

L'indagine dinamica sul Campanile della Chiesa del Carmine (NA): metodi, finalità e sviluppi

*G. Mannara; N. Ciancia; N. Barbati
STRAGO Ricerche S.r.l.*

SOMMARIO

Per una corretta progettazione di un intervento di restauro e di adeguamento è necessario conoscere il comportamento dinamico di una struttura, in termini di deformate modali, frequenze proprie e smorzamenti. La valutazione di questi parametri si ottiene abbinando la prova sperimentale di caratterizzazione dinamica alla modellazione numerica.

L'importanza storica e architettonica del Campanile della Chiesa del Carmine (NA) ha richiesto l'esecuzione di una prova non invasiva ma al tempo stesso efficace, sfruttando attuatori di tipo ambientale/impulsivo e impiegando strumentazione ad elevata sensibilità con tecniche avanzate di Analisi Modale Operazionale. I risultati dell'attività sperimentale hanno permesso calibrare il modello FEM sviluppato dall'Università di Napoli con l'uso di opportuni indici di correlazione e in più fornito elementi per lo sviluppo e il consolidamento della metodologia proposta. Inoltre, nell'ottica di uno Structural Health Monitoring, si è sperimentato un programma di monitoraggio dinamico 24h, ricavando indicazioni sulla variabilità dei parametri dinamici in funzione di parametri ambientali quali entità del traffico, temperatura e funzionamento delle campane.

In particolare l'esperienza maturata è stata sfruttata per misurare l'entità delle vibrazioni indotte sul campanile della chiesa di Santa Chiara delle Murate (PG), in previsione di un intervento di adeguamento che attenui l'effetto delle vibrazioni indotte dalle campane.

Introduzione

I campanili o più in generale i monumenti storici artistici rappresentano un grosso settore di applicazione delle indagini dinamiche, sia perché il nostro Paese è ricco di strutture del genere sia perché la loro geometria e il tipo di sollecitazione a cui sono sottoposti li rende particolarmente sensibili a problematiche di natura dinamica.

Trattandosi poi di opere con un'età considerevole e molto spesso afflitte da problemi di degrado si rendono spesso necessari degli interventi di recupero. Una progettazione al meglio di tali interventi si deve avvalere non soltanto di una conoscenza statica dell'opera bensì di una sua conoscenza più completa che può essere ottenuta attraverso una serie di rilievi dinamici. Le prove dinamiche, finalizzate alla conoscenza del comportamento dinamico della struttura, possono essere condotte in vario modo ed essere mirate alla conoscenza dei parametri modali quali frequenze proprie di vibrazione, forme modali e smorzamenti associati, alla lettura dei valori massimi di accelerazione individuati, alla valutazione di fenomeni di risonanza indotti dal suono delle campane, o altro ancora, a seconda della tipologia di opera e dei problemi a cui appare essere soggetta. La STRAGO Ricerche ha maturato negli anni una serie di esperienze nel settore e di seguito se ne riportano due: la prima svolta sul campanile della chiesa del Carmine a Napoli, la seconda sul campanile del complesso monastico di S. Chiara delle Murate a Città di Castello (PG).

Tipologia di prova adottata

L'esperienza maturata nel settore della caratterizzazione dinamica dimostra come anche la modellazione più spinta non possa tenere comunque conto né delle incertezze legate alla realizzazione delle parti strutturali, né dell'incidenza di quelle non strutturali e pertanto nessun tipo di modellazione può prescindere da una prova sperimentale in grado di ottenere informazioni sulle forme modali fondamentali. Le tecniche di analisi dinamica sperimentale sono varie e diffuse, tuttavia un aspetto fondamentale per una classificazione è il tipo di sollecitazione impiegata che influenza non soltanto la tecnica di elaborazione, ma anche i costi ed i tempi delle indagini. Si distinguono prevalentemente tre approcci: sollecitazione forzata, sollecitazione ambientale sfruttando attuatori naturali o antropici, sollecitazione di tipo impulsivo trasferendo alla struttura impulsi di intensità limitata con opportuni eccitatori, quali martelli strumentati o masse battenti. Le tecniche di vibrazioni forzate anche se dispendiose ed invasive sono quelle più conosciute e di collaudata affidabilità, tuttavia, in virtù dello sviluppo tecnologico e computazionale, stanno ormai lasciando il passo alle impulsive e ambientali.

Nel caso in questione, trattandosi di edifici di interesse storico situati in complessi monastici ci si è orientati verso una tipologia di prova del tutto non invasiva. Pertanto si è pensato di sfruttare come attuatori le sollecitazioni di carattere impulsivo e ambientale indotte dal vento e dal consistente traffico veicolare presente nella zona, e le sollecitazioni indotte dal suono delle campane.

Per giungere ad una corretta individuazione dei parametri dinamici si sono seguite le seguenti fasi:

- Elaborazione di un modello preliminare agli elementi finiti, utile sia per valutare in prima approssimazione le caratteristiche modali, sia per effettuare una corretta progettazione della prova sperimentale che definisca il range di frequenze di interesse, la sollecitazione ed il numero dei sensori.
- Esecuzione della prova dinamica in campo misurando accelerazioni o velocità in determinati punti.

- Elaborazione ed individuazione dei parametri modali (frequenze proprie, forme modali e smorzamenti).
- Taratura del modello numerico tramite opportuni indici di correlazione.

