

Il metodo dinamico per la verifica sismica di edifici esistenti: il caso dell'ospedale "Cristo Re" in Roma

Cristiano Algeri *, Paolo Panzeri *, Giuseppe Rossi **

Parole chiave: Verifica sismica, Edifici esistenti, Prove dinamiche

Key-words: Seismic assessment, Existent buildings, Dynamic tests

SOMMARIO - La verifica sismica di edifici esistenti può essere convenientemente eseguita attraverso il metodo dinamico basato sulla messa a punto di un modello di calcolo affidabile validato attraverso la sperimentazione dinamica della struttura. Viene presentato il caso di un importante edificio in muratura facente parte di un complesso ospedaliero in Roma, evidenziando come le sperimentazioni siano state sviluppate senza condizionare le funzionalità dell'edificio mantenuto sempre in esercizio durante le verifiche.

SUMMARY – The seismic response of existent buildings can be conveniently performed using dynamic methods. This kind of methodology implies a reliable calculation pattern which is validated by dynamic tests on the structure. In this paper a specific analysis of a strategic masonry building - a civil hospital in Rome – is proposed. All the experimental tests were carried out on the structure without altering the functionality of the building, which was always in full operation during the tests.

1. Introduzione

Analisi e valutazioni del comportamento strutturale delle opere civili possono essere efficacemente sviluppate con l'ausilio della sperimentazione dinamica che consente di caratterizzare frequenze proprie, forme dei modi di vibrare e capacità di dissipare l'energia della struttura.

Il metodo dinamico applicato alla verifica sismica degli edifici esistenti consiste proprio nella caratterizzazione sperimentale del comportamento dinamico della struttura per la definizione e messa a punto di un'affidabile modellazione numerica, da utilizzarsi per valutare la capacità dell'opera a sopportare l'azione del terremoto.

In considerazione dell'elevato grado di precisione richiesto dalla verifica sismica di opere importanti ed articolate quali sono gli edifici ospedalieri, il metodo suggerisce tipicamente l'impiego di idonei attuatori meccanici o idraulici (vibroline).

Tale sperimentazione risulta peraltro in linea con il raggiungimento dell'auspicato livello di conoscenza accurato (LC3) suggerito dall'O.P.C.M. 3431/2005, che può quindi essere ottenuto limitando al minimo l'interazione con le funzionalità dell'edificio ospedaliero mantenuto in esercizio durante le indagini.

* P&P Consulting Engineers, Bergamo, Italia

** Planning Workshop, Studio associato Ing. G.Rossi & Arch. Vanessa Zertanna Roma, Lagonegro - Italia

2. Il metodo dinamico

Le prove di caratterizzazione dinamica vengono oggi considerate tra le tecniche di indagine più complete ed efficaci per la comprensione degli aspetti che caratterizzano il comportamento al sisma di una struttura, e questo anche e soprattutto con riferimento a grandi strutture, quali importanti fabbricati, ponti e viadotti ed infrastrutture ferroviarie. Nel caso poi di strutture esistenti, le prove dinamiche rappresentano lo strumento in grado di identificare al meglio il reale comportamento nei confronti delle eccitazioni imposte arrecando minime interferenze nei confronti delle attività che abitualmente si svolgono all'interno dell'edificio. Sotto questo profilo è risultata particolarmente interessante la specifica applicazione di seguito descritta che ha dimostrato operativamente la fattibilità dell'esecuzione di prove dinamiche con vibrodina su edifici ospedalieri in attività con presenza di degenti e sale operatorie.

La caratterizzazione ottenuta attraverso la valutazione dell'effettivo comportamento dinamico-sperimentale dell'opera e quindi l'identificazione del sistema può consentire di definire e valutare, sulla base dei riscontri sperimentali (confronto con i parametri valutati per via numerica), la modellazione numerica sviluppata per l'analisi sismica della struttura, e quindi di identificare un adeguato modello numerico idoneo a rappresentare la realtà strutturale del manufatto.

In particolare, in tema di confronto tra dati sperimentali e valori numerici, può non risultare sufficiente limitarsi all'analisi delle frequenze proprie. Infatti, specie nel caso in cui si intenda accertare la presenza di situazioni puntuali, occorre curare anche la corrispondenza tra le forme modali, essendo noto che gli spostamenti modali risultano (rispetto alle frequenze proprie) maggiormente legati al comportamento locale e quindi, in linea di principio, più adatti alla valutazione di singolarità localizzate. Infatti quando sulla struttura sia previsto un intervento di recupero e/o consolidamento, il rilievo del comportamento della struttura, effettuato sia prima che dopo il consolidamento, permette l'identificazione degli effetti indotti dal rinforzo e la formulazione di un giudizio di bontà dell'intervento mediante il confronto diretto tra le risposte strutturali dinamiche registrate.

Una volta individuato il modello numerico messo a punto sulla base dei risultati sperimentali, successive analisi possono consentire un'adeguata valutazione delle sollecitazioni degli elementi costituenti la struttura, per la verifica delle effettive condizioni del manufatto sottoposto al sisma di progetto.

In aderenza all'O.P.C.M. 3431/2005 l'analisi dinamica modale, associata allo spettro di risposta di progetto, è da considerarsi il metodo normale nella definizione delle sollecitazioni di progetto e va applicata al modello tridimensionale dell'edificio. I risultati andranno comunque e sempre interpretati e valutati tenendo conto dell'effettivo campo di applicazione del metodo dinamico lineare, soprattutto per le verifiche degli edifici in muratura per i quali l'analisi modale risulta generalmente piuttosto conservativa.

3. L'ospedale "Cristo Re" in Roma

Di seguito viene illustrato un recente caso di studio condotto sulla struttura ospedaliera "Cristo Re" in comune di Roma condotta mediante l'applicazione dei criteri e delle tecniche precedentemente descritte e che rappresenta aspetti particolarmente significativi.

3.1 La struttura oggetto di prova e le indagini eseguite

Il fabbricato costituito da murature portanti tufacee e solai in laterocemento presenta una pianta piuttosto regolare, composta da una porzione rettilinea racchiusa da due appendici laterali e da un corpo centrale anch'esso con sviluppo longitudinale perpendicolare al corpo principale. L'edificio si sviluppa su quattro livelli fuori terra più un quinto livello, in copertura, costituito da una struttura

intelaiata in cemento armato adibita ad alloggio e locali di servizio. All'estremità di una appendice laterale il fabbricato risulta collegato con un altro edificio di analoghe dimensioni.

