto che una grandezza presenti un valore medio costante μ , e si discosti con una certa varianza attorno a tale valore μ (Figura 4.7). Anche il rumore è limitato da una banda.

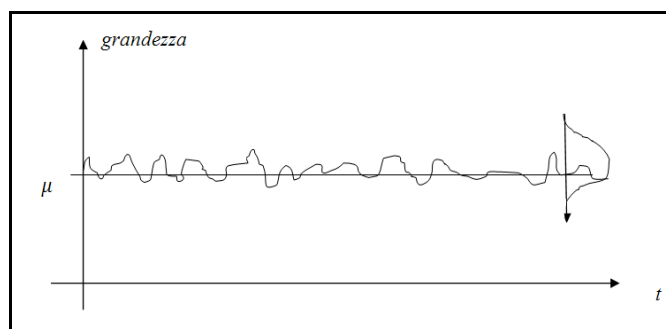


Figura 4.7. Rappresentazione rumore.

4.4 Il sistema di monitoraggio del Centro Unificato di Protezione Civile

4.4.1 Caratteristiche della rete di trasmissione

L'architettura del sistema di monitoraggio è stata progettata in modo da garantire una **trasmissione seriale** dei dati. Questa implica che i byte in uscita dai sensori vengono trasmessi un bit per volta. In fase di ricezione i bit sono "parallelizzati" per ricostruire i byte originali e consentirne la successiva elaborazione.

Nel linguaggio informatico si chiama "pacchetto" ciascuna sequenza di dati trasmessa su una rete o in generale su una linea di comunicazione. La forma esatta di ogni pacchetto dipende dal protocollo utilizzato, ma in genere si distinguono tre parti:

- *Header (intestazione)*: contiene tutte le informazioni necessarie alla trasmissione, quali l'indirizzo del trasmettitore, quello del ricevitore, la vita del pacchetto, i dati che riguardano l'assemblaggio con gli altri pacchetti e così via;
- *Data*: contiene i dati trasmessi;
- *Checksum*: un codice utilizzato per controllare la corretta ricezione dei dati.

Si definisce "commutazione" il meccanismo mediante il quale viene stabilito un particolare cammino per i dati; nel caso in esame si

è scelta la **commutazione di pacchetto**, una tecnica di accesso multiplo a ripartizione nel tempo, utilizzata per condividere un canale di comunicazione tra più stazioni in modo non deterministico. In una simile rete questo tipo l'informazione da trasmettere viene suddivisa in pacchetti di dimensione abbastanza piccola; ad ognuno di essi viene aggiunta l'intestazione, l'indirizzo del destinatario e la sua posizione (numero) all'interno del flusso dell'informazione che viene trasferito. I pacchetti vengono inviati individualmente attraverso la rete e vengono poi riassemblati, grazie al numero di pacchetto, nell'ordine originale. L'intera capacità trasmissiva disponibile viene impegnata per la trasmissione di ciascun pacchetto. Se vi sono più pacchetti da trasmettere contemporaneamente, questi vengono memorizzati in una "coda", subendo un "ritardo di accodamento" e rischiando di essere scartati in caso di esaurimento della memoria disponibile ("buffer") per la coda.

La struttura della rete costituita dai nodi e dalle relazioni di interconnessione tra di essi è detta "topologia". In particolare, si definisce "bus" il canale che permette a periferiche e componenti del sistema di dialogare tra loro. Si distingue fra diverse tipologie di bus:

- *A stella*, in cui ogni nodo della rete è collegata agli altri passando per uno o più concentratori, detti "hub", ed esiste un solo percorso che colleghi un nodo ad un altro. Ogni nodo ha un solo ramo, collegato ad un "hub",

mentre gli “hub” hanno almeno due rami di connessione verso altri nodi ed altri “hub”;

- *Daisy-chain*, in cui i nodi sono collegati uno di seguito all'altro, e quindi ogni nodo ha due rami (connessioni) ad eccezione dei 2 nodi posti alle estremità;
- *Ring*, simile alla rete *daisy-chain* in cui i punti estremi sono anch'essi connessi fra loro, creando quindi un anello.

Il sistema di monitoraggio sulla palazzina del CUPC prevede una topologia mista, in cui un certo numero di sensori, disposti in sequenza, fanno capo ad un “hub”. Da sottolineare che l’impiego di più “bus” permette, da una parte maggiore flessibilità, dall’altra comporta, come è spiegato di seguito, un aumento della possibilità di collisione dei dati nel caso per esempio in cui si decida di allargare la banda passante degli strumenti.

Il metodo di accesso adottato è il **polling selecting**, descritto precedentemente, in cui il mainframe interroga (polling) ciclicamente ciascuno dei terminali.

4.4.2 Caratteristiche dei sensori

I sensori utilizzati per rilevare le accelerazione sulla struttura oggetto di questa tesi sono **accelerometri biassiali analogici a**

tecnologia MEMS. Si tratta di dispositivi di piccole dimensioni, molto leggeri, il cui posizionamento non modifica il comportamento del manufatto. In particolare, il singolo apparecchio risultato costituito da un piano rigido di forma rettangolare su cui sono montati due sensori disposti perpendicolarmente.

In generale, si può affermare che questi accelerometri sono abbastanza “**rumorosi**”. Al fine di abbattere il disturbo è possibile tagliare la banda passante, ossia aumentare il rapporto segnale/rumore, (SNR). Questo è un numero puro che esprime quanto il segnale sia più potente rispetto al rumore nel sistema considerato. Si tratta di una grandezza legata alla precisione del segnale tanto maggiore quanto più è selettivo il filtro.

I sensori presentano un **filtraggio interno** altamente selettivo; alla luce delle precedenti considerazioni, si è limitata la banda passante dello strumento in modo da lasciar passare solo le frequenze comprese in un intervallo fissato dall’unità centrale. Generalmente, la scelta ricade nel range 0÷20 Hz poiché l’obiettivo del sistema di monitoraggio è un’approfondita conoscenza del suo comportamento dinamico anche nel caso in cui questa sia eccitata da deboli vibrazioni ambientali. In questo caso si ha un significativo abbassamento del rumore, ridotto a 0.33 mg, pari a 3.3 mm/s².

In realtà, l’intervallo 0÷20 Hz non risulta il più appropriato in presenza di un evento sismico; grazie all’impiego di opportuni **trigger**, si può allargare allora la banda passante fino a frequenze maggiori, per esempio 100 Hz. Il risultato è un evitabile aumento del

rumore che può raggiungere i 2 mg (20 mm/s²); cresce inoltre la probabilità di **collisione** dai dati che può determinare la perdita di informazioni. Per contrastare questi effetti negativi, il rimedio consiste nel ridurre il numero degli strumenti.

Da segnalare infine che i sensori hanno un processore e una memoria RAM, inoltre sono alimentati attraverso i “bus” stessi. Questo consente di ottenere un sistema dai **bassi consumi**.

La scelta dell'apparecchio è stata dettata anche dal **costo**, per questo motivo si sono esclusi accelerometri di tipo **piezoelettrico**. Il dispositivo che sarà installato sulla struttura è in grado di rilevare la **temperatura**.

Un requisito essenziale è rappresentato dall'**ermeticità**, il dispositivo infatti deve essere preservato da qualsiasi tipo di attacco proveniente da fattori esterni, come per esempio l'umidità. Possibilmente dovrà essere posizionato in punti non particolarmente esposti, per evitare che sia soggetto a raggi ultravioletti e a repentini sbalzi di temperatura. Deve essere garantita infine la lontananza da fonti di calore e soprattutto di vibrazioni al fine di non “inquinare” le misure; in ogni caso lo strumento dovrà essere facilmente accessibile al personale addetto al suo controllo e manutenzione.

4.4.3 Caratteristiche del sistema di acquisizione e analisi dati

I dati vengono inviati ad un'unità centrale che svolge i compiti di immagazzinamento, validazione preliminare ed elaborazione dei

risultati. In primo luogo, i dati provenienti dai sensori vengono salvati in un apposito *File*. Allo scopo di identificare le caratteristiche dinamiche della struttura in condizioni operative, è implementato all'interno dell'unità centrale un applicativo che sfrutta il **modello AR** e che riceve in ingresso registrazione della durata di 60 secondi.

I risultati vengono visualizzati su uno schermo touch screen in termini di poli e frequenze identificate nell'ultima ora e relative soltanto a sei accelerometri. Direttamente sul dispositivo hardware è possibile settare alcuni parametri. Lo schermo di dimensioni pari a 10 pollici, è alimentato da una batteria di back up; questa permette di svolgere le proprie funzioni anche in condizioni critiche quando non è disponibile corrente elettrica.

5 SIMULAZIONI NUMERICHE

5.1 Introduzione

L'analisi modale operativa necessita di alcune fasi preliminari fondamentali. Attraverso la realizzazione del modello della struttura, sede della Protezione Civile in Granarolo dell'Emilia, e la caratterizzazione numerica della sua risposta dinamica, è stato possibile, in primo luogo, investigare il range delle principali frequenze e verificare che queste ricadessero abbondantemente nell'intervallo di interesse, compreso fra 1 e 10 Hz. Questo aspetto è stato ampiamente trattato nel Capitolo 3.

Il passo successivo prevede l'impiego delle procedure di identificazione, descritte nel Capitolo 2, per la determinazione delle proprietà modali.

Prima di utilizzare le registrazioni di campo, è stato validato un software realizzato in ambiente MatLab a partire da dati numerici

ricavati da modelli agli elementi finiti; si riportano di seguito i risultati che confermano la capacità del modello scelto di ricavare correttamente le caratteristiche dinamiche.

5.2 Scelta del modello di identificazione dinamica

A differenza dei metodi che operano nel dominio delle frequenze [Ewins, 2000; Mazzotti & Vincenzi, 2005], che necessitano della valutazione dell'intensità della forzante, la peculiarità dei modelli che operano nel dominio del tempo consiste nella capacità di estrarre i parametri modali della struttura direttamente dai segnali ottenuti dalle registrazioni sperimentali provenienti dai sensori posti sul manufatto e senza la necessità, dunque, di misurare l'entità della forza eccitante.

Dato che uno degli scopi principali del progetto di monitoraggio della struttura in esame è la sua identificazione dinamica a partire da un'eccitazione di tipo ambientale, indotta per esempio dal traffico veicolare o dal vento, la scelta del modello da utilizzare ricade inevitabilmente all'interno della grande famiglia delle tecniche definite nel dominio del tempo.

Prima di effettuare prove dinamiche sul manufatto, però, sono state eseguite delle simulazioni il cui scopo è stato testare le procedure di identificazione. Queste sono state applicate, in primo luogo, al modello di un telaio a tre piani e in seguito al modello della palazzina, facente parte del CUPC. La simulazione consiste nell'applicazione di

diverse forzanti e nella determinazione della risposta della struttura; l'obiettivo è ricavare le serie temporali corrispondenti agli spostamenti nodali di ciascun piano. Per conseguire questo scopo, sono state eseguite analisi dinamiche nel transitorio lineare con l'ausilio del calcolatore.

Nel Capitolo 2 si è messa in luce la differenza principale fra i metodi ad errori nelle equazioni e i metodi ad errori nelle variabili. Mentre nei primi si ipotizza che la presenza di rumore caratterizzi la sola uscita del sistema, i secondi suppongono che sia l'ingresso che l'uscita siano affetti da rumori aggiuntivi. Nel caso in esame, il dato in ingresso è rappresentato dalla risposta della struttura in termini di spostamenti in funzione del tempo; poiché tale risultato deriva da un'analisi dinamica lineare eseguita con un programma di calcolo agli elementi finiti, si ipotizza che la soluzione sia esatta, ovvero la risposta del sistema è considerato priva di errore. Questo è il motivo per cui i modelli ad errori nelle equazioni risultano più appropriati; in particolare la scelta è ricaduta sui **modelli AR**. In realtà, si è deciso di sfruttare queste tecniche di identificazione anche perché implementate all'interno dell'unità centrale per una prima stima dei parametri dinamici, come dichiarato nel Capitolo 4.

Nelle simulazioni numeriche si sono adottati dapprima i valori esatti; successivamente si sono considerati i valori pseudo-sperimentali, ottenuti cioè aggiungendo al dato esatto una variabile aleatoria a media nulla e a varianza assegnata al fine di simulare il rumore presente nelle misure sperimentali .

5.3 Applicazioni

5.3.1 Telaio shear-type

La prima struttura su cui si è eseguita la simulazione è un telaio shear-type a tre piani con un'unica campata. I pilastri presentano sezione 30x30 cm e un'altezza d'interpiano pari a 300 cm; le travi hanno, invece, una sezione di 30x45 cm e luce pari a 500 cm. Tutte le aste hanno un comportamento elastico-lineare con modulo elastico pari a $E = 30000\text{MPa}$. Le masse di piano (pesi propri dei solai e frazioni del carico variabile) sono state sommate alla massa della trave, calcolando una densità equivalente; per le travi del primo impalcato, questa è pari a 26000 kg/cm^3 , per le travi del secondo e terzo impalcato si è calcolato un valore pari a 21000 kg/cm^3 . Per semplicità, in una prima analisi non si è considerato alcun smorzamento, ovvero nel riquadro *damping* si è spuntata l'opzione *none*. Il telaio è schematicamente rappresentato in Figura 5.1, le proprietà di travi e pilastri sono riassunti in Tabella 5.1.

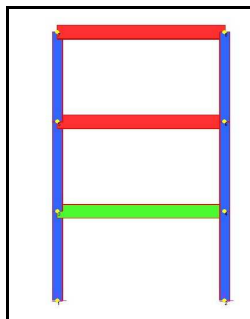


Figura 5.1. Telaio shear-type.

Elementi Strutturali	Sezione [cm]	Modulo Elastico [MPa]	Massa Equivalente [kg/cm ³]
Travi 1° impalcato	30 x 45	30000	26000
Travi 2° e 3° impalcato	30 x 45	30000	21000
Pilastri	30 x 30	30000	2500

Tabella 5.1. Caratteristiche del telaio.

I parametri modali di tale semplice modello sono stati considerati la soluzione di riferimento per il processo di identificazione. Di seguito, in Figura 5.2, sono illustrati gli andamenti dei primi 3 modi di vibrare del telaio.



1° modo di vibrare:

Freq.: 1.83 Hz

2° modo di vibrare:

Freq.: 4.53 Hz

3° modo di vibrare:

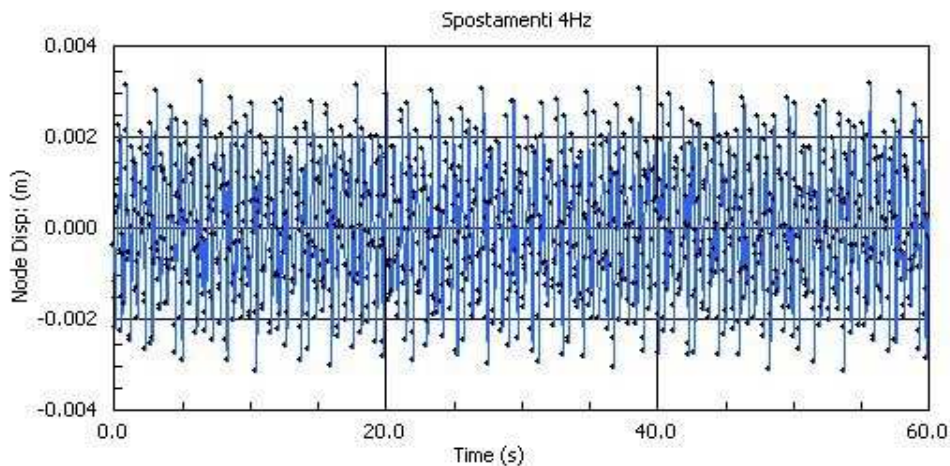
Freq.: 6.07 Hz

Figura 5.2. Modi propri di vibrare del telaio.

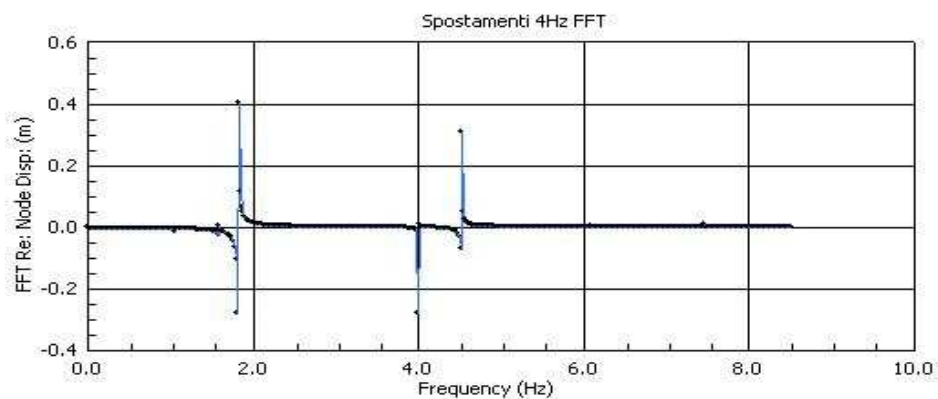
Per ottenere la risposta della struttura ai vari piani, sono state applicate diverse forzanti, la cui descrizione si trova nel Capitolo 3.

5.3.2 Risultati dell'analisi dinamica lineare

In questo paragrafo si illustrano i risultati dell'analisi dinamica nel transitorio lineare ottenuti con l'ausilio del programma di calcolo agli elementi finiti Straus7. Essi simulano le registrazioni accelerometriche relative ad un canale posto al primo piano del telaio. In Figura 5.4a) è riportato lo spostamento del nodo 4 in funzione del tempo e in direzione x, nel caso di applicazione della forzante sinusoidale, di equazione: $F(t) = \sin(2\pi 4t)$. La corrispondente FFT è mostrata, invece, in Figura 5.3b).



a)



b)

Figura 5.3.a) Spostamenti nodo 4; **b)** FFT. Segnale sinusoidale.

