

Studio e monitoraggio del patrimonio costruito alla scala dei beni: modellazione 3D per l'analisi sismica della basilica di San Nicola a Tolentino

Architectural scale studies and monitoring of built heritage: 3D modelling for the seismic analysis of the basilica of San Nicola in Tolentino

DONATO SABIA, NANNINA SPANÒ, RENATO LANCELLOTTA, ANTONINO QUATTRONE, ADRIANA PASCALE, FILIBERTO CHIABRANDO, ANDREA LINGUA, TAKAYOSHI AOKI

Abstract

La basilica di San Nicola a Tolentino fa parte delle strutture oggetto di studio della task force del Politecnico di Torino, nell'ambito delle attività svolte nell'Italia centrale nella fase post sisma del 2016. Tali attività fanno parte di un piano di cooperazione strategica tra il Comune di Tolentino, il Politecnico di Torino e la Nagoya City University. Sulla basilica sono state effettuate una serie di operazioni mirate all'analisi dello stato di conservazione, geometrico e strutturale. Le operazioni condotte hanno riguardato il rilievo metrico 3D con tecniche avanzate fotogrammetriche e laser scanning, la costruzione di un modello 3D della basilica e l'installazione di un monitoraggio dinamico continuo nel tempo. Le informazioni acquisite hanno permesso di realizzare e tarare un modello numerico agli elementi finiti funzionale all'interpretazione del comportamento della struttura rispetto l'azione sismica. Il sistema di monitoraggio è stato installato nel mese di aprile del 2017 e questo articolo riporta i risultati delle analisi eseguite sui dati acquisiti nei primi mesi di funzionamento.

The Basilica of San Nicola in Tolentino is part of the structures studied by the Politecnico di Torino task force, in the context of the activities carried out in central Italy in the post-earthquake phase of 2016. These activities are part of a strategic cooperation plan between the Municipality of Tolentino, the Politecnico di Torino and Nagoya City University. A series of operations were carried out on it aimed at analyzing the geometric and structural state of conservation. The operations carried out concerned the 3D metric survey with advanced geomatics techniques, the construction of a 3D model of the Basilica and the installation of continuous dynamic monitoring over time. The information acquired made it possible to create and calibrate a finite element numerical model purposed to the interpretation of the behavior of the structure with respect to the seismic action. The monitoring system was installed in April 2017 and this article reports the results of the analyses performed on the data acquired in the first months of operation.

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

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

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

Adriana Pascale, dottoranda in Ingegneria civile e ambientale, Politecnico di Torino.
adriana.pascale@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

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

1. La basilica: richiami sulla costituzione della fabbrica

La Basilica di San Nicola a Tolentino rappresenta un'importante eredità del patrimonio storico e artistico di interesse religioso a livello nazionale, per i caratteri architettonici che la costituiscono e per i rilevanti beni artistici in essa custoditi, che accompagnano il ruolo stratificato nei secoli di grande richiamo come centro di culto. La realizzazione del complesso risale al XIII secolo e, benché le trasformazioni rispetto al primo impianto siano significative, soprattutto la chiesa mantiene una elevata unitarietà, a navata unica mono-absidata,



Figura 1. (a) Vista aerea della Basilica di San Nicola e dell'adiacente chiostro e convento (ripresa da drone, febbraio 2017). Vista interna del Cappellone di San Nicola: (b) centro e (c) navata della basilica.

e in origine, a terminazione rettilinea, secondo un modello già adottato da altre fondazioni eremitane in Centro Italia¹. Gli interventi integrativi e di trasformazione del complesso (Figura 1a) si devono soprattutto alla Congregazione osservante di Lombardia che subentrò nella gestione del convento di Tolentino nel 1485, dopo la consacrazione della figura di Nicola che avvenne nel 1476², da cui derivò sia l'intitolazione attuale della basilica sia l'ampliamento della navata centrale (1503) come attualmente si presenta. All'inizio del XIV secolo era già stata realizzata la porzione absidale, mentre nelle ultime decadi del secolo si completava anche il chiostro, la cui lunga edificazione è testimoniata dal cambiamento degli stili di colonne e capitelli; tra il 1432 e il 1435 fu realizzato il portale gotico fiorito, completato da un ricco apparato scultoreo da parte del fiorentino Nanni di Bartolo³ (Figura 1b).

Il luogo di maggior interesse della basilica tolentinate è costituito dalla grande aula che si apre sul lato nord-est del chiostro e che, per la sua vasta dimensione, è comunemente noto fin dal XVIII secolo come "Cappellone di San Nicola". Qui hanno trovato sede i resti mortali del Santo, a

partire da una data che non è possibile precisare con sicurezza. La sala è rinomata soprattutto per la sua decorazione pittorica, una delle più vaste e meglio conservate tra quelle pervenute dei primi anni del Trecento, opera, secondo le proposte critiche più recenti, di maestranze riminesi capeggiate dal pittore Pietro da Rimini⁴.

Tra i successivi e diversi interventi di ampliamento, che si protrassero fino al XVII secolo, alcuni sono di particolare rilevanza per la chiesa e soprattutto per le sue vulnerabilità che nel seguito saranno discusse. L'abside poligonale a sette lati con archi a tutto sesto che si innesta nella parte terminale della chiesa è cinquecentesca e affianca la cappella delle Sante Braccia, che si sviluppa a partire dalla sacrestia del XV secolo. Nel corso del XVII secolo viene completata la cappella del Santo Sacramento⁵; negli anni trenta dello stesso secolo gli agostiniani decidono di costruire le cappelle interne allargando i fianchi della chiesa (Figura 1c), ritagliando lo spazio dal portico settentrionale del chiostro medievale, che venne così ridotto di una campata; proprio questo intervento suggerisce l'introduzione di una criticità costruttiva che verrà discussa come un elemento di vulnerabilità della struttura.

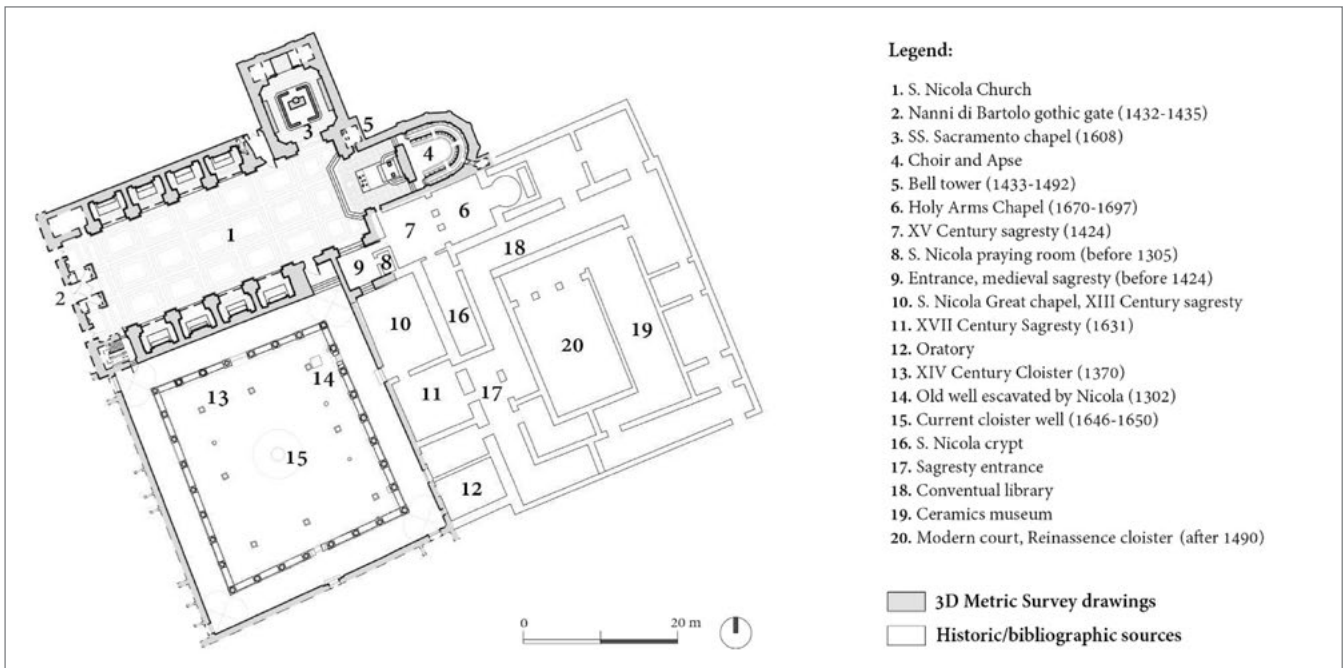


Figura 2. Planimetria del complesso della basilica e convento di San Nicola a Tolentino (restituzione della chiesa e del chiostro da rilievo 3D del team del Politecnico). Elaborazione tratta da: Carla Boriello, From point cloud based models to VR visualization for Cultural Heritage at risk: St. Nicola Church in Tolentino, tesi di laurea, Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Restauro e la valorizzazione del patrimonio, rel. F. Chiabrando A. Spanò, Politecnico di Torino, 2018. Per una graficizzazione schematica della cronologia della fabbrica, si confronti il contributo di G. Sammartano, N. Spanò, A. Accornero, pp. 217-221.



Figura 3. Lesioni in corrispondenza dei contrafforti del fronte: (a) vista aerea con ponteggi del fronte che raggiungono l'area della lesione; (b) una vista ravvicinata della lesione; (c) Giulia Sammartano, membro del team DIRECT, nella fase di programmazione della scansione laser sul ponteggio; (d) modello 3D geometrico e con texture dell'area della lesione.

Ricopre inoltre una posizione di assoluto rilievo tra gli ammodernamenti seicenteschi il soffitto a cassettoni ligneo, che con la ricchissima decorazione dorata costituisce un elemento di sicura qualificazione della chiesa⁶; sono invece i rifacimenti della facciata principale, che preservano ovviamente il portale gotico, ad aver probabilmente influito sulle criticità strutturali, riscontrate anche nell'attacco tra fronte e navata centrale.