Le prove dinamiche sono state integrate da indagini finalizzate all'identificazione dei particolari costruttivi strutturali ed alla determinazione del grado di consistenza e delle caratteristiche di resistenza dei materiali dei principali elementi portanti. L'insieme delle sperimentazioni puntuali e delle prove di carico dinamiche è stato studiato per conseguire un livello di conoscenza accurato ai sensi dell'O.P.C.M. 3431/2005 e quindi in ottemperanza anche al D.M. 14 settembre 2005 "Norme Tecniche per le costruzioni".



Vista del corpo di fabbrica oggetto di verifica



Dettaglio di installazione della vibrodina sul piano di copertura

Al fine di cogliere al meglio il reale comportamento dell'opera sono state eseguite le indagini sotto riportate, elencate in ordine di esecuzione temporale e per crescente grado di invasività:

- Ricostruzione dello schema strutturale mediante rilievo di dettaglio degli elementi portanti;
- Prove soniche per valutare il grado di consistenza della muratura;
- Test pacometrici per l'individuazione dei ferri d'armatura nei travetti dei solai laterocementizi;
- Endoscopie eseguite per meglio valutare alcuni dettagli e connessioni strutturali;
- Sondaggi orizzontali nella muratura ed ispezione in foro con sonda televisiva;
- Esecuzione di martinetti piatti singoli e doppi per una caratterizzazione dello stato di sforzo locale e della muratura costituente.

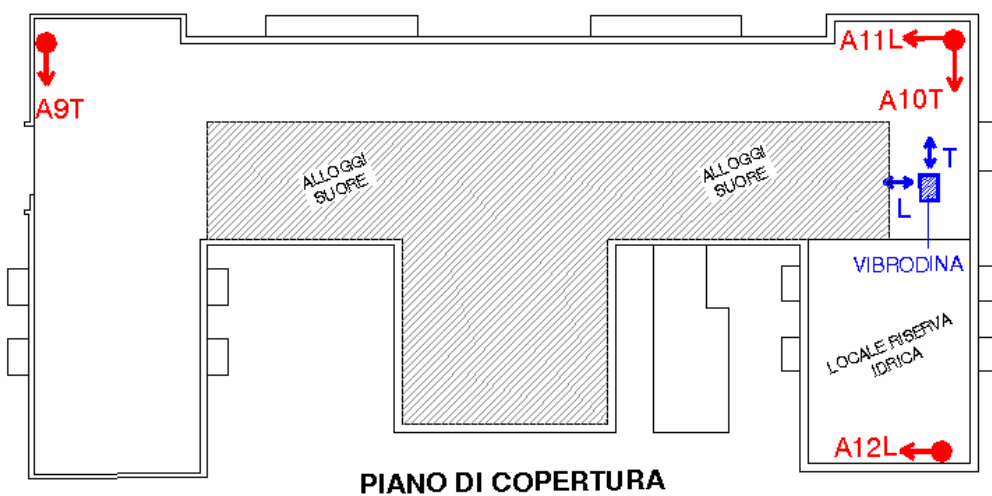
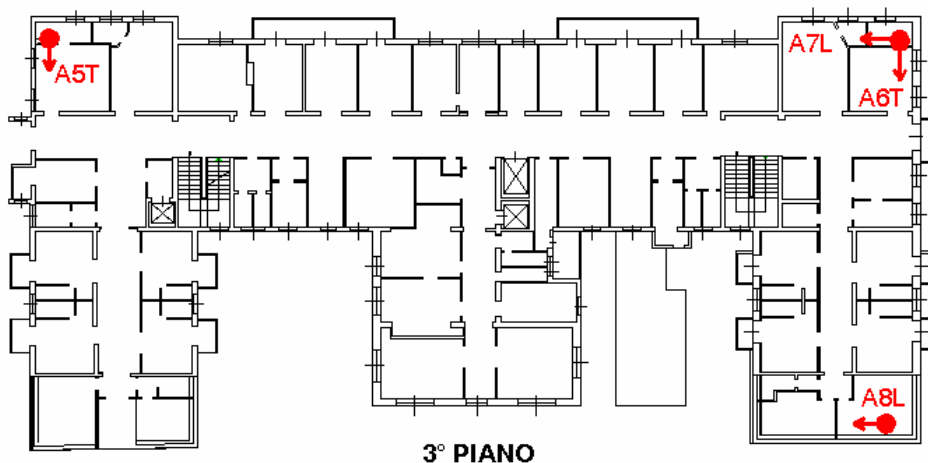
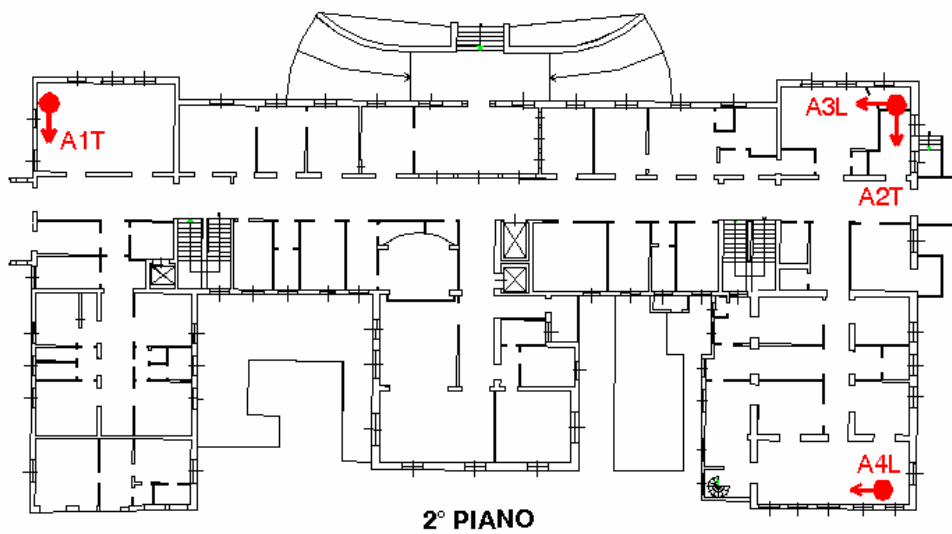
Successivamente a questa fase di indagini contraddistinte da diversi gradi di invasività è stata predisposta la prova di carico con vibrodina per la caratterizzazione del comportamento dinamico dell'opera.

