

Rilievo 3D e monitoraggio dinamico della Torre degli Smeducci e del campanile del Duomo vecchio a San Severino Marche

3D survey and dynamic monitoring of Torre degli Smeducci and old Cathedral Bell Tower at San Severino Marche

TAKAYOSHI AOKI, RENATO LANCELLOTTA, ANTONINO QUATTRONE, DONATO SABIA, GUIDO SFORZA, FILIBERTO CHIABRANDO, ANDREA LINGUA, GIULIA SAMMARTANO, SEBASTIANO FOTI, FEDERICO PASSERI

Abstract

Le attività della task force del Politecnico nell'Italia Centrale, nelle fasi post sisma del 2016, sono state indirizzate non solo alle aree epicentrali, ma si sono estese anche ad aree del cratere sismico che hanno subito danneggiamenti meno importanti. In queste aree le attività sono state rivolte alla analisi di beni monumentali ad alta vulnerabilità che hanno subito danneggiamenti limitati. In questo contesto si inquadrano le indagini condotte su due torri storiche di San Severino Marche, la Torre del Duomo Vecchio e la Torre degli Smeducci. Tali attività fanno parte di un piano di cooperazione strategica tra il Comune di San Severino Marche, il Politecnico di Torino e di Nagoya City University (Giappone).

The activities carried out by the Politecnico di Torino task force in Central Italy after the shocks of 2016 have been deployed not only in the main damaged area but also in other zone where the intensity of the earthquakes was lower and therefore the buildings were less damaged. In those areas the activities have been focused on the built heritage featured by high vulnerability as the two historical towers built up on the area of Monte Nero hill in San Severino Marche: the Tower of Duomo Vecchio and the Smeducci Tower. The performed actions have been developed under the umbrella of a cooperation between the Politecnico di Torino, Nagoya City University (Japan) and the municipality of San Severino Marche.

Introduzione

Le torri di San Severino Marche sorgono a pochi metri l'una dall'altra in cima alla collina, detta Monte Nero, in posizione dominante sulla città e i territori circostanti. Lo studio delle strutture in esame è particolarmente interessante perché consente di confrontare direttamente il comportamento rispetto alla medesima azione sismica di tipologie strutturali analoghe ma caratterizzate da differenti altezze e condizioni vincolari, l'una isolata l'altra addossata alla chiesa (Figura 1).

A monte delle operazioni di monitoraggio delle strutture in oggetto è stata realizzata una campagna di acquisizione multi-sensore che ha consentito di acquisire dati impiegati nella realizzazione di modelli tridimensionali e tradizionali rappresentazioni 2D (fotografiche e vettoriali) utili a una esaustiva documentazione delle torri.

Takayoshi Aoki, professore a Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City University, Nagoya, Japan
aoki@sda.nagoya-cu.ac.jp

Renato Lancellotta, professore emerito di Geotecnica, Politecnico di Torino, DISEG
renato.lancellotta@polito.it

Antonino Quattrone, coordinatore del Laboratorio MASTRLAB, Politecnico di Torino, DISEG
antonino.quattrone@polito.it

Donato Sabia, professore associato di Tecnica delle costruzioni, Politecnico di Torino, DISEG
donato.sabia@polito.it

Guido Sforza, laureato magistrale in Ingegneria civile, Politecnico di Torino, DISEG
guido.sforza@polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Sebastiano Foti, professore ordinario di Geotecnica, Politecnico di Torino, DISEG
sebastiano.foti@polito.it

Federico Passeri, dottore di ricerca in Ingegneria civile e ambientale presso il Politecnico di Torino, DISEG, Vigile del Fuoco
federico.passeri@polito.it



Figura 1. Vista della collina detta Monte Nero. A sinistra la Torre degli Smeducci e al centro il Campanile del Duomo Vecchio.



Figura 2. Schema del monitoraggio dinamico della Torre degli Smeducci e della torre del Duomo Vecchio.



Figura 3. Vista della Torre di San Severino (a) e dettaglio della cella campanaria in uno scatto acquisito tramite UAV (b).

Per l'acquisizione dei dati è stata eseguita una campagna di rilievo multi-sensore utile ad una corretta documentazione dell'area della collina del Monte Nero e delle strutture che insistono su di essa, seguendo il consolidato approccio multi-scala e multi-risoluzione. Le tecniche e strumentazioni impiegate partono dalla tradizionale topografia basata sull'utilizzo di stazioni totali e sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*), passando alla fotogrammetria digitale terrestre e aerea con l'utilizzo di sistemi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) fino all'utilizzo di laser scanner terrestri e mobili anche basati sull'impiego di tecniche SLAM (*Simultaneously Localization and Mapping*).

Al termine delle operazioni di misura e acquisizione dati, le elaborazioni conseguenti la modellazione 3D hanno consentito di generare gli elaborati grafici analoghi a quelli architettonici tradizionali, integrati con l'informazione fotografica ortoproiettata.

Grazie alla conoscenza geometrica delle strutture è stato successivamente progettato e installato il sistema di monitoraggio dinamico che, nel caso in oggetto, è costituito da accelerometri capacitivi aventi sensitività di 2V/g e termocoppie per la misura della temperatura interna ed esterna delle strutture. I sistemi di acquisizione sono dotati di antenne GPS/GNSS che consentono la sincronizzazione delle acquisizioni tra le due strutture e la terna *free field*. I dati accelerometrici sono rilevati in continuo con campionamento a 100 Hz, le temperature sono campionate a 10 Hz.

I dati registrati in locale sono accessibili da remoto e disponibili per le successive elaborazioni. Sulla Torre del Duomo vecchio sono installati 10 accelerometri e 2 termocoppie, sulla Torre degli Smeducci sono installati 14 accelerometri e 3 termocoppie, a cui si aggiungono gli accelerometri della terna *free field* (Figura 2).

1. Torre campanaria del Duomo Vecchio

L'edificio nel suo complesso venne realizzato verso la fine del XIII secolo. La Torre campanaria, caratterizzata da un'ampia base quadrata, è alta 28 metri ed è sulla sommità presenta una cella campanaria sulla quale si aprono quattro bifore decorate sotto le quali corre un fregio ad archetti trilobati. La struttura, risalente al XIV secolo, è addossata alla sinistra del fronte principale della fabbrica e si narra venne preso come esempio per la costruzione di altri campanili e torri nei dintorni. La torre è realizzata in mattoni e malta di calce con ringrossamenti alla base realizzati in blocchi di pietra squadrata. La torre si sviluppa in altezza con sezione quadrata costante e, come già accennato in precedenza, è parte integrante dell'attuale struttura del Duomo¹.