2. Ispezione visiva dei danni

Gli eventi sismici susseguitisi a partire da agosto 2016 hanno causato rilevanti danni alla basilica, in particolare quella del 26 ottobre (epicentro Ussita, scala M. 5,9), che colse gli ospiti della struttura ricettiva nella quale è stato convertito il convento e che determinò la chiusura al pubblico del complesso. Significative sono le lesioni in corrispondenza dei contrafforti della facciata a livello della copertura. (Figura 3 a-d) L'entità delle lesioni ha fatto propendere per l'installazione di un sistema provvisorio in acciaio finalizzato alla protezione dalla caduta di elementi murari e decorativi distaccati. Diffuse fessurazioni sono presenti nelle murature d'ambito della navata, all'altezza della cornice marcapiano che si sviluppa al di sotto delle ampie aperture che danno luce alla chiesa, e in corrispondenza degli archi delle cappelle laterali (Figura 4 a, b, c). I danni più rilevanti hanno interessato le strutture del presbiterio, in particolare del tamburo della cupola e dei pennacchi (Figura 4 d, e, g). A ridosso dell'altare e del coro sulle pareti laterali sono presenti lesioni profonde che fanno ipotizzare un probabile distacco dell'abside dal corpo centrale della basilica (Figura 4 f). Distacchi e fessurazioni diffuse sono presenti nella cappella del SS Sacramento, mentre fessurazioni di lieve entità hanno interessato le volte del chiostro (Figura 4 g) e le pareti e volte affrescate del cappellone di San Nicola.

3. Rilievo metrico 3D⁷

Il rilievo metrico 3D del complesso di Tolentino è stato programmato sia per delineare le relazioni spaziali nel contesto estremamente fitto del tessuto storico del centro urbano, sia per consentire la successiva all'analisi dello stato di conservazione della fabbrica sia dal punto di vista geometrico, sia strutturale.

La campagna di rilievo realizzata ha previsto l'utilizzo sia di strumentazione topografica tradizionale (Total Station, GPS/GNSS – *Global Positioning System / Global Navigation Satellite System*), sia di sistemi di recente tecnologia *image based* e *range-based*. Tra i sistemi *image based* è stato sperimentato l'utilizzo di UAV, per applicare la fotogrammetria digitale supportata dalle tecniche SfM (*Structure from Motion*) sia sull'intero complesso architettonico, sia per sperimentarla nel chiostro e anche all'interno dell'imponente navata della chiesa (Figura 5); sono inoltre stati sperimentati sistemi *imaging 360°* (GOPRO ring, Figura 6) e *steadycam* stabilizzate (DJI Osmo)⁸. Tra

i metodi *range-based*, oltre all'utilizzo di strumenti a scansione laser terrestre (TLS) è stato utilizzato il sistema di *mapping* mobile basato su tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) per valutare le opportunità offerte da questi nuovi sistemi per rilievi speditivi sui beni architettonici colpiti dagli eventi sismici. Questi metodi, usati in modalità integrate (Figura 7), sono stati in grado di garantire un'acquisizione completa della geometria della struttura. Le superfici esterne – dalle coperture al chiostro, e sostanzialmente i corpi di fabbrica dell'intero complesso architettonico – sono stati rilevati mediante la fotogrammetria UAV. Gli ambienti interni di pregio, o che presentavano danni che necessitavano di una attenzione particolare – sostanzialmente la basilica, il chiostro e il cappellone – sono stati rilevati mediante TLS e fotogrammetria terrestre integrata. Infine, gli ambienti del convento, dell'attuale sacrestia e della cripta sono stati affrontati utilizzando il più speditivo rilievo basato su SLAM, che offre nuvole di punti meno dense e accurate se confrontate con la tecnica TLS, ma che garantisce sicuramente una buona restituzione degli aspetti formali e morfologici delle strutture storiche, comprese le consistenze delle masse murarie.

Il primo aspetto affrontato ha riguardato la realizzazione della rete topografica di inquadramento. Dovendo affrontare una documentazione completa (interno/esterno), per consentire il riferimento reciproco di tutte le acquisizioni del rilievo 3D e per garantire la georeferenziazione di tutti i prodotti derivati, è stato seguito un approccio misto che ha previsto la realizzazione di una rete con tecnica GPS/GNSS nella parte esterna al complesso (Figura 8), mentre negli ambienti interni è stata realizzata una rete di raffittimento topografico con vertici misurati mediante tecnica classica con l'uso della stazione totale. La rete principale, nonostante il tessuto urbano sia estremamente fitto e quindi sfavorevole per la ricezione del segnale GNSS da satellite, è stata calcolata ottenendo accuratissime finali delle coordinate dei vertici che si attestano su usuali pochi millimetri. La rete di raffittimento, che comprende vertici georiferiti sia all'esterno della basilica che al centro del chiostro, è stata calcolata determinando separatamente e mediante livellazione la stima delle quote dei vertici e delle loro accuratissime rispetto alla planimetria. Anche questa rete, compensata con metodo dei minimi quadrati, ha fornito una stima dell'accuratezza dell'ordine di pochi millimetri per la planimetria e sotto il mezzo centimetro in quota.

La prima fase di acquisizione di dati di dettaglio è stata realizzata con l'utilizzo di sistemi UAV. Gli schemi di volo impiegati sono quelli attualmente riconosciuti più efficaci in presenza di patrimonio costruito⁹; prevedono cioè, oltre l'acquisizione di immagini nadirali (asse della camera perpendicolare al terreno), anche l'utilizzo di immagini acquisite con l'asse di presa inclinato a circa 45° rispetto al terreno. Infine agli schemi di strisciate tradizionali sono state integrate strisciate di immagini lungo percorsi circolari,

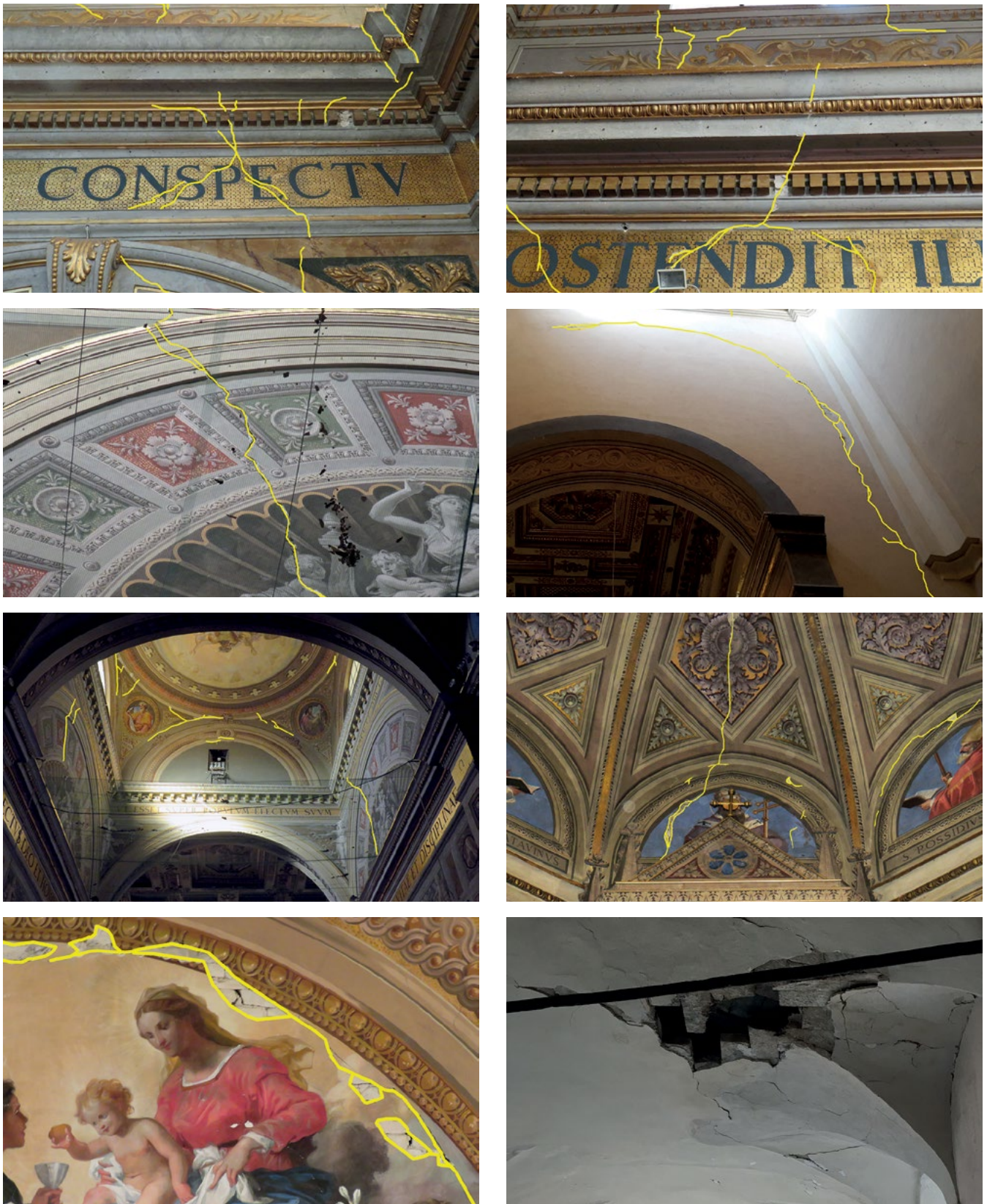


Figura 4. Lesioni diffuse nelle strutture del complesso: (a) fessurazioni delle murature della navata centrale nella zona di collegamento alla facciata, lato sud; (b) fessurazioni delle murature riprese dalla cantoria della controfacciata che ospita l'organo (lato nord); (c) profonda fessurazione nella zona terminale della navata, al di sotto dei pennacchi e della volta a vela; (d) profonda lesione nell'ambiente di passaggio tra il cappellone e la ex sacrestia, nella zona delle trasformazioni del XV sec.; (e) vista d'insieme della cupola centrale, con lesioni diffuse sui pennacchi; (f) lesione nell'abside, nel setto centrale del sistema poligonale a sette lati, che continua nell'unghia del sistema voltato; (g) gravi lesioni nell'arco di scarico della muratura (sotto i pennacchi centrali) che divide la porzione di chiesa corrispondente al primo impianto e l'area absidale successiva; (h) grave lesione nella volta del loggiato, nel lato settentrionale del chiostro; la fotografia ritrae la prima campata, in prossimità della zona facciata-controfacciata, che presenta danni anche al piano terreno.



Figura 5. Test di volo con micro-droni all'interno della navata per riprese video finalizzate a ispezioni ravvicinate sulle lesioni e per acquisizioni di fotogrammi destinati ad applicazioni fotogrammetriche (i piloti UAV della campagna del febbraio 2017 sono stati P. Maschio, F. Chiabrando e L. Teppati, rappresentato in foto).



Figura 8. Rete topografica principale determinata con tecnica GNSS, che abbraccia l'intero complesso architettonico, sul limitare delle mura della città.