Lo scopo delle prove dinamiche è consistito nella raccolta dei dati sperimentali necessari per affinare la modellazione numerica della struttura attraverso anche la definizione dei gradi di vincolo imposti dal corpo di fabbrica attiguo, arrivando così a disporre di un modello FEM "tarato" utile per le successive verifiche statiche e sismiche. Allo stesso modo l'esecuzione delle prove con vibrodina ha consentito di mettere in evidenza i movimenti dinamici del fabbricato e quindi di verificare la regolarità di comportamento della struttura. La conformazione delle strutture e le finalità delle indagini dinamiche hanno evidentemente condizionato le modalità di eccitazione dell'edificio nonché le caratteristiche della rete di sensori di misura utilizzata per cogliere la risposta del fabbricato all'eccitazione dinamica impressa.

In particolare e soprattutto per una completa caratterizzazione degli effetti dei vincoli fisici con i corpi attigui, si è fatto ricorso a due diverse postazioni di carico e a più modalità di eccitazione avendo sempre sollecitato la struttura nel piano secondo le due direzioni ortogonali principali.

La vibrodina ($F_{\max} = 20 \text{ kN} - f_{\max} = 50 \text{ Hz}$) è stata vincolata rigidamente al solaio di copertura mediante tassellatura in posizioni in grado di assicurare una corretta ripartizione del peso della macchina ed un'adeguata distribuzione dei carichi dinamici sinusoidali applicati. E' stato indagato il campo di frequenze tra 0 e 15 Hz.

Per misurare la risposta della struttura sono stati impiegati 12 accelerometri, distribuiti in ragione di 4 sensori su tre piani, posti a pavimento in direzione orizzontale (L longitudinale e T trasversale) - riportati nello schema seguente - caratterizzati da elevata sensibilità e risoluzione nonché adatti per operare nel campo di frequenze di indagine.



Per l'elaborazione dei segnali sono stati utilizzati applicativi appositamente sviluppati su codici MathCad e MatLab in ambiente Windows.

I picchi di amplificazione strutturale presenti nei moduli delle funzioni di trasferimento forniscono la frequenza propria dei modi di vibrare. La deformata modale di ogni singolo modo di vibrare viene valutata sulla base delle ampiezze relative dei diversi picchi alle diverse frequenze di risonanza mettendo in conto le corrispondenti differenze di fase. Lo smorzamento di ogni singolo modo viene valutato con il metodo della «radice quadrata di 2».

Si osservi che l'analisi modale trova una corretta base di partenza nella soddisfacente qualità delle funzioni di trasferimento, sia per la buona risoluzione in frequenza adottata in relazione al valore dei coefficienti di smorzamento evidenziati dalla struttura in esame, sia per avere operato con adeguati livelli vibrazionali in relazione alla sensibilità dei trasduttori di misura impiegati.

Nel campo di frequenza esaminato sono stati individuati ed analizzati i diversi modi principali di vibrare evidenziati dall'edificio oggetto di indagine, utilizzando per l'interpretazione del comportamento dinamico della struttura i risultati forniti dalle due diverse modalità di eccitazione applicate in L ed in T.

Per l'analisi del comportamento dinamico dell'opera nel piano orizzontale è stato fatto riferimento alle risposte della struttura per eccitazione longitudinale e per eccitazione trasversale, che hanno consentito di individuare le amplificazioni strutturali dell'edificio e di esaminare i movimenti flessionali nel piano dei solai ed i movimenti torsionali attorno all'asse verticale.

In particolare per la valutazione dei parametri modali (frequenze proprie, forme modali e smorzamenti percentuali rispetto al valore critico) dei primi modi di vibrare nel campo di frequenza esaminato, è stato fatto riferimento alle tre componenti di moto rigido attraverso le quali è possibile descrivere i movimenti dei diversi solai nel proprio piano.

È evidente che tale procedura è da ritenersi corretta solo nella misura in cui effettivamente i differenti solai sono in grado di costituire diaframmi orizzontali rigidi per sforzi giacenti nel proprio piano. Pertanto, e prima di procedere all'analisi modale facendo riferimento alle componenti di moto rigido, è stata verificata l'attendibilità dell'ipotesi di partenza di diaframma rigido.

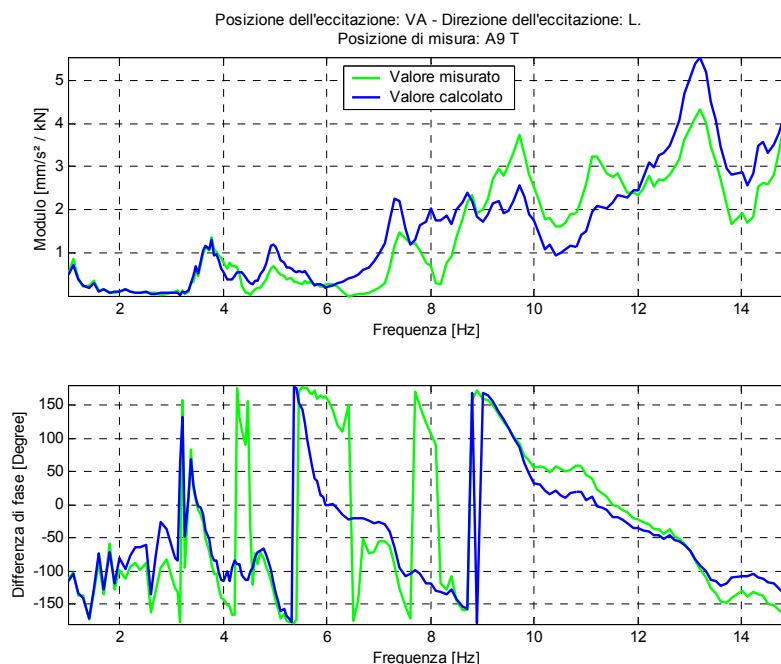
La verifica dell'attendibilità dell'ipotesi è stata impostata sull'individuazione e quantificazione delle discrepanze tra le risposte sperimentali rilevate dai differenti punti di misura per entrambe le eccitazioni applicate, ed i movimenti "teorici" calcolati analiticamente nei medesimi punti strumentati.

Tali movimenti sono stati univocamente determinati a partire dalle componenti di moto rigido, di volta in volta associabili agli orizzontamenti stessi mediante le relazioni che legano i moti di punti diversi di un medesimo corpo rigido. Si osservi infatti che i movimenti di ciascun orizzontamento strumentato sono stati rilevati in tre differenti posizioni per un totale di quattro componenti direzionali misurate, superiori quindi alle tre strettamente necessarie per una valutazione di tipo deterministico. L'impiego di un numero di rilevazioni sperimentali sovrabbondanti ha, quindi, consentito di impostare un'analisi di tipo statistico per la valutazione – ad ogni solaio – delle tre componenti di moto rigido che meglio approssimano i movimenti reali secondo il criterio del minimo errore quadratico.

