

---

## *Conclusioni*



---

## *Principali risultati ottenuti*

---

La sperimentazione condotta sul modello della facciata di Palazzo Geraci ha consentito di determinare il comportamento dinamico della struttura attraverso due tecniche di eccitazione diverse: il rumore ambientale e l'eccitazione per mezzo di un martello. In primo luogo è stato eseguito un confronto tra le due tecniche. In seguito all'esecuzione dell'intervento, è stato possibile interpretare il comportamento della struttura in due condizioni differenti: prima e dopo l'intervento di consolidamento.

Gli obiettivi dello studio svolto con la presente tesi erano principalmente tre:

- Se possibile determinare la presenza del danno in una struttura attraverso prove mirate all'identificazione dinamica;
- Se si potessero utilizzare dei modelli numerici per evidenziare, mediante analisi modali, il comportamento di strutture danneggiate.
- Se si fosse in grado di valutare l'efficacia di un intervento classico quali sono le iniezioni di malta, per il consolidamento di una struttura danneggiata.

Per quanto riguarda il primo aspetto, i risultati ottenuti, mostrano seppur con alcune incertezze, la veridicità dell'affermazione. I risultati sperimentali evidenziano come alcuni sensori presentano picchi di risonanza che altri non hanno, evidenziando la non monoliticità della struttura per la presenza del danneggiamento. Questo aspetto emerge marcatamente con le prove con il martello, in quanto, per mezzo del colpo inferto, si riesce a sollecitare la struttura in maniera tale da eccitare modi locali. L'aumento della forzante, porta la struttura ad un comportamento non lineare, riconoscibile dall'asimmetria dei picchi di risonanza. Si può pertanto affermare che, per la determinazione della presenza del danno, occorre ricorrere ad eccitazioni elevate, in maniera tale da portare la struttura ad un comportamento non lineare.

Per quanto riguarda la seconda problematica, la modellazione agli elementi finiti prodotta, ha portato ad una simulazione realistica del comportamento strutturale, con risultati molto vicini a quelli ottenuti sperimentalmente. Aspetto non trascurabile di tale lavoro consiste nel fatto che le analisi sono tutte modali, ovvero pur rimanendo in campo lineare è stato possibile evidenziare il comportamento di strutture danneggiate. In particolare modo, è stato riscontrato come modellare il danno attraverso una diminuzione del modulo elastico, e allo stesso tempo agire su quest'ultimo per considerare la struttura consolidata, sia efficace. Rimane tuttavia il

problema di forme modali che presentano compenetrazioni di materiale; tali modi nella realtà non possono avvenire perché presentano vincoli monolateri. A tutt'oggi sono in studio analisi modali non lineari in cui poter simulare questi vincoli, anche se a mio avviso sono sufficienti un po' d'attenzione e di buon senso per non cadere in interpretazioni erranee.

Come in parte già accennato è emerso come l'intervento abbia determinato, teoricamente e sperimentalmente, un miglioramento della situazione iniziale. Tuttavia è difficile dire se tale intervento sia preferibile ad un'altra tipologia di consolidamento, poiché non si hanno a disposizione dati per un confronto.

---

## *Aspetti originali del presente lavoro*

---

Durante l'esecuzione della sperimentazione è stato inoltre possibile fare alcune considerazioni che riguardano il campo della caratterizzazione dinamica.

Le principali osservazioni sono riassumibili nei punti riportati di seguito:

