



# Risultati del monitoraggio dinamico di un edificio scolastico a Camerino a valle del sisma del centro Italia dell'agosto 2016

Davide Arezzo<sup>a</sup>, Elisa Speranza<sup>a</sup>, Sandro Carbonari<sup>a</sup>, Fabrizio Gara<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Breccie Bianche, 60131 Ancona, Italia

*Keywords: Aftershocks; analisi modale operativa; analisi modale sperimentale; identificazione dinamica; monitoraggio sismico; risposta dinamica non lineare;*

## ABSTRACT

Il lavoro presenta i risultati del monitoraggio dinamico di un edificio scolastico situato a Camerino (MC), durante la sequenza sismica che ha colpito l'Italia centrale nel 2016. L'edificio ospita il liceo Classico e Scientifico "Varano" ed è situato nel centro storico di Camerino; si tratta di un fabbricato con struttura a telaio in cemento armato e tamponature in laterizio realizzato negli anni '60 e adeguato sismicamente nel 2013 con il sistema delle Torri Dissipative. Nel 2016, a valle del sisma del 24 agosto, è stato installato sull'edificio un sistema di monitoraggio dinamico costituito da accelerometri posizionati agli ultimi due piani della struttura e a livello delle fondazioni. Le registrazioni del moto alla base e della risposta dell'edificio ai piani superiori per effetto dei numerosi eventi sismici successivi al sisma principale e delle vibrazioni ambientali nei periodi di intervallo tra i sismi, hanno consentito di identificare i parametri modali grazie a tecniche input-output (N4SID), in occorrenza degli eventi sismici, e alle consolidate tecniche output-only (SSI), nei periodi di quiete. Ciò ha consentito di cogliere l'evoluzione delle caratteristiche dinamiche dell'edificio durante lo sciame sismico.

## 1 INTRODUZIONE

Nel campo dell'ingegneria civile si è assistito negli ultimi anni ad un progressivo aumento dell'attenzione relativamente all'utilità e ai vantaggi offerti dai sistemi di monitoraggio permanenti. Registrare la risposta dinamica delle strutture durante eventi sismici può garantire notevoli benefici: da un lato, fornisce utili informazioni ai fini del rilevamento del danno e della gestione delle emergenze post-sisma, dall'altro, può consentire la riduzione del rischio sismico attraverso la diminuzione delle incertezze legate sia alla stima della pericolosità che della vulnerabilità strutturale. La riduzione delle incertezze sulla vulnerabilità può derivare dalla validazione dei modelli strutturali basati sulla registrazione della risposta strutturale per eventi di medio-bassa intensità mentre la riduzione delle incertezze relative alla pericolosità presuppone un monitoraggio esteso al sistema terreno-fondazione che permetta di validare i modelli adottati per la definizione dell'input sismico.

Con riferimento ai terremoti di elevata intensità, la disponibilità di relazioni semplici e

dirette per diversi tipi di edifici tra le deviazioni dei parametri modali, rispetto alla struttura integra, e i livelli di danno presunti, sono della massima importanza per l'utilità pratica dei dati raccolti dai sistemi di monitoraggio (Ceravolo 2017). Pervenire a queste relazioni presenta problematiche intrinseche legate alla variabilità dei parametri modali della struttura sia rispetto all'intensità dell'eccitazione che alle condizioni ambientali.

In relazione ai terremoti di medio-bassa intensità, un aspetto interessante che emerge dal monitoraggio è la ormai ben nota variabilità delle proprietà dinamiche delle strutture durante lo scuotimento in assenza di danno; in questo senso il "vagabondare" (dall'inglese "wondering" tipicamente usato in letteratura per definire questo fenomeno) dei parametri modali della costruzione può essere imputato sia alla non linearità della risposta (Clinton 2006) che alla dipendenza dalle condizioni ambientali (e.g. Regni 2018, Rainieri 2018, Rainieri 2019, Saisi 2015). I suddetti aspetti rendono particolarmente problematica l'identificazione del danneggiamento della struttura a partire da registrazioni ottenute da sistemi di monitoraggio

in continuo. In letteratura è possibile trovare diversi lavori che affrontano il problema con riferimento ad edifici in muratura storici (Gentile 2016, Cavalagli 2018, Ubertini 2018)

Con riguardo specifico alla variazione delle frequenze proprie degli edifici in cemento armato durante forti eventi sismici, già nel lavoro di Calvi et al. (Calvi et al. 2006) si può trovare un'interessante quadro sullo stato dell'arte di allora. Più recentemente, la variazione dei parametri modali delle strutture civili soggette ad azioni sismiche è stata oggetto di diversi studi, tra cui Ghahari et al. (2013), Ceravolo et al. (2017) e Hu et al. (2019). Ad ogni modo, il numero dei casi studio analizzati e i risultati scientifici disponibili in letteratura non sono tali da consentire ancora una completa definizione di uno stato dell'arte consolidato.