È ovviamente appena il caso di osservare che nella sola ipotesi di perfetto comportamento rigido dell'orizzontamento, i movimenti "teorici" calcolati per via analitica nei punti strumentati a partire da quelli rigidi di "best fitting" vengono a coincidere esattamente con le misure sperimentali di origine.

Le componenti di moto rigido (gradi di libertà) assunte nella presente analisi si identificano con le traslazioni L e T e la rotazione θ_V attorno all'asse verticale V del "centro geometrico" dei solai dei diversi corpi di fabbrica. Dal punto di vista analitico i calcoli effettuati sono consistiti

nell'applicazione di relazioni matriciali per il calcolo dei moti rigidi di "best fitting" e quindi per la valutazione analitica dei movimenti teorici nei punti strumentati (valore calcolato).



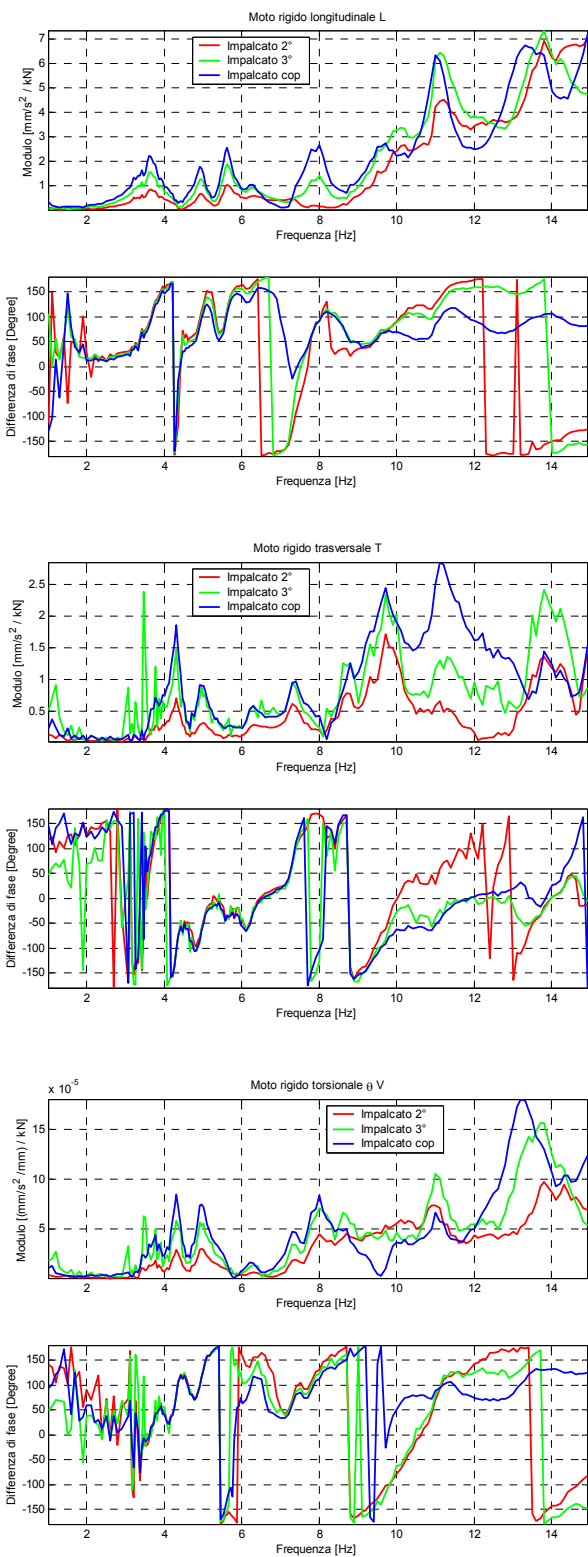
***Sovrapposizione tra misure teoriche calcolate e misure sperimentali
 Eccitazione in direzione L nel campo di frequenza 1,0-15,0 Hz***

L'esame delle curve di sovrapposizione tra misure sperimentali e movimenti teorici calcolati ha messo in evidenza un comportamento che può nel complesso essere considerato rigido nel campo di frequenza compreso fra 1,0 Hz e circa 5,0÷6,0 Hz. In generale uno scostamento tra curve "misurate" e curve "calcolate" viene infatti segnalato a partire dai 5,0÷6,0 Hz circa e risulta più o meno accentuato in funzione dei picchi di amplificazione.

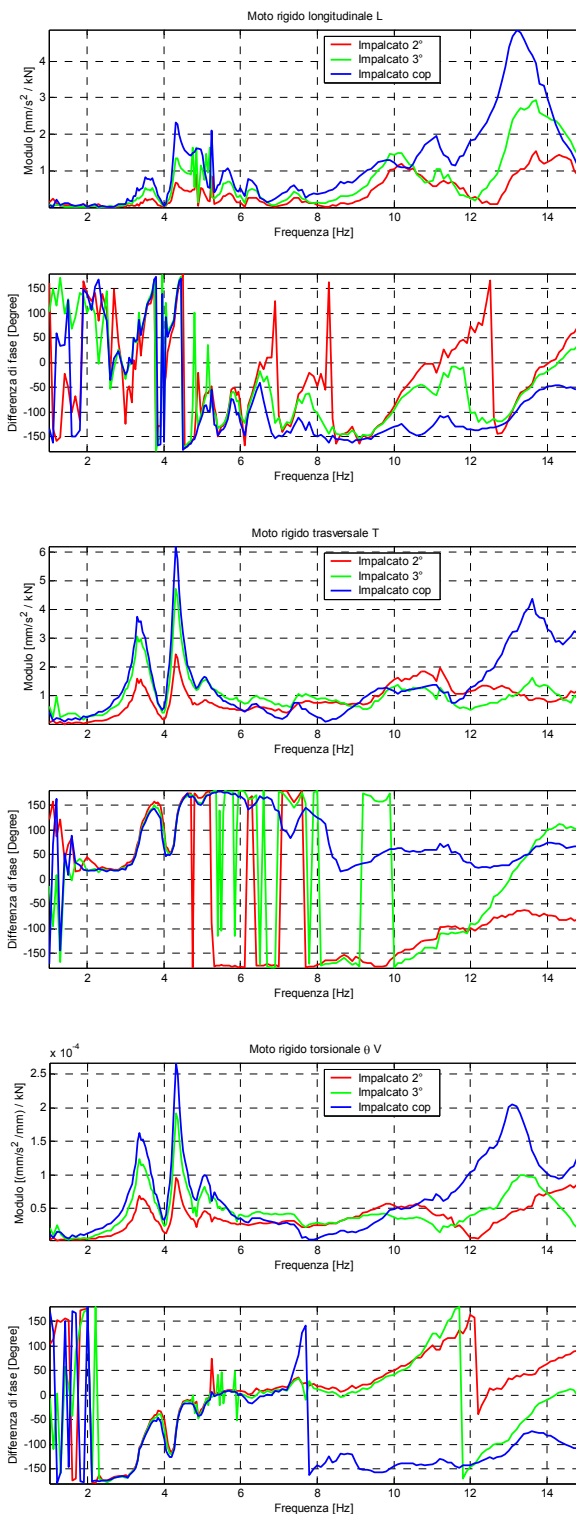
Il fatto che il comportamento tendenzialmente rigido possa essere considerato tale solo fino a circa 5,0÷6,0 Hz è presumibilmente anche indice di un grado di connessione non ottimale tra murature portanti verticali ortogonali e tra murature verticali ed orizzontamenti, con possibile influenza anche della geometria che in pianta presenta sagoma ad "E".