- Le difficoltà riscontrate nell'analisi dei segnali per ottenere prima le frequenze e poi i modi di vibrare sono dovute, come si è chiaramente visto nei risultati dei test, al comportamento fortemente non lineare della struttura. Occorrerà quindi considerare che, ogniqualvolta si vorrà eseguire una sperimentazione su una struttura di tipo analogo, le difficoltà maggiori si avranno proprio nell'interpretare i risultati e nella scelta del metodo per farlo.
- L'utilizzo di un analizzatore a pochi canali è da evitarsi in quanto, essendo la struttura fortemente non lineare, è bene registrare tutti i canali contemporaneamente; inoltre i tempi per lo svolgimento della prova sono molto lunghi.
- Dai risultati si è evidenziato che le prove ambientali sono in parte sovrapponibili a quelle con il martello; tuttavia il basso livello di eccitazione non riesce ad evidenziare la presenza di un danneggiamento. Comunque esse costituiscono un ottimo metodo, rapido ed economico, per la caratterizzazione della struttura. Questo fatto favorisce senz'altro tale tecnica per una prima indagine, al fine di definire meglio le prove successive ed eventuali ritocchi alla strumentazione, sia come posizione sia come capacità di rilevamento.
- Le prove con il martello strumentato richiedono un tempo di analisi più lungo, ma la maggior quantità di informazioni che se ne ricava lo giustifica pienamente. Dalla sperimentazione si può notare come i risultati migliori per una parte della struttura si ottengono colpendo dalla parte opposta, quindi lontano dal punto di impatto. A conferma di quanto affermato sono state calcolate le funzioni di coerenza, che presentano, agli antipodi del colpo, un buon comportamento soprattutto alle frequenze più basse (fino ai .. Hz).
- L'utilizzo delle densità spettrali di potenza si è rivelato un metodo facile e allo stesso tempo valido per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Una tecnica "semplice", quindi, può portare agli stessi risultati di altre più complesse e dispendiose, sia in termini di tempo sia di potenza di calcolo. Con ciò si intende

ricordare che, al fianco dei più recenti metodi di analisi tempo-frequenza, non bisogna dimenticare i metodi “tradizionali”, da cui si può ricavare molto.

- Dalla coerenza ci si aspettava dei risultati migliori, soprattutto sulla localizzazione del danno, ma probabilmente le forti non linearità hanno inficiato i risultati. La mappatura della coerenza, quindi, non è stata molto efficace per la localizzazione del danno, se non per dimostrare che, colpendo da un lato la struttura, i risultati migliori sono stati ottenuti per il lato opposto.
- Le diverse campagne di prove hanno dimostrato che non sempre le osservazioni visive sono sufficienti e adatte a fare supposizioni su cui basarsi. Ad esempio, le colonne sembrerebbero a prima vista tra loro simili, sia per la geometria sia per il materiale, ma in realtà la situazione è ben diversa, e nei risultati si evidenzia un comportamento differente. Questo potrebbe essere dovuto al grado di vincolo tra la colonna e la base, o anche a difetti costruttivi non visibili. Infatti il comportamento anomalo di un elemento costruttivo può anche non dipendere da se stesso, ma da ciò che lo circonda: un diverso comportamento può essere conseguenza del fatto che la struttura presenta delle lesioni asimmetriche che causano un comportamento globale anomalo, di cui fanno parte anche le colonne.

---

## *Futuri sviluppi*

---

Dopo aver “fatto il punto” del lavoro svolto come tesi, è naturale chiedersi: “e dopo?”. In risposta al quesito l’autore del presente lavoro ha pensato ai futuri possibili sviluppi di quanto svolto:

- L’esecuzione delle prove con eccitatore ha evidenziato il fatto che queste sembrano essere non risolutive, mentre a priori ci si aspettava ottimi risultati. Bisogna tuttavia considerare che spesso sono sorti problemi, di natura meccanica - elettronica, che hanno costretto ad abbandonare la serie di test in programma. In tale ottica un aspetto importante potrebbe essere legato alla posizione dello shaker, che si potrebbe variare come si era già pensato.
- Non si è riuscito a capire come la temperatura possa influenzare le frequenze e i modi. Da quanto si è potuto osservare tuttavia sembra non esserci dipendenza.
- Sarebbe interessante effettuare delle carotature in corrispondenza delle lesioni dove è stata iniettata la malta per appurare la profondità di iniezione in situazioni con lesioni molto piccole.
- Un ulteriore sviluppo della tesi potrebbe essere quello di eseguire una nuova lesione, nel punto un tempo già lesionato e vedere se si ottengono nuovamente i dati delle campagne prima dell’intervento, ovvero se il danno caratterizza in modo univoco la struttura.