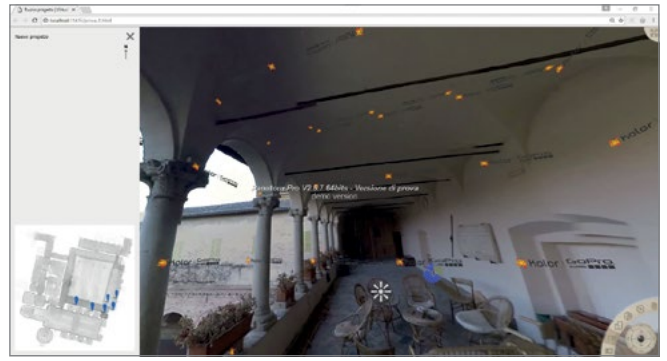


Figura 6. Navigazione di immagini sferiche in sistemi informativi che coniugano la possibilità di analizzare visivamente lo spazio ripreso dalle immagini e controllare la posizione di ripresa su mappe o viste in pianta di modelli di punti (la tesi di dottorato di Lorenzo Teppati ha affrontato lo studio di sistemi UAV e di camere sferiche o 360° per applicazioni fotogrammetriche in campo archeologico; è in corso di stampa un lavoro che coniuga sistemi 360° e scansioni basate su SLAM da parte di G. Sammartano, L. Teppati, N. Spanò).

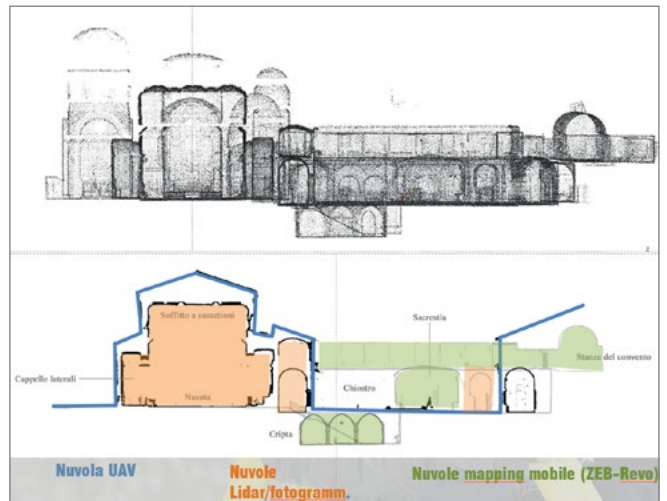


Figura 7. Strategia generale del rilievo metrico 3D, con indicazione della distribuzione delle tecniche di rilievo nei vari ambienti e loro integrazione.



Figura 9. Rete topografica di raffittimento determinata con tecnica classica, mediante stazione totale (vertici distribuiti nella chiesa, nel chiostrino e nel cappellone).



Figura 10. Un esempio di fotogramma del volo programmato per eseguire una traiettoria di volo circolare intorno al complesso e con asse inclinato.



Figura 11. Nuvola di punti densa generata utilizzando le strisciate di fotogrammi nadirali e inclinati.

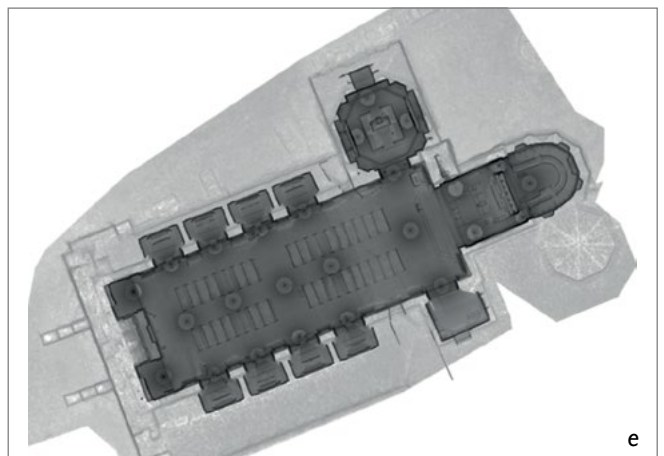
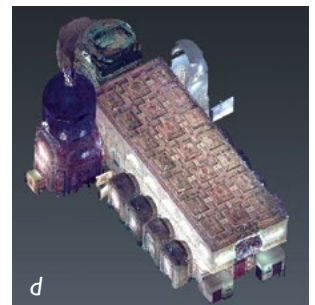
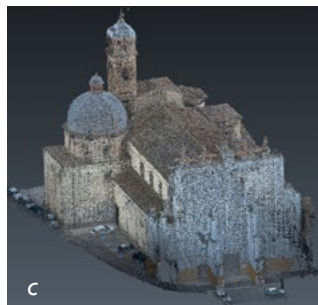
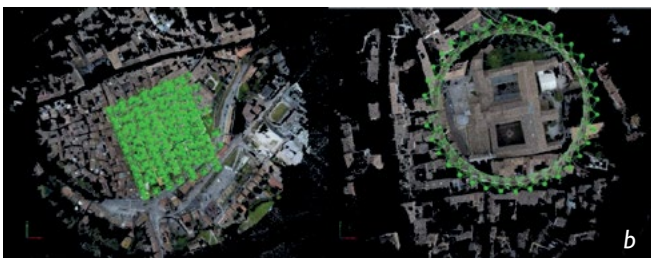


Figura 12. Elaborazioni dei voli fotogrammetrici: (a) nuvola densa alla scala urbana (GSD 2,2 cm) generata da immagini nadirali e oblique; (b) schemi di volo caratterizzati da strisciate parallele e traiettorie di volo circolare; (c) segmentazione della sola nuvola riguardante la basilica; (d) risultato della registrazione delle scansioni terrestri eseguite all'interno della basilica di San Nicola; (e) integrazione della nuvola aerea UAV e della nuvola di punti TLS dell'interno della basilica.

come sperimentato in altre occasioni¹⁰ I ricoprimenti longitudinali e trasversali progettati sono stati elevati (>80%) in quanto idonei per l'impiego dell'approccio SfM. Tutto ciò ha consentito una buona documentazione delle strutture sia in planimetria che in elevato (Figura 12 a-c).

I parametri principali del volo sono stati:

- quota media si volo: 63 m;
- numero di immagini (nadirali e oblique): 440;
- GSD (*Ground Sampling Distance*): 2,2 cm/pixel.

La Tabella 1 riporta i risultati del controllo della qualità dei dati, tipici di una applicazione fotogrammetrica, cioè la stima della precisione dei *Ground Control Points* (GCP) utilizzati per ottimizzare l'orientamento del blocco dei fotogrammi e quella dei *Check Points* (CP) che verificano il modello finale. La fase successiva è relativa alle acquisizioni terrestri, che sono state condotte con strumentazione ormai di comune utilizzo per i rilievi 3D del patrimonio costruito, come laser scanner terrestre e fotogrammetria close-range.

	x [m]	y[m]	z[m]
RMSE GCPs (15)	0,018	0,011	0,024
RMSE CPs (4)	0,02	0,033	0,07

Tabella 1. Risultati del controllo di precisione del modello fotogrammetrico.

Il rilievo TLS ha comportato l'acquisizione di circa 25 scansioni all'interno della basilica¹¹, per ricoprire adeguatamente l'intera aula, la porzione presbiteriale, compresa la cappella del SS Sacramento e la zona absidale; l'errore residuo medio dell'intera operazione di unione delle nuvole si è attestato su 4,5 mm, in linea cioè con gli standard di precisione ottenibili con questa tecnica (Figura 12 d).

Le elaborazioni portate a termine in queste prime fasi hanno consentito di ottenere delle nuvole di punti 3D complete esterno-interno della basilica (Figura 12 e) grazie alla possibilità offerta dalle reti topografiche di poter riferire le coordinate dei punti di tutte le nuvole a un unico sistema di coordinate, determinato appunto nella determinazione della rete GNSS e condotto all'interno della fabbrica mediante il raffittimento topografico. La parte di lettura architettonica e relativa rappresentazione è stata eseguita a partire da questi dati e ha consentito di estrarre le tradizionali viste in proiezione ortogonale utili alla generazione degli elaborati

2D (Figura 13), utilizzate per le analisi legate allo stato di conservazione della fabbrica¹² e la creazione del successivo modello FEM accurato.

Le potenzialità dei nuovi sistemi di *rapid mapping* terrestre basati su tecnologia SLAM tra i quali il sistema ZEB-Revo GeoSlam, sono state sperimentate oltre che in altri ambienti anche nel chiostro trecentesco¹³. Il risultato della nuvola rappresentata in Figura 14 a, è derivato dalla registrazione di due scansioni ottenute in un tempo di acquisizione di circa 10 minuti ciascuna. Nonostante la nuvola non sia associata al contenuto radiometrico delle immagini, e che la minor densità e accuratezza rispetto alle scansioni TLS non consenta di poter valutare per esempio la grande varietà stilistica di colonne e capitelli, indubbiamente essa fornisce un quadro di rappresentazione 3D del complesso in cui riconoscere la morfologia generale, l'assetto complessivo delle ali colonnate, le relazioni tra gli spazi, i dislivelli e i caratteri degli elementi architettonici principali in scala 1:100 e minori.

Una prima analisi eseguita allora in seguito alle acquisizioni aveva mirato all'eliminazione del rumore delle nuvole, stimando che se in origine la differenza tra sezioni corrispondenti (Figura 14b) tra nuvole si attesta su 4 cm, la stessa verifica eseguita dopo aver sottoposto la nuvola a filtri per la riduzione del rumore fornisce un risultato incoraggiante di solo 1 cm.



Figura 13. Sezioni longitudinali e trasversali, derivate dalle nuvole UAV e TLS integrate, utilizzando piani sezione tipici della rappresentazione architettonica.

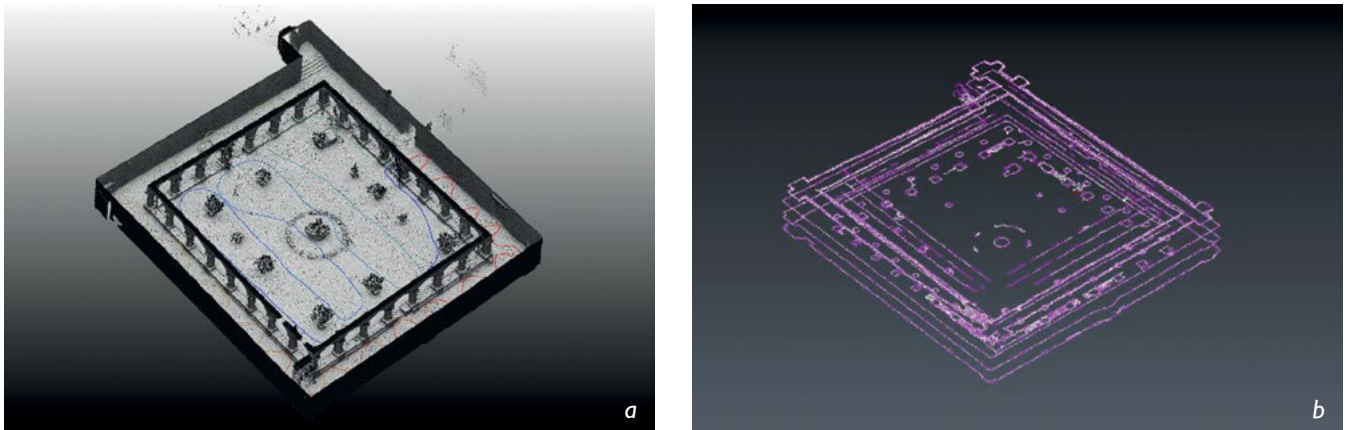


Figura 14. Nuvola derivata dalle scansioni con il sistema mobile di mapping tramite lo scanner portatile Zeb revo: (a) nuvola e traiettorie; (b) verifica della qualità su nuvole filtrate e non filtrate.