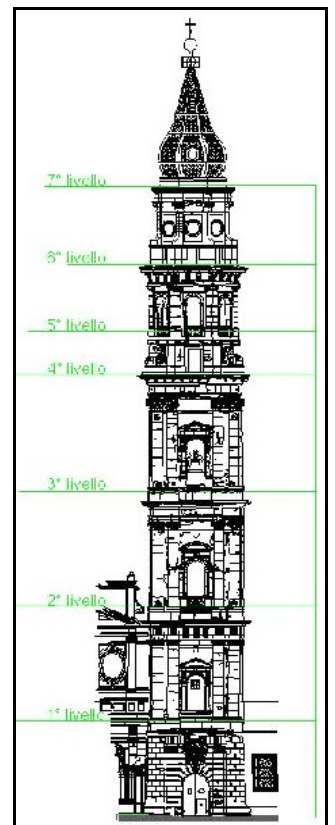
La strumentazione impiegata per la realizzazione della prova si compone di sensori accelerometrici servo-bilanciati monoassiali (Episensor ES-U2-Kinematics) e di un'unità di acquisizione dati NI PXI. L'accelerometro ha un range dinamico di 145 db ed è caratterizzato da un basso rumore di fondo. Il range di frequenza di funzionamento va dalla continua ai 200 Hz. PXI-4472 è il modulo della National Instruments disegnato appositamente per un'acquisizione dinamica con alta risoluzione in frequenza. Sono disponibili 16 canali che campionano in simultaneo. Il trigger è possibile in modalità pretrigger (acquisizione prima e dopo una certa condizione di soglia) e postrigger (dopo una certa condizione di soglia). Il processo di acquisizione comprensivo di un trattamento preliminare dei dati si è gestito con sw sviluppato in LabView. Come attuatore impulsivo si è impiegato un martello strumentato PCB della Piezotronics.

Indagine sul campanile della chiesa del Carmine a Napoli

L'indagine di caratterizzazione dinamica sul Campanile della Chiesa del Carmine all'interno del complesso omonimo (situato nella nota piazza Mercato a Napoli) è stata svolta a valle di una serie di interventi di diagnostica allo scopo di fornire delle indicazioni per una corretta taratura del modello numerico agli elementi finiti sviluppato per la progettazione di un intervento di restauro. Le finalità della prova sono dunque state rivolte principalmente all'individuazione delle frequenze fondamentali di vibrazione e delle relative forme modali. Inoltre, essendosi verificata la possibilità di lasciare la strumentazione in acquisizione nell'arco di un'intera giornata, si è presentata l'occasione per verificare eventuali variazioni del comportamento della struttura in funzione di parametri ambientali e in particolare in occasione del suono delle campane.

Esecuzione delle indagini

L'opera, pregevole dal punto di vista architettonico, è realizzata in muratura. Si possono tuttavia riconoscere due tipologie costruttive, la prima che si estende fino a quarto livello e che vede l'impiego di una muratura di tufo; la seconda dal quarto livello fino in sommità, realizzata con muratura di mattoni. Il campanile completato nel XVII secolo è stato più volte sottoposto a lavori di restauro, durante gli ultimi dei quali sono stati completamente sostituiti i solai in legno con solai in cemento armato. Sono stati inoltre effettuati lavori di consolidamento che hanno visto la realizzazione di catene. La campagna di indagine si è svolta tra il 16 e il 20 Marzo 2006 in differenti step, strumentando prima due impalcati con otto sensori per piano e poi un'intera verticale montando una o più coppie di



accelerometri per ciascun livello. I sensori sono stati vincolati sugli impalcati in prossimità degli angoli tramite delle apposite piastrine fissate con fischer. Le superfici interessate al fissaggio sono state opportunamente ripulite. Il sistema di acquisizione è stato disposto in una stanza del convento adiacente accessibile dal primo livello.

La progettazione della prova si è avvalsa essenzialmente dei riscontri forniti, in termini di modellazione F.E.M. e planimetrie, dal DAPS (Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale dell'Università Federico II di Napoli), e in base ai sopralluoghi effettuati.

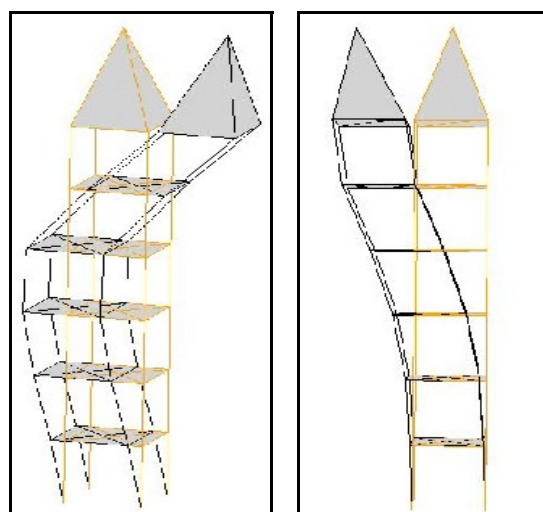
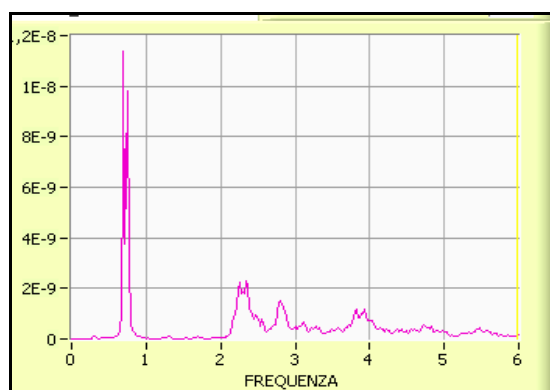
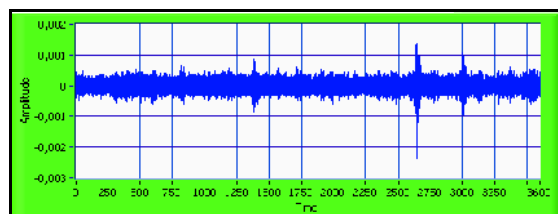
Modalità di elaborazione

L'elaborazione consiste in una prima fase di studio delle time history e analisi in frequenza valutando funzioni di auto cross spettri, coerenza, PSD (power spectral density) che permettono di ottenere indicazioni sui parametri modali. Il secondo passo prevede l'estrazione dei parametri modali tramite un software commerciale di analisi modale operativa LMS. Nel seguito si riportano delle elaborazioni effettuate.