Nello schema riportato in Figura 4 sono riportate le posizioni dei punti oggetto di monitoraggio. Nella Figura 5 è invece riportato un esempio di storia temporale delle accelerazioni orizzontali misurate sulla Torre, posizione 3, e il corrispondente diagramma spettrale, dal quale si evidenziano le principali frequenze di vibrazione.

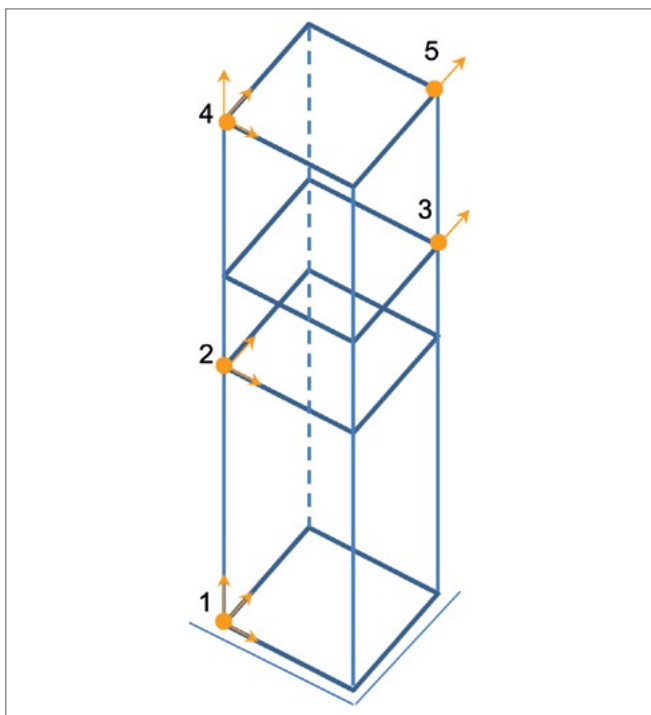


Figura 4. Torre del Duomo Vecchio. Posizione dei punti di misura.

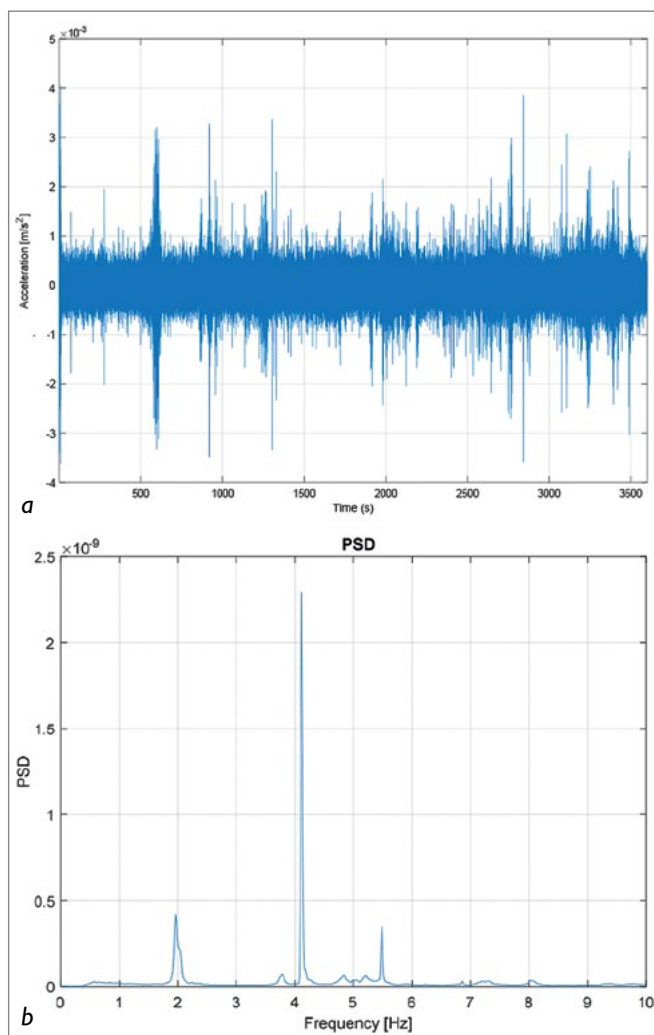


Figura 5. Storia temporale (a) e spettro (b) estratto dai dati monitorati sul Duomo Vecchio.

2. Torre degli Smeducci

La Torre Civica del Comune di San Severino Marche o Torre degli Smeducci, dal nome della signoria del luogo, aveva prevalente funzione di punto di osservazione e comunicazione, data la posizione dominante sui territori circostanti. Essa sorge sul vertice della collina detta di Monte Nero o Castello, a circa 342 m sul livello del mare. È l'unico monumento di architettura militare che sia rimasto intatto a San Severino e uno degli edifici più antichi di tutta la città, risalendo con ogni probabilità al XII o XIII secolo². La torre è a pianta quadrata e presenta complessivamente un'altezza di 40 m dal piano di campagna attuale (Figura 6).

La torre presenta storicamente una forte inclinazione in direzione sud-ovest causata dai cedimenti differenziali alla base, dovuti alla vicinanza della scarpata e alle caratteristiche geomeccaniche del terreno sottostante le fondazioni.

Dal punto di vista materico, dal piano di campagna a un'altezza media di 10 m la torre si compone di conci di pietra sbazzata, mentre dai 10 m fino alla sommità presenta una muratura a sacco portante in mattoni pieni con bugnatura in pietra nei quattro spigoli.

Addossata alla parte principale della torre lungo la parete est, vi è una costruzione bassa, anch'essa costruita in pietra sbazzata e mattoni pieni, che dal piano di campagna raggiunge un'altezza massima di 8 m nella propria linea di colmo.

Nel corso degli anni la torre è stata oggetto di numerosi interventi di consolidamento delle fondazioni e di miglioramento sismico. Nel 1973, a causa delle condizioni precarie della torre, furono sostituiti i solai esistenti in legno con quelli attuali in calcestruzzo armato, la scala in legno con quella metallica e furono realizzati dei pali radice in corrispondenza dello sperone metallico inserito nei primi del '900. Nel 1978, a causa dell'inefficacia dei pali radice, si formarono nuove lesioni nella muratura. Altri interventi furono eseguiti fino al 1985:

- consolidamento con iniezioni armate e perforazioni;
- costruzione di una nuova palificata a raggiera in grado di portare il peso della torre;
- ingabbiamento della muratura di fondazione con camicia in calcestruzzo armato e perforazioni armate di collegamento;
- costruzione di una platea di fondazione sulla testa dei pali;
- consolidamento del basamento con incamiciatura in calcestruzzo armato interna connessa alla muratura esistente (Figura 7).