Si distinguono chiaramente tre picchi: il primo e il terzo si hanno in corrispondenza del 1° e 2° modo di vibrare del telaio; si leggono rispettivamente i valore 1.83 e 4.53 Hz sull'asse delle ascisse su cui sono riportate le frequenze. Il secondo picco si ha, invece, per la frequenza della forzante: 4 Hz. In Figura 5.4 si riportano gli stessi andamenti nel caso, però, di applicazione di un rumore bianco.

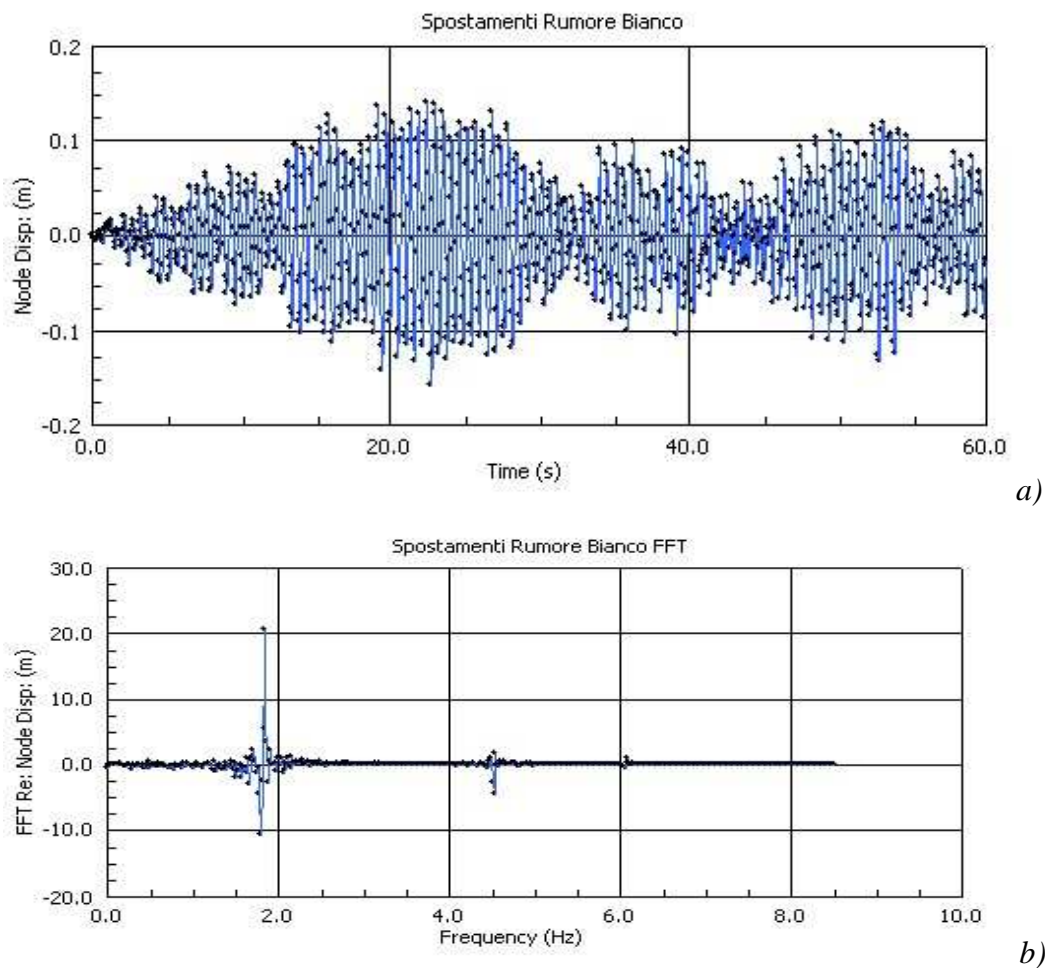


Figura 5.4.a) Spostamenti nodo 4; **b)** FFT. Rumore bianco.

In questo caso si individuano soltanto 2 picchi in corrispondenza delle frequenze del 1° e 2° modo.

5.3.3 Risultati del processo di identificazione

L'esecuzione di prove dinamiche su strutture al vero è di norma preceduta da alcune fasi di grande importanza: la simulazione numerica effettuata per testare le procedure di identificazione, ovvero per valutare le loro capacità di ottenere le caratteristiche modali ricercate è fra queste. A tal fine si è utilizzato un applicativo in ambiente Matlab che consente di ricavare i modi propri di una struttura e di costruire il diagramma di stabilizzazione a partire dai segnali ottenuti dai test numerici. Nel Capitolo 2, si è definita la stabilità di un modo al variare dell'ordine del problema; in questo paragrafo si ricorda soltanto che aumentando via via l'ordine del modello è possibile distinguere i modi strutturali da quelli puramente numerici.

In questo caso, l'identificazione è stata eseguita facendo ricorso alla funzione definita nel modo seguente:

```
function [RIS, Ris_tutti]=identifica_AR_1D(y,deltaT)
```

dove:

y rappresenta il segnale acquisito sulla struttura, ovvero il vettore contenente la soluzione dell'analisi dinamica nel transitorio lineare;

δT è il passo di campionamento in secondi.

A partire da questi dati si è ricostruita la dinamica dello stato e si è effettuata la stima dei suoi parametri. In primo luogo sono stati settati l'ordine minimo e massimo, oltre che i parametri per il

controllo della stabilità tra cui il rapporto in frequenza, il rapporto di smorzamento, lo smorzamento massimo e il valore MAC. Si è poi passati alla creazione di un oggetto di tipo *iddata*:

$$z = \text{iddata}(y, [], \text{delta}T)$$

che riceve in ingresso le uscite (y), gli ingressi ($[]$) e il periodo di campionamento ($\text{delta}T$). Il requisito fondamentale è, infatti, avere a disposizione un insieme di dati regolarmente campionati da cui partire per identificare il sistema. Questo oggetto consente di porre in un'unica struttura le diverse informazioni.

Si è stimato successivamente il modello AR mediante la funzione *ar*, la cui sintassi è:

$$m\{s\} = \text{ar}(z, i)$$

dove z rappresenta l'oggetto *iddata* precedentemente creato, mentre m è una variabile strutturata che contiene i risultati dell'identificazione. Attraverso la routine "*model*" si sono estratti i parametri modali; in particolare si è definita una variabile, chiamata nel caso in esame *mode*, contenente le frequenze, gli smorzamenti e gli autovettori normalizzati all'unità.

Tra le tante peculiarità dell'applicativo utilizzato, è da sottolineare che questo permette di trovare i modi fisici confrontando due successivi modelli di ordine diverso, di mettere i dati in termini di

frequenze crescenti, di eliminare i risultati “doppi”, infine di salvare i modi stabili in una matrice.

Essendo la frequenza di campionamento uguale a 20 Hz, si è fissato un δT pari a 0.05 secondi, successivamente si è introdotto il vettore y , risultato dell’analisi dinamica lineare dapprima effettuata nel caso di azione sinusoidale, in seguito nel caso di forzante tipo rumore bianco. Tale vettore contiene 1200 valori, necessari per avere un segnale della durata di 60 secondi. L’analisi ha fornito i risultati riportati in Tabella 5.2.

Valore di riferimento		Parametri identificati	
<i>Frequenze</i>	<i>Smorzamento</i>	<i>Frequenze</i>	<i>Smorzamenti</i>
1.83	0%	1.826	0.00
1°modo			
		4.000	0.00
4.53	0%	4.529	0.00
2°modo			
6.07	0%	6.075	0.00
3°modo			
		7.065	0.01
		8.378	0.00
		9.423	0.00
		9.451	0.00
		9.457	0.00

Tabella 5.2. Valori di riferimento e parametri identificati. Segnale sinusoidale.

Come si può notare la prima, la terza e la quarta frequenza identificate corrispondono rispettivamente ai primi tre modi di vibrare della struttura. Il secondo valore nella colonna dei parametri identificati sta ad indicare, invece, la frequenza del segnale sinusoidale; gli altri sono modi puramente numerici. Di seguito si mostrano i risultati nel caso di forzante tipo rumore bianco (Tabella 5.3) per cui è riportato anche il diagramma di stabilizzazione (Figura 5.6).

Valore di riferimento		Parametri identificati	
<i>Frequenze</i>	<i>Smorzamento</i>	<i>Frequenze</i>	<i>Smorzamenti</i>
1.83	0%	1.828	0.00
1°modo		4.494	0.01
4.53	0%	4.528	0.00
2°modo		5.166	0.05
6.07	0%	6.073	0.00
3°modo		6.840	0.04
		8.089	0.03
		8.893	0.01

Tabella 5.3. Valori di riferimento e parametri identificati. Rumore bianco.

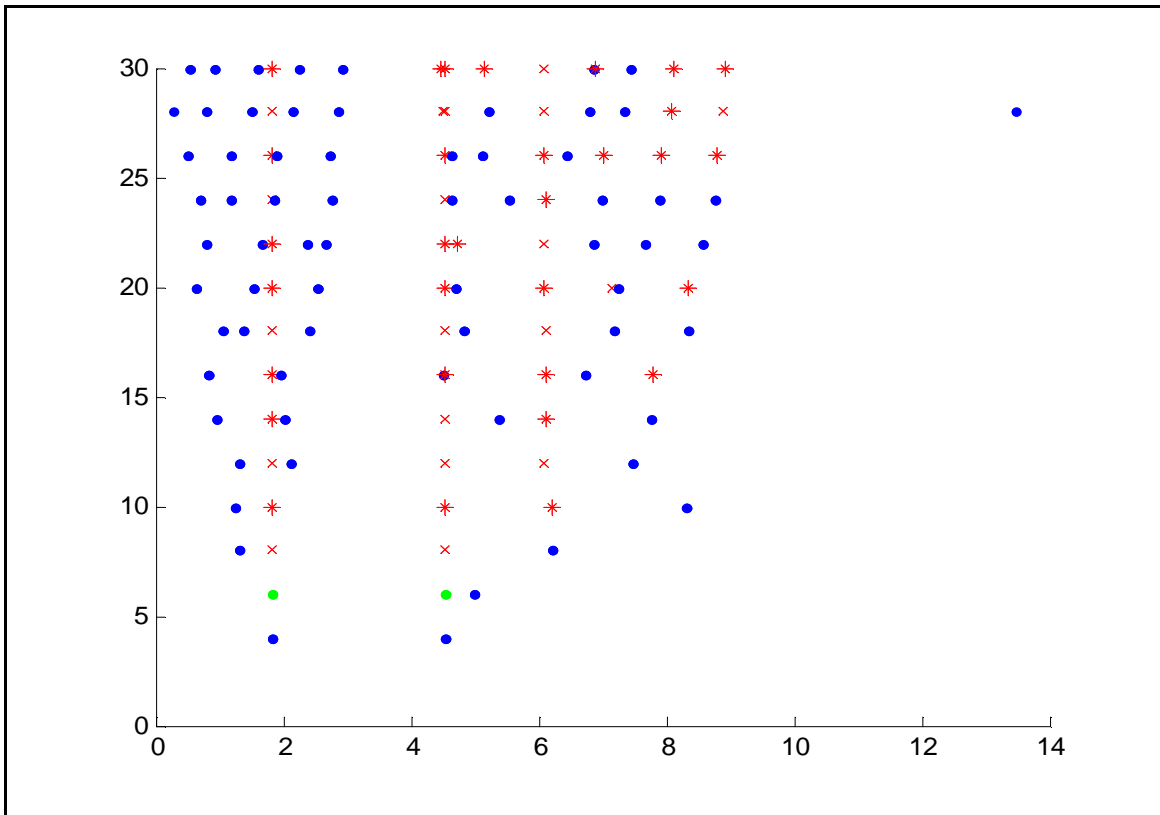


Figura 5.5. Diagramma di stabilizzazione. Rumore bianco.

Anche in questo caso c'è perfetta corrispondenza fra i valori di riferimento e le stime delle frequenze. Allo scopo di dimostrare l'efficienza e l'affidabilità dell'applicativo in Matlab si sono eseguite altre analisi a partire da diversi vettori y ; tutte hanno dato esito positivo. Da notare che al segnale non è stato aggiunto alcun tipo di rumore. Nei paragrafi seguenti vengono presentati i risultati delle simulazioni condotte sulla palazzina facente parte del complesso in esame, l'unica differenza consiste nell'aggiunta di un disturbo al segnale in ingresso al modello. Si vuole in questo modo considerare il rumore sulle misure.

5.3.4 Palazzina

La seconda struttura su cui è stata effettuata la simulazione è la palazzina del CUPC, descritta nel Capitolo 3. Si ricorda che da un punto di vista strutturale, essa risulta costituita da tre telai piani disposti in direzione x . Tutti i pilastri presentano sezione 70×70 , mentre per le travi occorre distinguere fra quelle centrali, di bordo e di collegamento; le prime hanno sezione 70×110 , le restanti 70×90 . Le tamponature sono state modellate con bielle disposte lungo le diagonali di diametro pari a 18 cm. In ogni caso, tutte le aste presentano un comportamento elastico-lineare con $E = 30000$ MPa. Si è supposto che la struttura fosse incastrata alla base. In Figura 5.6 se ne può osservare il modello mentre in Tabella 5.4 se ne riassumono le caratteristiche.

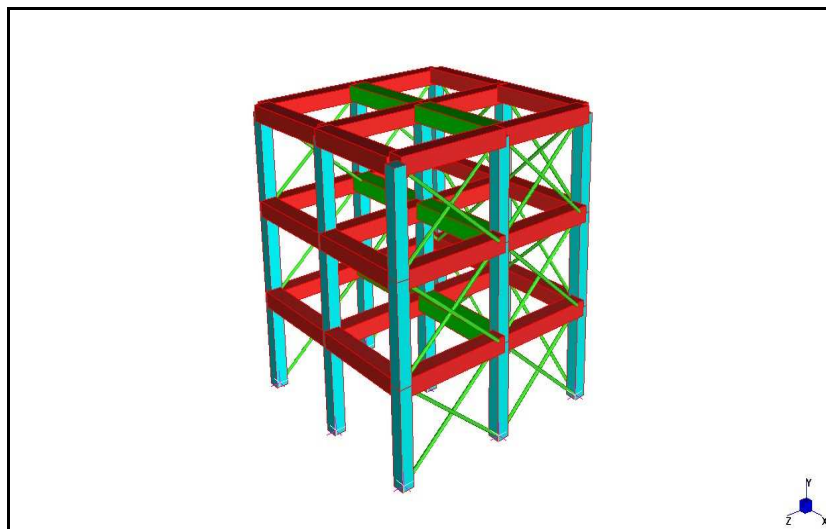


Figura 5.6. Palazzina appartenente al CUPC.

Elementi	Sezione [cm]	Tipo	Modulo Elastico [MPa]
Travi di bordo	<i>70 x 90</i>	<i>Beam2</i>	<i>30000</i>
Travi centrali	<i>70 x 110</i>	<i>Beam2</i>	<i>30000</i>
Pilastri	<i>70 x 70</i>	<i>Beam2</i>	<i>30000</i>
Tamponature	<i>D=18</i>	<i>Truss</i>	<i>30000</i>

Tabella 5.4. *Caratteristiche della palazzina.*

Le analisi dinamiche nel transitorio lineare sono state eseguite dapprima spuntando la voce *none* nella finestra *damping*, in seguito si è imposto uno smorzamento viscoso pari al 1% in corrispondenza della prima e seconda frequenza; per fare ciò si è spuntata l'opzione *Rayleigh*, sempre nella finestra *damping*, e si è inserito il valore *0.01*.

In maniera del tutto analoga a quanto già visto per il telaio si sono applicate diverse forzanti alla base della struttura. La prima analisi si è svolta per un'eccitazione sinusoidale di equazione: $F(t) = \sin(2\pi 6t)$, la seconda per una forzante tipo rumore bianco. Le osservazioni riguardanti la durata, la frequenza di campionamento, il passo temporale, la direzione di applicazione e il fattore di amplificazione sono le stesse di quelle fatte per la prima struttura presa in considerazione; a titolo d'esempio si riporta soltanto l'andamento dello spostamento del nodo 18, appartenente al primo impalcato, in funzione del tempo e la corrispondente FFT nel caso in cui agisca il rumore bianco (Figura 5.7).