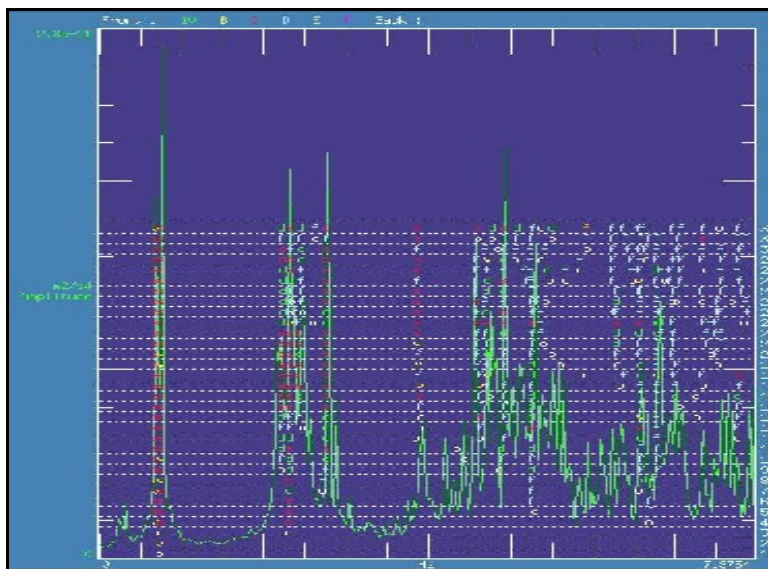
Nel caso di acquisizioni ambientali di lunga durata dell'ordine delle ore (in figura si riporta come esempio un estratto di registrazione a 200 Hz per un sensore posto al VI livello) per il calcolo delle funzioni, si adotta un approccio di media su estratti di una determinata lunghezza, combinando funzioni di windowing e concentrando l'analisi in un range dove ci si aspetta di trovare le frequenze relative forme modali di interesse.

L'analisi delle FFT per dati output only non è sufficiente per giungere ad un'accurata individuazione delle frequenze soprattutto per registrazioni ambientali; in genere si lavora con funzioni di auto e cross spettro che risentono meno degli errori di carattere statistico e dei disturbi per la presenza di picchi non legati a risonanze principali, permettendo, così, di ottenere dei risultati più accurati. Per un'individuazione più precisa delle frequenze si farà riferimento al metodo della somma dei cross-spettri, valutando in particolare la somma dei cross-spettri oltre che per tutti i sensori, anche per sensori posti lungo la stessa direzione o in uno stesso livello.

Le frequenze proprie sono molto ravvicinate ma l'individuazione non sembra problematica per le forme flessionali. Più complessa è l'individuazione del torsionale, su cui si riescono ad estrarre con chiarezza informazioni solo quando si considerano tutti i sensori disposti in entrambe le direzioni di misura. Dai valori è evidente che le eccitazioni naturali sono sufficienti per la rilevazione dei modi e che le forme modali flessionali non sono accoppiate.



L'analisi è stata poi condotta con LMS dove l'individuazione dei modi viene ottenuta attraverso dei diagrammi di stabilità nel range di frequenza di interesse, dove le s indicano i poli stabili. Si è calcolato il diagramma di stabilità con le registrazioni di tutti i canali e anche solo per i sensori che misurano nella stessa direzione; in quest'ultimo caso, poiché le frequenze proprie delle serie flessionali in x e y sono molto ravvicinate, si è considerato indicativo soltanto il valore relativo al modo torsionale. Si trovano riscontri per le prime sette forme modali in accordo con quelli individuati con l'analisi in frequenza. Le deformate modali in x ed in y sono simili.



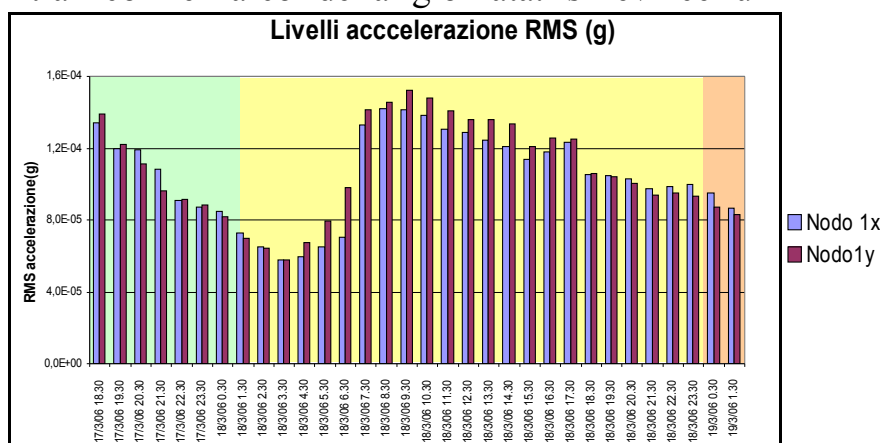
Modo	Deformata	Frequenza	Smorzamento
I	Flessionale x	0.70	1.0
II	Flessionale y	0.76	1.2
III	II Flessionale x	2.28	1.5
IV	II Flessionale y	2.35	1.7
V	Torsionale	2.77	1.6
VI	III Flessionale x	3.75	1.3
VII	III Flessionale y	3.85	1.2

Variazione dei parametri nell'arco di una giornata

Si propone una valutazione dei valori di accelerazione RMS¹ in funzione dell'orario di registrazione per verificare quanto il diverso livello di sollecitazione ambientale, causato essenzialmente dal traffico veicolare, influenzi il livello di sollecitazioni indotte sulla struttura. Si riportano dei risultati ad ogni ora di acquisizione partendo dalle 18:00 del 17/03/2006 alle 02:00 del 19/03/2006. Si badi che i valori riportati non sono dei valori "puntuali" ma ne costituiscono una media per quella ora; naturalmente i parametri di media e di trattamento preliminare dei dati sono gli stessi per ciascuna registrazione.