Con l'obiettivo di fornire un contributo in questo ambito di ricerca, carente di rielaborazioni dei dati sperimentali raccolti sul territorio nazionale, il presente documento presenta la risposta dinamica di un edificio scolastico, il Liceo Varano situato a Camerino (Figura. 1) in provincia di Macerata, durante lo sciame sismico che è seguito al terremoto del centro Italia dell'agosto 2016. Dopo una descrizione del caso studio e dell'intervento di adeguamento sismico realizzato prima del sisma, viene riportata una descrizione della catena di misura e delle configurazioni dei sensori utilizzate per le misurazioni dinamiche e per il monitoraggio; infine, sono riportati i risultati ottenuti da due giorni di monitoraggio in continuo. Durante questo periodo si sono susseguite molte scosse di intensità medio-bassa e alcune di intensità non trascurabile. Nonostante l'edificio non abbia subito danni apprezzabili se non prima dell'evento sismico verificatosi poi nell'ottobre del 2016, come si vedrà, i parametri modali della struttura subiscono notevoli variazioni all'aumentare del livello di accelerazioni a cui questa è sottoposta.

## 2 IL CASO STUDIO

### 2.1 Descrizione dell'edificio

L'edificio oggetto di studio risale agli anni 60' e nasce dalla scelta di ampliare e riabilitare il vecchio edificio in muratura ospitante il Liceo Ginnasio Napoleonico dal 1833 e, prima ancora, il Convento di Santa Elisabetta. Parte del nuovo edificio viene fondato sull'ex convento, mentre l'altra parte poggia sul terreno. L'edificio ha pianta a L formata da due ali, indicate in Figura

3a con "A" e "B", di dimensioni rispettivamente pari a circa 25x19 m e 13x27 m. I due corpi sono separati da un giunto di costruzione (non sismico) di circa 2 cm di larghezza presente a tutti i livelli della costruzione. L'ala "A", a sua volta, è divisa in due aree di pianta rettangolare, indicate con "A1" e "A2", tramite un secondo giunto di costruzione, anche questo non sismico. L'ala "A" si estende per 4 piani di cui uno interrato più il sottotetto, mentre l'ala "B" si estende per tre piani complanari ai primi 3 dell'ala "A" più il sottotetto. L'ala "A" ha altezze di interpiano diverse: 3,80 m per i piani intermedi, 3,60 m per l'ultimo piano e un'altezza variabile tra 4,80 e 6,00 m per il seminterrato. L'ala "B" ha altezza d'interpiano costante per tutte le elevazioni pari a 3,80 m. Complessivamente, l'altezza totale al colmo è pari a 20,40 m per il corpo "A" e 14,05 m per il corpo "B". Le due ali, come anticipato, differiscono anche per la tipologia delle fondazioni: il corpo "B" poggia, per il tramite di plinti, sulle mura storiche dell'ex convento, fondato a sua volta su roccia arenaria; l'ala "A" è direttamente fondata tramite plinti sulla roccia arenaria. La struttura è costituita da telai in cemento armato; le travi sono calate con sezione rettangolare, eccezion fatta per quelle perimetrali caratterizzate da sezioni di geometria articolata, con altezza e larghezza variabile (Figura 2). I pilastri hanno tutti sezione quadrata ruotata di 45° rispetto alla direzione dei telai per motivi architettonici, con dimensioni pari a 35x35 cm, a parte due pilastri centrali del corpo "A" che hanno sezione 42x42 cm. I solai sono in laterocemento con spessore 20+4 cm mentre le tamponature sono di diverse tipologie: le specchiature esterne dei telai sono chiuse con pareti perimetrali realizzate con muratura a cassetta (a parte il piano seminterrato dell'ala "A") per un'altezza pari a 1,20 m su tutte le campate mentre la restante specchiatura è chiusa con vetrate ad infissi sagomati (Figura 2).



Figura 1: Vista aerea del fabbricato.

## 2.2 L'intervento di adeguamento sismico

Nel 2013 viene realizzato un intervento di adeguamento tramite la costruzione di due Torri Dissipative (Balducci 2005) (Figura 2), una collegata sia al corpo "A" che al corpo "B", (Torre A) e l'altra solo al corpo "B" (Torre B) (Figura 3). Le Torri poggiano su una spessa piastra in c.a. connessa per il tramite di una cerniera sferica centrale ad una seconda zattera fondata su pali. Semplificando al massimo la descrizione dell'intervento, si può affermare che le Torri hanno il duplice scopo (i) di regolarizzare gli spostamenti dell'edificio, favorendo una deformata rettilinea in elevazione (drift di piano costanti), (ii) di favorire la dissipazione dell'energia in ingresso durante un sisma, attraverso dissipatori viscosi che sfruttano le velocità relative tra le due basi in c.a. di ciascuna Torre (Gioiella et al. 2018 a, b).