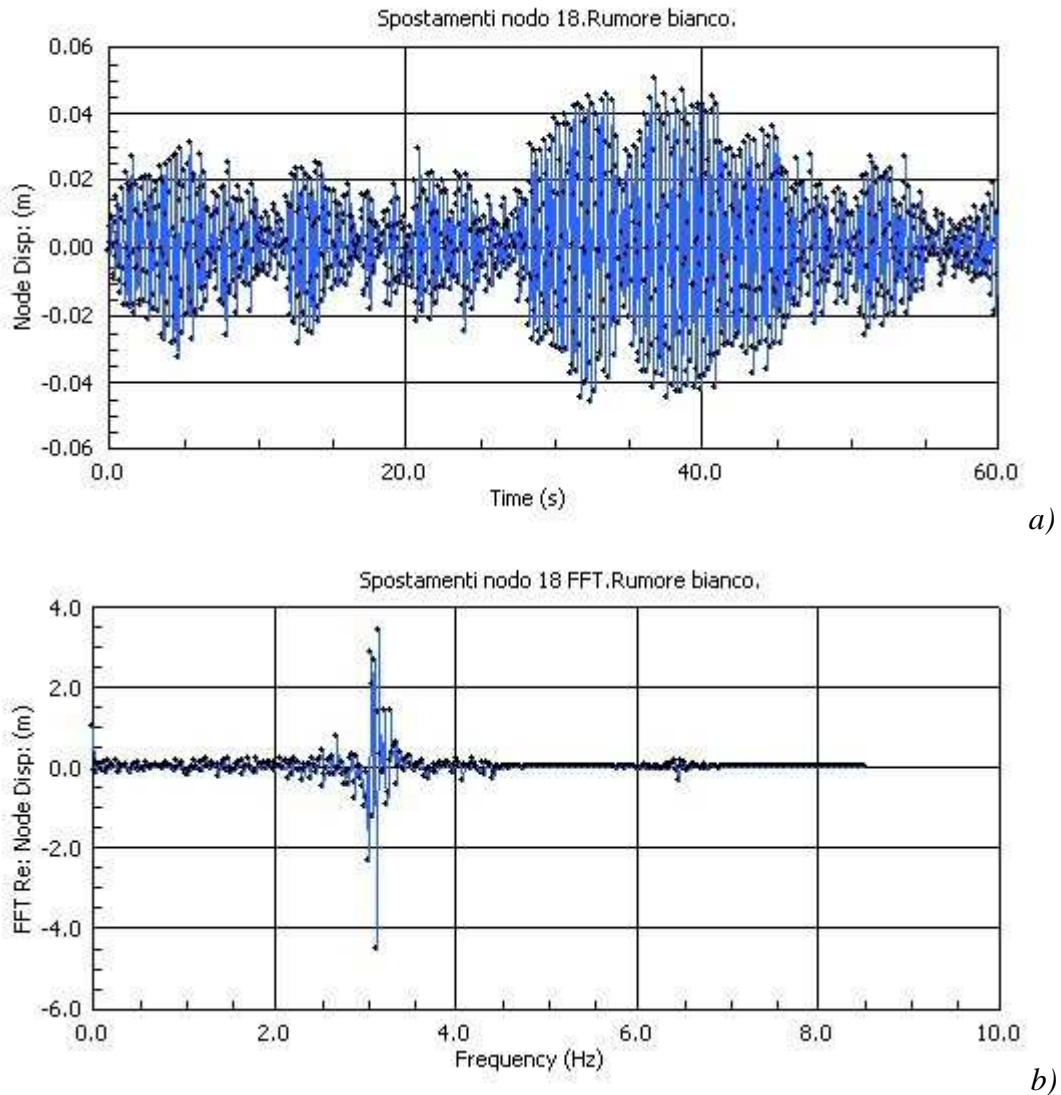


Figura 5.7.) *Spostamenti nodo 18; b)FFT. Rumore bianco*

Se si osserva il grafico in Figura 5.7b), si nota chiaramente il picco in corrispondenza del 1° modo di vibrare, mentre non si distinguono in maniera netta i picchi che corrispondono al 2° e 3° modo di vibrare. Per l'azione sinusoidale, invece, in corrispondenza dei valore 3.13, 4.38 e 6.47 Hz sull'asse delle ascisse, si sono rilevati tre picchi, queste sono le frequenze che corrispondono rispettivamente

al 1°, 2°, 3° modo di vibrare del manufatto. Il picco a 6 Hz trovato rappresenta, invece, la frequenza dell'azione sinusoidale.

Per quanto riguarda l'identificazione, questa è stata eseguita facendo ricorso alla funzione precedentemente definita. Come per il telaio, si è fissato un δT pari a 0.05 secondi, essendo la frequenza di campionamento uguale a 20 Hz; successivamente si è creata la variabile y e la si è adottata come dato in ingresso al modello. Si ricorda che il vettore y contiene 1200 valori puntuali che simulano le registrazioni sulla struttura, o più precisamente, gli spostamenti nodali in direzione x .

I test numerici sono state effettuati inizialmente considerando i **valori esatti**. Sono state poi svolte prove con i valori **pseudo-sperimentali**, ottenuti cioè aggiungendo al valore esatto una variabile aleatoria:

$$y_{PS} = y + WN \times \max(y) \times w \quad (5.1)$$

dove:

WN rappresenta un rumore bianco a valor medio nullo e deviazione standard 3.

In tal modo, si è voluto rappresentare il rumore presente nelle misure sperimentali e gli errori che possono essere commessi nella fase di identificazione. Il fattore w , indicante il peso del disturbo, è stato posto pari a 0.01, 0.02, 0.05 e infine 0.10 volte il valore massimo assunto da y .

Al fine di considerare il posizionamento ottimale degli accelerometri, per tutti i test sono stati considerati 6 punti di misura ritenuti significativi, di cui 3 in corrispondenza degli altrettanti piani dell'edificio, i restanti in corrispondenza dei vertici in pianta. Le considerazioni che seguono sono importanti per capire se le registrazioni possono essere ritenute attendibili qualunque punto di misura significativo si scelga. Per i requisiti di esposizione, lontananza da fonti di calore e di vibrazioni, infatti, soltanto in seguito ad un sopralluogo si potrà decidere il definitivo posizionamento degli strumenti. In Tabella 5.5, 5.6, 5.7 si riportano i parametri identificati nel caso di smorzamento nullo e viscoso all'aumentare dell'entità del rumore rispettivamente per il nodo 18, 35 e 36 la cui posizione risulta definita osservando la Figura 5.8 (puntini di colore nero).

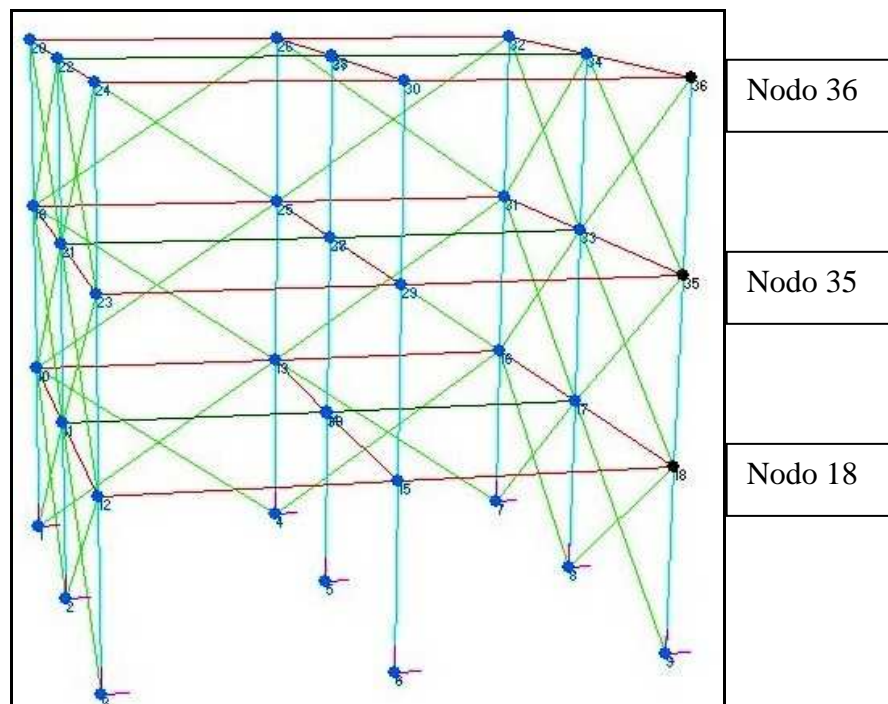


Figura 5.8. Posizionamento dei nodi 18, 35, 36.

Nodo 18 (primo impalcato):

<i>w</i>	<i>Damping None</i>			<i>Damping Rayleigh</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
		Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.
0%	1° modo	3.1336	-	0.0283	3.1304	-	0.0245
	2° modo	4.3853	-	0.0008	4.3631	-	0.0101
	3° modo	6.4686	-	0.0002	6.4715	-	0.0058
1%	1° modo	3.1190	0.4	0.0007	3.1292	0.04	0.0812
	2° modo	4.3824	0.06	0.0104	4.3184	1	0.0283
	3° modo	6.4675	0.01	0.0025	6.4781	0.1	0.0120
2%	1° modo	3.1179	0.5	0.0010	3.1319	0.04	0.0545
	2° modo	4.3605	0.6	0.0323			
	3° modo	6.4713	0.04	0.0063	6.4551	0.4	0.0210
5%	1° modo	3.1167	0.5	0.0018	3.1164	0.5	0.0088
	2° modo	4.3777	0.2	0.0478			
	3° modo	6.4397	0.5	0.0384	6.4430	0.5	0.0320
10%	1° modo	3.1183	0.5	0.0008	3.1193	0.5	0.0091
	2° modo	4.3724	0.2	0.0181			
	3° modo	6.4686	/	0.0033			

Tabella 5.5. Confronto fra i parametri identificati nel caso di smorzamento nullo e smorzamento viscoso all'aumentare del rumore. Nodo 18.

Nodo 35 (secondo impalcato):

<i>w</i>	<i>Damping None</i>			<i>Damping Rayleigh</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	
0%	1° modo	3.1260	-	0.0367	3.1384	-	0.0420
	2° modo	4.3837	-	0.0018	4.3117	-	0.0223
	3° modo	6.4688	-	0.0002	6.4939	-	0.0063
1%	1° modo	3.1225	0.1	0.5003	3.1187	0.6	0.0078
	2° modo	4.3797	0.1	0.0064	4.2795	0.7	0.0401
	3° modo	6.4651	0.05	0.0078	6.5342	0.6	0.0312
2%	1° modo	3.1183	0.2	0.0008	3.1187	0.6	0.0086
	2° modo	4.3777	0.2	0.0155			
	3° modo	6.4680	0.03	0.0138	6.5942	1.5	0.0312
5%	1° modo	3.1183	0.2	0.0008	3.1231	0.4	0.0089
	2° modo	4.4252	0.9	0.0332			
	3° modo	6.5199	0.8	0.0543			
10%	1° modo	3.1183	0.2	0.0007	3.1193	0.5	0.0075
	2° modo	4.3876	0.09	0.0156			
	3° modo	6.4541	0.2	0.0378			

Tabella 5.6. Confronto fra i parametri identificati nel caso di smorzamento nullo e smorzamento viscoso all'aumentare del rumore. Nodo 35.

Nodo 36 (terzo impalcato):

<i>w</i>	<i>Damping None</i>			<i>Damping Rayleigh</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	
0%	1° modo	3.1189	-	0.0007	3.1391	-	0.0414
	2° modo	4.3809	-	0.0024	4.2907	-	0.0261
	3° modo	6.4673	-	0.0002	6.4645	-	0.0046
1%	1° modo	3.1186	0.01	0.0006	3.1196	0.6	0.0080
	2° modo	4.3801	0.01	0.0056	4.2595	0.7	0.0300
	3° modo	6.4695	0.05	0.0023	6.3662	1.5	0.0378
2%	1° modo	3.1183	0.02	0.0007	3.1202	0.6	0.0082
	2° modo	4.3749	0.1	0.0081			
	3° modo	6.4691	0.03	0.0087	6.5443	1.2	0.0481
5%	1° modo	3.1183	0.02	0.0007	3.1146	0.8	0.0092
	2° modo	4.3617	0.4	0.0329			
	3° modo	6.4366	0.5	0.0196			
10%	1° modo	3.1184	0.02	0.0007	3.1202	0.6	0.0108
	2° modo	4.3676	0.3	0.0165			
	3° modo	6.4233	0.6	0.0220	6.5742	1.7	0.0312

Tabella 5.7. Confronto fra i parametri identificati nel caso di smorzamento nullo e smorzamento viscoso all'aumentare del rumore. Nodo 36.

Si nota che nel caso in cui i dati in ingresso al modello siano la soluzione dell'analisi dinamica lineare ottenuta imponendo smorzamento nullo, le stime delle frequenze proprie all'aumentare dell'entità del rumore si discostano di poco (al più 0.9%) dai valori di riferimento, rappresentati dai parametri identificati supponendo assenza di disturbo e riportati in grassetto. Circa lo smorzamento, si può affermare invece che la dispersione è decisamente elevata. Questo risultato conferma che l'algoritmo utilizzato non è in grado di fornire stime attendibili del parametro strutturale in oggetto, essendo questo, in ogni caso, difficile da valutare.

Nel caso si forniscano al modello i risultati ottenuti considerando uno smorzamento viscoso, si deduce che, per rumori pari al 1%, il modello restituisce parametri la cui dispersione è piccola (al più 1.5%) rispetto ai valori di riferimento; tuttavia, all'aumentare dell'entità del disturbo, sebbene si identifichi la prima frequenza, non sempre si ottengono le stime della seconda e della terza. In particolare, per il nodo 35 la seconda frequenza si perde addirittura per un rumore pari al 2%. A questo proposito è bene fare una considerazione. Gli spostamenti nodali in direzione x sono stati assunti come dati in ingresso al sistema; si può ritenere che il modello non riesca a cogliere la seconda frequenza poiché il corrispondente modo proprio di vibrare si esplica in direzione z . Dato che i sensori che saranno installati sul manufatto sono biassiali si riportano in Tabella 5.8 i risultati del processo di identificazione ottenuti a partire dagli spostamenti del nodo 35 in direzione z e x .

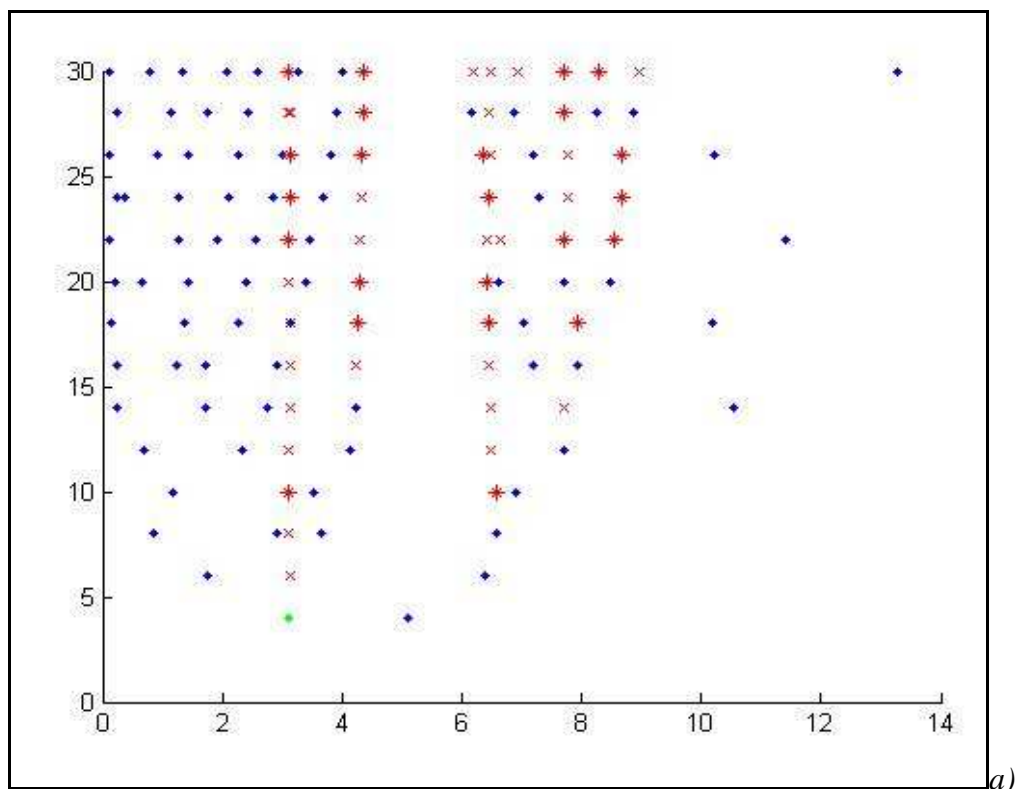
Nodo 35 (secondo impalcato):

<i>w</i>	<i>Direzione z</i>			<i>Direzione x</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	Freq. [Hz]	Scatter [%]	Smorz.	
0%	1° modo	3.1179	-	0.0109	3.1384	-	0.0420
	2° modo	4.3948	-	0.0089	4.3117	-	0.0223
	3° modo	6.4913	-	0.0090	6.4939	-	0.0063
1%	1° modo	3.1202	0.07	0.0085	3.1187	0.6	0.0078
	2° modo	4.3974	0.06	0.0123	4.2795	0.7	0.0401
	3° modo	6.5003	0.1	0.0306	6.5342	0.6	0.0312
2%	1° modo	3.1225	0.1	0.0092	3.1187	0.6	0.0086
	2° modo	4.3844	0.2	0.0124			
	3° modo	6.5341	0.8	0.0304	6.5942	1.5	0.0312
5%	1° modo	3.1193	0.04	0.0076	3.1231	0.5	0.0089
	2° modo	4.3715	0.5	0.0207			
	3° modo						
10%	1° modo	3.1183	0.01	0.0007	3.1193	0.6	0.0075
	2° modo	4.3876	0.1	0.0156			
	3° modo						

Tabella 5.8. Confronto fra i parametri identificati a partire da spostamenti in direzione *z* e *x*. Smorzamento viscoso. Nodo 35.

Si deduce che a partire dalla risposta strutturale in termini di spostamenti in direzione z, il modello è in grado di identificare anche la seconda frequenza, anche se, per entità di rumore pari al 5 e al 10 % del massimo valore assunto da y , si perde comunque la terza frequenza.

A titolo d'esempio in Figura 5.9 si mostrano relativamente agli spostamenti del nodo 35 in direzione z i diagrammi di stabilizzazione ottenuti nel caso di assenza di rumore e presenza di un rumore pari al 10% della risposta massima strutturale. In Figura 5.10, invece, si definisce la posizione dei nodi 10, 12, 16 e 18 (di colore nero), i cui spostamenti in direzione x sono stati considerati come dati in ingresso al modello al fine di valutare la disposizione ottimale dei sensori.