Oltre agli sviluppi accennati ve n’è senz’altro uno molto più importante e su cui oggi giorno si sta puntando molto, vale a dire il monitoraggio strutturale. Infatti operazioni come quelle svolte, ossia la caratterizzazione e l’identificazione dinamica, sembrano rivelarsi ottimi strumenti per la determinazione della presenza del danno, come d’altronde è stato evidenziato anche dai risultati del lavoro svolto.



---

## *Bibliografia*



## Introduzione

- [1] Bettinali F., Galimberti C., Meghella M., Pizzigalli E., *Identificazione dinamica della torre del Palazzo della Signoria in Firenze*, 5° Convegno Nazionale – L’ingegneria in Italia 1991, 29 settembre – 2 ottobre 1991, Palermo.
- [2] Ceravolo Rosario, *Metodi dinamici avanzati in diagnostica strutturale*, Dottorato di ricerca in ingegneria strutturale, relatore Prof. A. De Stefano, a.a. 1994/95, Politecnico di Torino.
- [3] Pampanin Stefano, *Studio sulle condizioni di vincolo delle colonnine della torre di Pisa mediante analisi dinamica ad elementi finiti con superfici di contatto*, Tesi di laurea, relatore Prof. G. Macchi, a.a.1996/1997, Università di Pavia.
- [4] Pavese A., Galimberti C., Calvi G.M., Fanelli M., Giuseppetti G., *Identificazione dinamica di torri in muratura*, 5° Convegno Nazionale – L’ingegneria in Italia 1991, 29 settembre – 2 ottobre 1991, Palermo.
- [5] Rytter A., Negro P., Kirkegaard P. H., *Vibration Based Inspection of a Four-Storey RC Building*, comunicazione presentata in International Workshop on Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, Maggio 1995, Università D’Annunzio, Pescara.

## Capitolo 1

- [6] Appunti del corso di “*Riabilitazione strutturale*” tenuto dal Prof. Ing. Lagomarsino S., Facoltà di Ingegneria di Genova, Diseg (Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica).
- [7] ASSI.R.C.CO, *IV Congresso Nazionale. Consolidamento e recupero dell’architettura tradizionale: dagli interventi singoli agli interventi d’insieme urbano*, 1992, Edizioni Kappa, Roma.

- 
- [8] AA.VV., *Comportamento statico e sismico delle strutture murarie*, 1982, Clup Milano.
- [9] Bezoari Giorgio, Monti Carlo, Selvini Attilio - *Fondamenti di rilevamento generale 2. Fotogrammetria agrimensura strade*, 1990, Hoepli.
- [10] Buti Andrea, 1992, *Diagnostica strutturale e strumentazione di cantiere. Tavola rotonda in occasione della 6<sup>a</sup> edizione di Riabitat Genova, 29 Maggio 1992*, Colombo Grafiche, Genova.
- [11] Carbonara Giovanni, *Trattato di restauro architettonico*, 1996, UTET, Torino.
- [12] Caterina Gabriella, *Tecnologia del recupero edilizio*, 1989, UTET, Torino.
- [13] Di Stefano Roberto, *Il consolidamento strutturale nel restauro architettonico*, 1990, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli.
- [14] Lucidi del corso di “*Riabilitazione strutturale*” tenuto dal Prof. Ing. Lagomarsino S., Facoltà di Ingegneria di Genova, Diseg (Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica).
- [15] Mastrodicasa Sisto, *Dissesti statici delle strutture edilizie*, 1993, Editore Ulrico Hoepli, Milano.

### Pagine web

- [16] <http://adic.diseg.unige.it/marche/modelli%20chiese/istruzioni.htm>  
*Sicurezza e conservazione delle chiese in zona sismica*, ultima visita 04/10/2000.
- [17] <http://space.tin.it/edicola/jxxmo/monitoraggio.htm>  
*Monitoraggio di manufatti nel tempo*, ultima visita 28/09/2000.
- [18] <http://services.arch.unige.it/r5/3/3-repert-strut.html>  
*Repertorio di elementi strutturali*, ultima visita 28/09/2000.