La torre è alta complessivamente 44 metri circa, 40 sopra il piano campagna e 4 interrati, divisi tra piano seminterrato e fondazioni. Complessivamente si contano 7 piani senza considerare il sottotetto. La sezione è quella tipica delle torri, ovvero scatolare cava, a pianta quadrata, mono connessa. A livello di basamento ha lato di circa 7 metri, che arriva a gradualmente a 6,7 m alla fine del basamento, rimanendo pressoché costante in elevazione. Gli elementi strutturali orizzontali sono solette in calcestruzzo armato di spessore



Figura 6. Vista aerea della Torre degli Smeducci.



Figura 7. Gabbia metallica della incamiciatura in cemento armato realizzata nel 1985 (da Paolo Rocchi, Torre Civica di San Severino Marche (MC). Relazione Tecnica, 1992).



Figura 8. Ortofoto dell'area sommitale del Monte Nero (elaborazioni da: Stefano Persico, Rapid mapping multiplatforma per rilievi 3D post emergenza. Le analisi della Torre degli Smeducci a San Severino Marche, tesi di laurea, Politecnico di Torino, relatori Andrea Maria Lingua, Filiberto Chiabrando, 2017).

compreso tra i 20 e 25 cm nei primi 5 piani, mentre negli ultimi due ci sono volte a botte in muratura. Lo spessore delle murature del basamento è mediamente di 175 cm a cui sono stati aggiunti 25 cm di incamiciatura in calcestruzzo armato, mentre in corrispondenza della cella campanaria è stato misurato uno spessore di 110 cm.

2.1 Rilievo 3D multisensore

Per consentire di documentare il contesto della sommità del Monte Nero e soprattutto per individuare con attenzione gli elementi da monitorare è stato eseguito un rilievo 3D multi-sensore completo dell'area della collina e delle due torri. Dopo la misura e materializzazione della rete di inquadramento utile alla definizione del sistema di riferimento e la disposizione di alcuni marker sul terreno necessari per le elaborazioni fotogrammetriche, sono stati pianificati e realizzati alcuni voli con sistemi UAV ad ala fissa e multi-rotore³. Per la realizzazione degli elaborati metrici utili alla documentazione alla scala territoriale quali l'ortofoto e il modello digitale del terreno, è stato seguito il tradizionale processo fotogrammetrico basato su tecniche *Structure from Motion*⁴. Nella Figura 8 è riportata l'ortofoto prodotta grazie all'elaborazione dei dati acquisiti con il drone ad ala fissa eBee della Sensefly equipaggiato con la camera Canon S110 (quota di volo pari a 100 m dimensione del pixel a terra 3,5 cm). Oltre alla generazione degli elaborati alla scala urbana per un'attenta documentazione delle torri sono state eseguite ulteriori acquisizioni multi-sensore per una più dettagliata definizione geometrica delle strutture (Figura 9). Alle operazioni fotogrammetriche a scala architettonica, si sono affiancati i rilievi laser scanner terrestri per integrare il livello di dettaglio sui fronti esterni ed è stato sperimentato infine il sistema ZEB1 (Figura 10) della Geoslam⁵, un sistema emergente di mapping mobile⁶ impiegato a San Severino per il rilievo della consistenza interna della Torre degli Smeducci. Lo strumento si basa sulla tecnica SLAM che deriva dall'acronimo inglese *Simultaneous Localization And Mapping*. Inizialmente utilizzata nel campo della robotica per la navigazione in tempo reale, oggi la tecnologia SLAM trova largo impiego nel mapping veloce tridimensionale. Lo strumento che è equipaggiato con un sensore inerziale (IMU) ed uno laser (profilometro), grazie agli algoritmi di gestione del sistema, è in grado di analizzare la traiettoria percorsa durante l'acquisizione e di posizionare i punti acquisiti in funzione del tempo percorso, attraverso rotazioni e traslazioni delle acquisizioni, con conseguente capacità di ricostruire in 3D la scena ripresa (Figura 10b). In altre parole, la tecnologia SLAM affina il processo grazie al quale uno strumento che si muove in un ambiente sconosciuto riesce in modo simultaneo a costruire il modello 3D di tale ambiente (Figura 10b) e a localizzarsi all'interno di esso. Il grande vantaggio di questo sistema è la possibilità di acquisire informazioni 3D muovendosi all'interno dell'ambiente che si intende rilevare a differenza degli scanner terrestri tradizionali che non possono essere assolutamente spostati durante l'acquisizione. Grazie a tale strumento è stato quindi possibile integrare il rilievo interno ed esterno della torre⁷ e realizzare i tradizionali elaborati grafici 2D utili allo studio ed all'installazione del sistema di monitoraggio. In alcuni punti della torre le misure eseguite con il sistema SLAM sono state integrate da rilievi diretti utili per definire

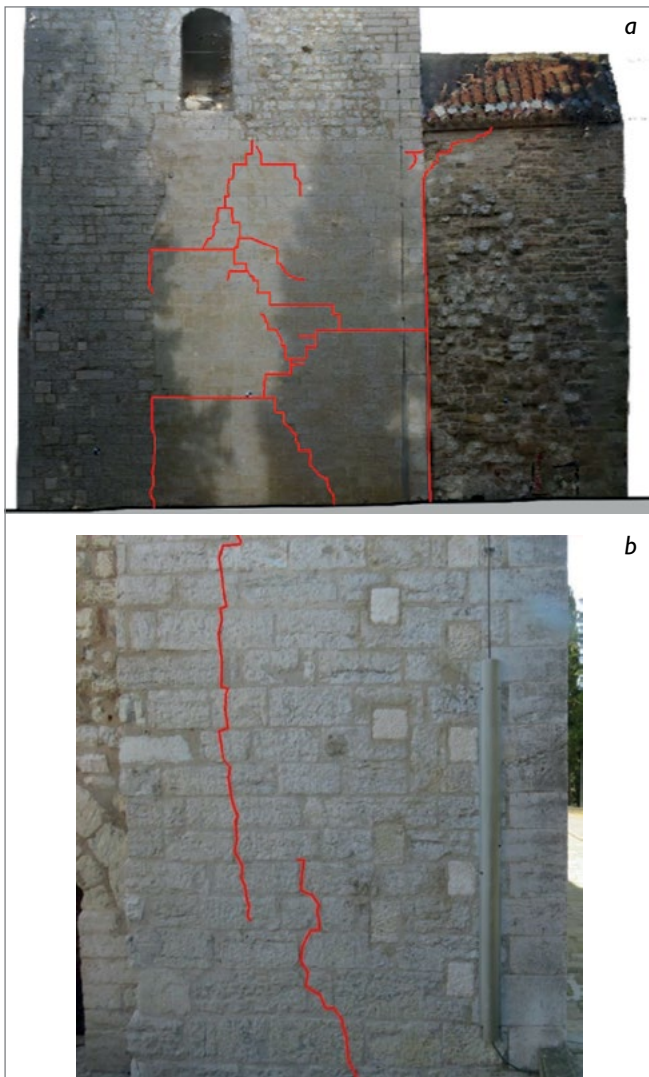


Figura 12. Dettagli dei quadri fessurativi sulla parete sud (a) e ovest (b).