Le due torri differiscono per diversi aspetti: oltre ad avere diversa altezza e differenti sezioni trasversali delle proprie membrature, la Torre T.A presenta bielle di collegamento con l'edificio in corrispondenza degli ultimi tre piani dell'ala "A" e degli ultimi due dell'ala "B", mentre la Torre B è collegata solo agli ultimi due piani dell'ala "B". Inoltre, la Torre B dispone di 4 dissipatori, uno ad ogni spigolo delle piastre di base, mentre la Torre A possiede 8 dispositivi, due per ogni spigolo. Un'ultima differenza riguarda le fondazioni: la Torre A presenta una fondazione scatolare in c.a. su micropali, ed ospita la nuova vasca antincendio del plesso, che sostituisce le vecchie cisterne interrate, eliminate per far posto alla torre. La Torre B, essendo ubicata al di sopra di un locale di due piani dei quali si voleva conservare l'utilizzabilità, è fondata su setti verticali in c.a. che formano uno scatolare. Tre setti di tale scatolare contornano le mura degli ambienti, esternamente, formando un setto a C che fonda, a quota piazzale, su una zattera con pali. Maggiori dettagli sull'intervento, fortemente vincolato da esigenze tecniche, si possono trovare in Balducci et al. (2015) e in Roia et al. (2014).

## 3 PROVE DINAMICHE E MONITORAGGIO IN CONTINUO

### 3.1 Descrizione delle prove dinamiche e del sistema di monitoraggio

Durante i lavori di adeguamento sismico sono state eseguite delle prove dinamiche di vibrazione ambientale finalizzate all'identificazione dei parametri modali dell'edificio.



Figura 2: (a) Facciata nord-ovest dell'edificio; (b) Facciata sulla rampa a sud-ovest; (c) retro dell'edificio ad est con le due Torri dissipative.

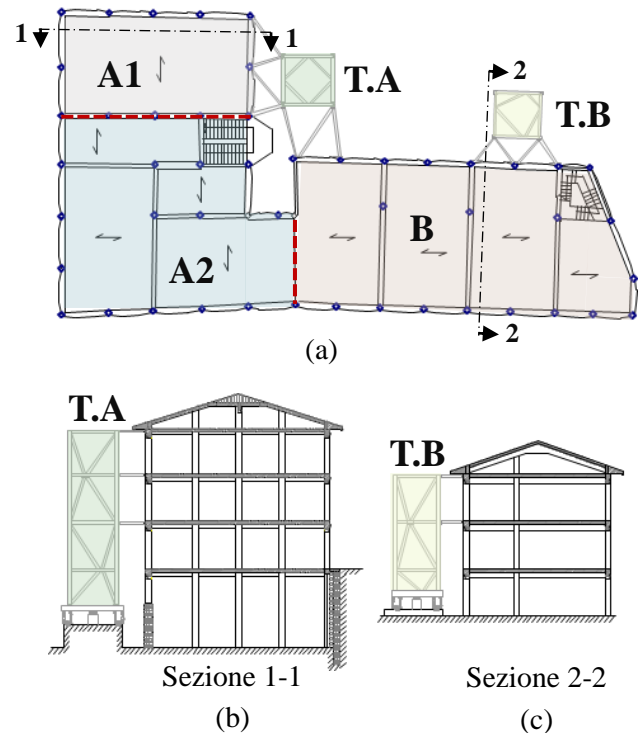


Figura 3: a) Pianta tipo della struttura e Torri dissipative, con sezioni relative alle torre "A" (b) e alla torre "B" (c) (Roia et al. 2014).

Una prima identificazione dinamica è stata condotta nel 2012, prima dell'intervento, e una seconda nel 2013 al completamento dei lavori di adeguamento. Lo scopo delle indagini effettuate è stato duplice: da una parte, le prove di identificazione preliminari hanno consentito di ottenere informazioni sul comportamento dinamico globale dell'edificio a supporto della progettazione dell'intervento e della calibrazione di un modello agli elementi finiti; dall'altro, le

indagini nella situazione post-operam, hanno consentito di verificare che i parametri modali della struttura adeguata corrispondessero a quelli previsti dal modello di calcolo. Una descrizione più ampia delle prove e dei risultati ottenuti si può trovare in Roia et al. (2014).