Per contro, la natura dei modi principali fino a 5,0÷6,0 Hz, caratterizzata da coefficienti di partecipazione sismica e relative masse partecipanti elevate in tale campo di frequenza, consente di ritenere che le sopraccitate carenze di connessioni non abbiano in effetti modo di condizionare sensibilmente il comportamento sismico della struttura.

Le successive figure illustrano le funzioni di trasferimento sperimentali relative ai moti rigidi di piano per i diversi solai strumentati.



Eccitazione in direzione L nel campo di frequenza 1,0-15,0 Hz
Funzioni di trasferimento relative alle traslazioni rigide in L e T ed alle rotazioni θ_V per tutti i solai strumentati



Eccitazione in direzione T nel campo di frequenza 1,0-15,0 Hz
Funzioni di trasferimento relative alle traslazioni rigide in X e Y ed alle rotazioni θ_V per tutti i solai strumentati

Nella successiva tabella, e nelle tavole proposte in seguito vengono riportati i valori di frequenza propria e di smorzamento, ed una descrizione di sintesi della deformata modale dei primi modi fondamentali di vibrare individuati nel campo di frequenza ove è stato ritenuto corretto fare riferimento ai moti rigidi di piano.

Modo	Frequenza	Smorzamento	Deformata
N°. 1	3,30 Hz	5,3 %	Primo modo proprio di vibrare in direzione trasversale. Caratterizzato da moto prevalente in T con presenza di una importante componente torsionale θ_v . Presenza di movimenti tutti in fase alle diverse quote strumentate senza inversioni di segno. Il modo risulta evidenziato prevalentemente per eccitazione in direzione T.
N°. 2	3,60 Hz	4,1 %	Primo modo proprio di vibrare in direzione longitudinale. Caratterizzato da moto prevalente in L. Presenza di movimenti tutti in fase alle diverse quote strumentate senza inversioni di segno. Il modo risulta evidenziato prevalentemente per eccitazione in direzione L.
N°. 3	4,90 Hz	2,2 %	Primo modo proprio di vibrare caratterizzato da moto con prevalente componente torsionale θ_v . Presenza di movimenti tutti in fase alle diverse quote strumentate senza inversioni di segno. Il modo risulta evidenziato prevalentemente per eccitazione in direzione L.

Risultati dell'analisi modale sperimentale

Le deformate dei modi di vibrare, soprattutto quelle caratterizzate da componente in T particolarmente significativa, risentono in modo sostanziale della connessione/collegamento con l'edificio ad esso ortogonale.

Le curve sperimentali evidenziano inoltre a frequenze più elevate altri picchi di amplificazione la cui deformata modale risulta piuttosto articolata e non descrivibile con completezza attraverso la rete di sensori di misura posizionati ai diversi piani strumentati, anche e soprattutto alla luce dell'evidenziato scostamento dal comportamento rigido di piano.

3.2 Modello FEM e verifiche sismiche

Sulla base dei dati forniti dalle evidenze sperimentali e del rilievo della struttura, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti tridimensionale dell'edificio in grado di riprodurre la risposta sperimentale e tale da consentire una corretta previsione della risposta del manufatto al sisma. Gli elementi resistenti sono riconducibili in maniera sostanziale a setti/pareti in muratura di spessore variabile. Il materiale impiegato risulta essere prevalentemente tufo vulcanico di media qualità in combinazione con malta ottenuta da impasti di pozzolana ed inerti di medie dimensioni che è plausibile ritenere, in accordo con quanto prescritto dal D.M. 20 Novembre 1987, appartenente alla classe M4.

In altezza l'edificio si sviluppa per quattro livelli ad interpiano variabile con orizzontamenti realizzati mediante solai laterocementizi in grado di fornire una certa rigidità di piano e la copertura presenta un terrazzo piano praticabile anch'esso costituito in laterocemento.

