

Valutazione della vulnerabilità sismica della chiesa di sant'Agostino ad Amatrice tramite analisi multitemporali

Seismic vulnerability assessment of the Sant'Agostino in Amatrice using multi-temporal analyses

ALESSANDRO GRAZZINI, GIULIA SAMMARTANO, NANNINA SPANÒ, SEBASTIANO FOTI, FILIBERTO CHIABRANDO, ANTONINO QUATTRONE, MARCO ZERBINATTI

Abstract

La chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice è divenuta il simbolo dei tanti beni architettonici gravemente danneggiati dalla lunga sequenza sismica del 2016-2017, che progressivamente l'ha portata ad un crollo quasi totale. La ricerca multidisciplinare ha avuto la finalità di interpretare il danneggiamento della chiesa, prima in forma di gravi lesioni e poi definitivamente di collasso, correlando in modo interdisciplinare un insieme di dati eterogenei. I modelli digitali derivati dai rilievi 3D realizzati seguendo i progressivi danneggiamenti, gli studi storici delle lesioni emerse in seguito ad altri importanti eventi sismici del passato, lo studio e l'analisi critica dei precedenti lavori di consolidamento, i risultati della microzonazione sismica per la definizione della risposta sismica locale dell'edificio, i risultati delle prove diagnostiche eseguite *in situ* sulle strutture murarie e la modellazione agli elementi finiti del comportamento dinamico dell'edificio sono discussi in forma integrata¹.

The Sant'Agostino church in Amatrice has become the symbol of the many architectural assets badly damaged by the long seismic sequence of 2016-2017, which gradually led to an almost total collapse. The multidisciplinary research had the aim of interpreting the damage to the church, first seriously damaged and then definitively collapsed, correlating heterogenous data in an interdisciplinary way. Such information came from different sources: the digital models processed by 3D surveys during progressive damages, the historical studies of the fractures that emerged after other important seismic events of the past, the study and critical analysis of previous consolidation works, the results of seismic microzonation for the definition of the local seismic response of the building, the results of the diagnostic tests performed in situ on the wall structures and the finite elements modelling of the dynamic behavior of the building.

Introduzione

L'analisi della vulnerabilità sismica dell'architettura storica rappresenta un campo di studio fondamentale per la conservazione del patrimonio costruito localizzato in aree ad elevato rischio sismico; essa è connessa al degrado materico, alla morfologia delle fabbriche, alle tecniche costruttive storiche che a volte sono abbinate all'uso di materiali disponibili di qualità non elevata e alla possibile stratificazione di interventi di consolidamento condotti non correttamente. Le moderne tecnologie di analisi consentono indagini non distruttive e soluzioni innovative per modellare in contesti tridimensionali, arricchiti anche dalla quarta dimensione, il tempo, le caratteristiche delle fabbriche e il livello

Alessandro Grazzini, dottore di ricerca in Ingegneria della strutture, assegnista di ricerca in Architettura tecnica presso il Politecnico di Torino, DISEG
alessandro.grazzini@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

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

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

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

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

Marco Zerbinatti, professore associato di Architettura tecnica, Politecnico di Torino, DISEG
marco.zerbinatti@polito.it



Figura 1. Situazione del crollo della chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice prima della rimozione delle macerie (29 luglio 2017).

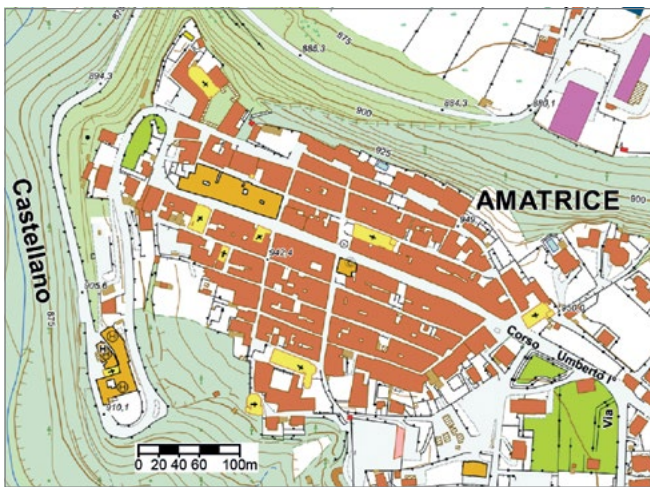


Figura 2. Stralcio della Carta Tecnica Regionale numerica della Regione Lazio (da <https://geoportale.regione.lazio.it/>; scala originale 1:10000). Nell'angolo S-E, a ridosso del tracciato delle mura, in giallo, la chiesa.



Figura 3. La chiesa di Sant'Agostino prima degli eventi sismici del 2016-17. (<https://closer.colasantiaste.com>).

di danno delle strutture che li compongono. L'analisi del comportamento dinamico delle murature storiche consente la valutazione del livello di sicurezza sismico dell'edificio per progettare interventi conservativi e di rinforzo per il miglioramento alla risposta sismica.

Proprio con questo spirito si è attivato lo studio della chiesa di Sant'Agostino di Amatrice (Figura 1), potendo contare su un modello multi-temporale derivato da acquisizioni fotogrammetriche ad alta risoluzione da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) e terrestri, che hanno monitorato il succedersi degli eventi anche grazie alla collaborazione con la squadra SAPR dei Vigili del Fuoco, che per mesi ha dedicato tutti gli sforzi possibili per produrre dati metrici utili per la documentazione di quanto stava accadendo, con azione particolare sulle ferite al territorio e al patrimonio che durante i mesi si infittivano. Tali modelli 3D, l'interpretazione delle stratificazioni di eventi e interventi occorsi alla fabbrica, i dati della stazione accelerometrica di Amatrice insieme allo studio di microzonazione sismica, hanno potuto contribuire a migliorare la simulazione della risposta sismica dell'edificio tramite il corrispondente modello ad elementi finiti.