A seguito dell'evento sismico di magnitudo 6.0 verificatosi il 24 agosto 2016, è stata effettuata in data 27 agosto 2016, un'altra prova di vibrazione ambientale con lo scopo di verificare lo stato di salute della struttura. In Figura 4 è riportata la configurazione dei sensori adottata per quest'ultima prova dinamica. In aggiunta, è stato installato sulla struttura un sistema di monitoraggio dinamico in continuo lasciando i sensori disposti a livello di fondazione e agli ultimi due piani dell'edificio.

Per quanto riguarda la strumentazione, si è fatto uso di sensori piezoelettrici PCB 393B31 con sensibilità di 10 V/g, schede di conversione analogico digitale NI 9234 con una risoluzione di 24 bit, uno chassis cDAQ 9178 e un notebook per l'acquisizione e la memorizzazione dei dati. Per le acquisizioni si è utilizzata una frequenza di campionamento di 2048 Hz. I dati riportati in questo lavoro riguardano i risultati ottenuti dalle registrazioni effettuate dal 27 al 29 agosto 2017.

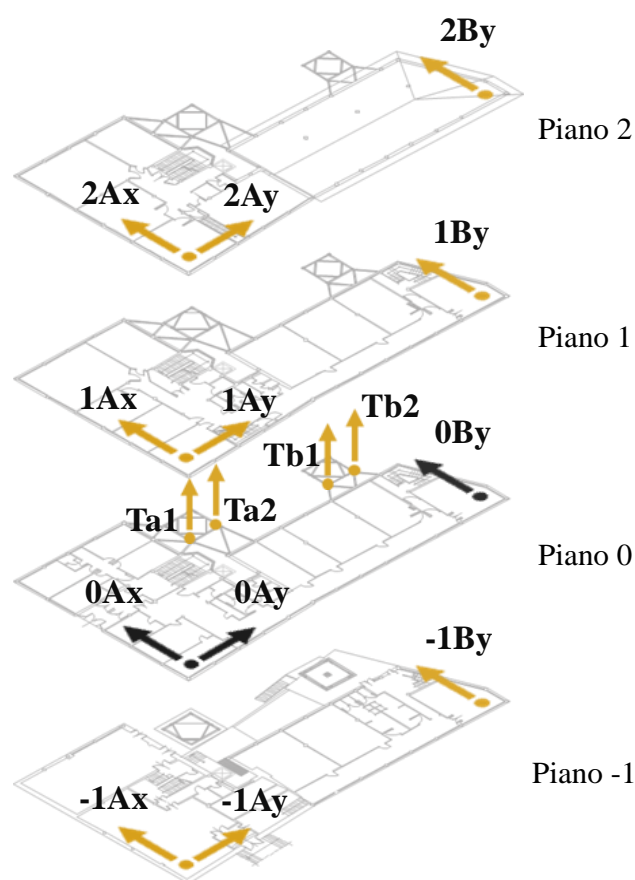


Figura 4: Configurazione dei sensori per la prova di vibrazione ambientale del 27.08.2016 e per il monitoraggio in continuo (esclusi i sensori al piano 0, in nero).

### 3.2 Gli eventi sismici registrati durante il monitoraggio

In Figura 5 si può osservare la posizione degli epicentri degli eventi avvenuti durante i tre giorni di monitoraggio, con quelli di maggior intensità messi in evidenza.

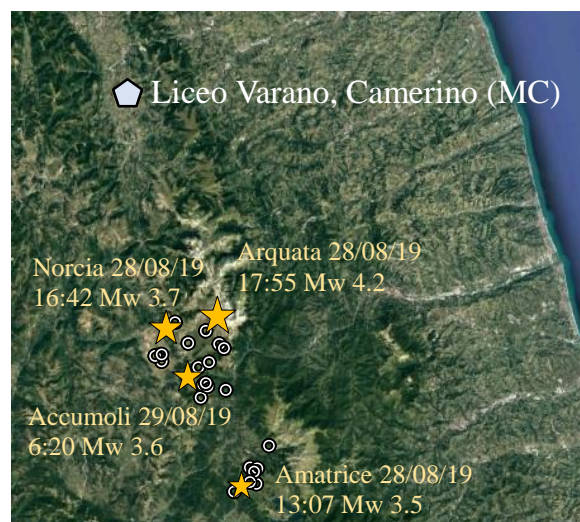


Figura 5: Epicentro degli eventi registrati durante il monitoraggio; in rilievo i quattro di intensità maggiore.

Tabella 1. Eventi sismici rilevanti registrati durante il periodo di monitoraggio ordinati per intensità decrescente.