Poiché il funzionamento delle campane influisce notevolmente sui valori dei parametri estratti si sono eliminate quelle porzioni di segnale influenzate dal suono delle campane. Il grafico delle accelerazioni RMS presenta un analogo andamento per ciascun sensore, con aumento delle accelerazioni crescenti in funzione della quota a cui sono disposti i sensori; si propone un istogramma dei livelli RMS per l'ultimo impalcato. Quest'andamento è facilmente relazionabile all'entità del traffico nell'arco della giornata: si evince un andamento dei livelli di accelerazione, sia lungo x che lungo y, maggiore durante il giorno che tende ad aumentare soprattutto tra le ore 9:00 e le 12:00 e tra le 17:00 e le 20. La fascia notturna 2:00-5:00 è quella in cui si avvertono le minori sollecitazioni.

Inoltre si aggiungono due considerazioni: la sera e la notte del venerdì, a partire dalle ore 21:00,



¹ Il valore RMS è un parametro che fornisce un'indicazione sul valore medio del segnale.

presentano dei livelli di eccitazioni più bassi della stessa fascia oraria del sabato, mentre l'intervallo che va dalle 18:00 alle 20:00, quella del ritorno dai luoghi di lavoro, è maggiore di Venerdì. In definitiva sembra che le variazioni dei livelli RMS siano ben correlabili a quelle del traffico veicolare.

Di sicuro interesse è monitorare la variabilità le frequenze proprie nell'arco della giornata in base a parametri ambientali quali la temperatura; c'è da premettere che un'analisi di questo tipo necessita di un'elevata risoluzione in frequenza affinché siano apprezzabili variazioni che in genere sono di minima entità.

Nel grafico sono riportati i valori delle frequenze per le prime due forme modali ottenute con una risoluzione di 0,002 Hz. Nel grafico, relativo al primo modo di vibrazione, si riscontra una tendenza all'aumento della frequenza a partire dalle 8:00 fino alle 14:00 che si mantiene

regolare per qualche ora e poi comincia diminuire; inoltre in prima mattina si rileva il più basso valore di frequenza. In definitiva le frequenze proprie variano con la temperatura con un incremento nelle ore diurne; c'è da dire che queste variazioni sono molto piccole: lo scarto massimo riscontrato è stato di 0.010 Hz (con un errore di 0.002 Hz) per il I modo e di 0.012 Hz per il II, la massima variazione percentuale è stata invece dell'1.4% e dell'1.6% rispettivamente, entro i limiti riportati in letteratura.

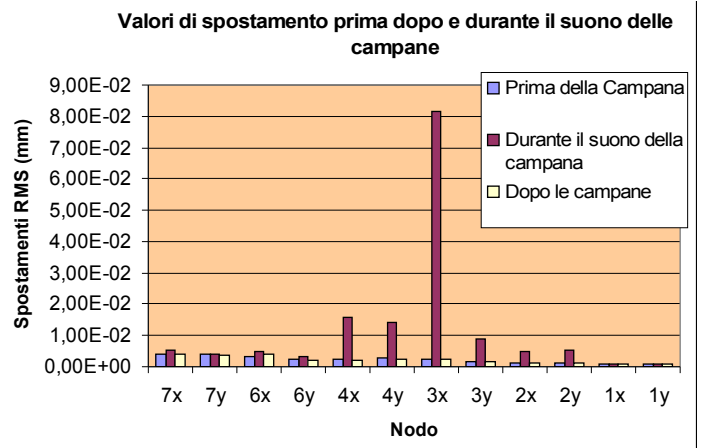
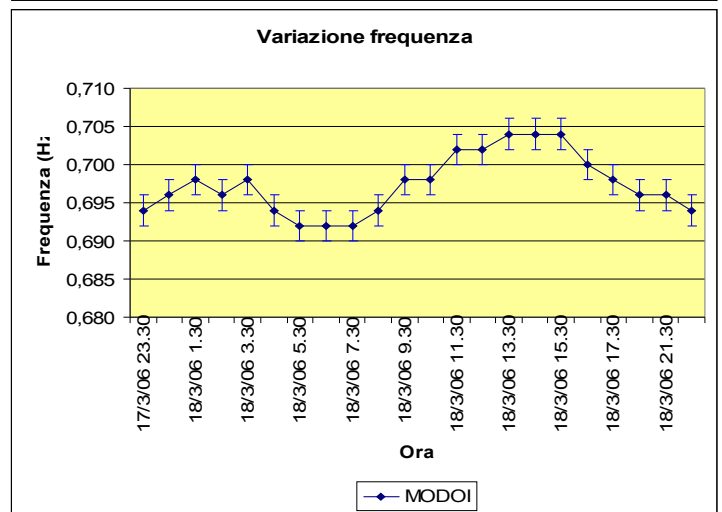
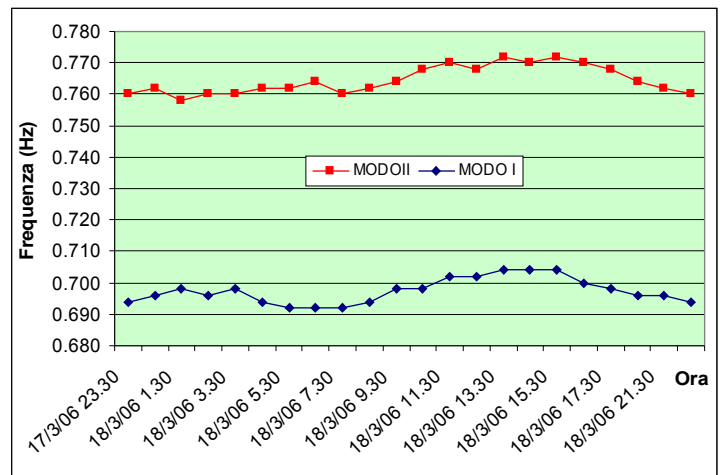
Effetti delle campane

Si sono acquisite registrazioni con le campane del livello III in funzione, allo scopo di evidenziare gli effetti delle campane sui livelli di vibrazione.