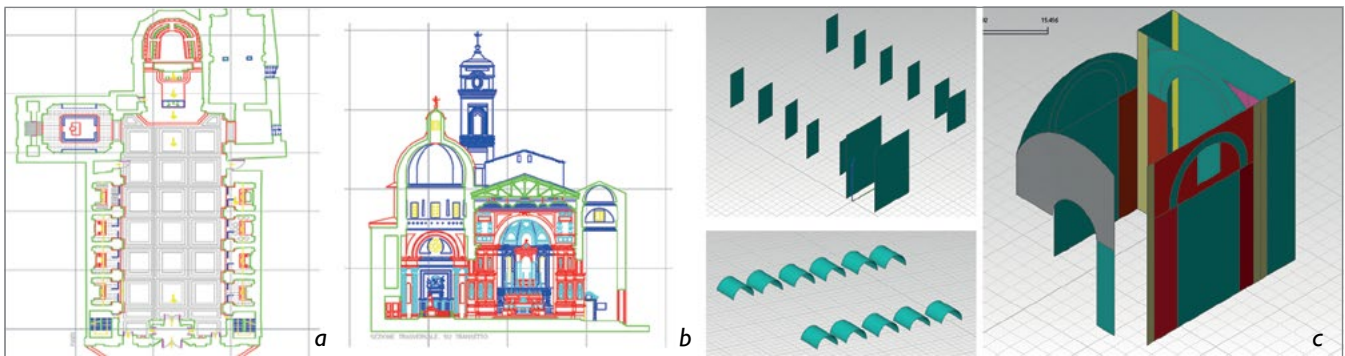


Figura 15. Fasi di lavorazione per la generazione del modello della chiesa costituito da elementi strutturali: (a, b) pianta e sezioni architettoniche del modello CAD; (c) individuazione degli elementi strutturali.

3.1 Modello geometrico per basare le analisi strutturali

Il modello matematico di un bene architettonico quale la basilica di San Nicola a Tolentino è derivato da un processo articolato di schematizzazione che porta necessariamente a una rappresentazione semplificata della struttura. I complessi medievali sono caratterizzati spesso da forti irregolarità, comunque insite nelle modalità costruttive dell'epoca, derivanti da interventi di ampliamento e ricostruzione che si sono succeduti nel corso dei secoli. L'utilizzo dei rilievi 3D e delle sezioni 2D da essi derivate facilita l'individuazione degli elementi strutturali con i propri volumi, spessori e disallineamenti, aiutando la loro distinzione dagli elementi architettonici e artistici puramente decorativi che li rivestono. Questo passaggio consente di scremare notevolmente la mole di dati derivante dalle fasi di rilievo 3D. I dati geometrici così ridotti all'essenziale, integrati con le informazioni acquisite tramite indagini storiche sulle fasi di realizzazione, sulle tecniche costruttive e sui materiali adottati alle varie epoche di realizzazione, diventano quindi il punto di partenza per la schematizzazione degli elementi strutturali. Nel caso della basilica di San Nicola, il rilievo 3D ha permesso di determinare in dettaglio gli spessori e gli allineamenti delle strutture principali della navata, delle cappelle laterali e della facciata, consentendo di individuare i piani medi delle pareti e la schematizzazione dei vincoli sussistenti tra di essi.

4. Il sistema di monitoraggio dinamico

Lo stato di danneggiamento rilevato dalle ispezioni visive e confermato dall'analisi dei modelli 3D ha suggerito l'installazione di un sistema di monitoraggio dinamico continuo della basilica. Esistono diversi esempi di monitoraggio permanente su strutture storiche e monumentali; nella maggioranza dei casi sono progettati per acquisire le vibrazioni della struttura in condizioni di normale utilizzo o nel caso di eventi che portino al superamento di determinate soglie di accelerazione, ad esempio durante eventuali eventi sismici. La stima di parametri sintetici, quali ad esempio i parametri modali, può consentire di osservare i cambiamenti del comportamento globale della struttura o seguire l'evoluzione dei danneggiamenti indotti dal sisma. Le informazioni provenienti dal sistema di monitoraggio possono quindi essere utilizzate per tarare i modelli numerici aumentandone la capacità di cogliere il comportamento reale della struttura. Il sistema di monitoraggio installato sulla basilica è costituito da 20 accelerometri monoassiali capacitivi, di cui 17 installati sulle strutture portanti lungo gli assi principali della basilica e 3 alla base della torre campanaria, assunti come terna accelerometrica di riferimento al suolo. In Figura 16 si riportano le posizioni e i versi di misura dei sensori accelerometrici. Il sistema è completato da tre termocoppie per la misura delle temperature interne, nella navata e nel sottotetto, ed esterna.

I sensori sono collegati a un sistema di acquisizione a 24 bit e i dati registrati in continuo con frequenza di campionamento di 100 Hz per gli accelerometri e di 1 Hz per le temperature. I dati sono quindi salvati in locale e accessibili in remoto. Il sistema installato non è invasivo e potrà rimanere in funzione sia durante gli interventi sulla struttura che durante il normale utilizzo della stessa. Lo scopo principale è quello di acquisire il comportamento dinamico globale e dei macroelementi principali costituenti il corpo centrale della basilica (facciata, navata, abside, torre campanaria), danneggiati durante la sequenza sismica, in modo da valutare l'attivazione o l'evoluzione dei meccanismi di danno individuati¹⁴.

Sono state collocate due coppie di accelerometri sulla facciata e sui muri longitudinali della basilica (posizioni 1X e 2X, 6X e 7X in Figura 16) per controllare l'efficacia del collegamento, valutare l'effetto di eventuali eventi sismici e, seguendo l'evoluzione nel tempo, prevenire il meccanismo di ribaltamento. Analoga funzione è affidata alla coppia 4X e 5X, collocata a cavallo della lesione rilevata sull'abside.

4.1 Analisi dei dati di monitoraggio

I dati sono stati preliminarmente analizzati per individuare il dominio di frequenze significativo. Successivamente i segnali sono stati pretrattati per la rimozione di trend, filtrati e decampionati in modo da poter eseguire l'identificazione dei parametri modali principali. La Figura 17 riporta gli spettri di potenza dei segnali rilevati nelle posizioni 8Y, 13Y e 13X.

4.2 Identificazione modale

La risposta strutturale in condizioni ambientali è stata utilizzata per identificare le caratteristiche modali principali della struttura. L'algoritmo adottato è lo Stochastic Subspace Identification (SSI)¹⁵. Tale algoritmo è stato applicato incrementando progressivamente l'ordine del modello. I modi

reali della struttura sono stati successivamente individuati applicando i seguenti criteri di stabilizzazione:

- variazione della frequenza tra ordini successivi inferiore al 1%;
- variazione dello smorzamento tra ordini successivi inferiore al 10%;
- esclusione dei modi con $\zeta > 10\%$ e $\zeta < 0\%$;
- MAC (Modal Assurance Criterion) $> 95\%$.

In Figura 18 sono rappresentati i diagrammi di stabilizzazione e di clusterizzazione dei risultati delle identificazioni al variare dell'ordine del sistema.

I parametri modali sono stati identificati sulla base di segnali acquisiti per intervalli di tempo di un'ora selezionati a distanza di una settimana, per un totale di 9 settimane. Questa operazione è stata eseguita per prendere in conto tutte le fonti di possibile eccitazione. Si riportano in Tabella 2 i parametri modali medi, coi rispettivi valori di scarto quadratico medio, mentre la Figura 19 mostra la distribuzione delle frequenze identificate. La Figura 20 riporta le forme modali. I primi due modi fanno riferimento alla torre campanaria, il terzo e il quarto sono i modi globali della basilica nelle due direzioni orizzontali, mentre il quinto mette in evidenza il modo di vibrare della facciata principale.

Modo	f_{ID} [Hz]	z [%]	Descrizione
1	1.581 (0.018)	1.16 (0.22)	Flex. X
2	1.849 (0.021)	1.39 (0.84)	Flex. Y
3	2.997 (0.046)	1.45 (0.29)	Aula Y
4	3.124 (0.026)	1.18 (0.20)	Aula X
5	3.791 (0.043)	1.73 (0.42)	Facciata

Tabella 2. Modi identificati.

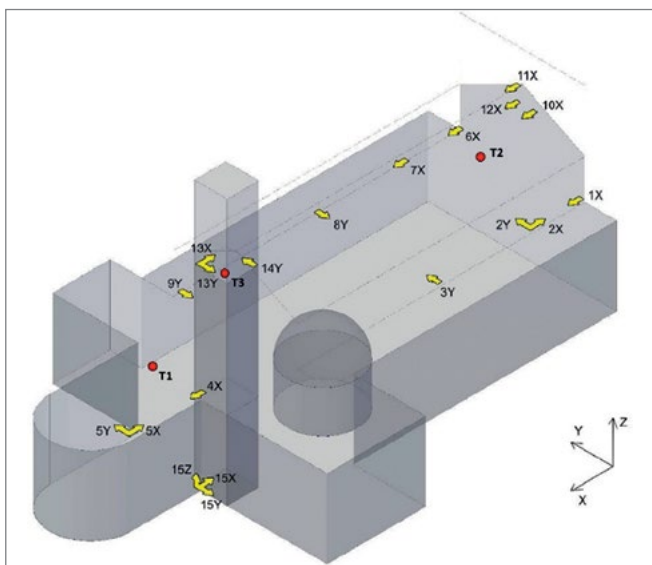


Figura 16. Sistema di monitoraggio; posizione dei sensori accelerometrici (in giallo) e delle termocoppie (in rosso).