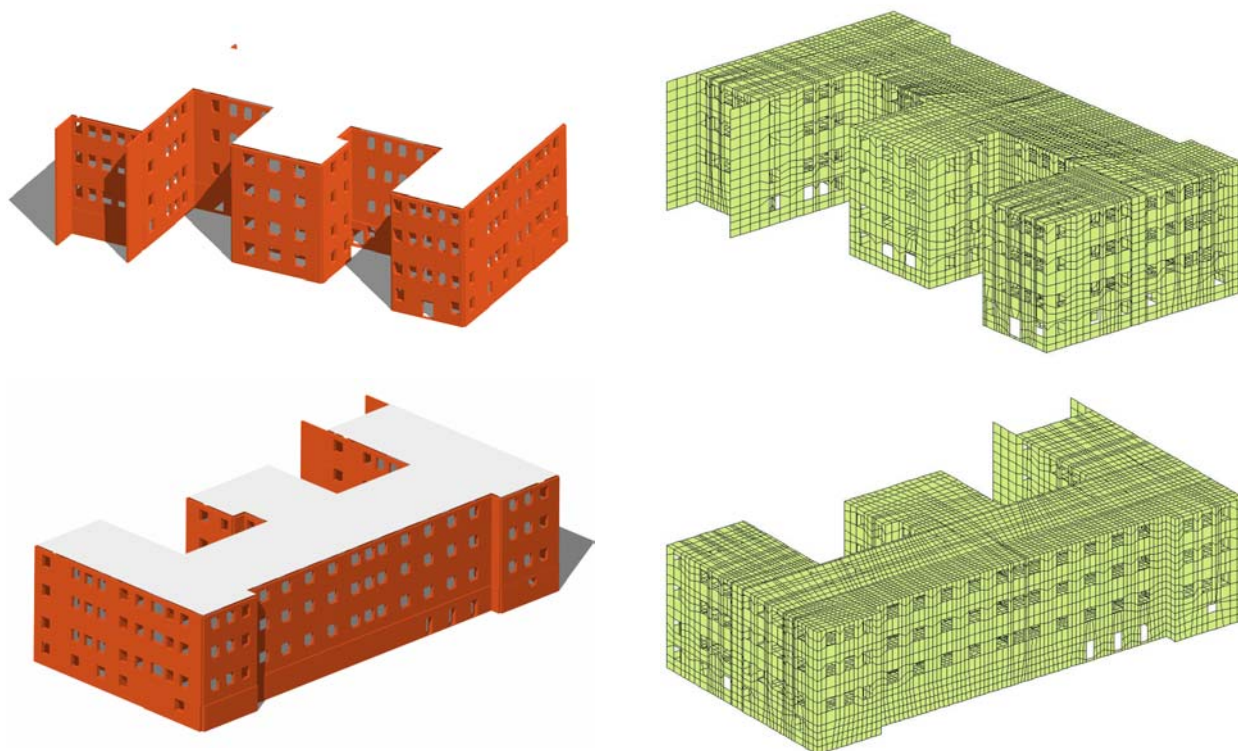
La modellazione si è sviluppata attraverso le seguenti principali fasi:

- definizione degli elementi resistenti sulla scorta del rilievo strutturale;

- definizione dell'asse baricentrico dei singoli elementi resistenti;
- definizione della geometria delle singole pareti (finestre, porte, presenza di cordoli);
- definizione delle caratteristiche meccaniche della muratura sulla scorta delle evidenze sperimentali ottenute mediante prove con martinetti piatti doppi (modulo elastico e resistenza a compressione);
- ipotesi di solai infinitamente rigidi (in grado di ripartire le forze sismiche in ragione delle diverse rigidzze presenti nei maschi murari);
- introduzione di opportuni elementi utili al fine di ricreare condizioni di vincolo simili a quelle esercitate dall'edificio attiguo;
- definizione dei carichi permanenti, accidentali e lineari ad azione verticale (serbatoi di riserva idrica e struttura degli alloggi per le suore);
- definizione delle sollecitazioni sismiche mediante spettro di risposta definito sulla scorta delle peculiarità del luogo e della destinazione d'uso (zona sismica, categoria di suolo, fattore di importanza, livello di conoscenza-confidenza);
- combinazione dei carichi verticali con i carichi sismici ad azione orizzontale.

La modellazione dell'edificio è stata condotta impiegando elementi shell sia per le pareti verticali che per le piastre di piano. I vincoli alla base sono stati supposti ad incastro perfetto. Una volta definiti i suddetti punti è stato possibile eseguire un'analisi dinamica modale al fine di cogliere il comportamento dinamico della struttura.

Di seguito vengono riportate alcune immagini del modello e della mesh realizzata.



Modello FEM del corpo di fabbrica

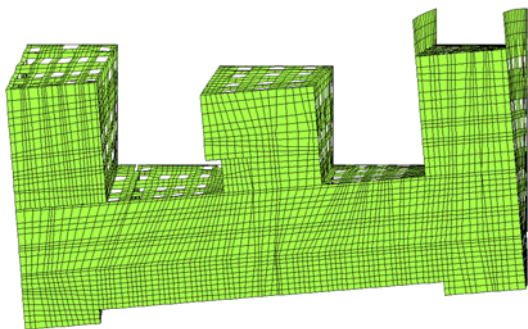
Il modello ad elementi finiti è stato sottoposto ad una procedura di identificazione che ha consentito l'affinamento della discretizzazione FEM operando anche sui vincoli/collegamenti con il fabbricato

attiguo all'edificio stesso, assumendo come parametri di controllo le frequenze proprie e le forme modali dei primi modi di vibrare misurate sperimentalmente.

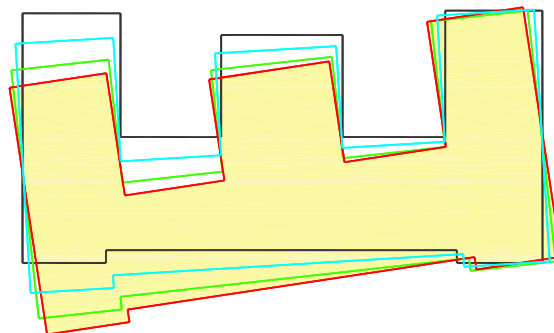
Di seguito vengono graficamente rappresentate le deformate numeriche che caratterizzano i primi tre modi di vibrare affiancate dai risultati forniti dalle prove con vibrodina come evidenziato nella successiva tabella. Il confronto tra le frequenze naturali ricavate dall'analisi delle registrazioni accelerometriche e le frequenze proprie ottenute dalla simulazione agli elementi finiti, mostra un soddisfacente accordo.

Modo di vibrare	Frequenza numerica	Frequenza sperimentale	Scostamento %
I	3,41 Hz	3,30 Hz	3 %
II	3,86 Hz	3,60 Hz	7 %
III	5,03 Hz	4,90 Hz	3 %