Si sono valutati i valori RMS di spostamento, ottenuti per doppia integrazione, prima dopo e durante il suono delle campane.

Dal primo istogramma pare evidente che, anche in termini di spostamento, l'effetto delle campane è avvertito soprattutto nei nodi 4 e 3 (si ricorda che le campane sono al terzo livello) prevalentemente in direzione x. E' evidente quindi che l'effetto delle Campane viene sì avvertito dall'intera struttura ma in maniera nei livelli più lontani dalle campate.

Si sono valutate differenti acquisizioni delle campane ottenendo risultati analoghi.



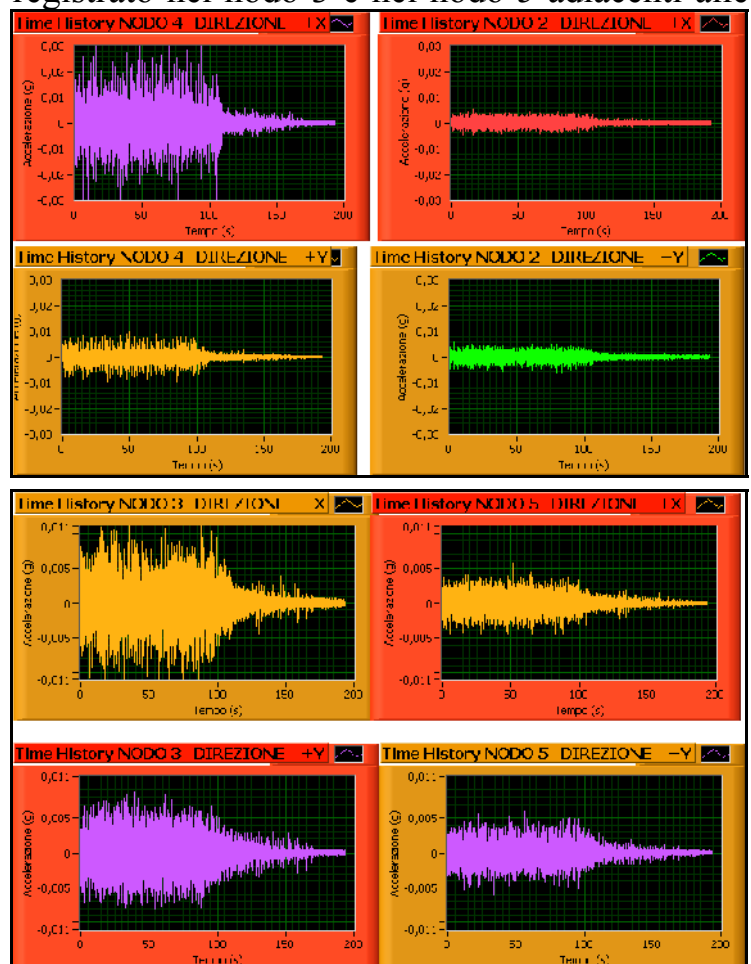
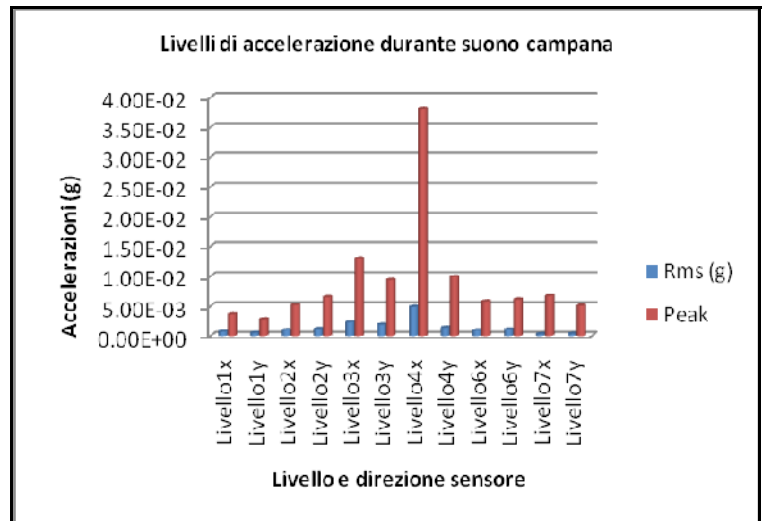
Oltre agli studi sui livelli di vibrazione, è parso interessante anche effettuare uno studio degli spettri in frequenze durante il funzionamento delle campane, allo scopo essenzialmente di verificare se le frequenze proprie della struttura fossero vicine o meno a quelle delle campane e più in generale se fosse possibile distinguere fenomeni a frequenza ben definita legati ad oscillazioni indotte dalle campane. Come esempio nel seguito si presentano le time history e l'analisi in frequenza per un segnale di circa tre minuti in cui nei primi due si è verificato il suono delle campane.

Time History

In figura sono riportati gli accelerogrammi in g registrati con frequenza di campionamento di 500 Hz, confrontando i grafici delle registrazioni relativi alle coppie di sensori disposti al nodo 4, situato al livello III, quello delle campane, e al nodo 2 del livello VI. La sollecitazione legata alle campane è molto evidente dai grafici e si evince sia un effetto locale registrato dai sensori che si trovano al livello delle campane, sia un effetto globale rilevato da tutti i sensori. Tuttavia come già riportato l'effetto locale in direzione x nel livello ospitante le campane è di gran lunga maggiore a quello rilevato negli altri livelli. Per completezza si riporta anche quanto registrato nel nodo 3 e nel nodo 5 adiacenti alle campane.