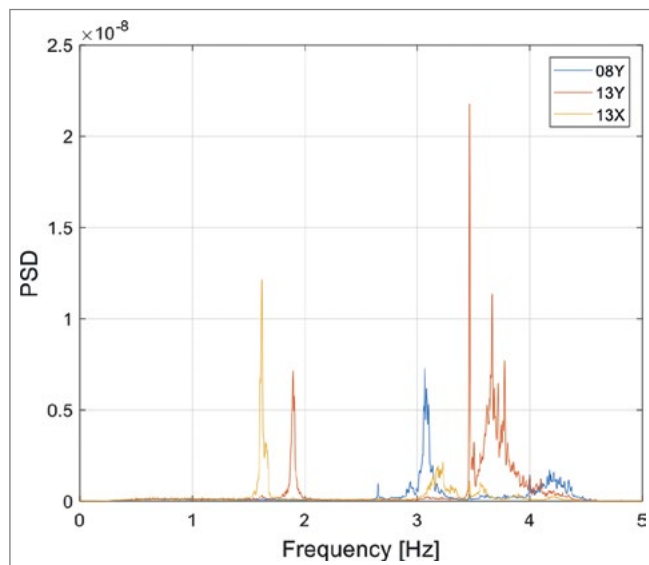


Figura 17. Contenuto in frequenza registrazione del 02/06/2017, ore 18-19.

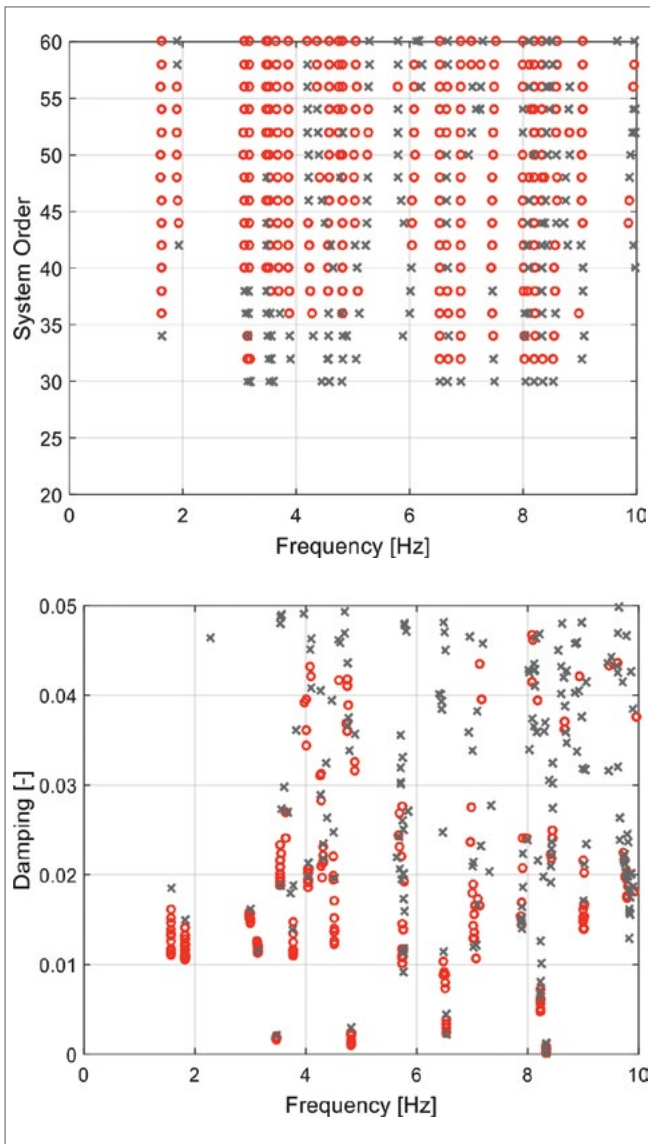


Figura 18 Diagrammi di stabilizzazione e clustering.

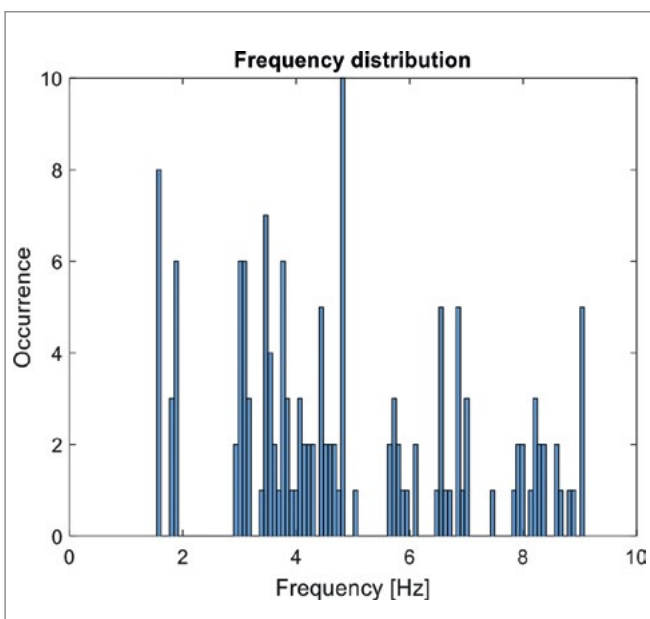


Figura 19. Distribuzione delle frequenze identificate.

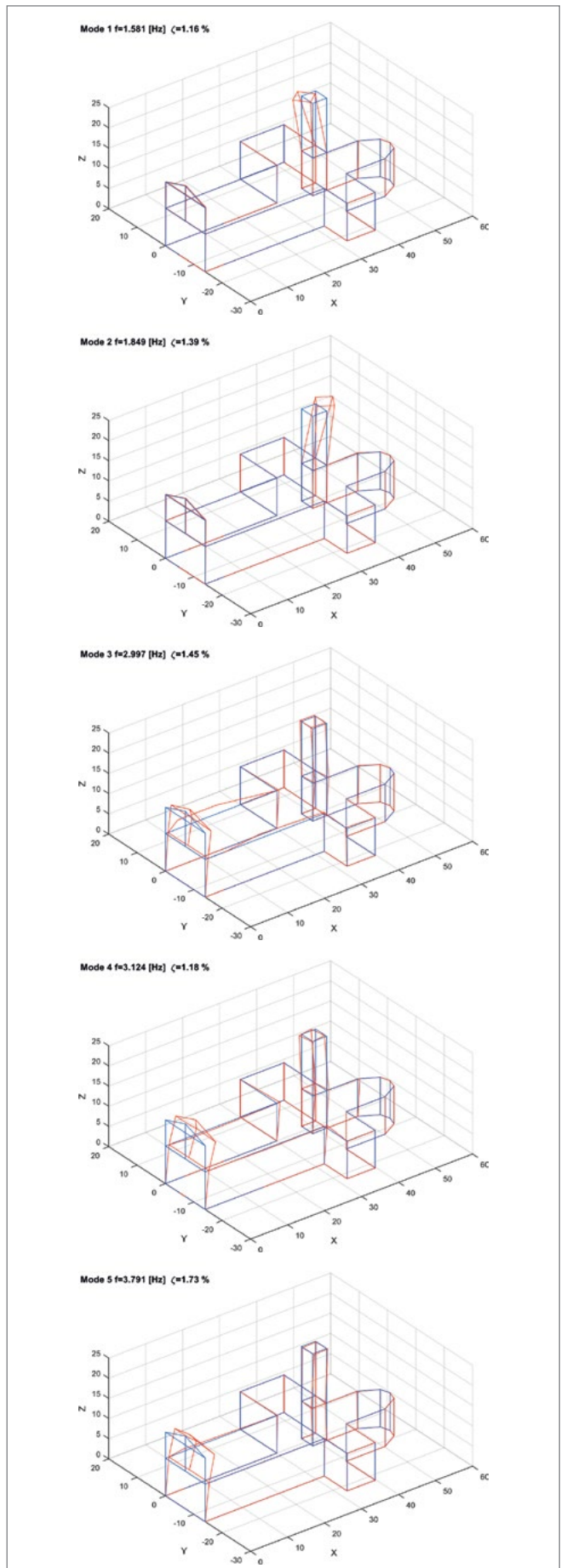


Figura 20. Forme modali dei primi cinque modi identificati.

I dati acquisiti in continuo permettono di individuare intervalli temporali in cui la risposta del sistema si discosta da un andamento assumibile come normale. La Figura 21 a riporta la risposta efficace (RMS) delle accelerazioni acquisite su quattro posizioni durante una settimana di monitoraggio (22-29 aprile 2017). L'andamento mette in evidenza la risposta all'evento sismico del 27 aprile 2017, avente magnitudo 4 ed epicentro a Visso (MC). La Figura 21 b mostra lo spostamento relativo stimato dalle misure accelerometriche acquisite dalle coppie di sensori applicate tra facciata e le pareti della navata (1X – 2X e 6X – 7X) e tra la navata e l'abside. La Figura 22 mostra invece l'andamento delle frequenze modali estratte automaticamente dai dati acquisiti durante lo stesso intervallo temporale.

5. Modellazione strutturale

Il modello numerico iniziale della basilica è stato realizzato utilizzando il software Midas¹⁶. L'utilizzo dei dati del rilievo geomatico, opportunamente trattati come precedentemente descritto, ha consentito di individuare i piani medi degli elementi strutturali principali e gli spessori a essi associati. Le strutture principali sono state modellate mediante elementi bidimensionali di tipo "plate" assumendo inizialmente proprietà meccaniche elastiche e isotrope. Gli elementi bidimensionali sono stati raggruppati in macroelementi per consentire una successiva taratura del modello sulla base dei dati sperimentali provenienti dal monitoraggio. Non sono state reperite informazioni riguardo i parametri meccanici della muratura, pertanto inizialmente sono stati assunti i valori inferiori suggeriti dalla normativa italiana per la tipologia di muratura (mattoni pieni e malta di calce).

- $E = 1,47 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$;
- $N = 0,25$;
- densità: $17,65 \text{ KN/m}^3$.