1. La chiesa di Sant'Agostino

La chiesa di Sant'Agostino, costruita nel 1428, si innesta in un insediamento sicuramente più antico, riferibile alla sua posizione di transito prossima alla via Salaria, e in adiacenza ad uno dei sei ingressi alla città di Amatrice, la porta "Carbonara", nell'angolo sud-est dell'abitato, che consentiva l'accesso in direzione dei monti della Laga² (Figure 2, 3). Giovanni Carbonara ipotizza che una chiesa dovesse esser presente già intorno al 1287, sulla base di tracce riconoscibili sul fianco nord-ovest; la struttura architettonica oggi nota fu commissionata da monaci agostiniani, eretta secondo gli stili delle "chiese fienile" del gotico mendicante tosco-umbro e con portale in marmo dai motivi tardo gotici³ (Figura 3). Inoltre, in corrispondenza della porta Carbonara, sul lato destro della chiesa si ergeva l'esile campanile, inizialmente realizzato come torre difensiva e poi adattato a campanile⁴. La struttura in muratura portante della chiesa si presenta a conci sbozzati in arenaria, almeno il nucleo interno. L'interno è a navata unica con tetto ligneo e capriate a vista. Due grossi incendi nel XVI e XVIII secolo distrussero parte degli interni e dell'abside, richiedendo notevoli lavori di restauro che si protrassero a più riprese per tutto il XIX secolo. Durante questi lavori fu demolita la volta del sottotetto perché ritenuta pericolante, lasciando le capriate lignee a vista. Diversi lavori di consolidamento che si succedettero nei secoli passati riguardarono anche la torre campanaria, alta 34 metri.

Dall'osservazione di immagini storiche disponibili è emerso che all'inizio del XX secolo erano presenti già alcune lesioni, causate da eventi sismici intercorsi nei decenni precedenti, visibili nella facciata e nel campanile (Figura 4a). Negli anni trenta la facciata fu rinnovata nella parte superiore

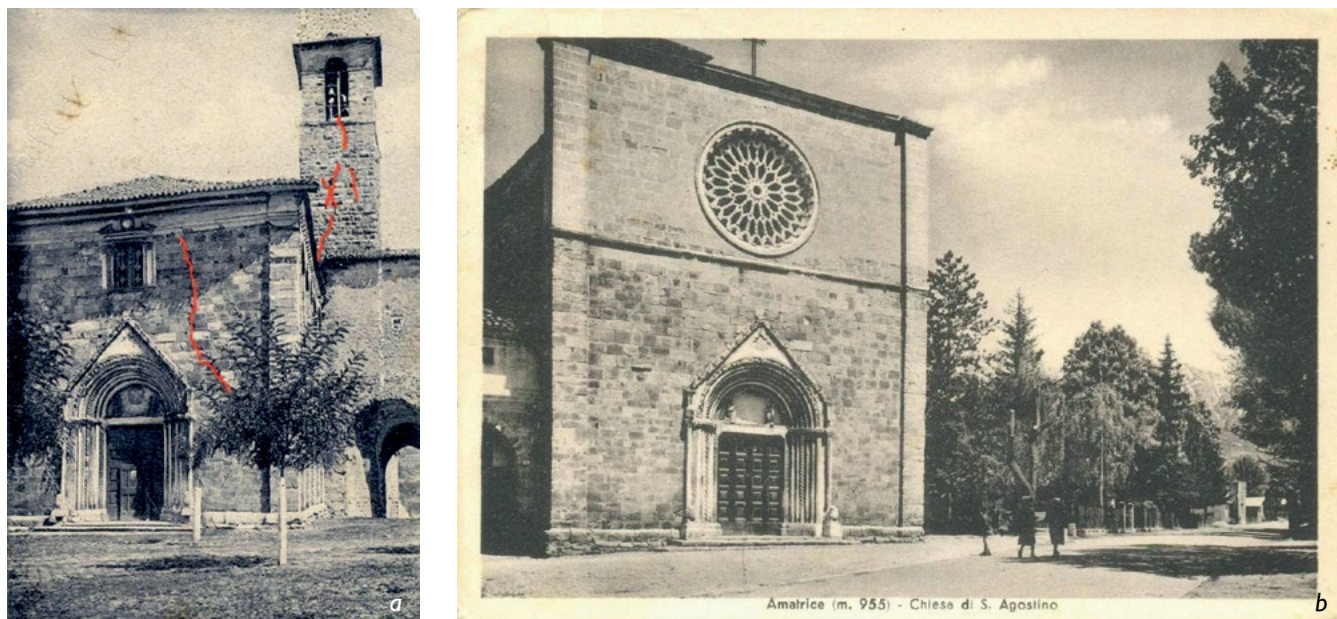


Figura 4. La chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice: (a) una cartolina di inizio '900 mostra lesioni sulla facciata e sul campanile, evidenziate in rosso; (b) la situazione dopo la ricostruzione della facciata.



Figura 5. Evoluzione dei crolli durante la sequenza sismica. (a) La chiesa di Sant'Agostino dopo la prima scossa sismica del 24 agosto 2016. (b) Il crollo dell'arco "Carbonara" e il danno sulle strutture murarie del campanile (le immagini riportano anche gli schemi dei meccanismi di danno in relazione agli elementi architettonici della chiesa, secondo la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2011. Pubblicata nella G.U. n. 47 del 26/02/2011, suppl. ord. n. 54, 2011) (c) Progressivo collasso della facciata dopo il sisma del 30 ottobre 2016. (d) Ultimo collasso dopo il terremoto del 18 gennaio 2017.

inserendo un rosone (Figura 4b) e il campanile fu rinforzato alla fine degli anni cinquanta.

Durante la prima grande scossa sismica del 24 agosto 2016, la chiesa di Sant'Agostino ha subito il crollo della parte superiore della facciata con rosone, facendo collassare a terra anche la porzione di tetto ad essa collegata (Figura 5a). Il campanile risultava gravemente danneggiato in corrispondenza della cella campanaria, mentre l'arco "Carbonara" era

crollato totalmente (Figura 5b). La seconda grande scossa sismica del 30 ottobre 2016 ha causato un incremento del danno lungo le murature d'ambito con alcuni isolati crolli (Figura 5c). Infine, il 18 gennaio 2017 la scossa di magnitudo 5.5 ha innescato il crollo di gran parte delle murature esistenti, già gravemente lesionate, compresa parte della facciata, l'intero tetto e il campanile (Figura 5d), lasciando la chiesa nelle attuali condizione di crollo quasi totale.