Si nota che al nodo 3 i livelli di accelerazione sono molto simili di quelli al nodo 4. Si sono confrontati i valori di accelerazioni di picco ed RMS per tutti i sensori sia per il minuto e mezzo in cui suonano le campane, sia per tutta la durata del segnale.

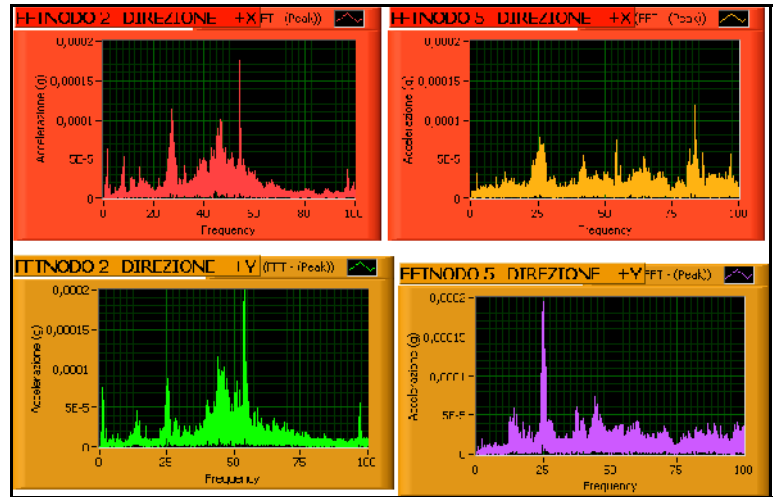
In generale l'ordine di grandezza delle accelerazioni è di frazioni di *mg* con livelli dello stesso ordine di grandezza nelle due direzioni, leggermente prevalenti lungo y. In assenza di campane, si è visto che confrontando sia il valore di picco che quello di RMS le accelerazioni aumentano man mano che si sale di livello. Quando entrano in funzione le campane invece i livelli 2, 3 e 4 sono quelli maggiormente sollecitati e negli ultimi due è la direzione x quella maggiormente sollecitata.



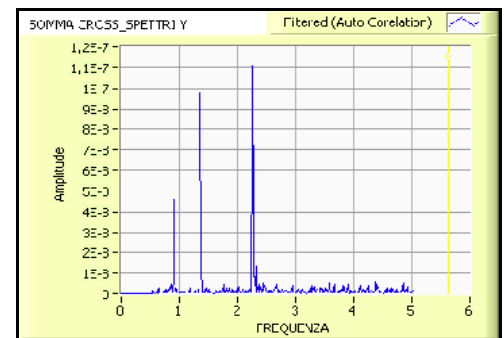
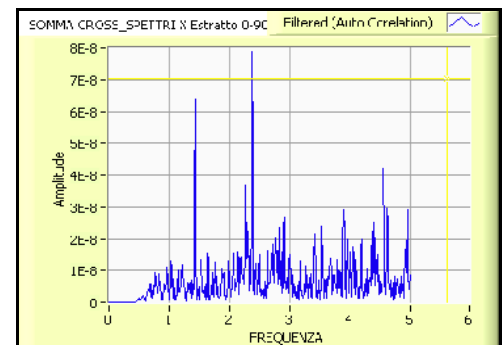
Si sottolinea che questi valori sono ricavati considerando tutte le componenti in frequenza del segnale; un'interpretazione più indicativa si otterrà con l'analisi in frequenza.

Analisi in frequenza

Si considerino le FFT dell'estratto di cui si è discusso in precedenza per i nodi 2 e 5 (livello VI); si evidenzia la presenza di sollecitazioni in intervalli di frequenze, in particolare dai 25 ai 60 Hz, che normalmente non vengono rilevate. È poi interessante valutare nel dettaglio anche eventuali effetti in frequenza determinati dalle campane a frequenze basse e quindi nella banda dove si sono rilevate le prime forme modali. Gli spettri dei sensori durante il suono delle campane sono disturbati e non permettono l'individuazione dei picchi relativi alle forme modali in maniera semplice. C'è da notare infatti che si evidenziano dei picchi non legati alla presenza dei modi propri. In questo caso da un'analisi con cross-



spettri si rileva per i sensori x un picco a 1.4 ed uno a 2.3 Hz mentre per quelli y picchi a 0.9, 1.3, 2.3 Hz. Mentre il picco a 2,3 è da associare alle seconde forme modali flessionali (che si ricorda sono molto ravvicinati in frequenza per le due direzioni), gli altri tre costituiscono picchi distinti da quelli individuati nell'analisi modale che però sono a frequenze lontane rispetto a quelle delle prime tre forme modali.



L'esperienza svolta sulla struttura in esame dal punto di vista sperimentale oltre a raggiungere con successo gli obiettivi principali previsti, ha fornito notevoli spunti di interesse per lo sviluppo e l'approfondimento della metodologia di indagine. Le prove dinamiche si sono svolte con accelerometri in diverse sessioni di prova al fine di ottenere delle indicazioni quanto più possibile approfondite sul comportamento dinamico della struttura, svolgendo prove di natura ambientale e impulsiva. Inoltre, nell'ottica di uno Structural Health Monitoring, si è tentato anche un approccio di monitoraggio dinamico lasciando la strumentazione in registrazione per una durata superiore alle 24 ore. Questo approccio ha permesso oltre che di individuare al meglio i parametri modali caratteristici delle forme modali fondamentali, anche di fornire indicazioni sulla variabilità di questi parametri in funzione di parametri ambientali di diverso tipo, traffico, temperatura, campane in funzione. Si sono infine proposti pure dei parametri di correlazione per testare la corretta taratura del modello FEM.