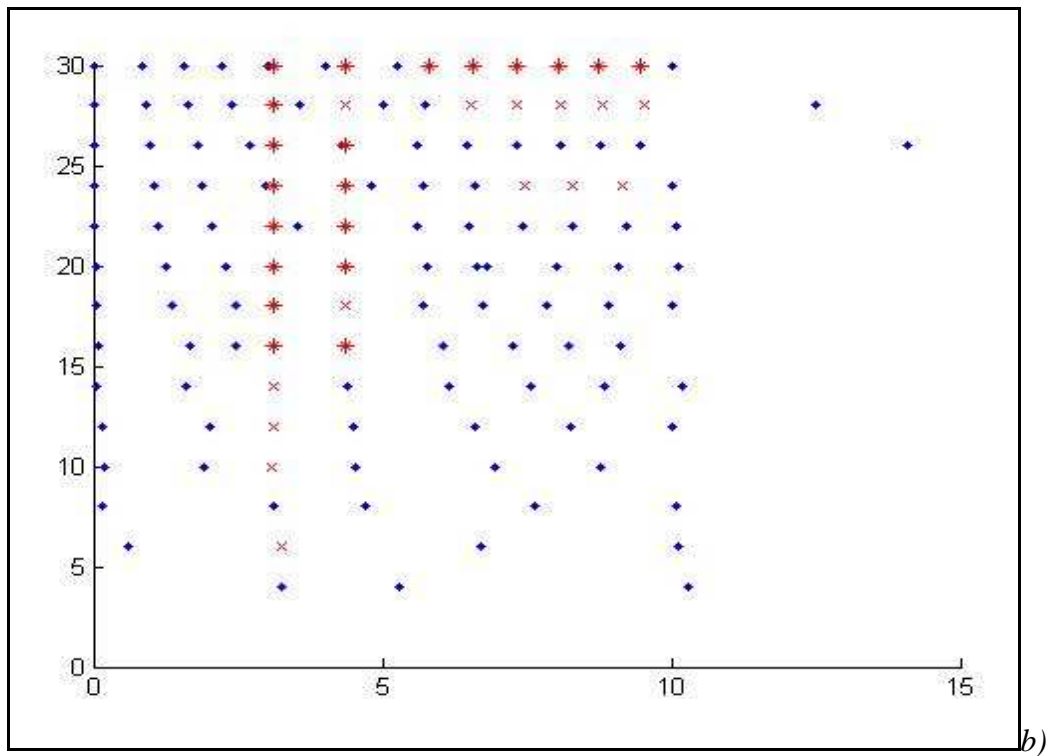


Figura 5.9 Diagramma di stabilizzazione. *a) Assenza di rumore;*
b) Rumore pari al 10 % della risposta massima.

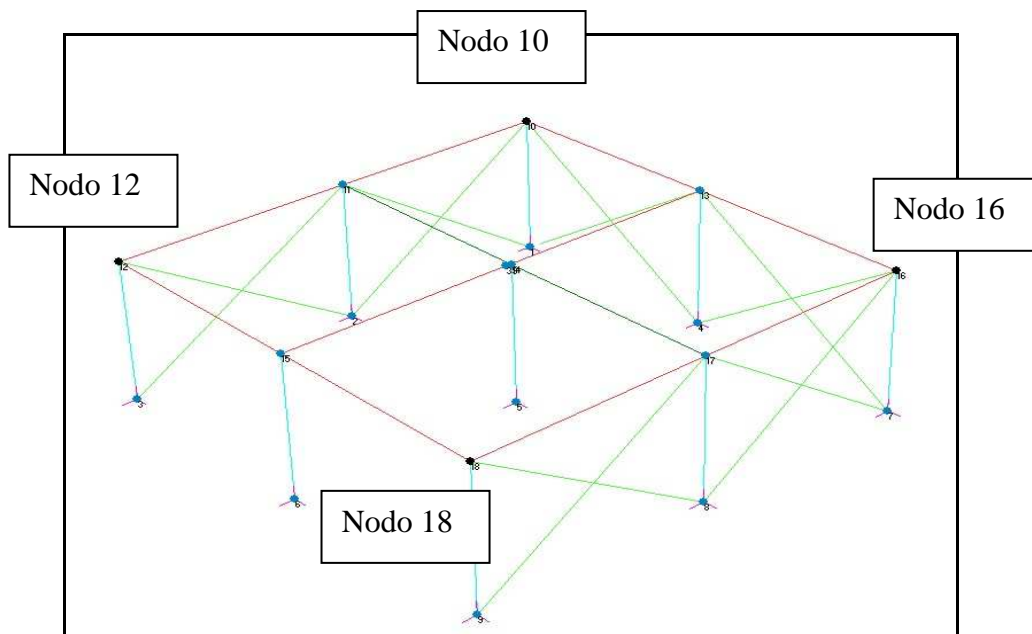


Figura 5.10 Posizione nodi 10, 12, 16, 18

<i>w</i>	<i>Nodo 10</i>			<i>Nodo 12</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
	Freq.	Scatter	Smorz.	Freq.	Scatter	Smorz.	
0%	1° modo	3.1293	-	0.0090	3.1304	-	0.0245
	2° modo	4.3908	-	0.0059	4.3631	-	0.0101
	3° modo	6.4695	-	0.0046	6.4715	-	0.0058
1%	1° modo	3.1276	0.05	0.0089	3.1186	0.4	0.0079
	2° modo	4.3908	/	0.0059	4.2904	1.7	0.0246
	3° modo	6.4982	0.4	0.0097	6.4670	0.6	0.0111
2%	1° modo	3.1250	0.1	0.0074	3.1170	0.5	0.0079
	2° modo	4.3933	0.06	0.0081	4.3206	0.9	0.0365
	3° modo	6.4559	0.2	0.0200	6.5333	0.9	0.0290
5%	1° modo	3.1173	0.4	0.0067	3.1217	0.3	0.0086
	2° modo	4.3880	0.06	0.0083			
	3° modo	6.4770	0.1	0.0245	6.5197	0.8	0.0411
10%	1° modo	3.1137	0.5	0.0055	3.1155	0.6	0.0088
	2° modo	4.4101	0.4	0.0199			
	3° modo	6.5279	0.9	0.0354			

Tabella 5.9. Confronto fra i parametri identificati nel caso di smorzamento viscoso all'aumentare del rumore. Nodo10 e Nodo 12.

<i>w</i>	<i>Nodo 16</i>			<i>Nodo 18</i>			
	Parametri identificati			Parametri identificati			
		Freq.	Scatter	Smorz.	Freq.	Scatter	Smorz.
0%	1° modo	3.1293	-	0.0090	3.1304	-	0.0245
	2° modo	4.3908	-	0.0059	4.3631	-	0.0101
	3° modo	6.4695	-	0.0046	6.4715	-	0.0058
1%	1° modo	3.1293	/	0.0083	3.1292	0.04	0.0812
	2° modo	4.3893	0.03	0.0061	4.3184	1	0.0283
	3° modo	6.4860	0.2	0.0122	6.4781	0.01	0.0120
2%	1° modo	3.1286	0.02	0.0083	3.1319	0.04	0.0545
	2° modo	4.3903	0.01	0.0082			
	3° modo	6.4626	0.04	0.0165	6.4551	0.4	0.0210
5%	1° modo	3.1156	0.4	0.0072	3.1164	0.5	0.0088
	2° modo	4.4069	0.3	0.0180			
	3° modo	6.5170	0.7	0.0559	6.4430	0.5	0.0320
10%	1° modo	3.1082	0.7	0.0110	3.1193	0.5	0.0091
	2° modo	4.4330	1	0.0310			
	3° modo	6.5974	2	0.0442			

Tabella 5.10. Confronto fra i parametri identificati nel caso di smorzamento nullo e smorzamento viscoso all'aumentare del rumore. Nodo 16 e 18.

Il posizionamento migliore sembra essere quello in corrispondenza del nodo 10; si registra infatti una stima che si discosta solo dello 0.9% rispetto al valore di riferimento supponendo la presenza di un rumore pari al 10 % della risposta massima del manufatto. In ogni caso, tuttavia, i risultati mostrano errori modesti sulle frequenze proprie (al più 2%) all'aumentare dell'entità del disturbo, la dispersione circa i coefficienti di smorzamento, invece, è notevole. In questo contesto, si può affermare che qualunque punto di misura significativo offre stime attendibili circa le frequenze e che i modelli AR rappresentano la scelta migliore per gli scopi prefissati; si ricorda infatti che tale metodo di identificazione, essendo implementato direttamente sulla scheda di acquisizione, permette una prima stima dei parametri modali della struttura, rimandando soltanto ad un secondo momento stime più accurate, effettuate, per esempio, ricorrendo a modelli ad errori nelle variabili.

5.4 Il vento

5.4.1 Generalità

Il moto dell'aria in prossimità della superficie terrestre è dovuto sia alla rotazione della Terra che a differenze di pressione atmosferica; queste ultime sono legate al riscaldamento differenziale dei vari strati dell'atmosfera. Il moto dell'aria, detto vento, è pertanto governato

dalle complesse leggi della meccanica dei fluidi e della termodinamica.

Negli strati più bassi dell'atmosfera (bassa troposfera), le masse d'aria in movimento risentono dell'influenza del suolo sottostante.

Le particelle d'aria che fluiscono sopra la superficie terrestre vengono rallentate da questa, in maniera tanto maggiore quanto più ci si avvicina al suolo, fino ad arrivare ad una condizione di velocità nulla per quelle a diretto contatto con il terreno. Pertanto la velocità del vento diminuisce progressivamente con l'avvicinarsi al suolo per effetto dell'attrito dell'aria con la superficie terrestre. Lo spessore di atmosfera all'interno del quale si fa risentire questo effetto di rallentamento si chiama "strato limite ambientale" (Atmosferic Boundary Layer, ABL).

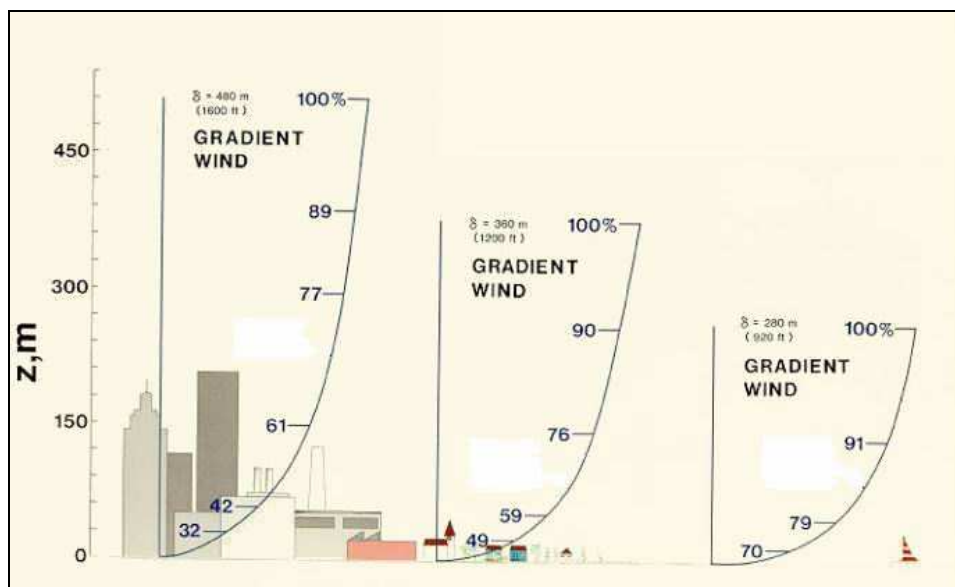


Figura 5.11. Altezza di gradiente per le varie tipologie di territorio.

Nello strato limite ambientale (Figura 5.11), la velocità media del vento aumenta con la quota fino ad un'altezza oltre la quale il suo valore si mantiene costante.

La quota in cui la velocità media raggiunge il suo valore massimo (e costante) definisce l'altezza di gradiente, questa non è costante e dipende, in primo luogo, dalla velocità dell'aria e dal tipo di superficie terrestre su cui essa fluisce

Se in un qualsiasi luogo si effettuano rilevazioni della velocità del vento, si può notare come la velocità istantanea del vento varia in funzione del tempo e dello spazio. Questo è dovuto, in primo luogo, all'interazione tra il vento ed il suolo e, quindi, alla presenza dello strato limite ambientale. L'aspetto di una registrazione della velocità istantanea fornita in un giorno qualsiasi da una stazione o da un osservatorio è del tipo mostrato in Figura 5.12:

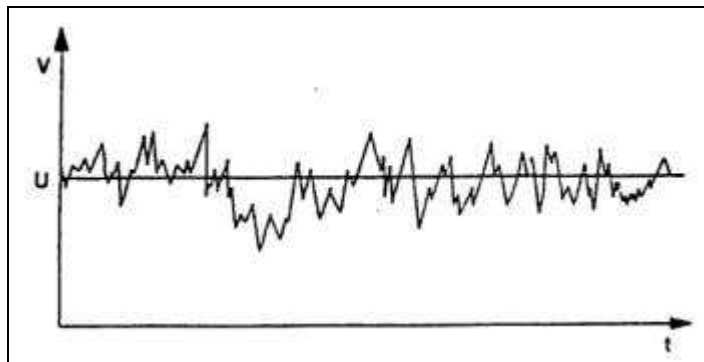


Figura 5.12. Aspetto di una registrazione.

In questa regione, infatti, l'impatto tra il flusso d'aria principale ed il suolo dà origine a vortici di varie dimensioni che si muovono in

tutte le direzioni, anche se, prevalentemente, seguono il vento principale. Pertanto, la velocità istantanea del vento sarà data da un termine medio (costante nel tempo), che tiene conto del flusso principale e da un altro termine, a valore medio nullo, che caratterizza la parte fluttuante di velocità e che è legato alla presenza dei vortici; questo termine varia casualmente nel tempo e nello spazio e viene trattato come un processo stocastico stazionario a valore medio nullo.

Considerando un sistema di assi cartesiani (Figura 5.13) in cui la direzione x corrisponde alla direzione orizzontale della velocità media del vento, la direzione y è l'altra componente orizzontale e la z è l'asse verticale; le rispettive componenti di velocità sono U, V e W, sono definite nel modo seguente :

$$U(P,t)=U_m(P)+u'(P,t)=U_m(z) + u'(x,y,z,t)$$

$$V(P,t)=V_m(P)+v'(P,t)=v'(x,y,z,t)$$

$$W(P,t)=W_m(P)+w'(P,t)=w'(x,y,z,t)$$

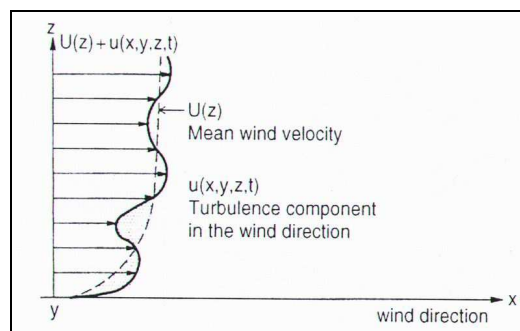


Figura 5.13. Distribuzione di velocità.

dove U_m , V_m , W_m sono i valori medi e u' , v' , w' le componenti fluttuanti.

La velocità del vento è funzione del tempo e del luogo preso in considerazione; in particolare, la U_m , per un determinato sito, dipende solo dalla quota, mentre le componenti di velocità medie nelle

direzioni Y e Z sono nulle; al contrario, le componenti istantanee di velocità vanno considerate tutte, poiché queste sono associate alla parte turbolenta del flusso, ovvero alla turbolenza atmosferica, che ha caratteristiche tridimensionali.

5.4.2 Velocità media e componente turbolenta

È possibile determinare il profilo verticale di velocità (media) del vento presente in un determinato luogo; per fare questo è necessario conoscere i valori della velocità media (orizzontale) del vento alle varie quote (da 0 metri fino all'altezza di gradiente). Quando non si hanno a disposizione questi dati sperimentali è possibile usufruire di opportune formule che, sotto opportune ipotesi semplificative, esprimono la relazione che c'è tra la velocità media del vento e l'altezza dal suolo.

La turbolenza atmosferica descrive, invece, la componente fluttuante della velocità del vento.

Fisicamente la turbolenza atmosferica è creata dallo “stiramento meccanico” delle masse di aria in movimento: gli strati di aria che si trovano a differenti altezze dal terreno si muovono con velocità medie orizzontali diverse tra loro; ciò provoca uno stiramento delle particelle d'aria che sono contenute fra tali strati, poiché queste saranno trascinate con una velocità maggiore nella loro parte più alta e, contemporaneamente, saranno rallentate, nella parte inferiore, da

componenti di velocità minori; questo movimento relativo provoca una rotazione della cella d'aria e, quindi, la formazione di vortici che si muovono, prevalentemente, nella direzione del flusso principale.

Da un punto di vista prettamente matematico il fenomeno della turbolenza atmosferica può essere studiato attraverso un approccio statistico.

Le principali grandezze che devono essere considerate per caratterizzare la componente turbolenta della velocità sono costituite dall'intensità di turbolenza, dalla scala temporale, dalla lunghezza di scala e dalla densità di potenza spettrale delle fluttuazioni di velocità.

Il parametro che quantifica numericamente la turbolenza, con un valore mediato nello spazio e nel tempo, è l'intensità di turbolenza, definita nel seguente modo:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U_m(z)} \quad (5.1)$$

dove σ_u indica la deviazione standard della componente di velocità nella direzione di propagazione del vento ed $U_m(z)$ è la componente media di velocità del vento.