2. Metodi fotogrammetrici per la valutazione del danno

Durante l'intera sequenza sismica del 2016-17, è stato possibile documentare e monitorare l'avanzamento del danno occorso alla chiesa attraverso l'uso delle moderne tecnologie rapide di rilevamento che prevedono la combinazione di approcci terrestri ed aerei, gli UAV, fornendo set di dati multi-temporali. Le Figure 4 e 5, che raccolgono un insieme di fotogrammi acquisiti da drone, documentano rispettivamente la situazione leggibile immediatamente dopo la prima grande scossa del 26 agosto (dati acquisiti dalla squadra SAPR del VVF) e quella successiva al 30 ottobre 2016 (Politecnico di Torino), tramite una selezione che evidenzia i maggiori meccanismi di danno verificatisi (ribaltamento della facciata, danni alla cella campanaria, danni da sforzi di taglio sulle murature d'ambito) che nel seguito di questo contributo verranno ampiamente discussi. Come si può constatare, tutte le acquisizioni sono state eseguite tramite sensori ad alta risoluzione, mentre la maneggevolezza dei vettori multi-rotori ha consentito l'avvicinamento alla struttura danneggiata potendo riprendere da vicino lo stato dei resti e i materiali, diversamente non possibile.

I modelli 3D ottenuti con textures di elevata precisione controllate per via fotogrammetrica, hanno fornito dati strutturati utili per ricavare informazioni sul comportamento strutturale e i potenziali meccanismi di collasso in un contesto di pericolo sismico, allora in corso.

Come evidenziato nei contributi introduttivi⁵, le nuove tecnologie fotogrammetriche per il mapping rapido, specialmente in situazioni d'emergenza, abbattano i tempi di esposizione al rischio degli operatori, e la loro efficacia nel raccogliere informazioni ricche ed accurate risulta come detto, del tutto vantaggioso in termini di costi-benefici⁶.

Gli *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) attrezzati per scopi fotogrammetrici con sistemi GNSS di bordo e con sensori immagine o video ad alta risoluzione, sono stati individuati come un perfetto strumento applicativo nei contesti di indagine per la produzione di mappe su larga scala e modelli 3D, soprattutto in condizioni di emergenza⁷.

I modelli spaziali a grandissima scala derivati da acquisizioni nadirali integrate a quelle oblique, come evidenziato anche in altri contributi di questo volume, sono inoltre essenziali per documentare efficacemente i danni e consentire sia misurazioni sia interpretazioni basate sui valori metrici e su quelli radiometrici⁸.

In termini generali si può dire che l'approccio integrato aereo e terrestre è stato ampiamente favorito dal miglioramento continuo degli algoritmi della correlazione di immagini (*Image Matching*) e della Computer Vision (*Structure from Motion*) implementati nella maggior parte dei software di fotogrammetria digitale commerciali e open source, rivelandosi un ottimo e attivo supporto attivo per il mapping ambientale, per la documentazione a scala urbana fino alla grandissima scala del patrimonio edilizio⁹.

L'esperienza di Amatrice ha consentito inoltre di suggerire che in situazioni di elevato rischio o addirittura di eventi disastrosi ripetuti, la strategia di acquisire dati in prospettiva diacronica, cioè adottando una configurazione multi-temporale di acquisizione può essere una soluzione preziosa per garantire una continuità dei dati anche lungo il decorso evolutivo dei fenomeni, fornendo cioè un contributo più efficace per il monitoraggio del comportamento strutturale.

Le campagne di rilievo sono state eseguite dopo i tre principali eventi di agosto 2016, ottobre 2016, e gennaio 2017 in collaborazione con il gruppo SAPR del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, e le strategie fotogrammetriche di acquisizione ed elaborazione sono state accuratamente documentate nella tesi di dottorato di Giulia Sammartano¹⁰.

I modelli 3D multi-temporali (Figura 8) che saranno discussi nel prosieguo sono quindi identificati con riferimento alle missioni di acquisizione: T1 (dopo il 24 agosto 2016), T2 (dopo il 30 ottobre 2016) e T3 (dopo il 18 gennaio 2017). Nella Tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali dei dati acquisiti, dal punto di vista terrestre (fotocamera reflex digitale a obiettivo singolo) e aereo, con riferimento ai UAV impiegati; sono inoltre riportati i principali risultati dal punto di vista qualitativo, risoluzione dei modelli (*Ground Sampling Distance*, GSD variabile da 4 mm a 8 mm) e di accuratezza metrica che risulta ottima per i tempi T1 e T2 attestandosi sotto il centimetro per il T1 e poco sopra il centimetro per il T2, mentre è diminuita drasticamente nel T3, anche per la difficoltà di prendere in considerazione riferimenti fissi precisi per via degli imponenti crolli.

3. Valutazione e interpretazione del danno sismico

Per comprendere in modo approfondito le vulnerabilità sismiche della chiesa, sono stati analizzati gli interventi di consolidamento eseguiti a seguito dei precedenti terremoti. Innanzitutto, come accennato in precedenza, nel XX secolo il campanile ricevette interventi di messa in sicurezza perché era a rischio di collasso, probabilmente a causa di precedenti terremoti, così come il fronte, che presentava anch'esso un quadro fessurativo rilevante (Figura 4a). Negli anni trenta il fronte fu rinnovato con la costruzione della porzione superiore caratterizzata da tipologia a vela e inserimento del grande rosone centrale (Figura 4b). Tale facciata a vela è un elemento potenzialmente vulnerabile perché non è efficacemente vincolato nello sviluppo verticale dell'edificio e manca di ulteriori vincoli nella parte sommitale (Figure 4b e 5a, c, d). La chiesa aveva subito l'azione di numerosi terremoti di notevole intensità verificatisi in questa zona nel corso dei secoli, e sicuramente è stata danneggiata in più occasioni e con diverse intensità, ad esempio in corrispondenza del terremoto della Valnerina del 1703 (magnitudo 6.9) e del terremoto della Maiella del 1706 (magnitudo 6.8)¹¹. Nel XX secolo si annoverano inoltre: il terremoto della Marsica del 1915 (magnitudo 7.0) e altri terremoti di magnitudo intorno a 5.0 verificatisi nell'area