Particolare attenzione è stata prestata nel definire il grado di interconnessione dei vari elementi componenti la basilica e l'influenza delle interazioni con le strutture contigue. Il grado di interconnessione tra diversi elementi strutturali è stato tenuto in conto nella modellazione attraverso elementi fittizi di differente rigidità. In questo modo sono state modellate la zona di interfaccia tra le arcate delle pareti longitudinali della navata e le volte a botte delle cappelle laterali, realizzate in epoche differenti e quindi presumibilmente aventi scarsa continuità strutturale. L'analisi dello stato fessurativo indotto da sismi del 2016 ha permesso di individuare i meccanismi di danneggiamento attivati e di individuare conseguentemente le zone di connessione tra gli elementi principali costituenti la basilica (macroelementi). Le zone di connessione sono state quindi modellate con elementi bidimensionali fittizi a bassa rigidità, in modo da poter simulare il differente livello di connessione riscontrato. Analoghe considerazioni sono state fatte per le zone fessurate costituenti il tamburo e le pareti dell'abside. L'interazione

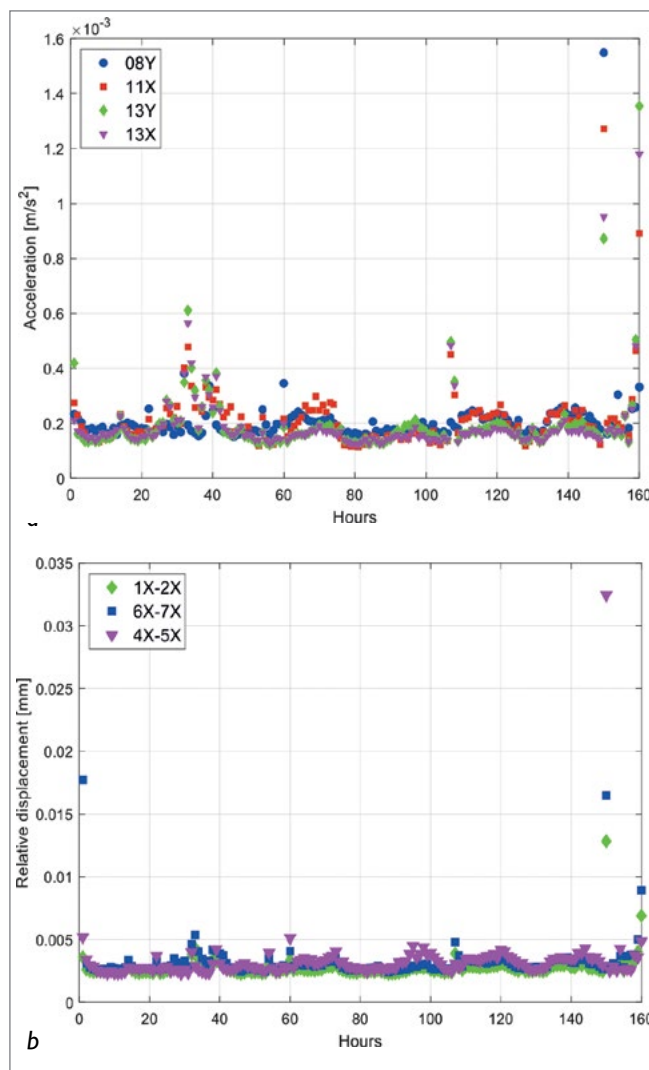


Figura 21. (a) RMS delle accelerazioni acquisite sulla struttura; (b) RMS degli spostamenti relativi tra facciata e navata e tra facciata e abside.

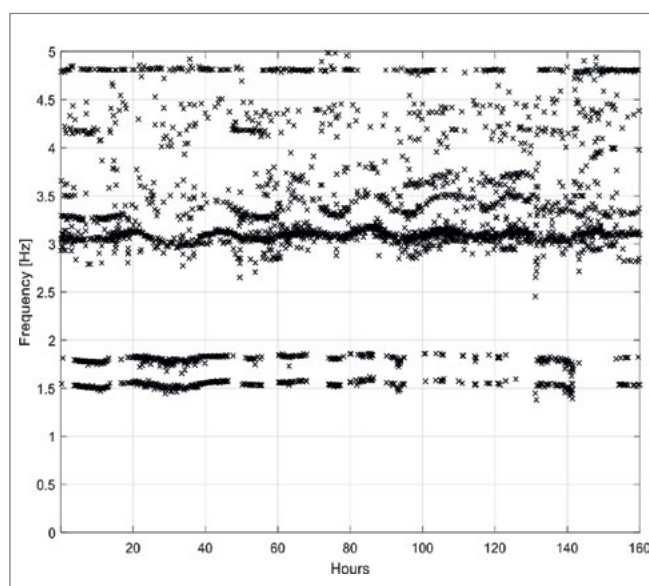


Figura 22 Frequenze modali estratte durante una settimana di monitoraggio.

mutua tra la basilica e gli edifici adiacenti, come il chiostro e l'ala conventuale, è stata tenuta in conto introducendo delle molle lineari al posto degli elementi strutturali non esplicitamente modellati. La copertura della navata è costituita da un tetto a falde con copertura in tegole. La funzione strutturale delle capriate lignee originarie, ancora presenti benché inefficaci, è stata affidata a due ordini di capriate metalliche, una adibita a sostenere la copertura, la seconda a sospendere il soffitto a cassettoni ligneo a copertura della navata. Nel modello di calcolo le capriate metalliche sono state modellate come elementi monodimensionali elastici incernierati alle pareti laterali, mentre il soffitto a lacunari ligneo, la capriata originaria in legno e gli altri elementi non strutturali sono stati tenuti in conto solo per i loro effetti inerziali. Il modello risulta essere costituito da circa 10000 elementi bidimensionali. Un'immagine del modello è riportata nella Figura 23.

5.1 Analisi strutturale

Sul modello numerico è stata eseguita una analisi dinamica modale per valutare la risposta elastica della struttura a basse sollecitazioni. Questa analisi consente il confronto diretto coi risultati sperimentali ottenuti in condizioni di eccitazione ambientale. I risultati sono riportati nelle Figure 24 e 25. Per consentire un confronto maggiormente aderente alle condizioni danneggiate della struttura, in corrispondenza delle zone fessurate sono state ridotte le caratteristiche meccaniche del materiale adottato, riducendolo di 10 volte in modo da riprodurre le discontinuità rilevate. Il modello lineare danneggiato è stato quindi calibrato in modo da ridurre le differenze tra i risultati numerici della analisi modale e i parametri dinamici sperimentali riportati precedentemente. Il modulo elastico delle murature della navata e dell'abside è stato ridotto a 1,1 GPa. La Tabella 3 riporta i valori delle frequenze numeriche del modello corretto, l'errore relativo rispetto alle frequenze sperimentali e il MAC (*modal assurance criterion*) che esprime la coerenza tra le forme modali.

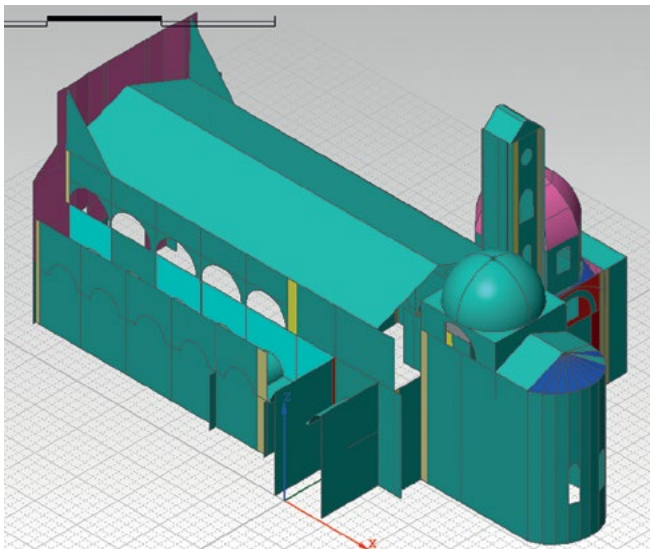


Figura 23. Modello strutturale organizzato in macro-elementi.

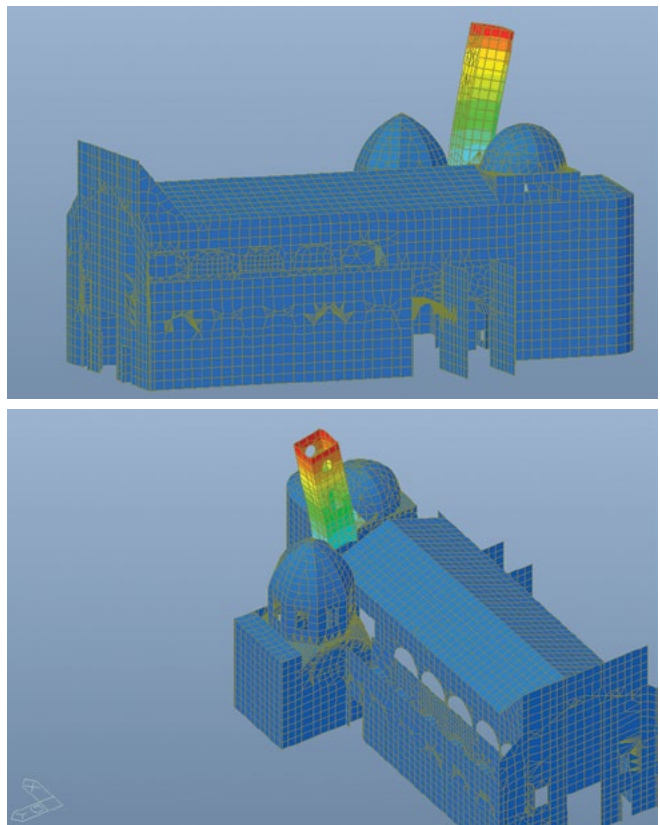


Figura 24. Modi di vibrare della torre campanaria (corrispondenti ai modi 1 e 2 riportati in tabella 3).

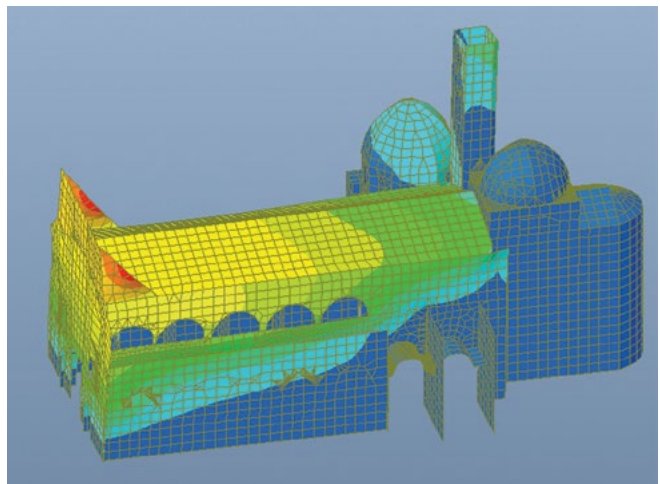


Figura 25. Modo di vibrare dell'aula (corrispondente al modo 3 riportato in Tabella 3).

Modo	f _{FEM} [Hz]	f _{ID} [%]	Errore [%]	MAC [%]
1	1.64	1.581	3.73%	99%
2	1.85	1.849	0.05%	78%
3	2.97	2.997	-0.90%	69%
4	3.70	3.124	-	-
5	3.77	3.791	-0.50%	74%

Tabella 3. Confronto tra i modi sperimentali e quelli numerici.