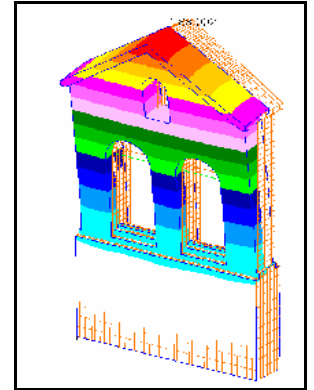
Caratterizzazione dinamica del campanile appartenente al complesso monastico di S. Chiara delle murate situato a Città di Castello (PG).

Le prove sono state svolte in seguito alla rilevazione ottica della presenza di un preoccupante quadro fessurativo localizzato soprattutto nella parte intermedia delle tre colonne che sostengono le arcate superiori e il sistema travi di sostegno – campane, le cui cause sono da ricercare nel:

- *Materiale costituente le travi di sostegno delle campane:* le vecchie travi in legno sono state sostituite con delle travi in acciaio.
- *Movimento oscillatorio delle campane:* accentuato dalla geometria dell'opera;

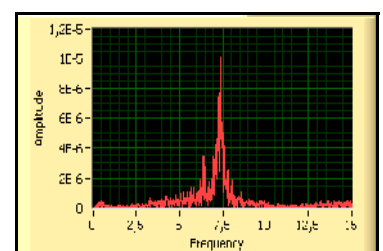
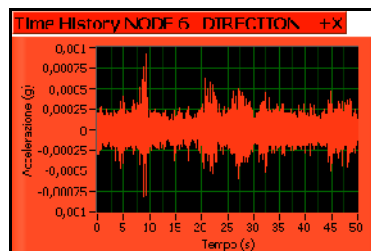
Alla luce di quanto detto, per poter meglio definire una strategia di intervento, si è deciso di effettuare delle prove di tipo dinamico con lo scopo di:

- *Riscontrare eventuali fenomeni di risonanza sulla struttura durante il movimento delle campane,* caso che risulterebbe molto gravoso e pericoloso, soprattutto per le caratteristiche peculiari dell'opera che non la rendono adatta a movimenti ciclici di tipo dinamico;
- *Ricavare i parametri dinamici dell'opera* quali frequenze fondamentali, forme modali e smorzamenti.
- *Realizzare e calibrare un modello agli elementi finiti della struttura,* con lo scopo di avere un supporto utile e necessario per qualsiasi analisi preliminare, progettuale e/o di verifica, a seconda del tipo di intervento da eseguire.

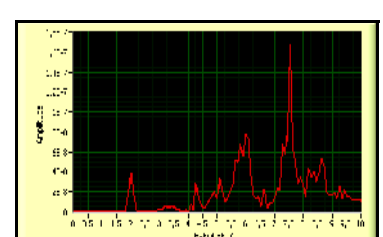
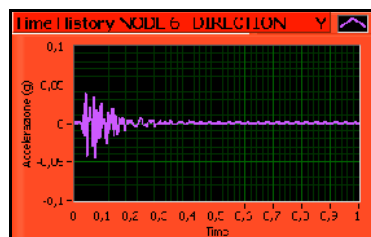


La prova è stata eseguita utilizzando come attuatori sollecitazioni ambientali (vento), sollecitazioni impulsive (martello strumentato) e sollecitazioni forzate (suono delle campane), mentre la strumentazione impiegata è stata la stessa utilizzata in occasione della prove di caratterizzazione dinamica del campanile della chiesa del Carmine a Napoli.

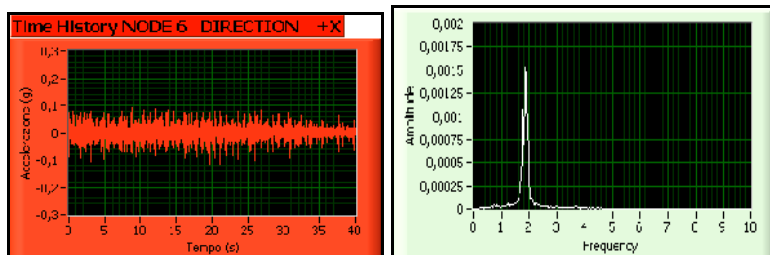
Sollecitazioni ambientali. Le analisi effettuate con questo tipo di sollecitazione non hanno prodotto buoni risultati, infatti l'effetto delle sollecitazioni ambientali evidenzia le forme modali relative all'intera struttura e non a quelle del campanile sovrastante che in quest'ottica sono da considerarsi delle forme modali locali rispetto a quelle complessive del sistema struttura-campanile.



Martello strumentato. Per eccitare quindi i modi della struttura di interesse, sono stati scelti più punti di battuta nel piano orizzontale secondo due direzioni ortogonali x e y. Le figure a lato mostrano una time history lungo la direzione x e il relativo spettro ottenuto attraverso processi di media da cui risultano facilmente individuabili dei picchi a 2.04 Hz, 6.07 Hz e 7.37 Hz. Da uno studio nei diversi punti di misura questi picchi si è ricavato che corrispondono ad un primo modo flessionale lungo x, un secondo torsionale e un terzo flessionale ma nella direzione y.



Prova con le campane. La prova con le campane risulta estremamente importante non tanto per l'estrazione dei parametri dinamici della struttura bensì per la valutazione delle accelerazioni indotte alla struttura e soprattutto per la valutazioni di



eventuali effetti di risonanza. A lato sono riportati un segnale acquisito e la FFT relativa. Quello che si nota è una riduzione del picco in frequenze da 2.04 Hz circa del campanile, a 1.8 Hz circa dell'insieme campane – campanile. Questo fenomeno è dovuto in parte al fatto che l'eccitazione avviene ad un valore prossimo a quello di risonanza della struttura, e in parte a fenomeni di non linearità come mostrano le lesioni presenti sul campanile. Si osserva poi un incremento delle accelerazioni di circa 10 volte superiore rispetto al caso del martello strumentato. È inoltre da osservare come nel caso specifico il suono delle campane rende identificabile un solo picco in frequenza contrariamente a quanto accadeva sul campanile della chiesa del Carmine a causa della differente massa delle due strutture.