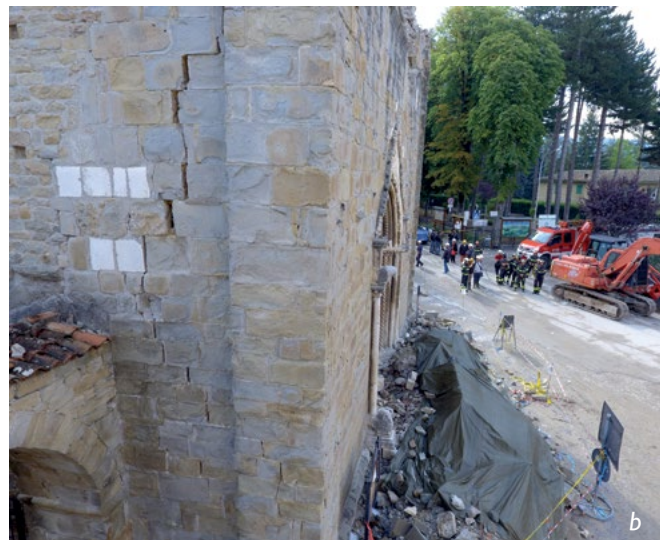


Figura 6. Una sequenza di immagini da UAV acquisite dal gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco dopo il 24 agosto 2016. (a) muratura danneggiata in prossimità dell'intervento di inserimento del rosone in facciata, caratterizzata da una elevata vulnerabilità; (b-c) effetto del ribaltamento della facciata, visto da entrambi i lati; (d) Arco "Carbonara" completamente collassato, caratterizzato da murature solo sovrapposte e non ammassate alla parete della chiesa; (e) il fronte ovest della torre campanaria, non molto visibile dal basso, presenta lesioni evidenti già dopo la prima forte scossa, sicuramente di entità più ingente rispetto agli altri fronti; (f) fronte ovest, presenta fessurazioni evidenti soprattutto nella parte absidale della chiesa.



Figura 7. Una sequenza di immagini da UAV dopo l'evento del 30 ottobre 2016. (a) effetti sul campanile e sulle murature della chiesa; (b) murature di differente tessitura alla base del campanile; (c) danneggiamento e crollo parziale del cordolo di cemento armato inserito per legare superiormente la cella campanaria; (d) muratura del fronte ovest crollato, in una vista ingrandita.

		T1	T2	T3
Droni		Inspire 1 DJI with Zenmuse X5	Phantom 4 DJI	Inspire 1 DJI with Zenmuse X5
	Sensor	36 Mpx full-frame	12.4 Mpx	36 Mpx full-frame
	Pixel size (μm)	4.89	4.38	4.89
Camera Reflex		Nikon D800E		-
	Sensor	36 Mpx full-frame CMOS		-
	Pixel size (μm)	4.89		-
Immagini	(n°)	661	97	116
GSD	(mm/px)	4.09	5.41	8.3
GCP RMSE	(m)	0.007	0.014	0.026
CP RMSE	(m)	0.007	0.013	0.105*

Tabella 1. Strumentazione aerea e terrestre impiegata; immagini acquisite e risultati qualitative relativi a risoluzione e accuratezza metrica ottenuti per i tre modelli.

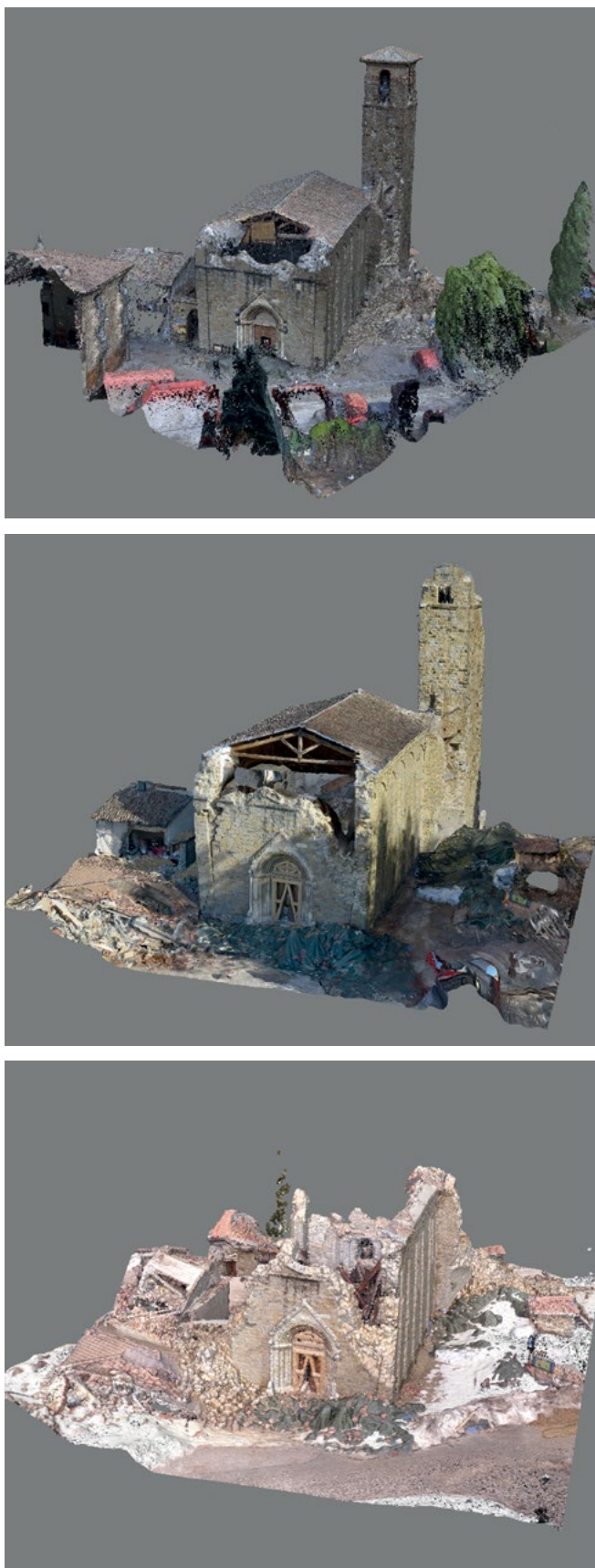


Figura 8. Immagini dei modelli ottenuti T1 (dopo il 24 agosto 2016), T2 (dopo il 30 ottobre 2016) e T3 (dopo il 18 gennaio 2017). Si tratta di modelli 3D texturizzati ad alta definizione per la visualizzazione, l'analisi metrica e radiometrica, cioè la possibilità di misurare i danni occorsi alla fabbrica.

geografica limitrofa (Monti della Laga 1883; Alto Reatino 1916; Maiella 1933; Gran Sasso 1950)¹².