I° Modo di vibrare

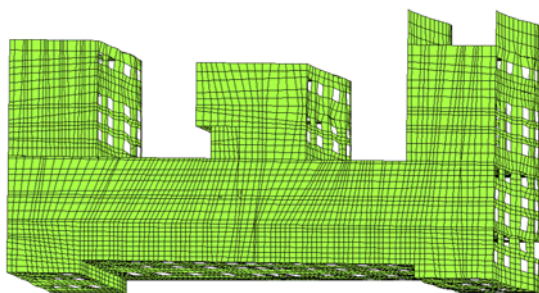


Deformata modale modellazione numerica
Frequenza 3.41 Hz

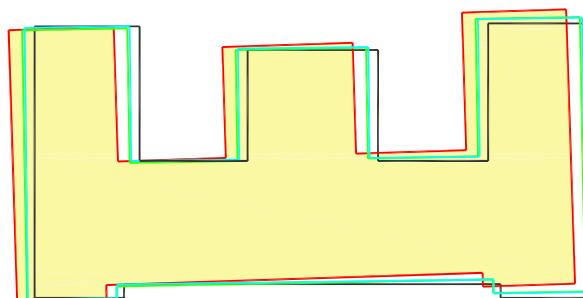


Deformata modale prova dinamica con vibrodina
Frequenza 3.30 Hz

II° Modo di vibrare

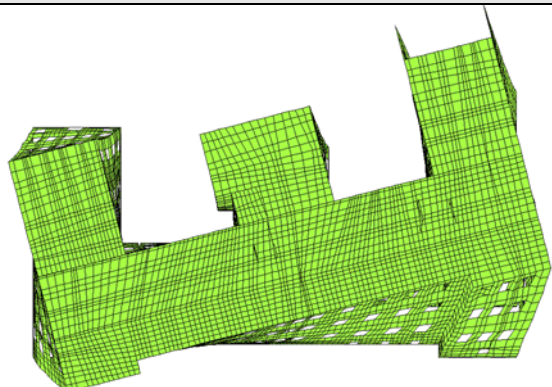


Deformata modale modellazione numerica
Frequenza 3.86 Hz

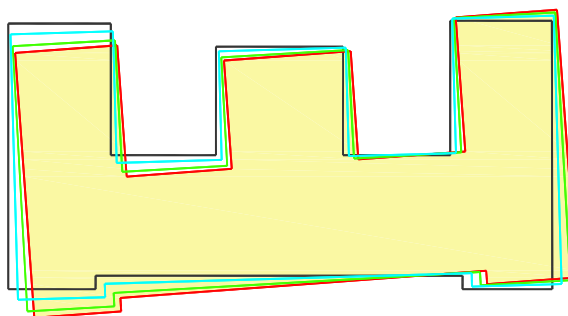


Deformata modale prova dinamica con vibrodina
Frequenza 3.60 Hz

III° Modo di vibrare



Deformata modale modellazione numerica
Frequenza 5.03 Hz



Deformata modale prova dinamica con vibrodina
Frequenza 4.90 Hz

Per quanto concerne la verifica sismica di seguito vengono riportati i parametri sismici caratterizzanti l'analisi eseguita ai sensi dell'OPCM 3431/2005.

- Tipologia analisi: Analisi dinamica modale
- Tipologia edificio: Edificio esistente
- Verifica con fattore di struttura (paragrafo 11.2.2.2 dell'OPCM 3431)
- Zona 3 ($a_g/g=0.15$)
- Categoria del suolo B
- Valori dei parametri nelle espressioni (paragrafo 3.2 dell'OPCM 3431) dello spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali: $S = 1.25$ $T_b = 0.15$ $T_c = 0.5$ $T_d = 2$
- Valori dei parametri dello spettro di risposta elastico della componente verticale $S = 1.00$
 $T_b = 0.05$ $T_c = 0.15$ $T_d = 1$
- Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente 5 %
- Edificio regolare in pianta
- Edificio non regolare in altezza
- Fattore di struttura in direzione x per meccanismi duttili 2.25
- Fattore di struttura in direzione x per meccanismi fragili 1.5
- Fattore di struttura in direzione y per meccanismi duttili 2.25
- Fattore di struttura in direzione y per meccanismi fragili 1.5
- Fattore di struttura in direzione z 1.5
- Categoria I: fattore di importanza 1.4
- Amplificazione topografica 1,0
- Numero di modi analizzati 12
- Metodo di combinazione SRSS

Relativamente al livello di confidenza – conoscenza raggiunto sulla base delle informazioni complessivamente acquisite e posto che:

- la geometria è stata definita sulla base dei rilievi strutturali eseguiti ed integrati mediante verifica e rilievo in situ della tipologia e orditura dei solai e dei carichi gravanti su ogni elemento di parete;
- i dettagli costruttivi sono stati esaminati mediante verifiche in situ con controlli accompagnati da scarifiche e saggi sulle murature per l'esame delle caratteristiche costruttive;
- le proprietà dei materiali sono state ricavate mediante indagini in situ ad integrazione anche dei dati disponibili sulle proprietà dei materiali contenute nella stessa OPCM 3431/2005;
- è stata eseguita una prova sperimentale con vibrodina meccanica che ha consentito di caratterizzare esaustivamente il comportamento dinamico della struttura per giungere ad un modello FEM connotato da un buon riscontro rispetto alle evidenze sperimentali;

il livello di conoscenza acquisito sulla struttura può essere quindi classificato come LC3 – conoscenza accurata. Le verifiche numeriche sono pertanto state condotte utilizzando un fattore di confidenza pari a $FC = 1,0$.

Le caratteristiche dei materiali, utilizzate per le verifiche numeriche, sono state definite sulla base delle indagini condotte in situ sulla struttura che hanno consentito di caratterizzare la tipologia e le peculiarità costruttive della muratura (mediante scarifiche, sondaggi, carotaggi, videoendoscopia) nonché le proprietà meccaniche quali resistenza a compressione e modulo elastico.

Ai fini delle verifiche strutturali per le murature portanti esterne ed interne dell'edificio si sono assunte le seguenti caratteristiche meccaniche riportate in tabella.

Entità		Valore	
resistenza media a compressione della muratura	fm	16	kg/cm ²
resistenza caratteristica a compressione della muratura	fk	12	kg/cm ²
resistenza di design a compressione della muratura (DM 20/11/1987) - (per le verifiche con azioni statiche)	fd	4	kg/cm ²
resistenza di design a compressione della muratura (OPCM 3431/2005.) - (per le verifiche con azioni sismiche)	fd	6	kg/cm ²
resistenza caratteristica a taglio della muratura	fvk o	0.5	kg/cm ²
modulo di elasticità normale	E	14000	kg/cm ²
modulo di elasticità a taglio	G	5600	kg/cm ²
peso specifico	w	1800	kg/m ³

In particolare è stato fatto riferimento all'ipotesi di diaframmi orizzontali rigidi riconducendo i gradi di libertà dell'edificio a tre per piano, e quindi concentrando le masse ed i momenti di inerzia ai centri di gravità di ciascun piano. A tal proposito le indagini sperimentali hanno evidenziato un comportamento sufficientemente rigido dei solai nel campo di frequenza entro il quale risultano ricompresi i primi tre modi fondamentali di vibrare del fabbricato. La verifica sismica è stata in definitiva quindi condotta correttamente attraverso il metodo dell'analisi modale, considerando il contributo dei suddetti tre primi modi di vibrare ai quali corrisponde una massa partecipante totale superiore all' 85%.