Data e ora	Mw	Profondità [km]	Distanza [km]
28-08-2019 17:55	4.2	9	36.93
28-08-2019 18:42	3.7	9	35.40
29-08-2019 08:20	3.6	10	43.47
28-08-2019 15:07	3.5	9	61.97
28-08-2019 17:37	3.5	12	40.30
27-08-2019 23:31	3.4	11	62.03
29-08-2019 03:44	3.4	10	42.26
28-08-2019 08:37	3.3	11	46.88
28-08-2019 11:18	3.2	8	59.20
28-08-2019 22:22	3.1	8	45.02
28-08-2019 07:16	3.1	9	62.03
28-08-2019 09:59	3.0	7	39.83
28-08-2019 12:25	3.0	10	39.42
28-08-2019 14:17	3.0	12	40.75
28-08-2019 08:13	2.9	8	59.75
28-08-2019 01:53	2.9	10	60.11
27-08-2019 23:26	2.9	10	62.03
28-08-2019 18:25	2.8	11	46.83
27-08-2019 23:26	2.8	10	57.24
27-08-2019 19:50	2.8	10	37.31
28-08-2019 04:40	2.8	11	41.97
29-08-2019 06:04	2.8	9	45.44
28-08-2019 22:00	2.7	9	61.41
28-08-2019 12:44	2.7	10	44.94
28-08-2019 10:44	2.7	10	38.31
27-08-2019 18:55	2.6	10	34.69
28-08-2019 17:34	2.6	10	39.20

In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali degli eventi per cui è stata registrata la risposta della struttura, ordinati per intensità decrescente. L'evento di intensità maggiore, di magnitudo 4.2, si è verificato il 28 agosto, ad una distanza di circa 37 km dall'edificio.

### 3.3 Tecniche di identificazione dinamica

Le registrazioni sono state pre-trattate attraverso le classiche tecniche di trattamento dei segnali: dapprima un controllo visivo, poi l'eliminazione degli spike e dei trend spuri, un ricampionamento a 51.2 Hz per diminuire l'onere computazionale e l'applicazione di un filtro passa-basso alla frequenza di Nyquist.

L'identificazione dei parametri modali, sia per la prova preliminare che per le registrazioni effettuate durante il monitoraggio nei periodi di quiete, è stata condotta attraverso il consolidato algoritmo SSI-COV (Covariance Driven Stochastic Subspace Identification), mentre l'identificazione durante gli eventi sismici è stata eseguita tramite gli algoritmi della famiglia N4SID (Numerical Algorithms for State Space Subspace System Identification) (Lennart 2019) implementati in matlab per il caso specifico, utilizzando come input i segnali registrati al livello delle fondazioni (piano -1 in Figura 4). Una trattazione più completa delle tecniche di identificazione qui menzionate può essere trovata in Van Overschee (1996).

Una delle ipotesi fondamentali alla base dei sopracitati algoritmi prevede che il sistema dinamico debba essere elastico lineare e tempo invariante. Nel caso degli edifici in c.a. soggetti ad azioni di una certa intensità questa ipotesi spesso non risulta pienamente soddisfatta ed i parametri modali della struttura dipendono in modo sensibile dall'ampiezza delle accelerazioni a cui sono sottoposte. Nella letteratura recente si possono trovare interessanti lavori su questi temi (Ponzo et al. 2011). Nel presente lavoro si è affrontato il problema effettuando l'identificazione su registrazioni limitate a lassi di tempo, anche molto brevi, caratterizzati da un livello di accelerazioni all'incirca omogeneo.

## 4 ANALISI DEI DATI E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Le prove di vibrazione ambientale preliminari hanno permesso l'identificazione dei parametri modali di cui, in seguito, si è tenuto traccia con il sistema di monitoraggio in continuo.

In Figura 6 è riportato il diagramma di stabilizzazione ottenuto con le registrazioni della

prova preliminare del 27 agosto. Le prime quattro frequenze fondamentali della struttura sono in corrispondenza di picchi ben evidenti nel contenuto in frequenza del segnale e nel diagramma di stabilizzazione risultano identificate da soluzioni molto stabili sia in termini di frequenza e fattori di smorzamento che di forma modale, quest'ultime giudicate tramite l'indice MAC (Modal Assurance Criterion).

In Figura 7 sono riportate le quattro forme modali associate ai primi quattro modi di vibrare identificati con i relativi valori di frequenze proprie e fattori di smorzamento. Come si può vedere dai valori della matrice dei MAC, il terzo e il quarto modo appaiono non perfettamente ortogonali: questo risultato, più che ad un errore in fase di identificazione del sistema dinamico, è tuttavia dovuto al cosiddetto "aliasing spaziale" a sua volta dovuto al limitato numero di sensori utilizzati per le misurazioni, che non consente di cogliere il moto reciproco dei singoli corpi dell'edificio e dei loro spostamenti relativi in corrispondenza dei giunti.