Come già anticipato, la chiesa di Sant'Agostino subì danni anche durante il terremoto della Valnerina del 1979 (magnitudo 5.8): un potenziale distacco della facciata, diverse disconnessioni lungo tutto il perimetro superiore delle pareti in corrispondenza degli appoggi delle capriate, danni registrati anche agli architravi delle finestre, come evidenziato dalla Figura 9. All'inizio degli anni '80 furono eseguiti dei lavori di consolidamento consistenti nella ricostruzione del tetto in legno, sempre con capriate a vista, l'inserimento di un cordolo in cemento armato (Figura 10b), e la cucitura delle lesioni mediante cuciture armate, in accordo con le norme tecniche del periodo.

Il cordolo in cemento armato, sebbene sia un intervento invasivo e non concorde con il valore originario dell'edificio storico, è stato comunque eseguito efficacemente mediante barre verticali inghisate per un'altezza considerevole al fine di migliorare la collaborazione della parete sottostante alla trasmissione dei carichi provenienti dalla copertura (Figura 10a, b, c).

L'esame di questi danni ha quindi evidenziato debolezze pregresse della struttura, derivanti da precedenti eventi sismici, nonché l'inefficacia di alcuni interventi realizzati dopo il terremoto della Valnerina del 1979. L'uso di modelli digitali ha offerto la possibilità di correlare spazialmente in 3D gli effetti derivanti dagli eventi sismici del passato e il danneggiamento attuale verificatosi durante l'ultimo terremoto, al fine di interpretare il comportamento strutturale d'insieme.

Per esempio, molti quadri fessurativi e crolli fotografati dal drone nelle fasi immediatamente successive agli eventi, rientrano nella casistica dei classici meccanismi di danno sismico propri delle chiese¹³.

Oltre ai crolli del fronte principale e del campanile, anche l'arco "Carbonara" è collassato totalmente (Figura 6d). La struttura in muratura di tale arco non era ammortata alla muratura della chiesa, e quindi ha subito un immediato distacco collassando senza poter usufruire di una collaborazione

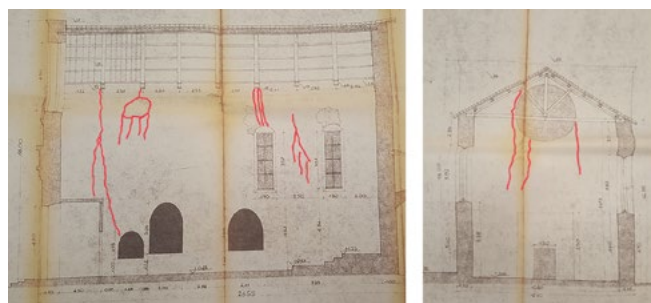


Figura 9. Gli effetti del terremoto della Valnerina del 1979 rappresentati in alcuni disegni architettonici (dall'archivio della Soprintendenza Archeologica e Paesaggio delle Belle Arti di Rieti): (a) sezione longitudinale che guarda la muratura d'ambito nord-ovest; (b) sezione trasversale, verso la muratura di controfacciata.



Figura 10. (a) Cella campanaria crollata: sono visibili i tiranti originali e le armature del cordolo in cemento armato inserite durante il consolidamento degli anni '80. (b) Cordolo in cemento armato eseguito efficacemente mediante barre verticali molto lunghe. (c-d) Vulnerabilità insite nella muratura di base, costituita da una sovrapposizione di strati edificatori.

strutturale. Questa considerazione, benché non più riscontrabile nella situazione finale, è altamente confermata dalla lettura dei modelli multi-temporali realizzati a seguito degli eventi di agosto e ottobre, che sono presentati efficacemente nella Figura 11.

La tessitura muraria della chiesa era costruita da un rivestimento in pietra di spessore limitato e nucleo interno in piccole pietre eterogenee disposte in modo caotico (Figura 5c); ciò consente di osservare che nei confronti delle azioni sismiche orizzontali questa tessitura muraria non garantisce un efficace comportamento monolitico¹⁴.

La Figura 7d mostra la presenza di una parte della muratura della facciata nord-ovest costituita da due strati adiacenti senza connessione, molto probabilmente derivanti da riparazioni o riedificazioni effettuate nel corso dei secoli in corrispondenza di precedenti terremoti. Si intravede un lacerto di intonaco (Figura 10d) tra le due pareti, confermando che la fodera muraria interna è stata inserita in una diversa e successiva fase edificatoria. Questa camera d'aria non è presente sull'intera lunghezza della parete ma soltanto per una parte, quella corrispondente al crollo rappresentato nelle Figure 12c e 7d sopra le nicchie contenenti gli affreschi del XV secolo. Pertanto questa parte muraria è collassata a seguito della presenza del doppio paramento e della diminuzione della sezione portante in corrispondenza delle nicchie sottostanti. La possibilità di comparare i dettagli dei modelli multi-temporali e multi-scala, insieme alla possibilità di riferire nello stesso spazio virtuale caratterizzato da un unico sistema di riferimento anche i disegni o le foto storiche, riconoscendo punti corrispondenti della realtà passata e

quella attuale, consente di eseguire comparazioni puntuali dell'evoluzione dei fenomeni fessurativi e di instabilità, come dimostra la Figura 12 per il fronte ovest. Sostanzialmente è possibile accostare e comparare per sovrapposizione danni esterni ed interni, riferiti ai diversi ambiti temporali di pertinenza.