## Capitolo II

- [19] Gade Svend, Herlufsen Henrik and Konstantin-Hansen Hans, *How to Determine the Modal Parameters of Simple Structures*, Application note: Brüel&Kjær, Denmark.
- [20] Golival J. C., *Mesures de vibrations et identification des structures*, lucidi delle lezioni, a.a. 2000-2001.
- [21] Herlufsen H., *Dual channel FFT analysis*, Technical Report to Advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement, Brüel&Kjær, Denmark.
- [22] ISMES, *La sperimentazione dinamica delle strutture. Metodi e tecniche di indagine*, Manuali Tecnici Ismes, Edizione fuori commercio.
- [23] Jenkins G.M. and Watts D.G., *Spectral analysis and its application*, 1972, Holden-Day, San Francisco.
- [24] Giacchetti R., Menditto G., *Indagini dinamiche non distruttive per l'individuazione delle caratteristiche meccaniche delle strutture*, Quaderno CIAS n°2, CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale Scientifico).
- [25] McConnell K.G., *Vibration testing. Theory and Practice*, 1995, John Wiley & Sons, New York.
- [26] Marazzi Francesco, *Tecniche di identificazione dinamica*, Tesina di dottorato, Dipartimento di Meccanica Strutturale, a.a. 1999/2000, Pavia.
- [27] Marazzi Francesco, *Tecniche di controllo robusto per strutture flessibili in presenza di carichi ambientali*, Tesi di laurea, Dipartimento di Meccanica Strutturale, a.a. 1996/1997, Pavia.

- [28] Martinez J.L., Martín-Caro J.A., Torrico J., León J., campo J. A., *The Silla de la Reine tower in the Cathedral of León. Structural Monitoring combined with numerical analysis*, European Coast F3, Conference on System Identification & Structural health Monitoring.
- [29] Pavese Alberto, *Studi sul comportamento dinamico di torri in muratura e loro modellazione*, Tesi di dottorato, relatore Prof. Giorgio Macchi, correlatore Prof. Michele Fanelli, 1992, Università di Pavia.
- [30] Paz Mario, *Dinamica strutturale. Teoria & Calcolo*, 1985, Libreria Dario Flaccovio Editrice, Palermo.
- [31] Tirelli D., *Applicazioni dell'Analisi Modale alla Misura di Caratteristiche Dinamiche di Strutture Civili*, Special Publication No 1.00.67, Joint Research Centre, Institute for Systems, Informatics and Safety, 2000, Ispra.
- [32] Odetti F., Raimondo M., *Elementi di algebra lineare e geometria analitica*, 1992, Edizioni Culturali Internazionali Genova, Genova.

### Pagine Web

- [33] <http://www.luchsinger.it/tn-sti.htm>  
*La precisione dei sistemi digitali di acquisizione dati*, ultima visita 28/09/2000.

### Capitolo 3

- [34] Marco Mocellin, *Il consolidamento anti-sismico di edifici monumentali. Una rassegna di tecniche e un caso di studio: il Palazzo Geraci di Palermo*, tesi di laurea, relatore Prof. Elisa Gaugenti Grandori, correlatori Ing. Armelle Anthoine, Ing. Pierre Pegon, a.a. 1996-1997, Politecnico di Milano.
- [35] Flavio Bono, *Analisi e prove sperimentali su un modello in grande scala di sistemi innovativi per la protezione sismica di edifici storici e monumentali*, relatore Prof. Arch. Giuseppe Turchini, correlatore Prof. Ing. Duilio Benedetti, relatore esterno Ing. Vito Renda, 1996-1997, Politecnico di Milano.

- [36] Rapporto Finale, Attività del Centro Comune di Ricerca di Ispra, *POP SICILIA, Convenzione tra Regione Siciliana, Centro Comune di Ricerca di Ispra della Commissione Europea, Università di Catania, Messina e Palermo*, 1997, A. Lucia.

#### Capitolo 4

-

#### Capitolo 5

- [37] Fanelli M., *La dinamica dei sistemi non lineari*, Technical Report, ENEL-CRIS-DSR, 1991.

#### Capitolo 6

- [38] Amstron K. J., Eykhoff P., *System identification – a survey*, 1971, Automatica.