Durante il monitoraggio si è quindi tenuto traccia delle variazioni delle frequenze associate ai quattro modi di vibrare sopra descritti. In Figura 8 sono riportati i risultati delle analisi di identificazione eseguite sui segnali acquisiti in continuo; nel dettaglio, i risultati dell'identificazione con tecniche di tipo output-only eseguite su segnali della durata di 20 minuti, sono sovrapposti ai risultati risultati delle identificazioni eseguite in corrispondenza degli eventi sismici. Si nota l'evidente diminuzione delle frequenze di vibrazione all'aumentare del livello di accelerazioni a cui la struttura è sottoposta. E' importante notare che tale diminuzione non è tuttavia permanente e infatti, terminata la scossa, l'edificio torna a vibrare secondo la dinamica identificata all'inizio del monitoraggio.

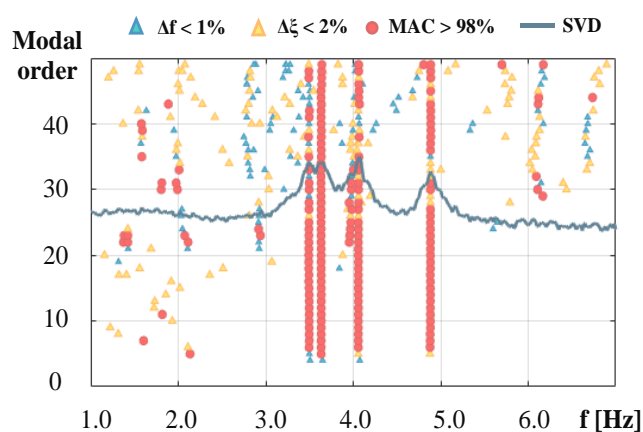


Figura 6: Diagramma di stabilizzazione ottenuto dalla prova di vibrazione ambientale preliminare al monitoraggio

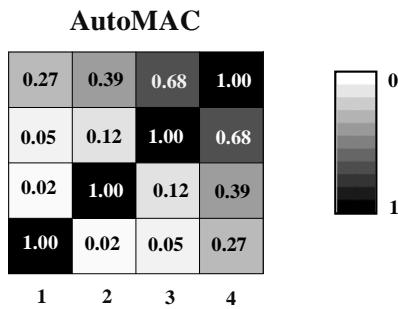
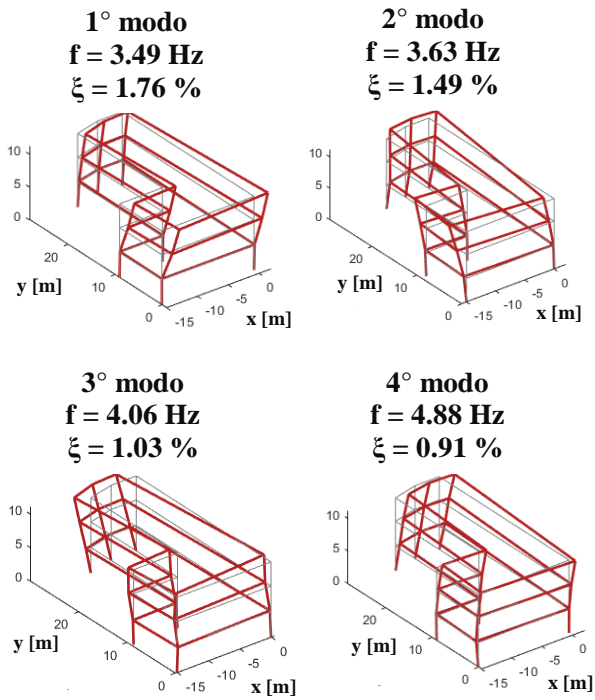


Figura 7: Prime 4 forme modali con i relativi valori di frequenze e rapporto di smorzamento; in basso l'autoMAC delle 4 forme modali.