Come dimostra la Figura 13, è possibile verificare a ritroso che già in corrispondenza del primo evento sismico del 2016, benché la muratura d'ambito ovest non rivelasse danni molto ingenti, il fuori piombo della sua superficie si attestava già su entità comprese tra 5 e 10 cm.

Analogamente, nel fronte est, il modello multi-temporale dotato di texture ad elevata risoluzione consente di valutare con elevato dettaglio l'evolversi del quadro fessurativo, che presenta i tipici andamenti a croce di Sant'Andrea.

Il danno principale della facciata occorso dopo il primo evento sismico è stato coerente con la direzione della massima intensità del terremoto (quasi ortogonale alla facciata) e con la tipica vulnerabilità del ribaltamento delle facciate a vela delle chiese.

Si è potuto ripercorrere questa elevata vulnerabilità osservando l'evolversi della fessurazione precedentemente osservata nell'immagine del primo Novecento (Figura 2a) e presente anche in seguito al terremoto del 1979 (Figura 9b), che era stata riparata mediante cuciture armate.

Nella Figura 15 le fotografie storiche sono state trasformate ed è stata loro assegnata scala reale utilizzando una trasformazione omografica (raddrizzamento analitico d'immagini) con l'impiego di coordinate di punti estratte dai modelli metrici eseguiti in seguito alle scosse e descritti nel paragrafo



Figura 11. Modello metrico strutturato 3D misurabile che mostra la fessura dell'arco Carbonara: (a) stato di settembre 2016, (b) stato di dicembre 2016, fessure di 20-70 cm.

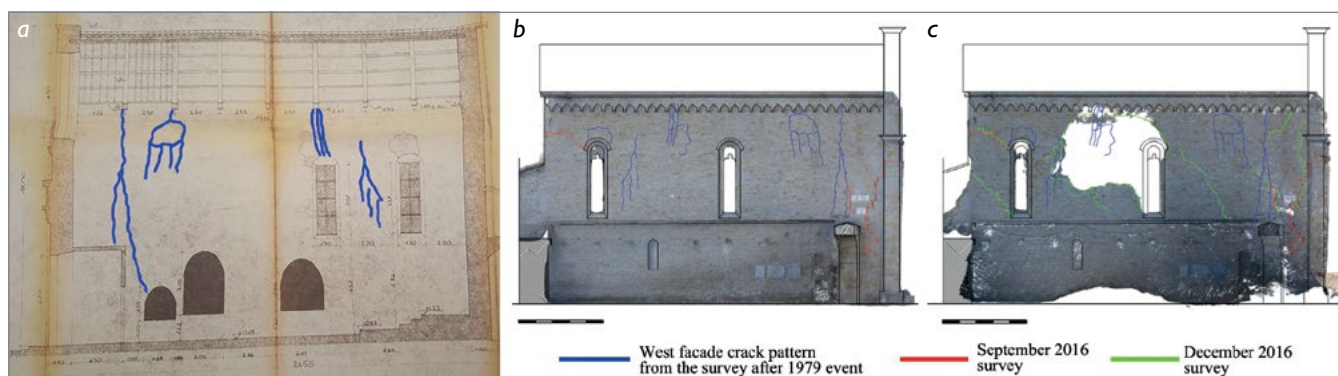


Figura 12. Comparazione e rintracciamento delle corrispondenze nel modello metrico 3D e nei disegni storici, dei danni visibili all'interno e all'esterno in seguito agli eventi del 1979 e del 2016. (a) evidenziazione dei danni sismici del 1979, nella muratura ovest, visti dall'interno. (b) sovrapposizione dei danni del 1979 (in blu) visibili all'interno riproiettati sul fronte esterno e associati ai danni del 2016. (c) comparazione di tutti i danni: del 1979, di agosto 2016 e di ottobre 2016.

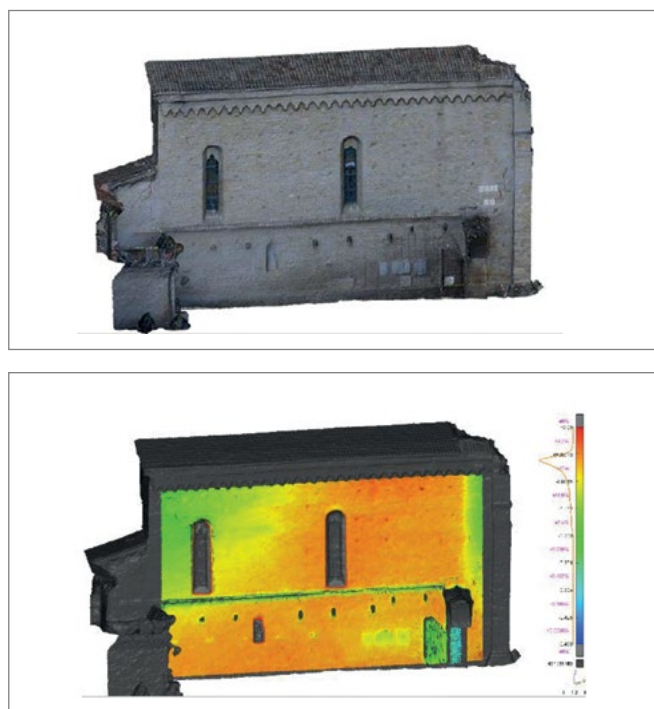


Figura 13. Analisi della deviazione dal piano verticale del fronte ovest, rilevato nel modello di settembre 2016. I valori rappresentati in arancione/rosso sono i maggiori. Il 75% della superficie devia dal piano verticale per valori compresi tra 5 e 10 cm.