La densità di potenza spettrale è la grandezza che meglio descrive la componente turbolenta della velocità; essa rappresenta il contributo energetico dei vortici in funzione della frequenza, o del numero d'onda, degli stessi. generalmente tale grandezza la si considera per la componente di velocità u , nella direzione di propagazione del vento, per la quale si trova la seguente espressione:

$$R_N(z, n) = \frac{n \cdot S_u(z, n)}{\sigma_u^2(z)} \quad (5.2)$$

in cui n è la frequenza e $S_u(z, n)$ è lo spettro di potenza della turbolenta nella direzione longitudinale.

5.4.3 Azione del vento

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici [NTC, 2008].

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_b c_e c_p c_d \quad (5.3)$$

dove:

q_b è la pressione cinetica di riferimento;

c_e è il coefficiente di esposizione;

c_p è il coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento;

c_d è il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali.

La pressione cinetica di riferimento q_b (in N/m^2) è data dall'espressione:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (5.4)$$

dove:

v_b è la velocità di riferimento del vento (in m/s);

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Il coefficiente di esposizione c_e dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno, e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione.

5.4.4 Applicazione di forzanti simulanti venti di diversa intensità

Per capire se le accelerazioni indotte dal vento sul CUPC sono tali, in primo luogo, da poter essere rilevate dai sensori MEMS e, secondariamente, da costituire un ulteriore fonte di informazione circa il comportamento dinamico della struttura, si sono considerati quattro diversi casi simulanti l'azione del vento. In particolare, si sono create due condizioni di carico, denominate rispettivamente "Vento di

medio-bassa intensità” e “Vento di medio-alta intensità”. La prima risulta rappresentata da una distribuzione di forze nodali in direzione z (Figura 5.14), la cui entità è stata calcolata a partire da una pressione cinetica di riferimento q_b , data dall’espressione (5.4), in cui l’andamento di v_b in funzione del tempo è mostrato di seguito (Figura 5.15). La seconda è rappresentata dalla medesima distribuzione di forze nodali, tuttavia la loro entità è stata calcolata a partire da una velocità v_b doppia.

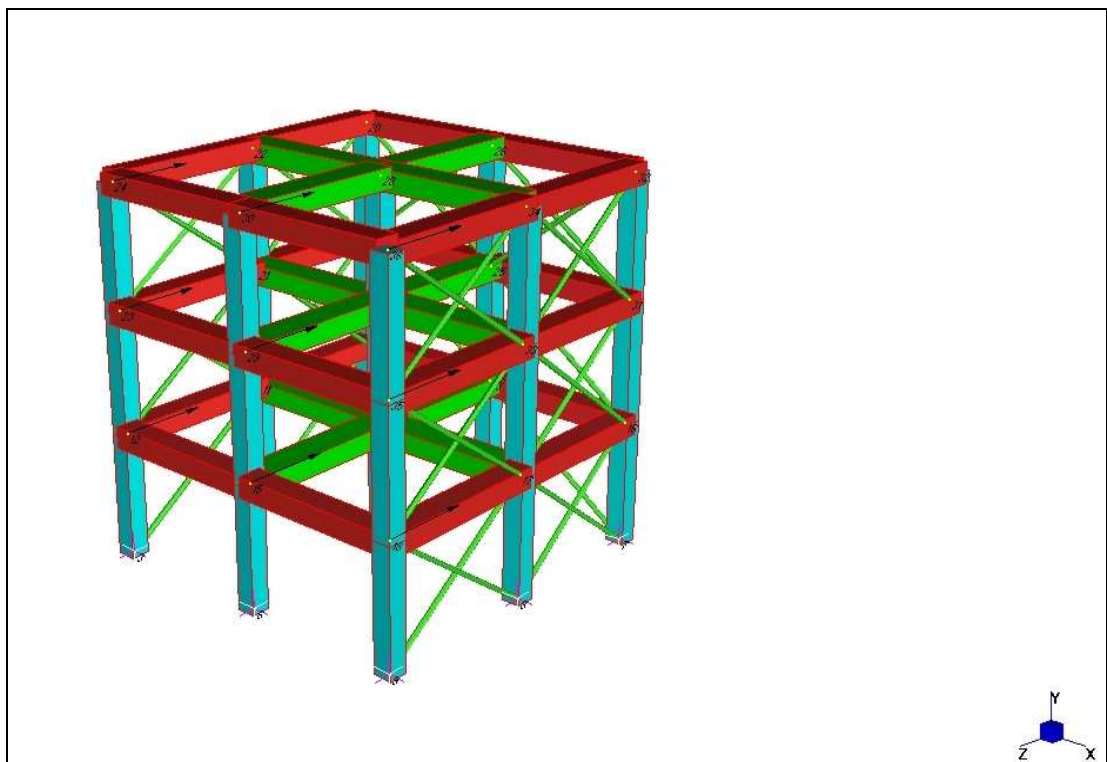


Figura 5.14. Condizione di carico “Vento di medio-bassa intensità”.

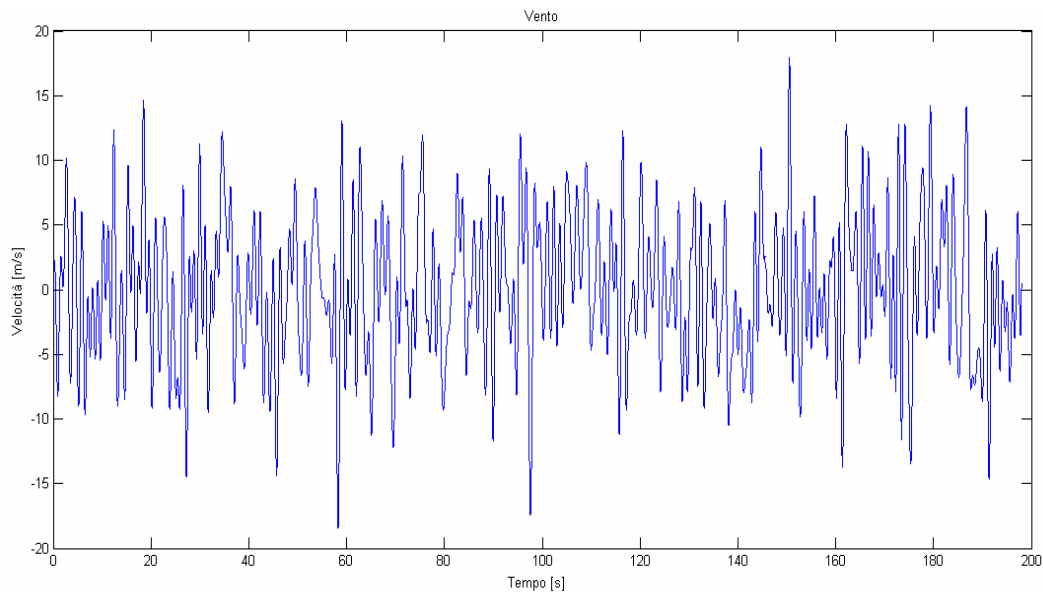


Figura 5.15. *Registrazione di vento.*

Per ciascuna condizione di carico, si è considerata una storia temporale avente passo pari a 0.02 (Figura 5.16) e 0.01 secondi.

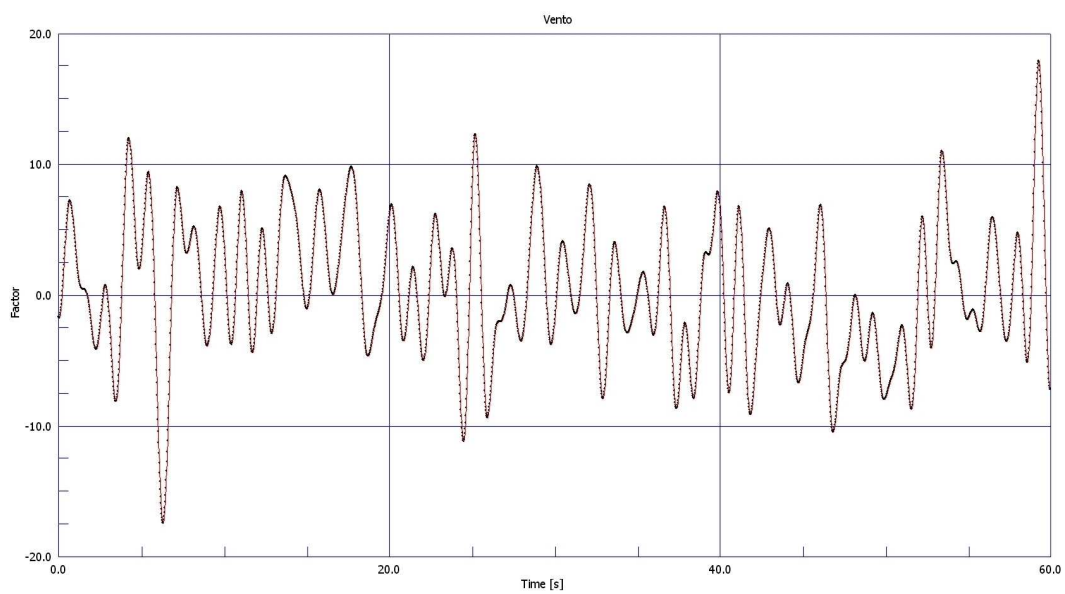


Figura 5.16. *Storia temporale. Passo 0.02.*

Al fine di ottenere le accelerazioni indotte sull'edificio, si sono svolte le analisi dinamiche nel transitorio lineare per ciascuno dei quattro casi in esame. Si è spuntata la voce *Rayleigh* nella finestra *Damping*, e si è inserito il valore 0.01 in corrispondenza della prima e seconda frequenza, in modo da considerare uno smorzamento viscoso pari al 1%.

I risultati ottenuti permettono di fare considerazioni interessanti. Prima di affrontare la loro valutazione, si accenna soltanto che nei grafici riportati di seguito, in blu è rappresentato l'andamento delle accelerazioni in mg al variare del tempo, in rosso, invece è tracciata una retta di equazione: $a = 0.3 \text{ mg}$, rappresentante il rumore dello strumento nelle misure. I risultati si riferiscono al nodo 36.

Si nota che, se si considera la storia temporale con passo pari a 0.01 secondi, sia nel caso di azione simulante un vento di medio-bassa che medio-alta intensità, i valori di accelerazione registrati sono superiori alla soglia di rumore per lunghi intervalli temporali rispetto al periodo di registrazione (Figura 5.17e 5.18)

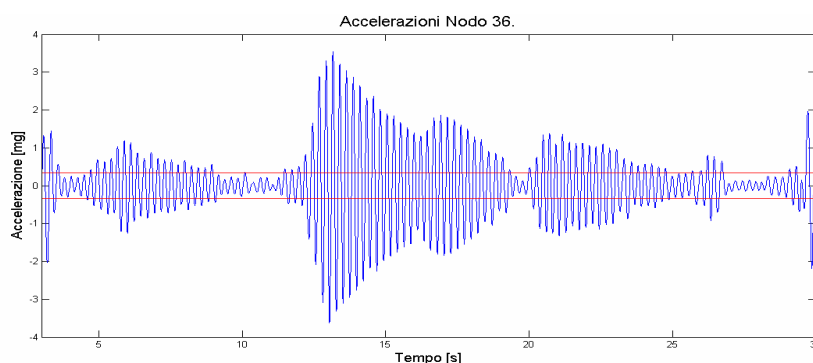


Figura 5.16. Accelerazioni nel caso di vento di medio- bassa intensità.
Passo 0.01 secondi.

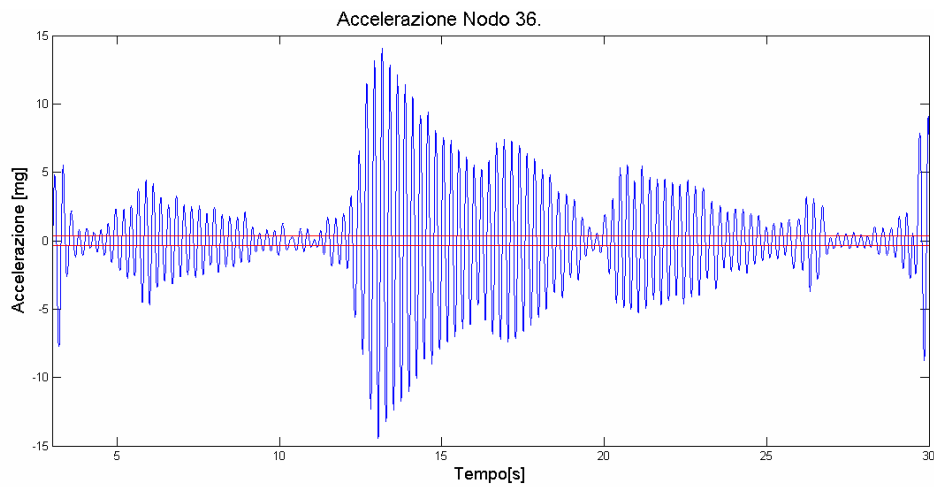


Figura 5.19.Accelerazioni nel caso di vento di medio- alta intensità.

Passo 0.01.

Qualora si consideri la storia temporale con passo pari a 0.02 secondi, nel caso di vento a medio-bassa intensità, si evince dalla Figura 5.19 che i valori di accelerazione sono del tutto compresi nel range in cui ricadono anche quelli indotti dal rumore.

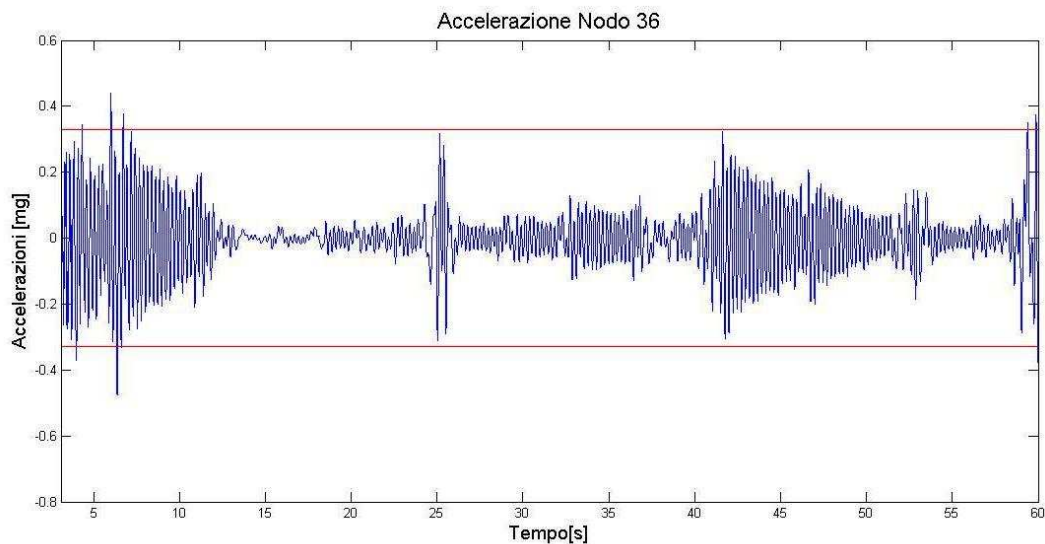


Figura 5.20.Accelerazioni nel caso di vento di medio- bassa intensità.

Passo 0.02.

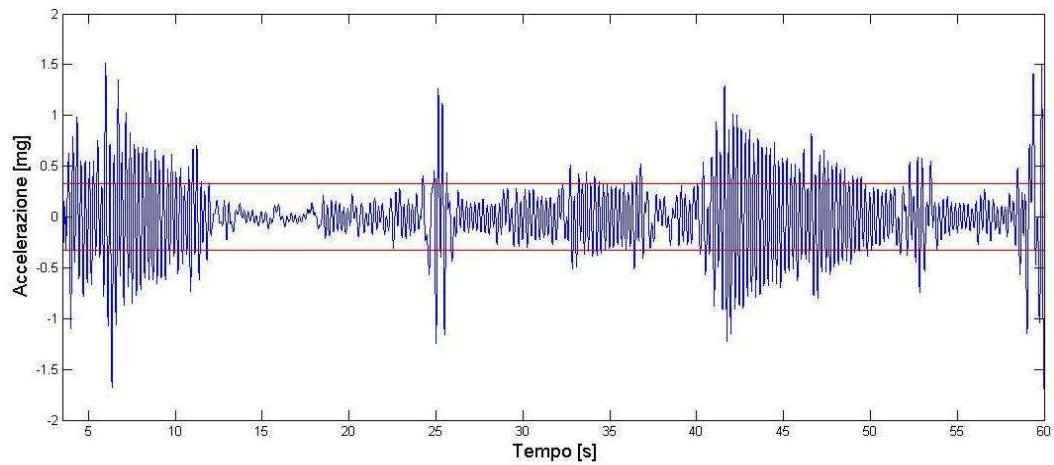


Figura 5.21. Accelerazioni nel caso di vento di medio-alta intensità.
Passo 0.02.

Nel caso di un vento di intensità medio-alta, si raggiungano dei picchi in accelerazione pari a 1.5 mg. Questo si traduce in un rapporto segnale-rumore pari a 5, o in altri termini, ad una percentuale di rumore nelle misure pari al 20%. Sulla base delle considerazioni fatte precedentemente, si prevede che l'identificazione dinamica condotta secondo le modalità presentate, non riesca a cogliere le frequenze proprie della struttura; come già visto, queste infatti si perdono già con un rumore pari al 5-10%.