5.2 Verifica sismica

La verifica sismica è stata condotta attraverso l'analisi statica non lineare sul modello integro per valutare la capacità della struttura nei confronti delle azioni orizzontale. Questa analisi consente inoltre di evidenziare eventuali punti critici nelle componenti strutturali e quindi di identificare l'attivazione di possibili meccanismi di danno.

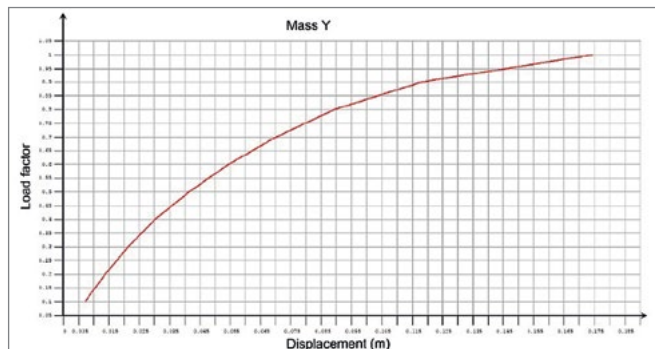


Figura 26. Curva di capacità per carichi incrementali in direzione trasversale.

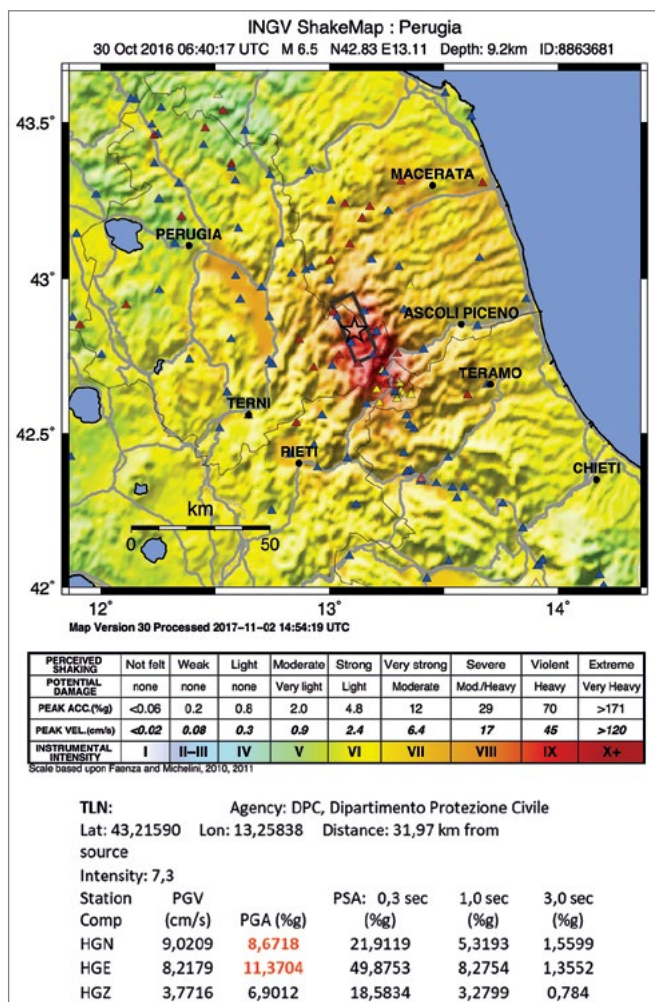


Figura 27. Evento sismico del 30 ottobre 2016: mappa di scuotimento e tabella sintetica delle registrazioni effettuate dalla stazione sismica di Tolentino (i dati accelerometrici e le mappe di scuotimento relativi all'evento sono reperibili all'indirizzo: <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/8863681/intensity.html>).

La legge costitutiva adottata attribuisce al materiale infinita resistenza a compressione e resistenza limitata a trazione (STRUMAS). Le analisi sono state condotte adottando distribuzioni incrementali di forza proporzionali alle masse, dirette lungo le due direzioni principali della basilica. Per ogni distribuzione le curve di capacità sono state valutate rispetto a più nodi di controllo, rappresentativi del comportamento proprio di elementi strutturali differenti. La Figura 26 rappresenta la curva di capacità ottenuta lungo la direzione ortogonale all'asse della basilica con punto di controllo definito in sommità alle pareti laterali della navata. L'analisi è stata condotta fino ad un moltiplicatore pari a 0,6 g. Il confronto tra i risultati delle analisi non lineari e il rilievo dei danni precedentemente descritto è stato eseguito per il valore di accelerazione subito dalla basilica nel corso dell'evento sismico del 30 ottobre 2016, per il quale sono stati rilevati i danni maggiori. L'accelerazione di picco registrata durante il terremoto del 30 ottobre 2016 a Tolentino dagli strumenti della stazione sismica è circa 0,11 g (Figura 27).

Analizzando la risposta della basilica registrata dal sistema di monitoraggio dinamico durante un terremoto di bassa intensità avvenuto il 27 aprile 2017, il fattore di amplificazione medio tra il livello delle fondazioni e la navata lungo le direzioni longitudinale e trasversale può essere approssimativamente stimato pari a 3,5. La Figura 28 mostra le storie temporali registrate a livello delle fondazioni (a sinistra), della facciata e della navata.

La Figura 29 mostra l'andamento delle tensioni principali nel modello non lineare per lo step di carico corrispondente ad una accelerazione orizzontale uniforme di 0,4 g. Tale accelerazione è coerente con l'accelerazione alla base di 0,11 g moltiplicata per il fattore di amplificazione rilevato sperimentalmente. In Figura 29 le crocette nere indicano gli elementi in cui la tensione principale di trazione supera il limite per il legame costitutivo adottato. Si può notare come le posizioni in cui maggiormente si concentrano le zone di fessurazione sono congruenti con il rilievo dei danni descritti precedentemente. Il modello numerico sembra quindi essere sufficientemente affidabile nel riprodurre gli scenari di danno indotti dal terremoto.

6. Considerazioni conclusive

Il lavoro condotto sulla basilica di San Nicola a Tolentino sottolinea l'importanza di una campagna di rilievo accurata, integrata con indagini sperimentali sulla struttura, che consente di ottenere un modello numerico robusto e affidabile. Le attività di documentazione metrica 3D, nonché le analisi strutturali eseguite sull'esteso complesso architettonico della basilica di San Nicola hanno avuto la duplice finalità di ribadire il valore formativo, culturale e identificativo insito nella salvaguardia del patrimonio, tramite un'esperienza diretta. In secondo luogo la lettura analitica della fabbrica e il conseguente modello 3D denso sono stati comparati e

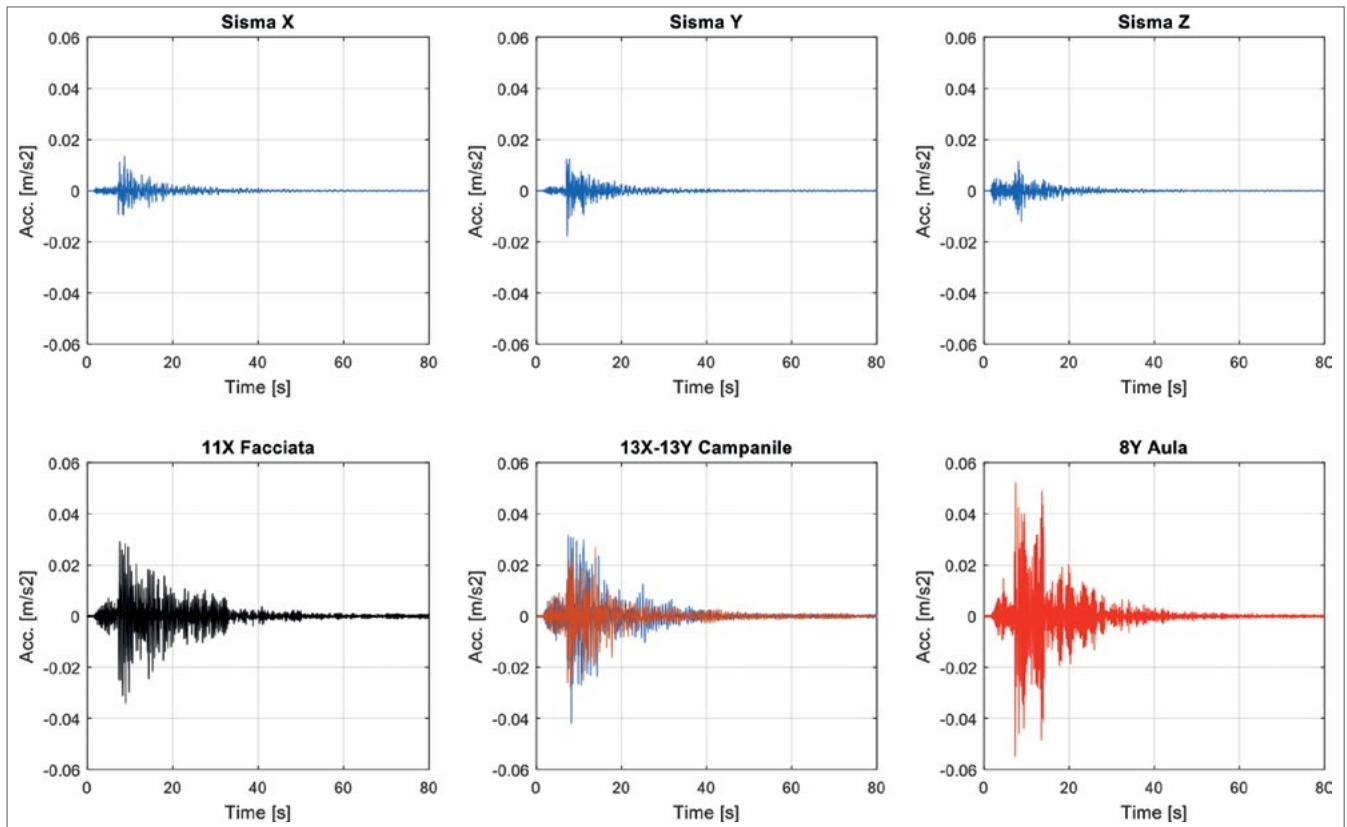


Figura 28. Terremoto del 27 aprile 2017 registrato dal Sistema di monitoraggio. In blu, l'accelerazione a livello delle fondazioni; in nero, l'accelerazione registrata a livello della facciata; in rosso, l'accelerazione al livello della navata.