2.2 Modellazione della struttura

L'eterogeneità delle caratteristiche murarie e degli interventi di consolidamento hanno suggerito una modellazione a elementi solidi. Il modello numerico è stato realizzato in ambiente MIDAS⁸. La mesh è costituita da elementi *brick* a 4 e 8 nodi, con dimensioni dell'elemento comparabili allo spessore dei singoli paramenti e infittimenti in corrispondenza delle aperture. Il modello risulta composto da 94389 elementi e 73703 nodi (Figura 13a).

La fondazione è stata modellata come blocco rigido e il terreno è stato schematizzato alla Winkler.

Le tipologie murarie individuate nella struttura sono le seguenti:

- muratura a blocchi lapidei quadrati, tipologia individuata nel paramento interno ed esterno del basamento;
- muratura in mattoni pieni e malta di calce, tipologia individuata nel paramento interno ed esterno del fusto.
- muratura in pietrame disordinato (ciottoli, pietre erratiche e irregolari), costituisce il riempimento dei paramenti sia nel basamento che nella parte del fusto.

Le caratteristiche meccaniche delle singole tipologie sono state definite sulla base delle indicazioni riportate dalla normativa italiana per edifici esistenti in muratura⁹, assumendo i valori medi per i moduli elastici e i valori minimi per le resistenze. A tali valori sono stati applicati i coefficienti correttivi suggeriti in funzione della qualità delle componenti e della presenza di interventi di consolidamento. In Tabella 1 si riportano i valori di riferimento assunti.

Descrizione della tipologia muraria	Parametri meccanici			
	E_{medio} (MPa)	$f_{m,\text{min}}$ (MPa)	$\tau_{0,\text{min}}$ (MPa)	W (kN/m ³)
Muratura in blocchi lapidei quadrati	6854	14,7	0,22	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	3375	5,4	0,13	18
Muratura in pietrame	2349	4,0	0,08	19

Tabella 1. Parametri meccanici di riferimento delle tipologie murarie.

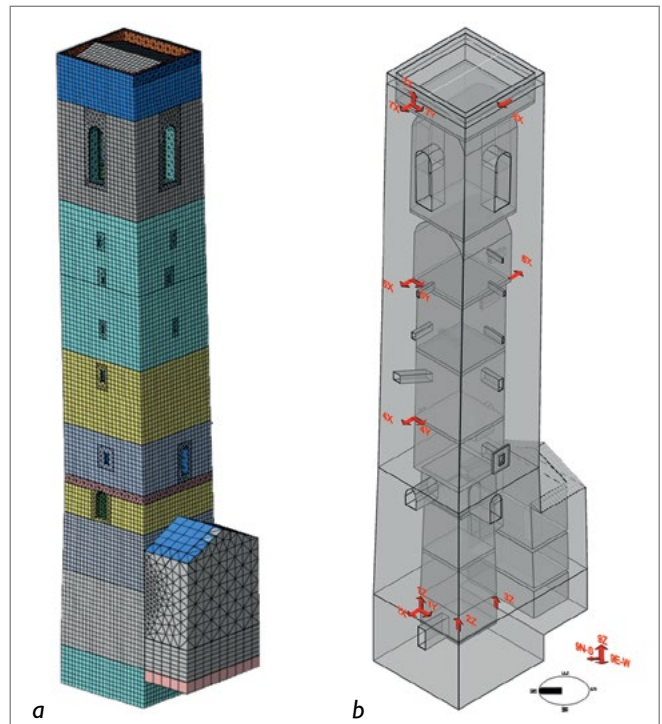


Figura 13. Modello FEM della torre degli Smeducci (a) e posizione degli accelerometri (b).

2.3 Il sistema di monitoraggio dinamico

Sulla struttura è stato installato un sistema di monitoraggio continuo, finalizzato a rilevare la risposta dinamica nel tempo attraverso la misura di storie temporali di accelerazioni con una frequenza di campionamento pari a 100 Hz. Complessivamente sono stati installati 17 accelerometri mono assiali capacitivi. Gli accelerometri sono stati posizionati lungo le due direzioni principali della torre a differenti livelli in modo da valutare i parametri modali della struttura (Figura 13a). Per studiare l'interazione terreno-struttura, in



Figura 14. Terna accelerometrica free field.

aggiunta alla terna *free field* (Figura 14), sono state collocate una terna triassiale e due accelerometri mono assiali in direzione verticale al piano interrato e una terna triassiale in copertura. Sono misurate inoltre la temperatura dell'aria esterna ed interna e la temperatura della muratura.

2.4 Identificazione modale

I dati sperimentali rilevati sono stati analizzati al fine di stimare i parametri modali principali attraverso procedure di identificazione dinamica operanti nel dominio del tempo. I segnali accelerometrici acquisiti in condizioni di eccitazione ambientale hanno permesso di identificare le caratteristiche dei principali modi di vibrare della struttura. In aggiunta, è stato identificato il modo di vibrare lungo la direzione verticale dalla analisi delle risposte registrate in concomitanza di eventi sismici di bassa intensità. Le caratteristiche identificate sono riportate in Tabella 2.

Modo	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]	Descrizione
F1Y	1,25	0,5%	I Flessionale Y
F1X	1,36	0,6%	I Flessionale X
T1	4,37	0,9%	Torsionale
F2Y	4,52	0,4%	II Flessionale Y
F2X	4,91	1,4%	II Flessionale X
V1Z	9,50	N.D.	verticale

Tabella 2. Modi sperimentali.

2.5 Miglioramento del modello

I parametri modali sperimentali sono stati utilizzati per tarare i parametri meccanici del modello numerico attraverso una procedura di *model updating* suddivisa in due fasi. Nella prima fase si è valutata l'influenza dell'interazione tra terreno e struttura operando sulla rigidezza delle molle lineari alla base e tenendo fisse le altre proprietà meccaniche.

La procedura è basata sull'analisi dell'amplificazione della risposta verticale tra il livello della fondazione e la sommità della torre. In particolare, la rigidezza del sistema terreno-fondazione è stata stimata adottando un modello semplificato ad un grado di libertà. Nota la massa e stimata la frequenza del modo di vibrare verticale è possibile definire la rigidezza complessiva verticale del vincolo di base, risultata pari a 135 GN/m.