Dalle analisi emerge che particolare preoccupazione desta il movimento delle campane, la cui frequenza propria è particolarmente vicina a quella del primo modo della struttura. Inoltre la riduzione della frequenza di oscillazione che si osserva con le campane in movimento dimostra chiaramente la presenza di effetti di degrado molto evidenti che danno luogo a fenomeni di non linearità. A valle del lavoro svolto sono state avanzate delle ipotesi di interventi mirati a:

- *Allontanare la frequenza di vibrazione della struttura da quelle proprie delle campane;*
- *Ridurre la trasmissione delle alte frequenze agendo sulle travi di sostegno;*
- *Ripristinare il quadro fessurativo e attuare un piano di recupero dell'intera opera;*
- *Ridurre la forzante che nasce per effetto del moto oscillatorio delle campane;*
- *Ridurre l'ampiezza delle oscillazioni del campanile rispetto il complesso sottostante.*

È stato inoltre proposto la verifica del il funzionamento dei motori che azionano il moto delle campane, che non si esclude possano incidere negativamente sulla dinamica della struttura del campanile.

Differenti sono poi le metodologie di intervento praticabili per raggiungere gli obiettivi proposti, ma per la loro realizzazione effettiva si dovrà tener inevitabilmente conto dei vincoli a cui l'opera è soggetta.

Conclusioni

Le esperienze mostrate hanno evidenziato come le indagini dinamiche possano fornire delle valide indicazioni per la realizzazione di interventi finalizzati al recupero e alla conservazione di questo tipo di strutture, individuando eventuali ammaloramenti e determinandone le cause. Tali indicazioni possono essere ricavate direttamente dai risultati delle prove oppure successivamente attraverso un modello numerico agli elementi finiti della struttura calibrato in base ai risultati delle indagini sperimentali.

Generalmente vengono seguiti entrambi gli approcci: il modello numerico è fondamentale per effettuare delle previsioni, la prova sperimentale fornisce indicazioni circa lo stato di salute attuale della struttura, soprattutto se le misure vengono effettuate con un cadenza regolare (monitoraggio).

Bibliografia

1. R.J. ALLEMANG & D.L. BROWN (1983). "Correlation coefficient for modal vector analysis", *Proc. 1st Int. Conf. Modal Anal.*, 110-116.
2. J.S. BENDAT & A.G. PIERSOL (1993). "Engineering applications of correlation and spectral analysis", 2nd Ed., Wiley Interscience.
3. B.M. DOUGLAS & W.H. REID (1982). "Dynamic tests and system identification of bridges", *Journal Struct. Div.*, ASCE, 108, 2295-2312.
4. C. GENTILE (2001). "Full-scale testing and system identification of a steel-trussed bridge", in *Structural Engineering Mechanics and Computation* (A. Zingoni Ed.), Elsevier, 591-598.
5. C. GENTILE & F. MARTINEZ Y CABRERA (1997). "Dynamic investigation of a repaired cable-stayed bridge", *Earthquake Engg. Struct. Dyn.* 26, 41-59.
6. C. GENTILE, F. MARTINEZ Y CABRERA & A. SAISI (1998). "Dynamic characteristics of a curved cable stayed-bridge: computation and tests", *Studi & Ricerche* 19, 213-239.
7. C. GENTILE & F. MARTINEZ Y CABRERA (2001). "Dynamic assessment of a curved cable-stayed bridge at the Malpensa 2000 airport (Milan, Italy)", *Struct. Engg. Int.* 2001/01, 52-58.
8. R. GENTILE & A. VALSECCHI (2002). "I ponti gemelli del nuovo raccordo tra l'attraversamento di Lecco e la Valsassina", *Atti Giornate AICAP 2002*.
9. N.A.J. LIEVEN & D.J. EWINS (1988). "Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)", *Proc. 6th Int. Conf. Modal Anal.*, 690-695.
10. N.M.M. MAYA & J.M.M. SILVA Eds. (1997). "Theoretical and experimental modal analysis", Research Studies Press Ltd.
11. T.P. WATERS (1995). "Finite element model updating using measured frequency response functions", Ph.D. Thesis, Department of Aerospace Engg., University of Bristol.
12. P.D. WELCH (1967). "The use of Fast Fourier Transform for the estimation of Power Spectra: a method based on time averaging over short modified periodograms", *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 15, 70-73.
13. LMS CADA-X (1997) "Running Modes Manual".
14. M. ABDELGHAN, M. BASSEVILLE and A. BENVENISTE (1997) "In-operation damage monitoring and diagnostics of vibrating structures, with applications to structures and rotating machinery." *Proceedings of IMAC X, Orlando*.
15. G. H. JAMES III, T. G. CARNE and J. P. LAUFER. (1995) "The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures". *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis* 10(4), 260-277.
16. L. HERMANS and H. VAN DERAUWERAER (1997) "On the use of auto- and cross-correlation functions to extract modal parameters from output-only data" *Proceedings of the 6th International conference on Recent Advances in Structural Dynamics*.
17. C. MALERBA P.G. (a cura di) (1996), *Monitoraggio delle strutture dell'ingegneria civile*, D. Flaccovio, 1997, CISM, UDINE.
18. P. ANDERSEN, P. H. KIRKEGAARD, R. BRINCKER, (1996) "System Identification of Civil Engineering Structures Using State Space and ARMAV Models" *Proceedings of ISMA 21 Conference*, "Noise and Vibration Engineerin", Leuven (B).