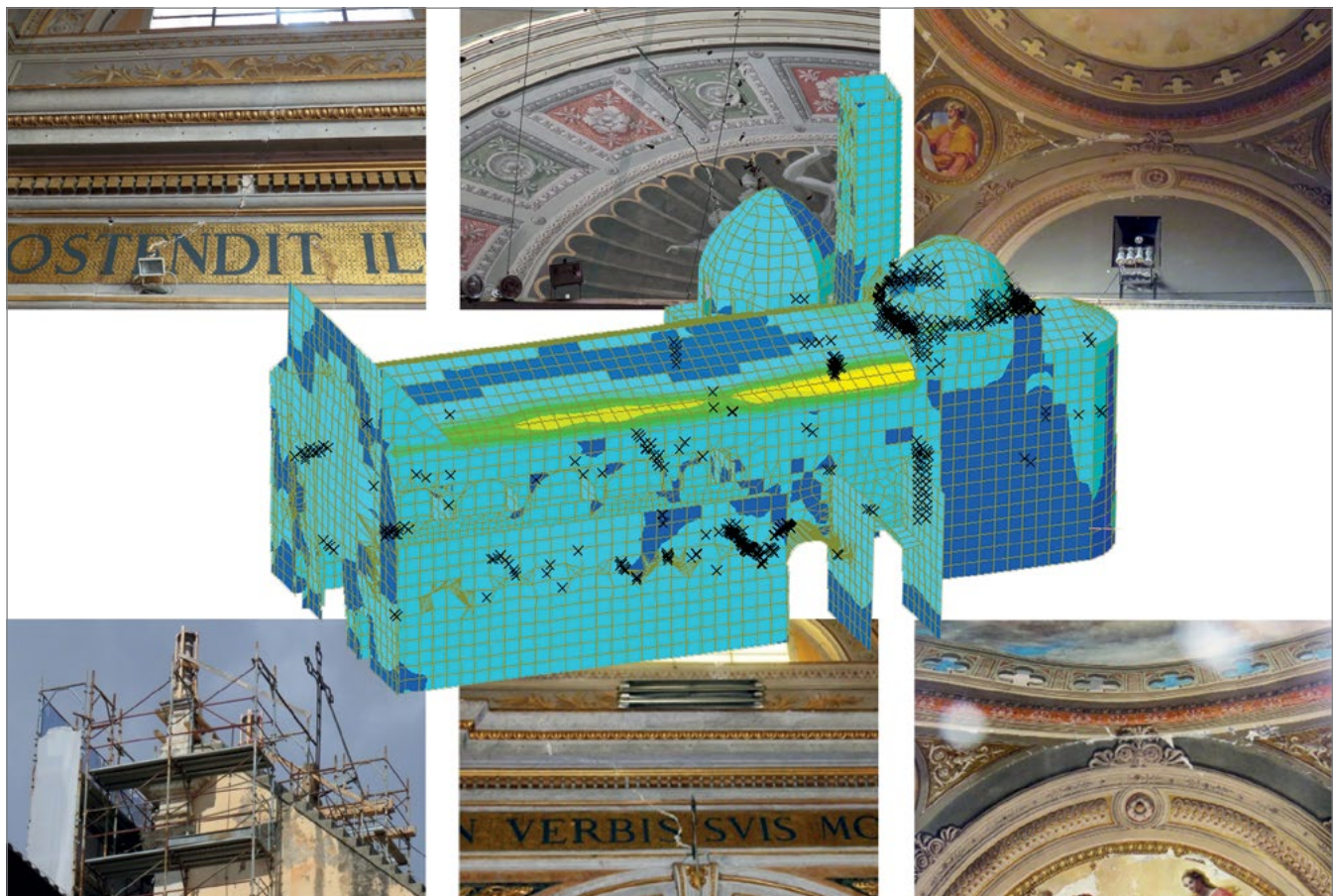


Figura 29. Confronto tra il quadro fessurativo del modello non lineare e i danni osservati sulla struttura.

collaborano ad arricchire l'indagine strutturale realizzata con il supporto del monitoraggio dinamico.

La presenza di un sistema di monitoraggio continuo consente di ottenere un modello in grado di riprodurre una stima della risposta reale con sufficiente affidabilità. I dati del monitoraggio della struttura danneggiata consentono di seguire, attraverso le variazioni della risposta strutturale, l'evoluzione dei danneggiamenti. Il modello inoltre permette di esplorare gli effetti di sismi di varia intensità sulla stabilità della struttura. Gli obiettivi formativi del progetto ampliano il raggio d'azione alla collaborazione interdisciplinare e i risultati sono stati resi disponibili delle diverse istituzioni coinvolte.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato da JSPS KAKENHI (S) (Research leader prof. Takayoshi Aoki, Grant Number 16H06363) e dalla "Foundation for Cultural Heritage and Art Research". Gli autori ringraziano il Comune di Tolentino e il Monastero Agostiniano per il supporto avuto in tutte le fasi di installazione del sistema di monitoraggio.

Note

¹ Proprio nel 1275 i superiori del nuovo Ordine mendicante inviarono in questo luogo fra Nicola da Castel Sant'Angelo, diventato poi San Nicola da Tolentino. «L'insediamento in Tolentino degli eremiti di Sant'Agostino dovette sopravanzare di qualche anno l'inizio dei lavori del complesso conventuale in costruzione nel luglio del 1284, quando la nobildonna Bionda dei Franchi elargiva metà dei suoi beni per finanziare la fabbrica. Il silenzio delle fonti documentarie – ridotte per i secoli XIII e XIV a un numero esiguo di carte, data la perdita dell'archivio eremitano precedente il 1485 – costituisce un grave impedimento al fine di ricostruire le fasi di acquartieramento della comunità mendicante che probabilmente si stabilì, intorno al 1265, su un terreno in forte pendio poi livellato dal cantiere religioso, forse a quel tempo ancora esterno alle mura di Tolentino e prossimo alla sponda settentrionale del Chienti. Strutture di prima accoglienza dovevano comunque sorgere nell'area destinata all'insediamento; sebbene l'estensione della fabbrica agostiniana abbia modificato il primitivo contesto [...]», Pio Francesco Pistilli, *Architettura medievale del complesso monumentale*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino 1995.

² Lo sviluppo del complesso conventuale è in gran parte da ascrivere al richiamo devozionale verso San Nicola da Tolentino, inviato in tale luogo dal nuovo Ordine mendicante nel 1275 a trent'anni (la canonizzazione ebbe inizio nel 1325 e si concluse circa un secolo dopo); cfr. padre Federico Cruciani, *San Nicola, un profilo*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica...* cit.

³ Il portale è realizzato in pietra d'Istria, come consueto nelle chiese di Venezia dove aveva soggiornato lo scultore fiorentino, discepolo di Donatello; cfr. Anne Markham Schulz, *Portale di Nanni di Bartolo*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica...* cit.

⁴ Pio Francesco Pistilli, *Architettura del Cappellone*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica...* cit., p. 82.

⁵ Di tale cappella, con cupola particolarmente elevata rispetto alle dimensioni in pianta, è stata analizzato il modello 3D per la valutazione dei dissesti (cfr. in questo volume il contributo a p. 206).

⁶ Cfr. in questo volume il contributo a p. 212.

⁷ Le operazioni di rilievo metrico 3D in sito si sono svolte tra il 20 e il 24 febbraio 2017, configurate come stage didattico del team DIRECT e coinvolgendo un gruppo di circa 12 persone tra tutor e studenti, tra i quali molti hanno svolto successivamente tesi di laurea di cui si riferisce in questo volume (sui temi del patrimonio architettonico: Alessio Calantropio, Stefano Perri, Raffaella Stano, Stefano Persico, Carla Borriello, Serena Porcari, Alessia Rosignuolo, Alice Accornero; per il versante dei centri storici colpiti Alessandro Battino). Le elaborazioni dei modelli 3D di questo contributo sono state svolte presso il Laboratorio di Geomatica del DAD e del DIATI, in particolare dagli allora dottorandi (Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati), borsisti (Giacomo Patrucco, Alessandra Spreafico, Stefano Perri), tesisti (Adriana Pascale, Raffaella Stano) in collaborazione con i tutor.

⁸ Per i principi di funzionamento fotogrammetrici si rimanda al primo contributo dedicato alle tecniche di *rapid mapping*, per le applicazioni della steady cam e della tecnologia SLAM si rimanda ai contributi dedicati. Cfr. in questo volume il contributo a p. 147 e quello a p. 217.

⁹ Gores J. Grenzdörffer, Markus Guretzki, Ilan Friedlander, *Photogrammetric image acquisition and image analysis of oblique imagery*, in «The Photogrammetric Record», 23(124), 2008, pp. 372-386.

¹⁰ Irene Aicardi, Filiberto Chiabrando, Nives Grasso, Andrea Lingua, Francesca Noardo, Antonia Spanò, *UAV photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLI-B1, 2016, pp. 835-842; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-835-2016. Andrea Lingua, Francesca Noardo, Antonia Spanò, Simone Sanna, Francesca Matrone, *3D model generation using oblique images acquired by UAV*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-4/W2, 2017, pp. 107-115; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-107-2017.

¹¹ La strumentazione utilizzata è stata già introdotta in questo volume nel contributo a p. 41.

¹² Parte delle analisi conseguenti il rilievo TLS e UAV integrato sono riportate in questo volume nel prossimo contributo, ad esse dedicato, a p. 206.

¹³ Come riferito in altri contributi, tale sistema è in grado di acquisire informazioni 3D in movimento grazie all'utilizzo del laser scanner (Hokuyo UTM-30LX-F, www.hokuyo-aut.jp) integrato al sistema INS/IMU; l'utilizzo di vincoli geometrici dell'ambiente ritratto e un processo di triangolazione inversa e registrazione *cloud to cloud* consentono di ottenere la nuvola dello spazio percorso. È possibile ottenere nuvole di punti registrate dell'oggetto ripreso eseguendo acquisizioni in movimento in ambienti indoor e nei limiti della portata dello strumento (30 m) anche outdoor. La fase di registrazione è realizzata in post-processing con il software proprietario. Cfr. in questo volume i contributi a p. 91 e 217.

¹⁴ Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato Lancellotta, Antonino Quattrone, *Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino*, in Atti della conferenza ANIDIS 2017.

¹⁵ Peter Van Overschee, Bart De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems: Theory – Implementation – Applications*, Kluwer Academic Press, Dordrecht 1996.

¹⁶ La modellazione strutturale è stata oggetto della tesi di laurea magistrale in Ingegneria civile di Adriana Pascale, *Analisi sismica della basilica di San Nicola a Tolentino*, Politecnico di Torino, relatori Donato Sabia, Nannina. Spanò, dicembre 2017.