6 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

6.1 Introduzione

La valutazione della **vulnerabilità sismica** di edifici strategici - quale il Centro Unificato di Protezione Civile - richiede un'affidabile identificazione dinamica. Per conseguire questo scopo, oltre alle fasi illustrate precedentemente, risulta opportuno effettuare **campagne sperimentali** su elementi strutturali al fine di testare la strumentazione. Nel seguito si descrive brevemente una prova eseguita su un solaio della Fondazione Cassa di Risparmio in Bologna utilizzando un prototipo degli accelerometri MEMS, facenti parte del sistema di monitoraggio previsto per la struttura in esame.

L'obiettivo principale è valutare la capacità dei sensori di cogliere deboli vibrazioni ambientali, nonostante il rumore intrinseco dei dispositivi.

Si accenna soltanto che il manufatto, oggetto di questa tesi, sorge in Via Frullo in Granarolo dell'Emilia, classificata secondo il *Codice della Strada* come Strada Comunale che collega la frazione di Castenaso con quella di Quarto Inferiore, e distante circa 1 km da Via San Donato e Via Bruno Tosarelli, rispettivamente denominate SP5 e SP253. A partire da queste considerazioni e dall'osservazione della Figura 6.1a), si potrebbe affermare che il traffico veicolare non risulta essere l'eccitazione naturale principale agente sulla struttura; tuttavia, il complesso ospita un'autorimessa, per cui risulterà sicuramente soggetto a vibrazioni indotte dai mezzi della Protezione Civile.



La Figura 6.1b) mostra, inoltre, la presenza di estese zone agricole nell'area di interesse, pertanto l'esposizione del complesso all'azione del vento non potrà essere trascurata.



Figura 6.1. Via Frullo in Granarolo dell'Emilia (BO):
a) Mappa stradale; b) Immagine satellitare.

6.2 Applicazioni sperimentali: Fondazione Cassa di Risparmio

6.2.1 Descrizione della struttura

La Fondazione Cassa di Risparmio ha sede in Bologna, nella storica residenza di **Casa Saraceni**, sita in via Farini 15.

Si presume che la costruzione del palazzo risalga ai primi anni del Cinquecento per volere di Antonio Saraceni, esponente dell'antica

nobiltà cittadina. Dopo vari passaggi di proprietà l'intero immobile pervenne nel 1930 al Credito Fondiario della Cassa di Risparmio di Bologna.

Il palazzo, di dimensioni piuttosto ridotte, è ben proporzionato e modulato secondo un ordine ritmico rigoroso. La facciata, elegante e armoniosa, si articola su due piani e si alza su un ampio portico di sette arcate a tutto sesto su colonne in mattoni e capitelli in arenaria, che fanno da contrappunto, nel piano nobile, all'apertura di sei grandi finestre ad arco tondo con un capitello pensile centrale e larga fascia di bordatura; mentre, nel piano superiore, si sussegue una lunga serie di finestrelle rettangolari che ritmano lo spazio sottostante il cornicione (Figura 6.2).



Figura 6.2. Fondazione Cassa di Risparmio. Via Farini 15. Bologna.

L'edificio sorge in un luogo dove nel XIII secolo già risiedeva la famiglia Clarissimi: una lapide ricorda ancor oggi che in quel punto esisteva una torre dedicata ad Alberto Clarissimi. Nel 1496 questa fu inglobata nella quattrocentesca casa dei Saraceni, i quali trasformarono la torre in altana in occasione della costruzione della loro residenza in stile rinascimentale bolognese. Le sue dimensioni originarie sono sconosciute in quanto fu mozzata nella seconda metà del '400; oggi la torre è alta 16 metri e ha una base quadrata di 8,64 metri, con muri spessi 1,47 metri.

Nel corso degli anni '60, l'Istituto di credito, per far fronte alle nuove esigenze funzionali dei servizi bancari, affidò il ripristino del fabbricato all'ingegner Augusto Baulina Paleotti, che consolidò la parte dell'edificio verso vicolo San Damiano, sostituì alcune colonne del porticato, e ricostruì i muri della torre-altana, dove vennero aperte nuove finestre.

6.2.2 Traffico veicolare

Le vibrazioni indotte dal traffico costituiscono un problema diffuso, soprattutto nei centri storici delle città, in quanto sono fonte di fastidio per le persone, possono causare danni architettonici e strutturali ai fabbricati, infine possono compromettere il funzionamento di delicati dispositivi elettronici.

L'intensità di questi fenomeni dipende da numerosi fattori tra cui le caratteristiche dei mezzi (massa, tipo di sospensioni, ecc...), le

relative velocità, le proprietà del terreno di sottofondo, la struttura degli edifici esposti, infine le caratteristiche meccaniche della pavimentazione [Dondi et al., 2003].

La presenza di elementi di discontinuità quali tombini, giunti, buche, ecc. determina la quota d'energia del veicolo che si trasmette al terreno sotto forma di deformazione elastica, propagandosi in onde che, per analogia con quelle prodotte dai terremoti, sono appunto dette "sismiche". Quando queste raggiungono i manufatti producono vibrazioni, associate a sollecitazioni dinamiche che si vanno a sommare a quelle statiche alterando le condizioni di equilibrio tra forze agenti e forze resistenti.

Le prove sperimentali condotte sul solaio dell'altana della Fondazione Cassa di Risparmio hanno rappresentato da un lato un'ottima occasione per testare lo strumento di misura, dall'altro un modo per avvallare le lamentele dei dipendenti dell'Istituto di Credito che hanno manifestato un certo disagio dovuto sia alle vibrazioni che al rumore, provenienti principalmente dal transito di mezzi di trasporto pubblico.

6.2.3 Prove sperimentali

Al fine di valutare la capacità del prototipo in possesso di misurare le vibrazioni indotte dal traffico veicolare e dal calpestio si è svolta una prova sperimentale su un elemento strutturale dell'altana della Fondazione Cassa di Risparmio, descritta precedentemente. In

particolare, il teatro della sperimentazione è stato l'attico, un ambiente dalla pianta pressoché quadrata coronato in sommità da una capriata in legno. Da sottolineare che l'attico è esposto su due lati, uno si affaccia su Via Farini, l'altro su Vicolo San Damiano.

È noto che gli elementi strutturali su cui è possibile cogliere con maggior accuratezza gli spostamenti subiti dagli edifici sono il solaio e i muri perimetrali. Essendo l'ambiente arredato con ampie librerie occupanti l'intera superficie delle pareti, la scelta del posizionamento del sensore è ricaduta inevitabilmente sul **punto centrale del solaio**.

La strumentazione comprendeva un PC, una scheda di acquisizione dati, un sensore, infine un'unità centrale da cui era possibile dare inizio ed interrompere l'acquisizione dei segnali.

Si sono svolte in totale 15 misurazioni dalla durata variabile; tutte sono state effettuate nell'arco della stessa mattinata dalle ore 10.30 alle ore 11.45 circa. Lo scopo della prima registrazione, che ha visto il sensore disposto in posizione orizzontale, è stato semplicemente verificare il funzionamento dello strumento; al fine di mettere in vibrazione il solaio si è effettuato un salto. Le seguenti sperimentazioni sono state svolte disponendo l'accelerometro in posizione verticale; in ogni caso, in tutte si è verificato che lo strumento fosse solidale al pavimento, si è provveduto inoltre ad attribuire al sensore una certa massa.

La durata delle prime 9 misurazioni non è stata fissata, nel senso che al passaggio di un mezzo di trasporto pubblico in Via Farini si dava inizio all'acquisizione dati che proseguiva per qualche frazione

di minuto. Particolarmente interessante è stata l'8^a registrazione che ha visto la messa in vibrazione del solaio attraverso camminate e salti effettuate contemporaneamente da 4 persone. La durata delle restanti misurazioni, invece, è stata fissata a 5 minuti, fatta eccezione per la 10^a (1 minuto).

6.2.4 Risultati dell'identificazione

L'identificazione dei parametri modali è stata eseguita sfruttando i modelli AR e facendo ricorso a funzioni già implementate in ambiente MatLab. In particolare, di seguito si riportano i risultati relativi a due diverse misure di durata variabile (da qualche frazione di minuto a cinque minuti) con frequenza di campionamento pari a 80 Hz. Prima di analizzare le registrazioni, è stata effettuata una validazione dei dati con lo scopo di riconoscere la stazionarietà, escludere la presenza di armoniche spurie e verificare la distribuzione statistica. È stata operata una standardizzazione dei dati al fine di verificare che fossero normalmente distribuiti e un trattamento preliminare delle serie temporali finalizzato alla rimozione delle medie. In Figura 6.3 è riportata la registrazione relativa al salto; l'andamento in verde rappresenta il segnale misurato dall'accelerometro in posizione orizzontale, l'andamento in blu, invece, il segnale misurato dall'accelerometro in posizione verticale.

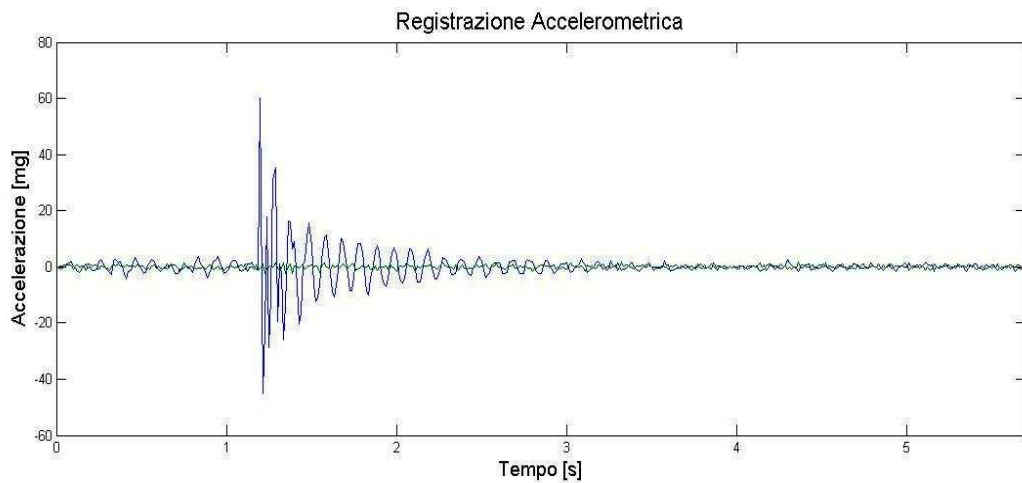


Figura 6.3. *Registrazione accelerometrica relativa al salto.*

Si è scelto, inoltre, di mostrare il grafico della trasformata di Fourier, costruito a partire dalle registrazioni di campo; si evidenziano tre picchi, rispettivamente in corrispondenza delle frequenze pari a 10, 24 e 34 Hz (Figura 6.4). Si ricorda che la trasformata discreta di Fourier permette di analizzare un segnale campionato nel dominio del tempo nel dominio delle frequenze, mettendo in evidenza le componenti spettrali.

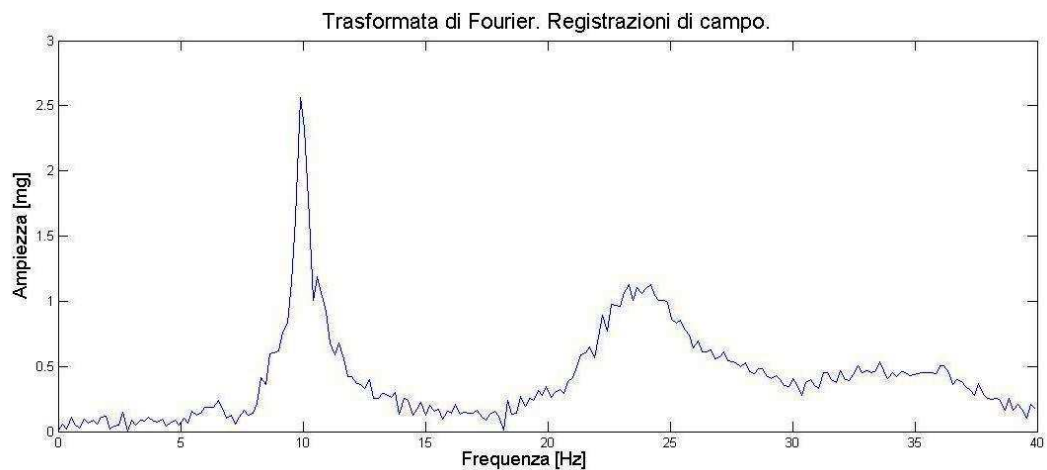


Figura 6.4. *Grafico della Trasformata di Fourier, costruito a partire dalle registrazioni di campo.*

Di seguito si può osservare lo spettro di potenza del segnale (Figura 6.5).

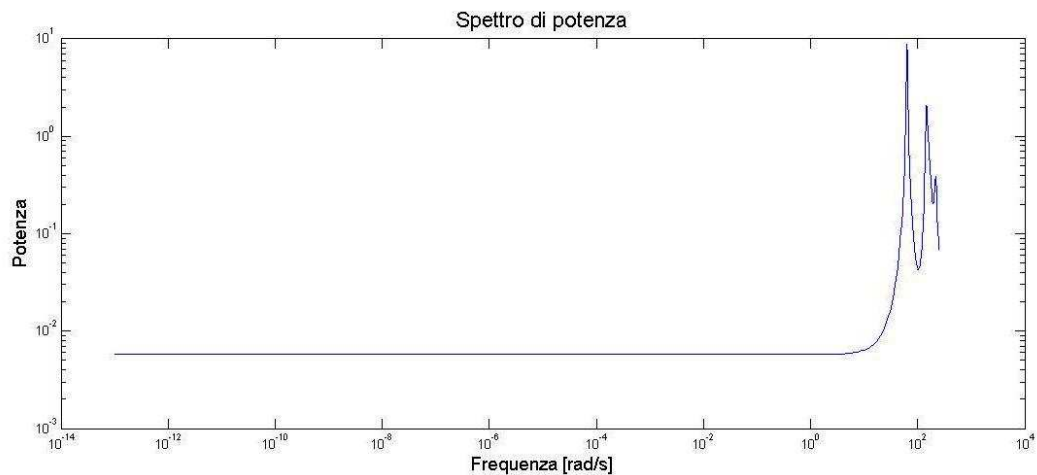


Figura 6.5. Spettro di potenza del segnale.

In Figura 6.6 è riportato, invece, il grafico della trasformata di Fourier, costruito a partire dai parametri identificati dal modello.

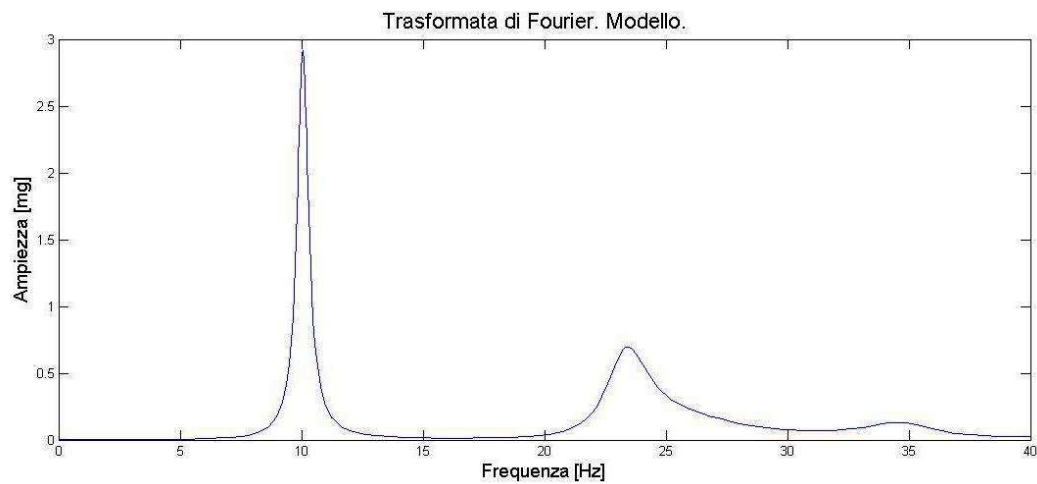


Figura 6.6. Grafico della Trasformata di Fourier, costruito a partire dai dati identificati dal modello.

Come mostra la Figura 6.7, i grafici relativi alla trasformata di Fourier, costruita a partire dalle registrazioni di campo e dai parametri del modello risultano del tutto sovrapponibili, nel senso che si individuano i tre picchi in corrispondenza dei medesimi valori di frequenza.

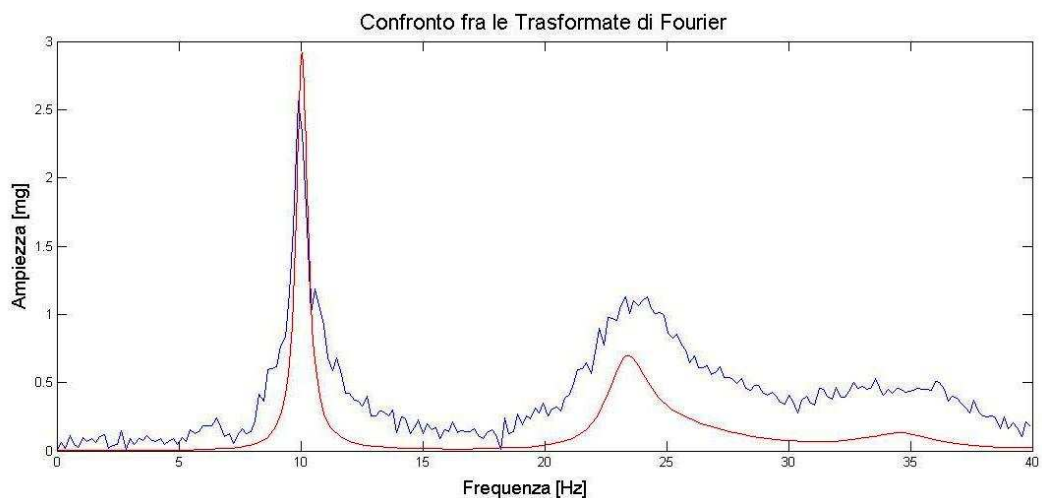


Figura 6.7. Confronti fra le Trasformate di Fourier ,ottenute a partire dalle registrazioni di campo(blu) e dai dati identificati dal modello (rosso).