Successivamente è stata condotta la correzione dei parametri meccanici delle componenti strutturali in elevazione. La procedura è stata preceduta da un'analisi di sensitività volta alla determinazione delle variabili che maggiormente influenzano la risposta del modello FEM. Da tale analisi si desume che i materiali del basamento hanno influenza maggiore sui primi modi di vibrare, mentre i modi torsionali e flessionali superiori sono influenzati maggiormente dalle caratteristiche dei materiali costituenti il fusto in elevazione. Il *model updating* è stato eseguito adottando il metodo di Douglas-Reid¹⁰. Tale metodo consiste nel definire un modello pseudo-strutturale che approssima adeguatamente la risposta del modello FEM in funzione delle variazioni dei parametri meccanici, definite in un intervallo limitato. Tramite un processo iterativo è stato quindi possibile individuare la combinazione di parametri attraverso la minimizzazione delle differenze tra le risposte numeriche e sperimentali. Il modello pseudo-strutturale è stato definito assumendo un intervallo di variazione di $\pm 30\%$ dei moduli elastici e di $\pm 15\%$ delle densità di massa. La Tabella 3 riassume i parametri utilizzati nella procedura con indicazione dei valori iniziali e di quelli ottimizzati.

Parametro	Valore iniziale	Valore ottimizzato
E_p [GPa]	12,0	14,3
E_r [GPa]	4,25	5
$E_{p,Fess}$ [GPa]	12,0	11,1
$E_{r,Fess}$ [GPa]	4,25	3,9
E_m [GPa]	3,0	2,35
E_r [GPa]	2,0	1,9
ρ_m [kN/m ³]	18,0	18,7
ρ_r [kN/m ³]	19,0	17,8
K_W [GN/m]	130	133

Tabella 3. Valori iniziali dei parametri.

E_p = Modulo elastico paramento in pietra

E_r = Modulo elastico riempimento

$E_{p,Fess}$ = modulo elastico del paramento in pietra fessurato

$E_{r,Fess}$ = Modulo elastico del riempimento fessurato

E_m = Modulo elastico paramento in mattoni

E_r = Modulo elastico riempimento nel fusto

ρ_m = densità muratura in mattoni

ρ_r = densità muratura nel fusto

K_W = Rigidezza totale alla base.

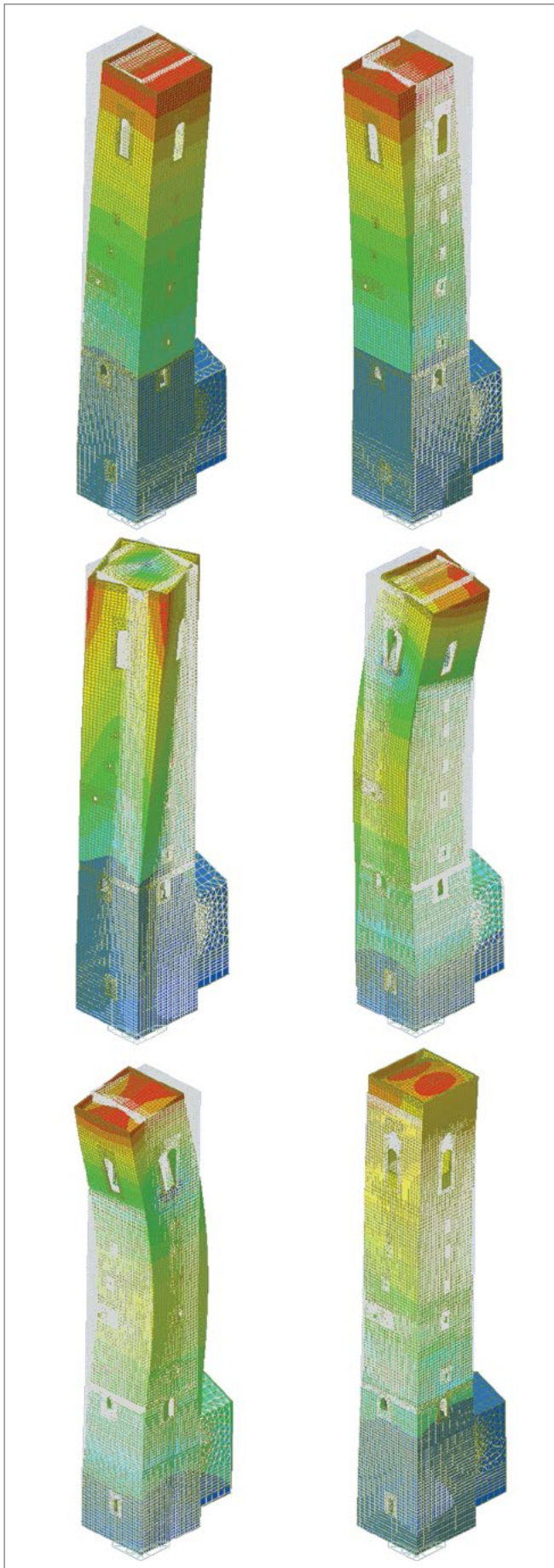


Figura 15. Forme modali del modello dopo la procedura di updating.

Modo	f_{exp} (Hz)	f_{fem} (Hz)	Δ_F %	MAC
F1Y	1,25	1,25	-0,17%	72%
F1X	1,36	1,28	-6,14%	87%
T1	4,37	4,60	5,29%	95%
F2Y	4,52	4,80	6,12%	79%
F2X	4,91	4,91	0,01%	77%
V1Z	9,50	8,93	-5,08%	-

Tabella 4. Confronto tra parametri modali sperimentali e del modello dopo la procedura di updating.