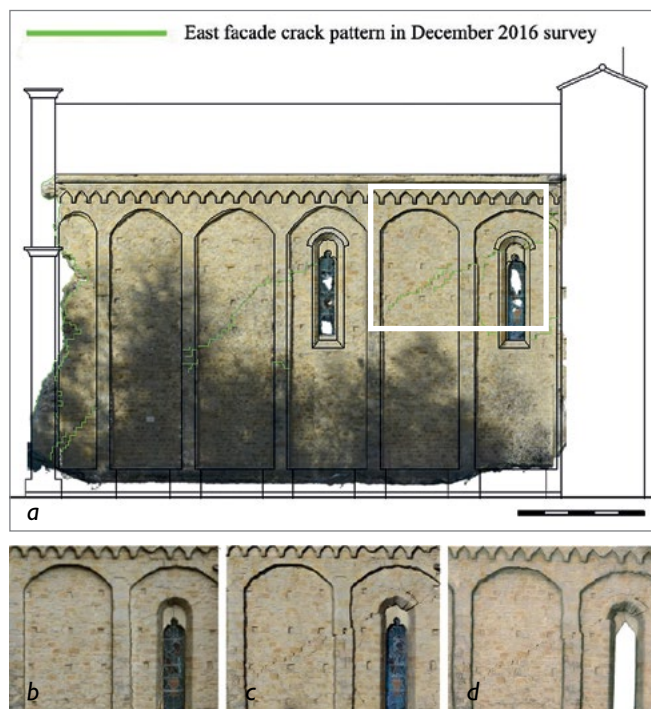


Figura 14. Fronte est: (a) quadro fessurativo rilevato nel modello di dicembre; evoluzione delle fessurazioni in settembre 2016 (b), dicembre 2016 (c), febbraio 2017 (d).

2 (figura 8). Ciò consente di restituire le fessurazioni di inizio novecento (Figura 15 in giallo) e l'integrazione della facciata (Figura 15 in verde) e di metterle in relazione dimensionale ai successivi e progressivi danneggiamenti e crolli osservabili e ugualmente misurabili a partire dai modelli fotogrammetrici realizzati.

Nella Figura 16, i danni di inizio secolo, e l'integrazione del fronte degli anni trenta con l'inserimento del rosone, sono sovrapposte e correlate ai danni e ai crolli del terremoto

del 2016: settembre 2016 (rosso), dicembre 2016 (verde), febbraio 2017 (blu). Si può così osservare che le prime gravi lesioni al fronte della chiesa emerse in seguito al primo evento, seguono un andamento molto simile alla lesione di inizio novecento; i crolli della parte superiore della facciata verificatisi dopo gli eventi di ottobre e rilevati a dicembre, presentano una coincidenza quasi perfetta con la linea di demarcazione della sopraelevazione. Le lesioni e crolli dell'ultima fase, (in verde e blu, rispettivamente nel rilievo

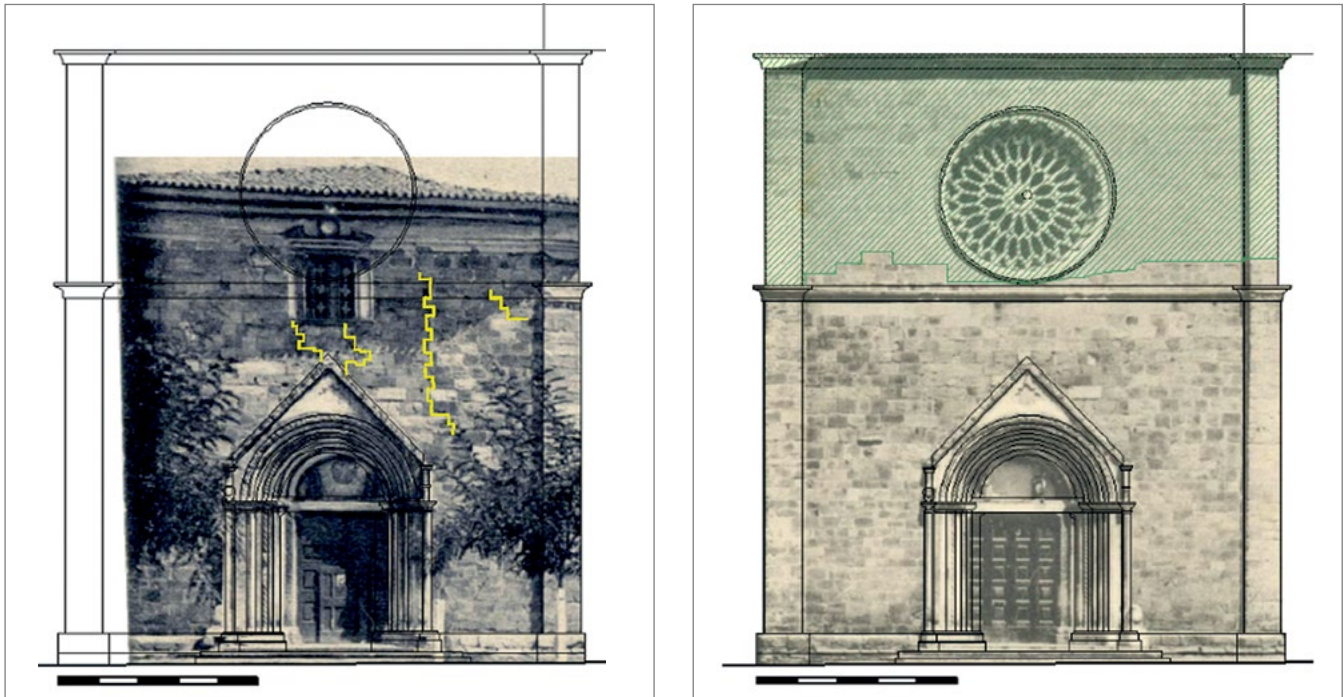


Figura 15. Orto-rettificazione e rappresentazione metrica del fronte di Sant'Agostino da immagini storiche prima e dopo la ricostruzione della facciata, da Figura 1b, c. Le fessure precedenti sono ancora visibili e misurabili in (a) in linee gialle; le tracce di elevazione possono essere rilevate e misurate nell'area verde.