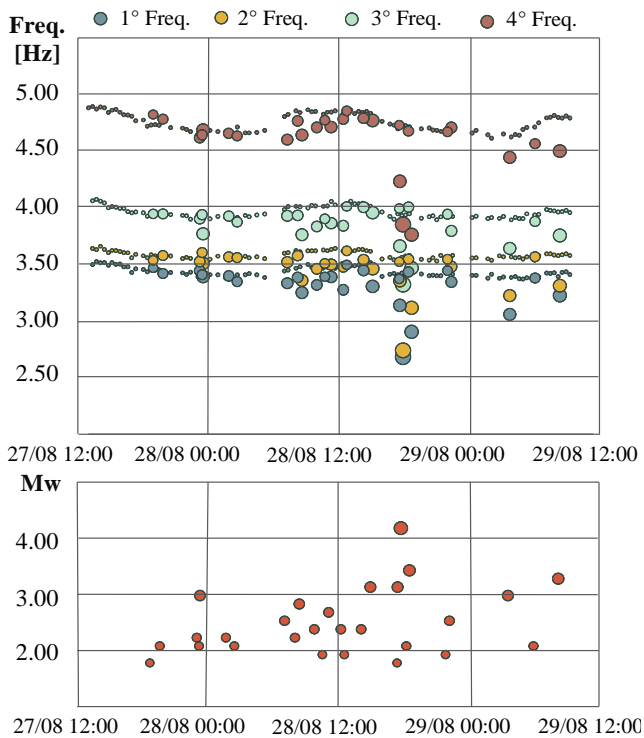


Figura 8: Andamento delle frequenze associate ai primi quattro modi di vibrare della struttura.

La spiegazione va cercata nei fenomeni non lineari (ad esempio di natura attritiva) che si innescano superato un certo livello di eccitazione fornito alla struttura. È inoltre interessante notare come le frequenze identificate lontano dagli eventi sismici abbiano un trend particolare, scorrelato dalla successione delle scosse; questo trend giornaliero è correlato alle condizioni ambientali, e in particolare alla temperatura, con valori massimi delle frequenze che si raggiungono durante il giorno, e i valori minimi che vengono toccati durante le notti.

Infine, in Figura 9 sono riportati i valori delle frequenze di vibrazione dei primi 4 modi di vibrare in relazione alle PGA dei contemporanei eventi sismici.

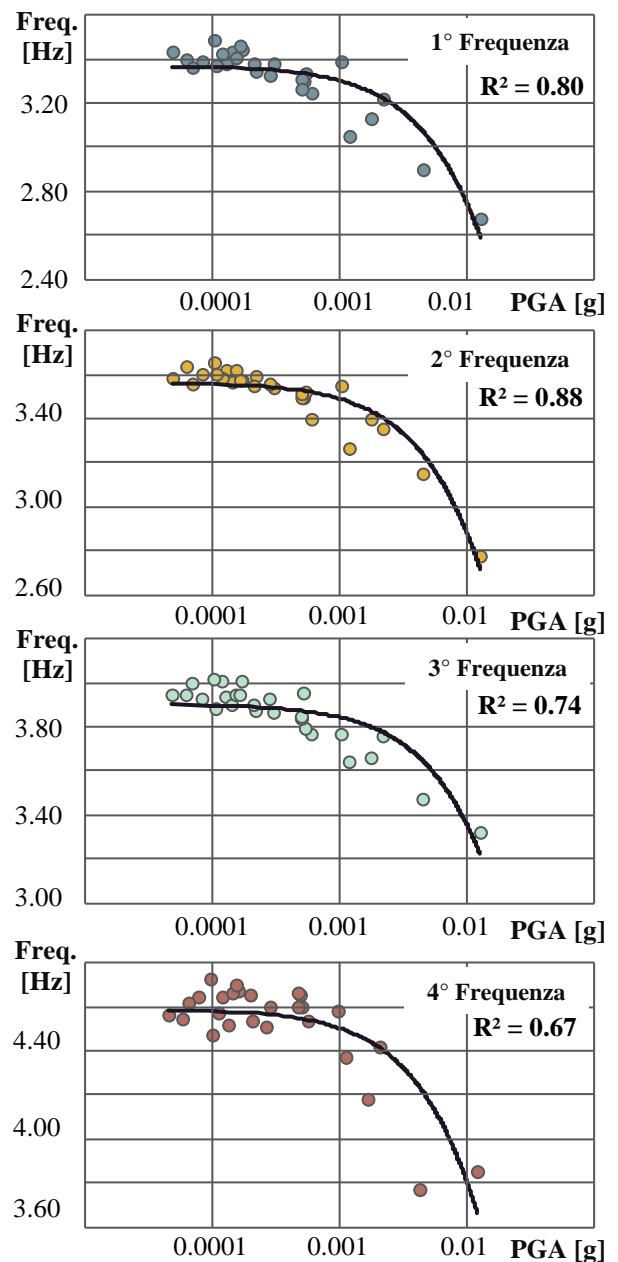


Figura 9: Correlazioni tra i valori di frequenza dei primi 4 modi di vibrare e la PGA degli eventi.

## 5 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata analizzata la risposta sismica di un edificio scolastico situato a Camerino durante lo sciame sismico che è seguito al terremoto del centro Italia dell'agosto 2016.

Nel dettaglio, sono mostrati i primi risultati, ottenuti da due giorni di monitoraggio in continuo della struttura, in termini di variabilità delle frequenze di risonanza della struttura con l'intensità dell'eccitazione sismica.