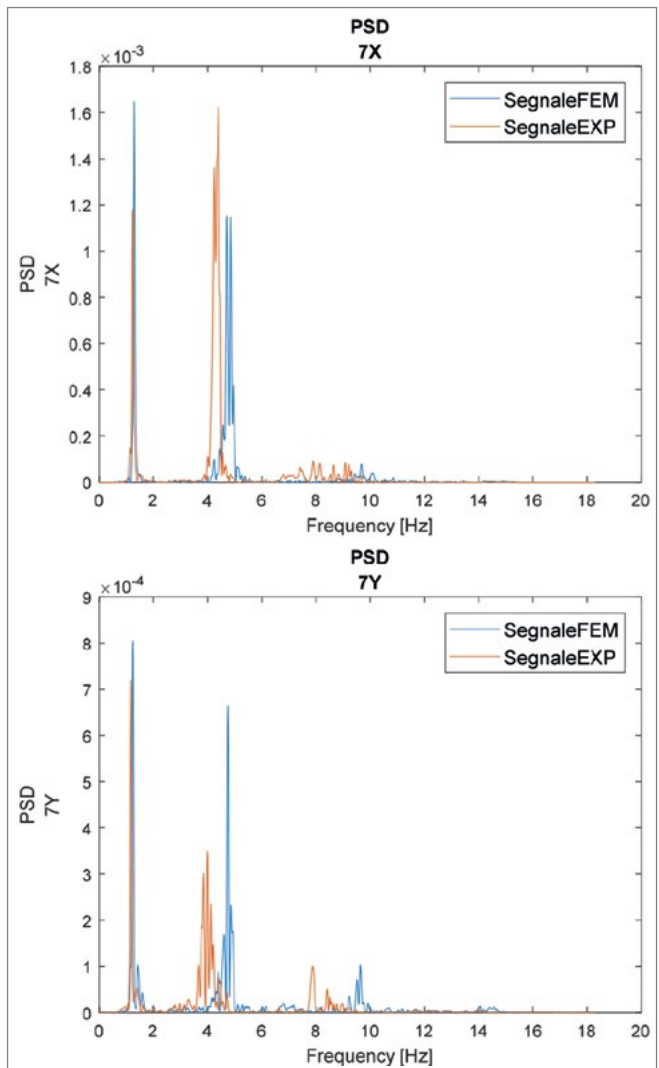


Figura 16. Confronto delle PSD dei segnali registrati (in rosso) e numerici (in blu) per le posizioni 7X e 7Y.

L'analisi modale del modello corretto ha permesso di ottenere i parametri modali riportati in Tabella 4 a cui sono associate le deformate modali rappresentate in Figura 15. La tabella riporta inoltre gli scarti rispetto alle frequenze sperimentali e il livello di coerenza delle deformate modali valutato mediante il parametro *Modal Assurance Criterion* (MAC)¹¹.

La verifica della qualità del modello corretto è stata effettuata attraverso un'analisi dinamica lineare, integrando le storie temporali registrate dai sensori *free-field* e confrontando le risposte. In questo caso è stata utilizzata la storia temporale del sisma registrato il 10/04/2018 di magnitudo Mw 4.7 con epicentro a Muccia (MC), sito a 20 km S-O rispetto a San Severino Marche. Dal confronto delle risposte spettrali (PSD) sperimentali e numeriche valutate in cima alla torre (posizioni 7X e 7Y in Figura 16), si evidenzia una corrispondenza accurata alle basse frequenze, mentre maggiori errori si hanno per le componenti spettrali superiori.

2.6 Analisi statica non lineare

La valutazione della vulnerabilità sismica della Torre degli Smeducci è stata eseguita mediante analisi statica non lineare (*pushover*). Il modello non lineare dei materiali è stato definito adottando una legge costitutiva di tipo elastico-plastico con resistenza infinita a compressione e nulla a trazione. Le analisi sono state condotte applicando un carico incrementale lungo ciascuna direzione principale della torre con profilo proporzionale alla forma del corrispondente modo flessionale principale. Le analisi sono state condotte secondo le indicazioni riportate dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)¹², ricavando per ciascun profilo di carico la curva di capacità riportante il taglio alla base in funzione dello spostamento di punto di controllo lungo direzione del carico, scelto nel centro di massa dell'ultimo livello della torre. La valutazione della domanda sismica è stata valutata adottando il metodo dell'oscillatore equivalente a un grado di libertà (N2). L'analisi è stata spinta fino a ottenere il superamento della tensione di compressione ultima, stimata pari a 2 MPa dalle prove sperimentali eseguite durante i lavori di consolidamento degli anni '90.

Il confronto tra la capacità e la domanda sismica ha permesso di valutare un indice di sicurezza sismica. La Tabella 5 riporta sinteticamente i risultati delle analisi, dalle quali si desume che, nella condizione peggiore, l'indice di sicurezza è pari all'80% della domanda definita dalla norma.

Tale condizione di carico è quella che vede l'azione orizzontale nel senso di inclinazione della torre, mentre per distribuzioni lungo la direzione ortogonale è prossima all'unità. Tale risultato evidenzia come l'inclinazione della torre, causata da cedimenti statici in fondazione, causi un apprezzabile incremento della vulnerabilità sismica.

Dir.	F _u [kN]	d _u [m]	d* _{max} [m]	d _{max} [m]	d _u /d _{max}	q
+Y	3186	0,111	0,061	0,108	1,03	1,62
-Y	2441	0,085	0,061	0,107	0,80	1,47
+X	2814	0,102	0,063	0,102	0,94	1,56
-X	2814	0,143	0,060	0,107	1,34	2,19

Tabella 5. Sintesi dei risultati dell'analisi push over.

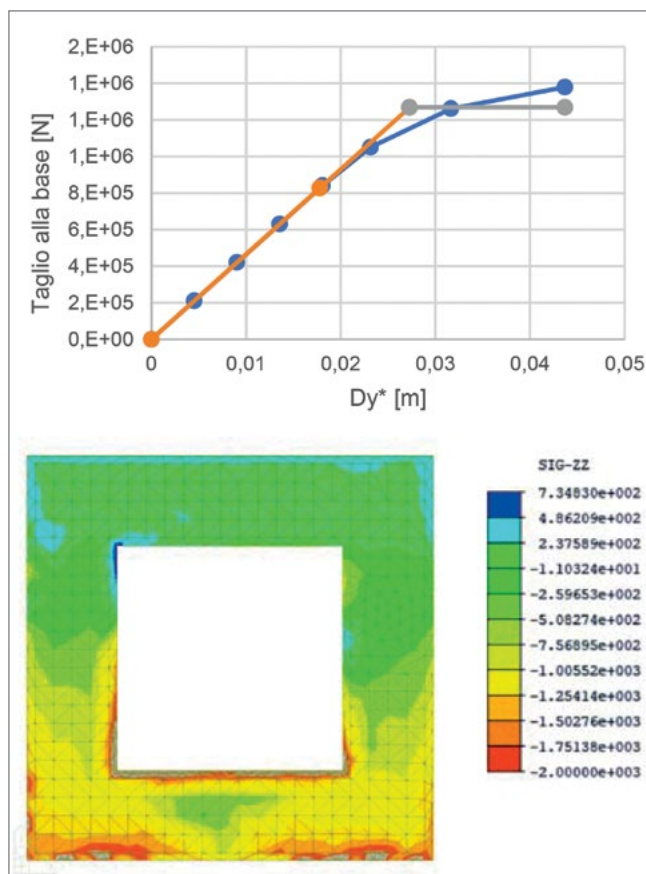


Figura 17. Curva di capacità per distribuzione in direzione -Y e distribuzione delle tensioni nella sezione critica.