I risultati forniti dalle verifiche sismiche sono infine stati valutati ed interpretati tenendo conto del grado di conservatività che tipicamente caratterizza il metodo dell'analisi modale applicato agli edifici esistenti in muratura.

Mentre per quanto riguarda le verifiche di ordine statico si è fatto riferimento al D.M. 20/11/87, i riferimenti normativi adottati per le verifiche sismiche sono riportati nelle Norme Tecniche delle Costruzioni. Al capitolo 9 "Costruzioni esistenti" vengono indicate metodologie per la verifica ed il collaudo delle strutture e tra queste viene contemplato l'utilizzo dell'Ordinanza OPCM 3431/2005.

4. Conclusioni

Nella valutazione dell'importanza del metodo dinamico occorre considerare che le problematiche legate alla verifica degli edifici esistenti sono notevoli, in quanto, a fronte di un esteso grado di conoscenza richiesto, talvolta non è disponibile alcuna documentazione sul progetto delle strutture e sulla loro realizzazione. In altri casi le opere possono essere state interessate da interventi strutturali difficilmente ricostruibili a posteriori e che comunque ne possono aver condizionato significativamente la risposta alle sollecitazioni sismiche.

L'O.P.C.M. 3431/2005 prevederebbe l'esecuzione di indagini accurate sulle opere, sia dal punto di vista del rilievo della geometria delle strutture e dei dettagli costruttivi, che dal punto di vista della determinazione delle caratteristiche dei materiali. L'esecuzione di verifiche geometriche di dettaglio (in presenza di contropareti, controsoffitti, impianti) e delle relative prove distruttive sui materiali (demolizioni, carotaggi, asportazioni di piccole porzioni di struttura per le successive indagini

di laboratorio) risulta talvolta impossibile, in quanto i fabbricati sono in uso e lo svolgimento delle indagini strutturali non sempre risulta compatibile con le attività svolte.

I metodi dinamici di indagine sono invece un insieme di procedure analitiche e sperimentali che, sulla base della risposta strutturale conseguente l'applicazione di forzanti variabili nel tempo, consentono di determinare con affidabilità il comportamento dinamico del sistema vibrante. L'utilizzo di strumenti di rilevazione della risposta della struttura particolarmente sensibili garantisce la possibilità di applicare forzanti di intensità limitata con il vantaggio di evitare condizioni di carico estreme. Procedure sperimentali consolidate consentono poi di studiare il comportamento strutturale in tempi brevi e senza interrompere la funzionalità dell'opera.

La verifica sismica delle opere esistenti, condotta con metodi dinamici non distruttivi, consente pertanto i seguenti vantaggi operativi:

- Migliore livello di conoscenza complessivamente raggiungibile attraverso l'identificazione di un modello numerico tarato sulla base del comportamento dinamico della struttura, coinvolgente anche aspetti di comportamento d'insieme connessi con proprietà dei materiali, dettagli strutturali ed elementi non strutturali collaboranti. Questa più approfondita conoscenza dei dettagli strutturali e delle proprietà dei materiali può convenientemente consentire di limitare le verifiche puntuali sui diversi elementi strutturali;
- Limitazione dei disturbi / interferenze (rumore, polvere, invasività sull'opera, riduzione temporanea della funzionalità d'esercizio) causate dall'esecuzione delle indagini puntuali di tipo distruttivo (in alcuni casi inaccettabili, come ad es. nel caso dell'analisi di scuole, oppure di strutture ospedaliere);
- Efficace possibilità di confronto ante e post intervento per la verifica dei miglioramenti antisismici conseguiti;
- Riduzione dei costi di indagine: sulla base delle indicazioni contenute nell'OPCM 3431/2005, per una struttura di medie dimensioni per la quale si intenda raggiungere un livello di conoscenza LC3 (accurata), l'impiego dei metodi di indagine dinamici integrati da una quota parte limitata e mirata (il modello numerico tarato della struttura può consentire di individuare le sezioni di verifica di maggiore interesse) di verifiche puntuali (dell'ordine del 20% di quelle previste nel caso di verifiche esaustive), può consentire un risparmio complessivo nei costi di indagine del 30 – 40%.

Bibliografia

- /1/ Ramos L.F., Casarin F., Algeri C., Lourenço P.B., Modena C., *Investigation techniques carried out on the Qutb minar, New Delhi, India*, Structural Analysis of Historical Constructions SAHC-2006, New Delhi, India, 2006. ISBN 972-8692-27-7.
- /2/ Indirli M., Cami R., Carpani B., Algeri C., Panzeri P., Rossi G., Piova L., *The antiseismic rehabilitation of Marchesale Castle at San Giuliano di Puglia*, Structural Analysis of Historical Constructions SAHC-2006, New Delhi, India, 2006. ISBN 972-8692-27-7.
- /3/ Ewins D., *Modal testing: theory, practice and application*, Research Studies Press LTD. England, 2006.
- /4/ Lagomarsino S, Cavicchi A., Penna A., *Structural identification by dynamic testing: the example of the building n°4 of the Fivizzano hospital*, Firenze ,2001.
- /5/ Migliacci A., Panzeri P., Ronca P., *Dynamic Tests on a Large Wooden Vaulted Roof in Seismic Area*, IABSE Conference "Innovative Wooden Structures and Bridges" Lahti Finland, 2001.

- /6/ Bonacina G., Ferri C., Panzeri P., Salvaneschi P. *Vulnerability assessment and strengthening simulation for earthquake protection of buildings*, Proceedings of the International Conference "New Technologies in Structural Engineering", Lisbon 1997.
- /7/ Castellani A., Castiglioni C., Chesi C., Plumier A., Panzeri P., Pezzoli P., Negro P., Carydis P. Gr., *A European Research Program to Improve the Assessment of Steel Buildings Behaviour During Earthquakes - STEELQUAKE*, Proceedings of the Review Meeting on Seismic Risk Research in the European Union published by the European Commission - Brussels, 1997
- /8/ Cadei M., Panzeri P., Peano A., Salvaneschi P. *An expert system to support retrofitting of masonry buildings*, Proceedings of the workshop on "Collaborative European research activities for seismic risk prevention and reduction", edited by the European Commission EUR 16759 EN - Environment and Climate Programme - Climate and Natural Hazards - Seismic risk (editors: M. Yeroyanni, A. Peano, P. Panzeri) Bergamo, 1994.