In maniera del tutto analoga, per un'altra registrazione si riportano nell'ordine: l'andamento dell'accelerazione in funzione del tempo (Figura 6.8), lo spettro di potenza del segnale (Figura 6.9), i grafici della trasformata di Fourier a partire dai dati sperimentali (Figura 6.10) e dai parametri identificati dal modello (Figura 6.11). Ancora una volta, il confronto fra questi due andamenti mostra perfetta corrispondenza fra i risultati.

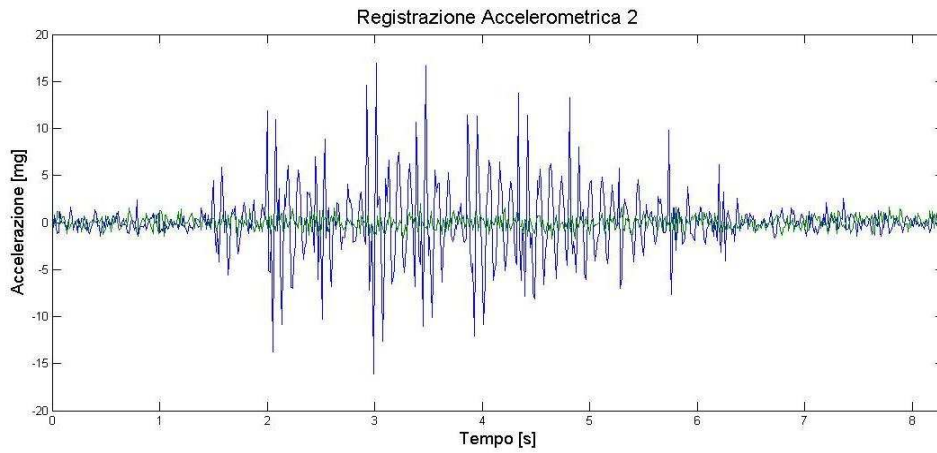


Figura 6.8. Registrazione accelerometrica [2].

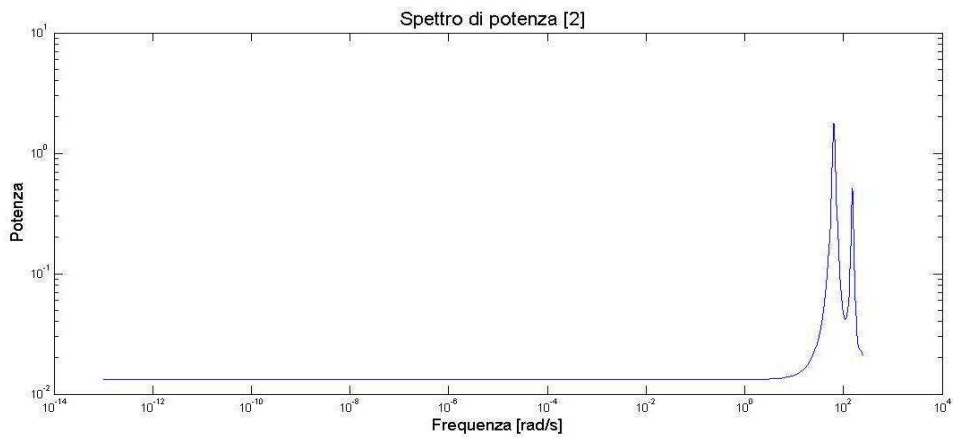


Figura 6.9. Spettro di potenza del segnale [2].

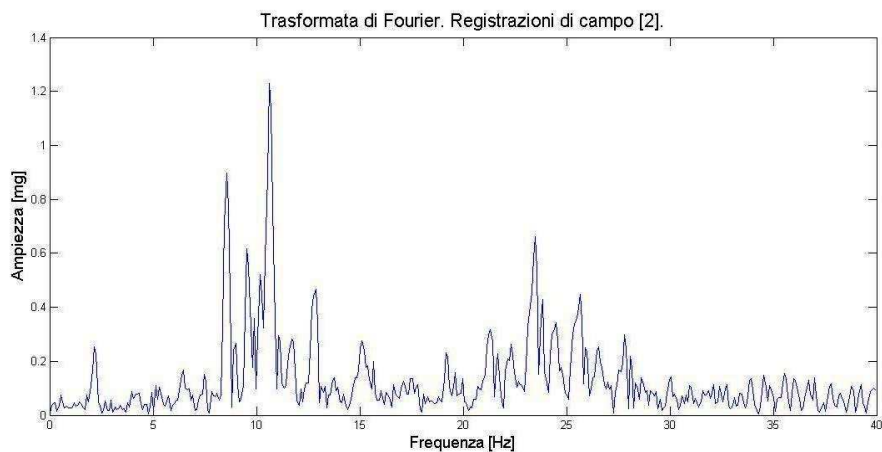


Figura 6.10. Grafico della Trasformata di Fourier, costruito a partire dalle registrazioni di campo [2].

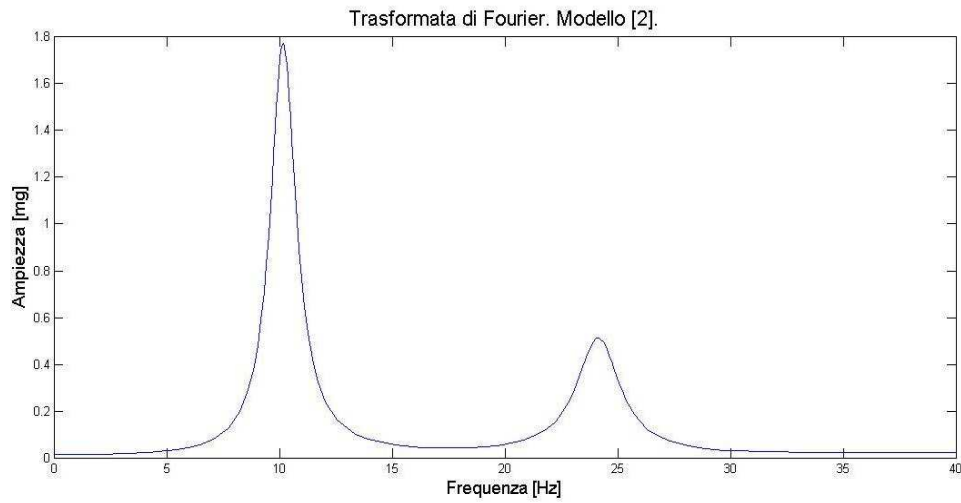


Figura 6.11. Grafico della Trasformata di Fourier, costruito a partire dai parametri del modello [2].

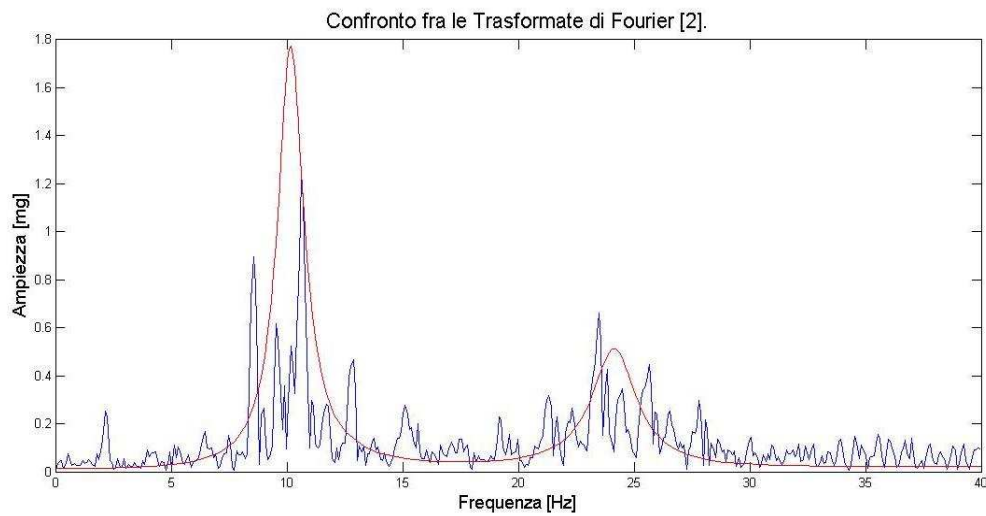


Figura 6.12. Confronti fra le Trasformate di Fourier, ottenute a partire dalle registrazioni di campo (blu) e dai dati identificati dal modello (rosso)[2].

6.3 Prossime applicazioni sperimentali: struttura in acciaio

Il Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni ha commissionato la realizzazione di una struttura in acciaio con collegamenti bullonati su cui sarà possibile effettuare ulteriori campagne sperimentali con lo scopo, da un lato, di testare ancora una volta la strumentazione, dall'altro, di accrescere la conoscenza del comportamento dinamico di strutture similari.

In Figura 6.13 sono illustrate le componenti del prototipo, mentre nelle seguenti immagini si mostrano i disegni architettonici (Figura 6.14) e il modello agli elementi finiti della struttura (Figura 6.15).

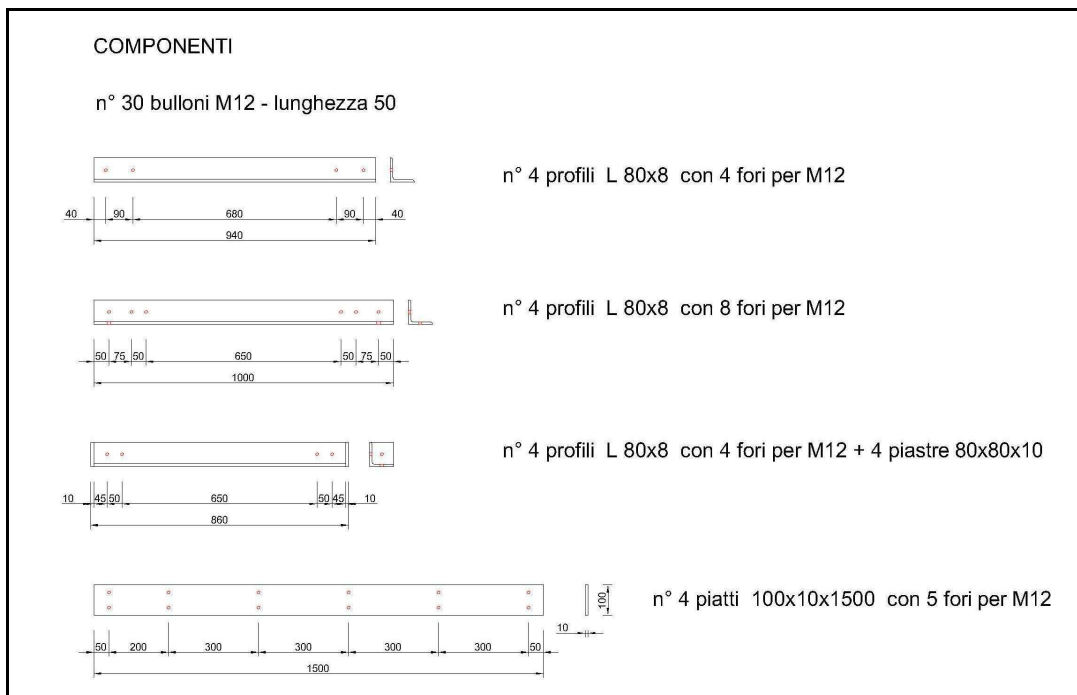


Figura 6.13. Componenti del prototipo in acciaio.

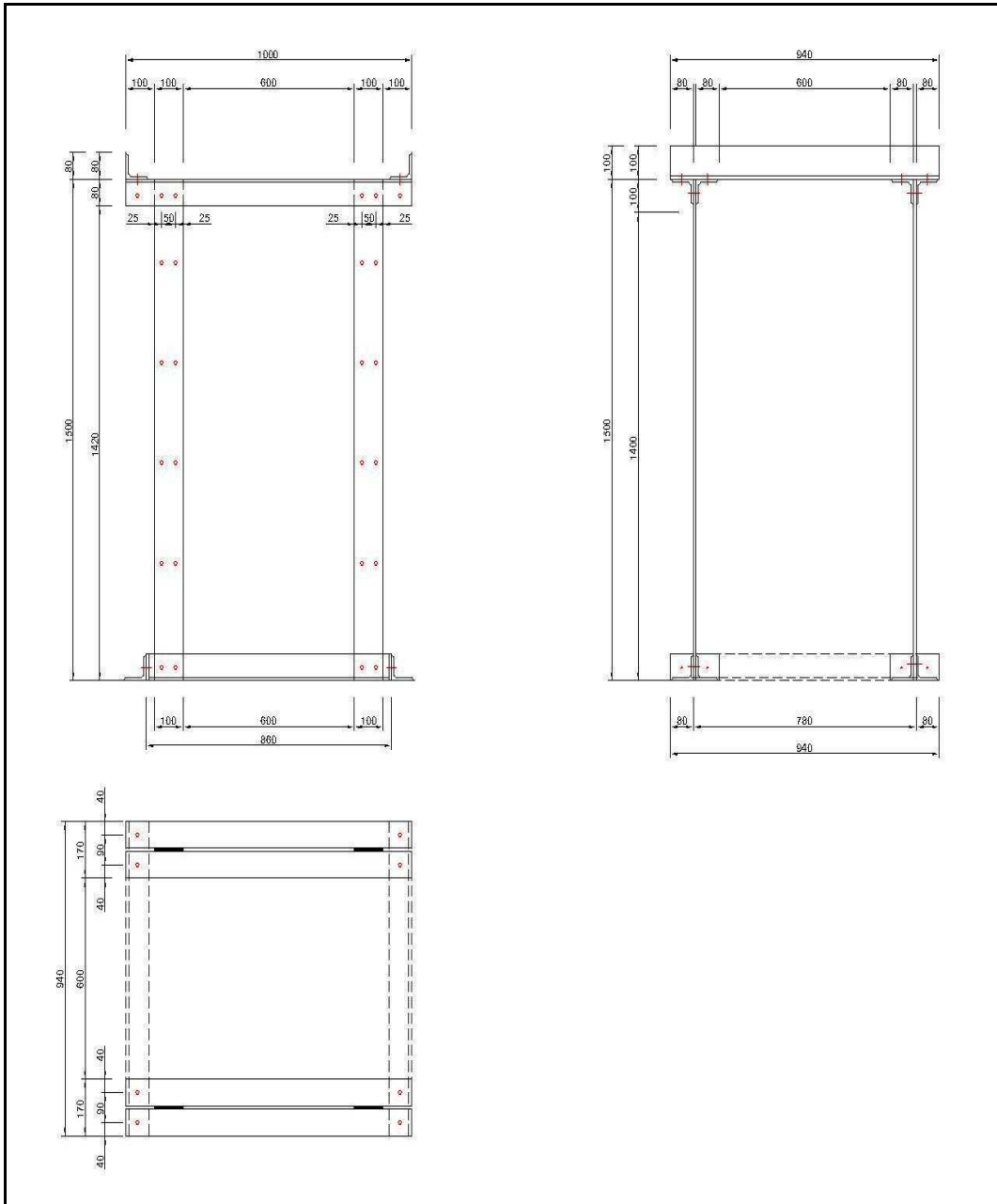


Figura 6.14. Disegni architettonici del prototipo in acciaio.

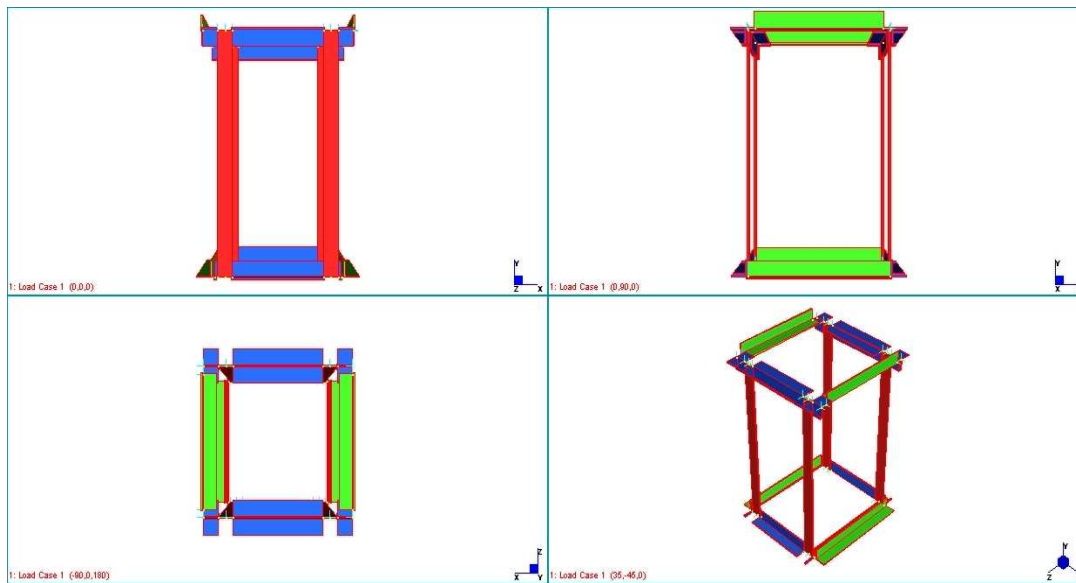


Figura 6.15. Modelli FEM del prototipo in acciaio.