Figura 18. Planimetria del piazzale della Torre degli Smeducci. Nel dettaglio: disposizione stendimenti MASW-1 e MASW-2 e punti di acquisizione prove HVSR-2 e HVSR-3 distribuite sull'area di indagine.

2.7 Caratterizzazione geofisica e studio preliminare della risposta sismica locale del sito

Il monitoraggio dinamico strutturale della Torre degli Smeducci è stato accompagnato da una caratterizzazione geofisica del sito su cui sorge la costruzione propedeutica a una analisi preliminare della risposta sismica locale. In particolare, la caratterizzazione geofisica si è composta di 2 prove per onde superficiali MASW (*Multistation Analysis of Surface Waves*) e 2 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) riportate nella Figura 15 (MASW-1 e MASW-2, HVSR-2 e HVSR-3). Sia le prove MASW che le prove HVSR sono state condotte in posizioni differenti nell'area del piazzale della torre, in modo da identificare eventuali disomogeneità spaziali. Tali possibili disomogeneità erano state infatti evidenziate da una precedente relazione geologica¹³, di cui si riporta la sezione C-D in Figura 19, come esempio.

Le fasi di processamento del dato geofisico hanno portato alla scelta dei soli risultati della curva di dispersione sperimentale ottenuta dalla prova MASW-2 e della curva di ellitticità sperimentale ottenuta dalla prova HVSR-2. La prima è scelta è stata dettata dalla migliore qualità del dato acquisito e dalla posizione che fornisce un'informazione della parte più lontana dalla scarpata e più attendibile per le condizioni prettamente sottostanti la torre. D'altra parte, la scelta del solo dato sperimentale proveniente dalla HVSR-2 è stato obbligato dai criteri di qualità proposti dal progetto

SESAME, i quali hanno scartato il dato sperimentale della prova denominata HVSR-3.

Una volta acquisito e processato il dato geofisico, si è proceduto alla sua inversione tramite tre metodi differenti. I primi due sono basati sulla sola curva di dispersione sperimentale, utilizzando due approcci e software differenti. Il terzo metodo sfrutta in maniera combinata sia l'informazione sperimentale della prova MASW, sia della prova HVSR, operando quella che si definisce una inversione congiunta. I risultati di questi tre approcci hanno fornito un risultato assolutamente compatibile in termini di profilo di velocità delle onde di taglio, riportato in Figura 20. Da questa figura è possibile associare la condizione stratigrafica a un sottosuolo di classe B, secondo i dettami della Normativa italiana NTC 2018.

Una volta conclusa la caratterizzazione geofisica del sito, si è passati a una valutazione preliminare della risposta sismica locale. Per questo scopo si sono scelti 7 accelerogrammi spettrocompatibili rispetto allo spettro di Normativa associato a una probabilità di eccedenza del 10% in un tempo di riferimento di 50 anni (tempo di ritorno di 475 anni corrispondente allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita, SLV). Le analisi preliminari di risposta sismica locale sono state effettuate con un modello monodimensionale e un approccio lineare elastico equivalente. I risultati finali, considerando sia le incertezze sui diversi modelli di velocità delle onde di taglio sia i 7 differenti input, sono forniti in Figura 21, insieme con gli spettri

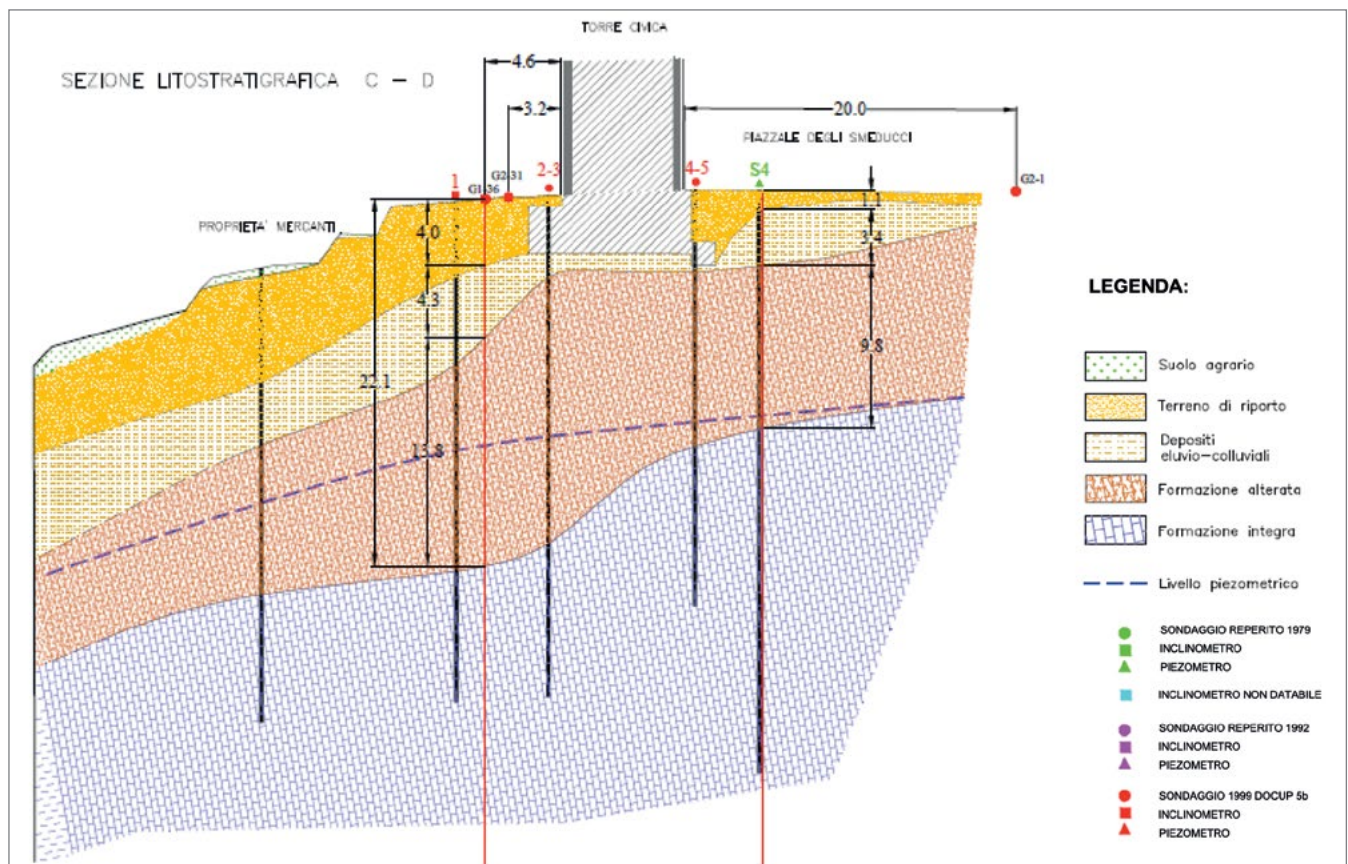


Figura 19. Sezione geologica C-D del piazzale della Torre degli Smeducci che evidenzia chiaramente la disomogeneità spaziale del sottosuolo investigato.