Le prime rielaborazioni evidenziano una evidente diminuzione delle frequenze di vibrazione all'aumentare dell'ampiezza delle accelerazioni a cui la struttura è sottoposta. La riduzione delle frequenze di vibrazione in corrispondenza degli eventi sismici non è permanente e, terminata la scossa, l'edificio torna a vibrare secondo la dinamica identificata all'inizio del monitoraggio.

Il lavoro contribuisce, in termini di dati sperimentali, ad arricchire lo stato dell'arte sul tema del monitoraggio della salute strutturale tramite il controllo nel tempo dei parametri modali. Su questo tema la ricerca è ancora aperta e riguarda diversi aspetti tra cui la dipendenza dei parametri dalle condizioni ambientali e la non linearità nella risposta della struttura con l'intensità dell'input sismico.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Balducci, A., 2005. "Dissipative Towers". Application n. EP20100747238, PCT n. WO2010EP62748 20100831, International and European classification E04H9/02 – Italian concession n° 0001395591.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Crowley, H., 2006. State-of-the-knowledge on the period elongation of RC buildings during strong ground shaking: *ECEES First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper n.1535
- Cavalagli, N., Comanducci, G., and Ubertini, F. 2018. Earthquake-induced damage detection in a monumental masonry bell-tower using long-term dynamic monitoring data. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(supl):96–119.19
- Ceravolo, R., Matta, E., Quattrone, A., Fragonara, L. Z., 2017. Amplitude dependence of equivalent modal parameters in monitored buildings during earthquake swarms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(14), 2399-2417.
- Clinton, J. F., Bradford, S. C., Heaton, T. H., Favela J., 2006. The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure. *Bulletin of seismological Society of America*, 96(1), 237-257.
- Gentile, C., Guidobaldi, M., & Saisi, A., 2016. One year of monitoring of historic tower: damage detection under changing environment, *Meccanica* 51, 2873-2889.
- Ghahari, S. F., Abazarsa, F., Ghannad, M. A., Tarcitoglu, E., 2013 Response-only modal identification of structures using strong motion data. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(8), 1221-1242.
- Gioiella, L., Tubaldi, E., Gara, F., Dezi, L., Dall'Asta, A., (2018). Stochastic seismic analysis and comparison of alternative external dissipative systems – Shock and vibration (without fee), Volume 18, article ID 5403737. (a)
- Gioiella, L., Tubaldi, E., Gara, F., Dezi, L., Dall'Asta, A., (2018). Modal properties and seismic behaviour of buildings equipped with external dissipative pinned rocking braced frames – *Engineering Structures*, 172, 807-819. (b)
- Hu, R. P., Xu, Y. L., 2019. SHM-Based seismic performance assessment of high-rise buildings under long period ground motion. *Journal of Structural Engineering*, 145(6).
- Lennart, L., 2019. System Identification Toolbox: Getting Started Guide. *The MathWorks, Inc.*
- Ponzo, F. C., Ditommaso, R., Auletta, G., 2011. Un approccio semplificato per la localizzazione del danno su strutture in cemento armato basato sulla trasformata di Stockwell. *XIV Convegno ANIDIS*, 18-22 settembre, Bari.
- Rainieri, C., Magalhaes, F., Gargaro, D., Fabbrocino, G., & Cunha, A., 2018. Predicting the variability of natural frequencies and its causes by Second-Order Blind Identification. *Structural Health Monitoring*, 18(2), 486-507.
- Rainieri, C., Reynders, Fabbrocino, G., De Roeck, G., 2019. Analysis Of The Environmental Influence On Natural Frequencies Of A Hospital Building. - *8th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2019; Copengahen; Denmark; 13 May 2019 through 15 May 2019; Code 148910.*
- Regni, M., Arezzo, D., Carbonari, S., Gara, F., 2018. Effect of Environmental Conditions on the Modal Response of a 10-Story Reinforced Concrete Tower. *Shock and Vibration*, Article ID 9476146.
- Roia, D., Gara, F., Balducci, A., Dezi, L., 2014. Ambient vibration tests on a reinforced concrete school building before and after retrofitting works with external steel "dissipative towers". *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic, EURO DYN*, 30 June - 2 July 2014, Porto, Portugal, 2509-2516.
- Saisi, A. and Gentile, C. and Guidobaldi, A. (2015) Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy. *Construction and Building Materials*, 81, 101-112.
- Ubertini, F. and Cavalagli, N. and Kita, A. and Comanducci, G., 2018. Assessment of a monumental masonry bell-tower after 2016 Central Italy seismic sequence by long-term SHM. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 775-801.
- Van Overschee, P., De Moor, B., 1996. Subspace Identification for Linear Systems - Theory, implementation and application. *Kluwer Academic Publishers.*