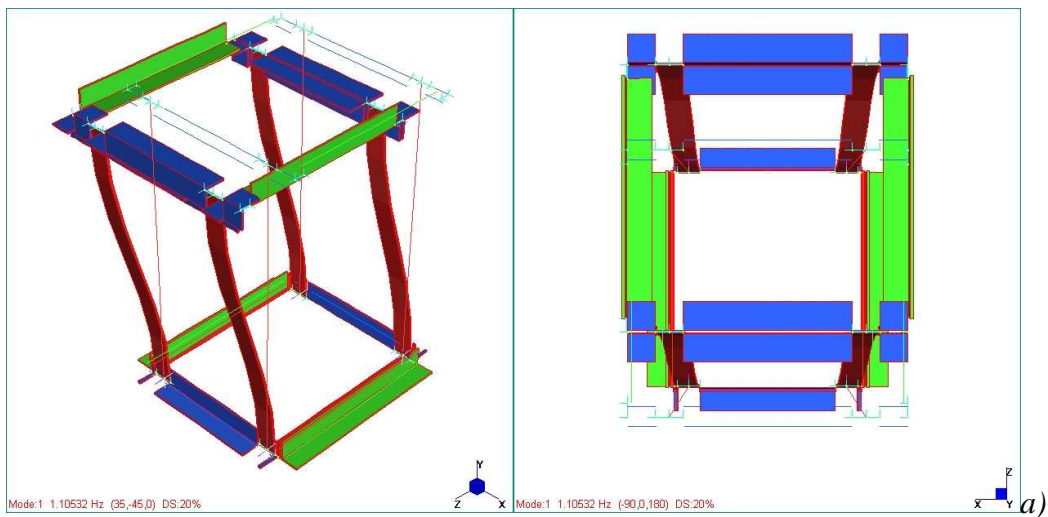
La realizzazione del modello è partita da un'attenta osservazione dei disegni architettonici. Si accenna soltanto che le bullonature sono state modellate in maniera semplificata tramite *link* rigidi. Inoltre dato che di default il programma fa in modo che gli assi degli elementi *beam* risultino allineati, si è utilizzato il comando *offset*. Da sottolineare che alla struttura è stata aggiunta in sommità una massa pari a 300 kg.

L'analisi modale ha consentito di individuare le frequenze proprie riportante in Tabella 6.1 e le corrispondenti deformate modali illustrate in Figura 6.16. Si anticipa che il primo modo è traslazionale in direzione z, il secondo torsionale, infine il terzo traslazionale in direzione x. Con l'espressione direzione x e z, s'intende rispettivamente la direzione forte e debole della sezione dei piedritti.

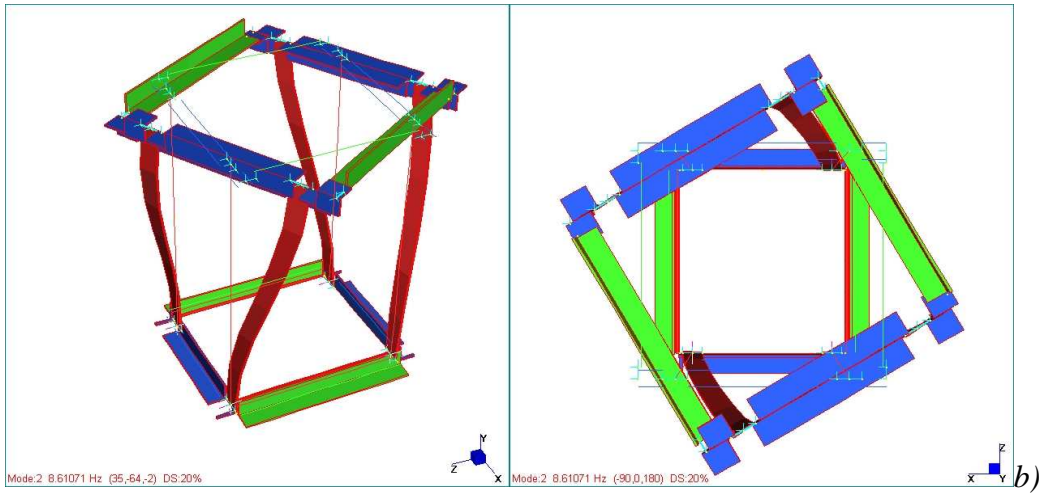
Mode	Frequency [Hz]	Modal Mass [Engineering]	PF-X [%]	PF-Y [%]	PF-Z [%]
1	1.10	4.90×10^2	0.00	0.00	91.88
2	8.61	6.64×10^2	0.00	0.00	0.00
3	10.78	4.90×10^2	91.87	0.00	0.00

<u>TOTAL MASS PARTICIPATION FACTORS</u>	91.87	0.00	91.88
--	--------------	-------------	--------------

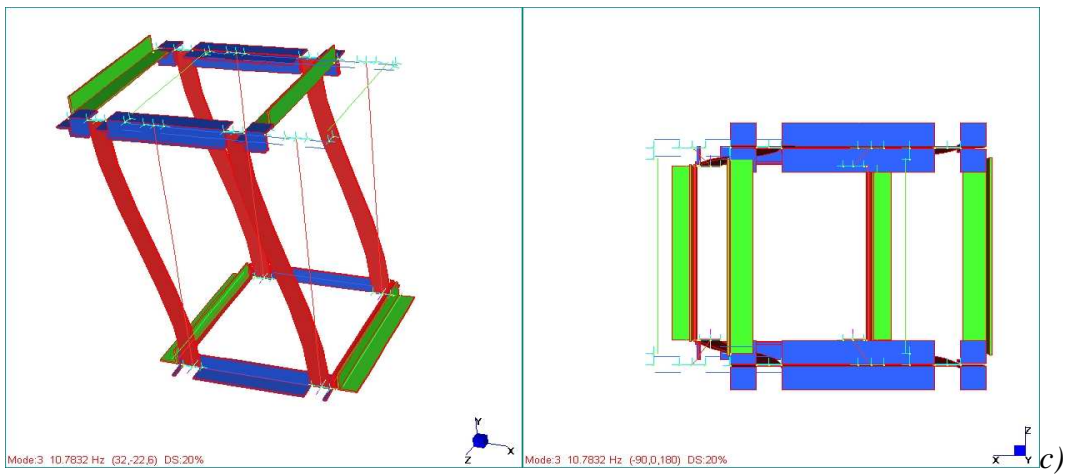
Tabella 6.1. Risultati in termini di frequenze, massa modale e fattore di partecipazione dell'analisi modale.



Prima frequenza propria: 1.10 Hz



Seconda frequenza propria: 8.61 Hz



Terza frequenza propria: 10.78 Hz

*Figura 6. 16 Deformate modali corrispondenti a: a)Primo modo;
b)Secondo modo; c)Terzo mod*

CONCLUSIONI

L'elevata sismicità del territorio italiano richiede l'adozione di misure efficaci in grado di mitigare gli effetti dei terremoti sulle strutture. La protezione degli edifici nei riguardi del rischio sismico può trarre benefici, tra l'altro, dall'approfondita conoscenza del comportamento dinamico della costruzione. L'analisi modale sperimentale sta acquisendo sempre maggiore rilevanza quale strumento per la valutazione del comportamento effettivo della struttura in opera.

La conoscenza delle caratteristiche modali risulta di grande utilità anche in vista della valutazione delle prestazioni delle stesse nel caso di condizioni ambientali estreme come i terremoti.

Accanto alle tradizionali tecniche basate sull'input noto, negli ultimi anni si è assistito ad una crescente diffusione delle tecniche di identificazione dinamica in presenza di sola eccitazione ambientale, che hanno il vantaggio di fornire le caratteristiche dinamiche della struttura nelle condizioni di esercizio. Oggi si tende sempre più a preferire le tecniche di identificazione ad input incognito poiché

l'esecuzione delle prove avviene con costi ridotti rispetto all'analisi modale sperimentale classica, e interferendo in maniera minima col normale uso della struttura.

I parametri modali così ottenuti possono, quindi, essere usati per migliorare i risultati delle analisi agli elementi finiti: la validazione dei modelli analitici consente il loro efficace impiego nella valutazione del rischio sismico per la struttura in esame.

L'analisi modale operativa, infine, costituisce uno strumento particolarmente flessibile, che si presta particolarmente bene al monitoraggio continuo, il cui scopo non consiste solo nell'identificazione di danni improvvisi o progressivi ma anche nel controllo della funzionalità della struttura nelle condizioni di esercizio. Pertanto, il monitoraggio strutturale coinvolge un gran numero di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile quali il progetto (attraverso le tecniche di model updating), la valutazione del danno, la manutenzione e il rinforzo di strutture esistenti, il controllo strutturale durante i terremoti (mediante sistemi semi-attivi).

In questa tesi si sono trattati gli aspetti preliminari fondamentali per la realizzazione di un sistema di monitoraggio dalle caratteristiche ottimali.

In primo luogo, la modellazione del Centro Unificato di Protezione Civile ha permesso di investigare il range delle principali frequenze delle strutture.

Lo studio delle tecniche di identificazione ha permesso di scegliere la procedura ottimale per gli scopi prefissati. In particolare, i

modelli AR, relativamente semplici e computazionalmente convenienti, si sono mostrati adatti per una prima stima dei parametri di interesse. Per identificazioni più sofisticate, si sono introdotti i modelli a errori nelle variabili (EIV), che, come ampiamente discusso, ipotizzano che anche gli ingressi del sistema siano affetti da rumore.

Il sistema di monitoraggio previsto sulla palazzina rappresenta una sorta di sfida; i sensori a tecnologia MEMS sono infatti piuttosto rumorosi, tuttavia al loro interno vi sono filtri altamente selettivi che permettono di abbattere la soglia del rumore ad un valore pari a 0.3 mg. Attualmente sono in corso studi che prevedono l'attivazione di trigger nel caso di eventi sismici di una certa entità al fine di allargare la banda passante fino a valori pari a 80-100 Hz.

In ogni caso, le campagne sperimentali effettuate sull'altana della Cassa di Risparmio di Bologna hanno dato esiti positivi, dimostrando la capacità del prototipo in possesso di cogliere deboli vibrazioni ambientali nonostante il rumore intrinseco.

Le simulazioni numeriche, infine, hanno mostrato che le accelerazioni adottate da qualsiasi punto di misura significativo sono in grado di fornire stime attendibili.

Nell'ultimo capitolo si è presentato un prototipo in acciaio, commissionato dal Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni, al fine di eseguire ulteriori analisi le cui soluzioni possano incrementare la conoscenza circa le strutture metalliche.

Si auspica che i risultati delle future analisi modali sperimentali previste sulla struttura in esame siano utilizzati per migliorare il modello agli elementi finiti proposto al fine di aumentarne la capacità di previsione del comportamento strutturale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Andersen P. (1997). *Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA models*. Ph.D. Thesis. Aalborg: Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.

Anderson, B. D. O., Green, M., & Deistler, M. (1987). *Errors-in-variables identification: Linear gaussian stationary results*. In 10th IFAC World Congress, Munich, Germany.

Anderson, B. D. O., & Moore, J. B. (1979). *Optimal filtering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Anderson, B. D. O., & Deistler, M. (1984). *Identifiability of dynamic errors-in-variables models*. *Journal of Time Series Analysis*, 5, 1–13.

Binda, L., Saisi, A. (2003). *Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*. DIS Dipartimento ingegneria strutturale, Politecnico di Milano.

Brigante, M., Campagna, R., Iodice V., Pasquino M. (2004). *Il monitoraggio strutturale mediante l'impiego di una stazione automatica di misure e di acquisizione*. Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli.

Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. (2000) *Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition*. Proceedings of IMAC 18, USA.

Brown, R., Hwang P. (1992). *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Cantieni, R. (2005). *Experimental methods used in system identification of civil engineering structures*. Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.

Diversi, R., Guidorzi, R., & Soverini, U. (2002). *Algorithms for optimal errors-in-variables filtering*. Systems & Control Letters.

Fabbrocino, G., Rainieri, C., Verderame, G. M. *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*. Università degli Studi del Molise, Consorzio ReLUIS, Università degli Studi "Federico II" di Napoli, Consorzio ReLUIS.

Fabbrocino, G., Rainieri, C., Manfredi, G., Cosenza E. *Protezione sismica di edifici strategici e monitoraggio strutturale: applicazione all'Edificio centrale della Facoltà di Ingegneria di Napoli*. Dipartimento SAVA, Sezione Ingegneria & Ambiente, Università

degli Studi del Molise e Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi Federico II di Napoli.

Fabbrocino, G., Rainieri, C., Manfredi, G., Cosenza, E., Verderame, G. M. *La valutazione della risposta dinamica nel progetto di rinforzo sismico della Torre delle Nazioni, Mostra d'Oltremare*. Dipartimento SAVA, Sezione Ingegneria & Ambiente, Università degli Studi del Molise e Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi Federico II di Napoli.

Fiore, A., Porco, G. *Formulazione inversa per verifica strutturale mediante tecniche di acquisizione in campo dinamico*. Dipartimento di Strutture, Università della Calabria.

Fujino, Y. and Abe, M. (2001). *Structural health monitoring in civil infrastructures and research on SHM of bridges at University of Tokio*. Proc. of SPIE Vol. 4337, 2001.

Gentile C. (2005). *Operational Modal Analysis and Assessment of Historical Structures*. 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.

Glisic, B., Inaudi, D., Del Grosso A., Lanata, F. (2003). *Monitoraggio a breve e a lungo termine* SMARTEC SA & Dipartimento ingegneria strutturale e geotecnica, Genova.

Guidorzi, R., Diversi, R., Soverini, U. (2002). *Optimal errors-in-variables filtering*, Automatica.

Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li, Gang-Bing Song. (2004). *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. Engineering Structures 26 1647–1657.

Kalman, R., E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transaction of the ASME. Journal of Basic Engineering, 33 – 45.

Inaudi D. (2000). *Application of Fibre Optic Sensors to Structural Monitoring*. Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection, P.K. Rastogi and D. Inaudi Eds., Elsevier, 459-472 .

Lardiès, J. (1997). *Modal parameter identification from output-only measurements*, Mechanics Research Communications, 24(5), 521-528.

Lardiès, J. (2008). *Relationship between state-space and ARMAV approaches to modal parameter identification*. Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 611-616.

Ljung, L. (1999). *System Identification, Theory for the User* (second Ed.). Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Lynch, J. P. (2002) *Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures*. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.

Lynch, J.P., Law, K.H., Kiremidjian, A.S., Carryer, E., Farrar, C.R., Sohn, H., Allen, D., Nadler, B. and Wait, J. (2002). *Laboratory and field validation of a wireless sensing unit design for structural monitoring*. Proc. of the US-Korea Workshop on Smart Structural Systems, Pusan, Korea.

Marcari G., Fabbrocino G., Manfredi G., Prota A.(2007). *Experimental and Numerical Evaluation of Tuff Masonry Panels Shear Seismic Capacity*, Proc. of the 10th North American Masonry Conference, St. Louis, Missouri.

Materazzi, A., (2001). *Effetti delle vibrazioni di origine ambientale sulle costruzioni civili*. Dipartimento di ingegneria civile e ambientale, Università di Perugia.

Ministero delle Infrastrutture, Ministero dell'Interno, Dipartimento della Protezione Civile, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, (2008). *Norme tecniche per le costruzioni*. Decreto Ministeriale.

Mufti (2001). *Guidelines for Structural Health Monitoring*. University of Manitoba, ISIS Canada.

Muscolino, R. (2005). *Dinamica delle strutture*. McGraw-Hill Libri Italia s.r.l. Milano.

Panzeri, P., Algeri, C., Rossi, G. (2007). *Il metodo dinamico per la verifica sismica di edifici esistenti: il caso dell'ospedale "Cristo Re" in Roma*. Ingegneria sismica- Anno XXIV, 2007.

Panzeri, P., Algeri, C. (2006). *Prove di caratterizzazione ed esperienze di monitoraggio in campo dinamico*. Corso CISM 8-10 novembre (2006). Metodi dinamici per il monitoraggio delle strutture dell'ingegneria civile.

Presidenza del Consiglio dei Ministri (2003). *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274/03, 2003, e successive modifiche in OPCM n.3431/05 e OPCM n.3452/05

Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. and Manfredi, G (2007). *Structural monitoring and assessment of the School of Engineering Main Building at University of Naples Federico II*. Proceedings of the

3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII-3.

Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. and Manfredi, G. (2007). *Implementation of OMA procedures using LabView*. Proceedings of the 2nd IOMAC Conference, Copenhagen, Denmark.

Söderström, T. (1981). *Identification of stochastic linear systems in presence of input noise*. *Automatica*, 17, 713–725.

Söderström, T. (2007). *Errors-in-variables methods in system identification*. *Automatica*, 43(6), 939–958.

Söderström, T., & Stoica, P. (1989). *System Identification*. Prentice-Hall.

Ubertini, F., Pascale, G., De Miranda, S., Colla S. *Monitoraggio intelligente di strutture storiche*. DISTART, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

Van Overschee, P. & De Moor, B. (1991). *Subspace algorithm for the stochastic identification problem*. Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, UK.

Van Overschee, P. & De Moor, B. (1993). *Subspace algorithm for the*

stochastic identification problem. Automatica, 29(3) 649-660.

Vincenzi, L., (2007). *Identificazione dinamica delle caratteristiche modali e delle proprietà meccaniche di strutture mediante algoritmi di ottimizzazione.* Dipartimento DISTART, Università di Bologna.

Zanon, P. (2000). *Monitoraggio strutturale della chiesa di San Gaudenzo in Novara.* Dipartimento di Strutture, Università di Trento.

Zhang, L., Brincker, R. & Andersen, P. (2005). *An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues.* Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.