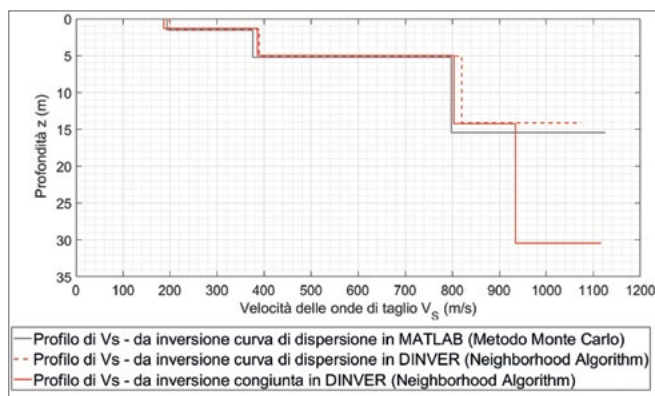


Figura 20. Confronto dei profili di velocità delle onde di taglio ottenuti rispettivamente dalle inversioni della sola curva di dispersione e dall'inversione congiunta.

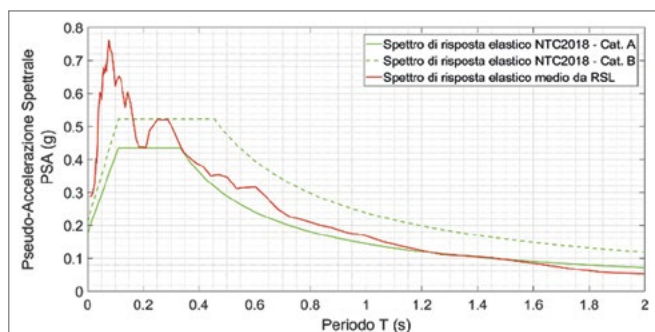


Figura 21. Spettri di risposta in superficie ottenuti mediante l'adozione della Normativa (NTC 2018) per suoli di categoria A e B e confronto con i risultati delle analisi preliminari di risposta sismica locale ottenuti mediando i diversi profili di velocità delle onde di taglio e i diversi input accelerometrici.

di normativa associati ad una condizione di suolo di tipo A e B. Tali spettri sono da mettere in relazione con il periodo proprio predominante della struttura della torre, che si aggira intorno a 0,8 s, come mostrato in Tabella 4.

3. Conclusioni

Per la parte di rilievo metrico 3D, alla luce dei risultati ottenuti si evince chiaramente l'importanza dell'integrazione tra varie tecniche e sensori, in quanto sulle strutture analizzate è stato possibile descrivere con attenzione la geometria che ha consentito di individuare le caratteristiche strutturali dell'oggetto e di conseguenza valutare con attenzione la tecnica di monitoraggio più opportuna. Oltretutto la disponibilità di dati tridimensionali ha consentito la generazione del modello utile all'analisi FEM con un dettaglio decisamente elevato. Infine, la possibilità di sperimentare i sistemi SLAM all'interno delle strutture analizzate ha consentito di velocizzare notevolmente la parte di rilievo della consistenza delle torri, peraltro già sperimentato¹⁴, in quanto con altre tecniche LiDAR, o fotogrammetrica, sarebbe stato sicuramente gravosa in termini sia del tempo di acquisizione che di elaborazione. L'analisi dei dati provenienti dal sistema di monitoraggio installato permetterà di valutarne il comportamento nel tempo.

L'osservazione di deviazioni dal comportamento normale delle stesse, anche a seguito di eventi sismici, potrà quindi segnalare l'opportunità di investigazioni più approfondite per valutare l'eventuale evoluzione o insorgenza di danneggiamenti.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato da JSPSKAKENHI(S) (Research leader Prof. Takayoshi Aoki, Grant Number 16H06363) e dalla Foundation for Cultural Heritage and Art Research. Gli autori ringraziano il Comune di San Severino Marche per il supporto avuto in tutte le fasi di installazione del sistema di monitoraggio.

Note

¹ Federico Guidobaldi, *Notizie preliminari sulle nuove scoperte archeologiche nel Duomo Vecchio di San Severino Marche*, in «Rivista dell'istituto nazionale d'archeologia e storia dell'arte», 34(66), 2011, pp. 165-180.

² Raoul Paciaroni, *La torre del castello di Sanseverino e le sue funzioni di avvistamento e di segnalazione*, Associazione Palio dei Castelli, Sanseverino Marche 2014.

³ Arnadi Murtiyoso, Mathieu Koehl, Pierre Grussenmeyer, Tristan Freville, *Acquisition and processing protocols for UAV images: 3D modeling of historical buildings using Photogrammetry*, in «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», IV-2/W2, 2017, pp. 163-170; DOI:10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-163-2017.

⁴ Hideharu Yanagi, Hirofumi Chikatsu, *Performance evaluation of 3D modeling software for UAV Photogrammetry*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLI-B5, 2016; DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-147-2016.

⁵ Mehdi Maboudi, David Bánhidi, Markus Gerke, *Evaluation of indoor mobile mapping systems*, in Atti della 20th Application-oriented Workshop on Measuring, Modeling, Processing and Analysis of 3D-Data, 2017, pp. 125-134.

⁶ Erica Nocerino, Fabio Menna, Fabio Remondino, Isabella Toschi, Pablo Rodríguez-González, *Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems*, in Proceedings of SPIE 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV, 103320I, June 2017; DOI:10.1117/12.2270761.

⁷ Cfr. in questo volume il contributo a p. 202.

⁸ MIDAS Information Technology, MIDAS Family programs, 2018.

⁹ Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, *Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008*.

¹⁰ Bruce M. Douglas, Wayne H. Reid, *Dynamic tests and system identification of bridges*, in «Journal of the Structural Division», 108 (10), 1982, pp. 2295-2312.

¹¹ Randall J. Allemang, *The modal assurance criterion-twenty years of use and abuse*, in «Sound and Vibration», 37(8), 2003, pp. 14-23.

¹² Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Decreto Ministeriale 17/01/2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.

¹³ Marcello Maccari, Alessandro Onorati, *Riparazione dei danni e miglioramento sismico Torre degli Smeducci*. Ricostruzione Post Sisma (DOCUP 5b), 1999. *Relazione geologica e geotecnica*.

¹⁴ Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*, in «Applied Geomatics», 10(4), 2018, pp. 317-339.