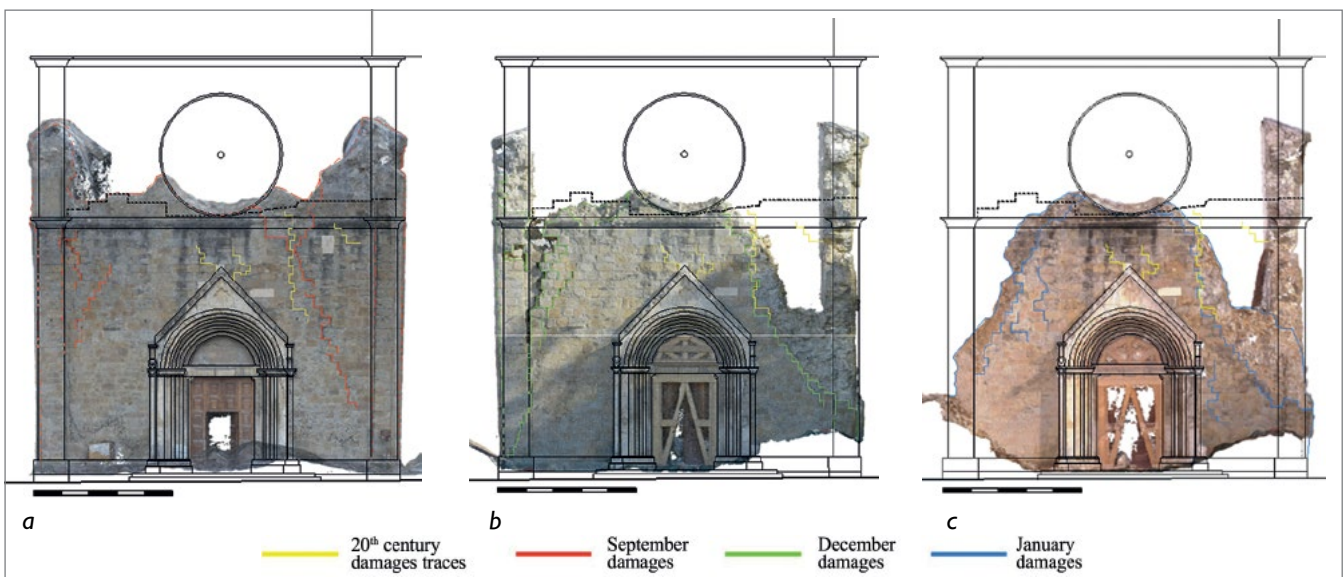


Figura 16. Analisi multi-temporale della facciata in muratura di Sant'Agostino. Le fessure risalenti agli anni '20 (giallo) e il segno dell'elevazione della facciata prima della ricostruzione degli anni '30 in linea tratteggiata, possono essere correlate ai segni del danneggiamento del terremoto 2016-2017: (a) settembre 2016, (b) dicembre 2016, (c) febbraio 2017.

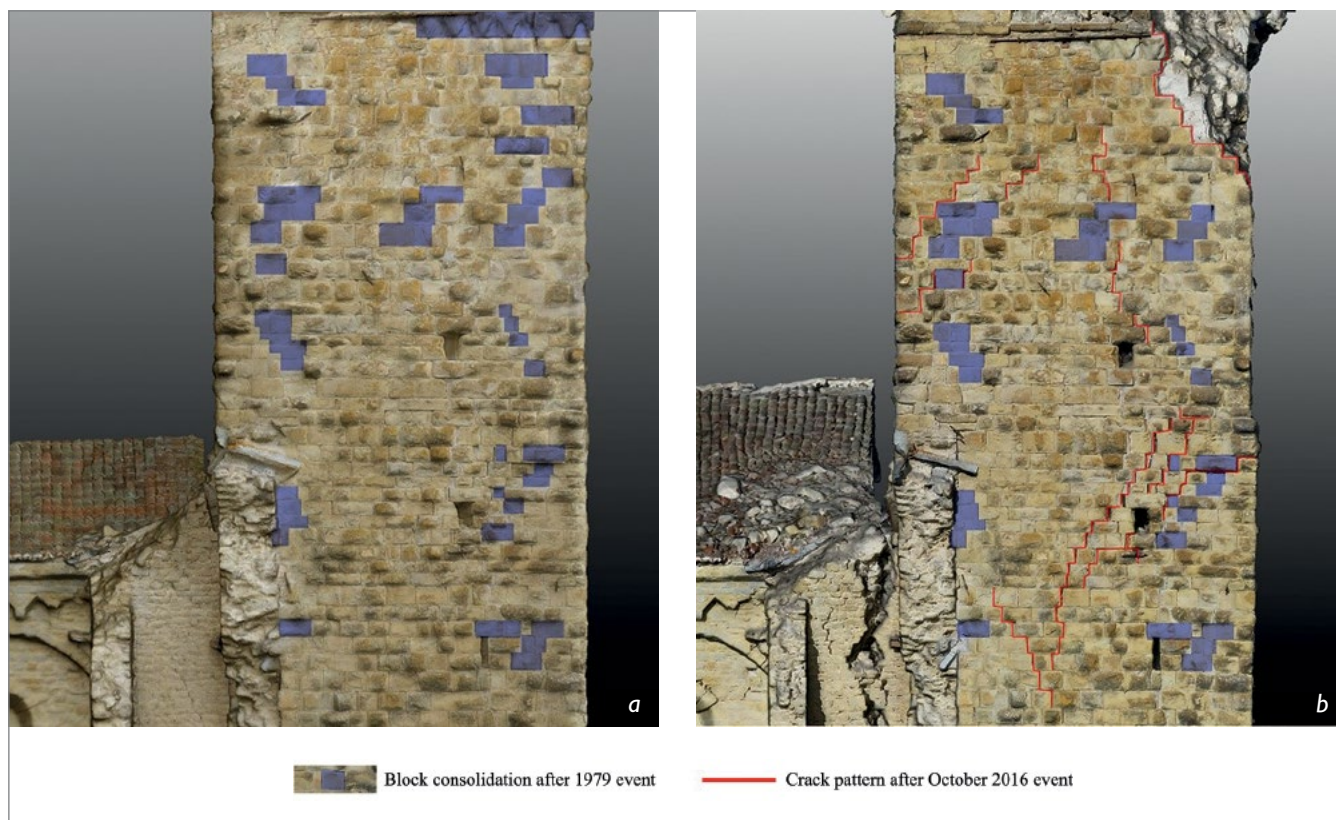


Figura 17. Gli ultimi lavori di consolidamento dopo il terremoto della Valnerina del 1979 sono evidenziati in blu, nella condizione di settembre 2016 del campanile (a), e nella situazione del campanile in seguito agli eventi di ottobre 2016 con rappresentazione delle fessurazioni in rosso (b).

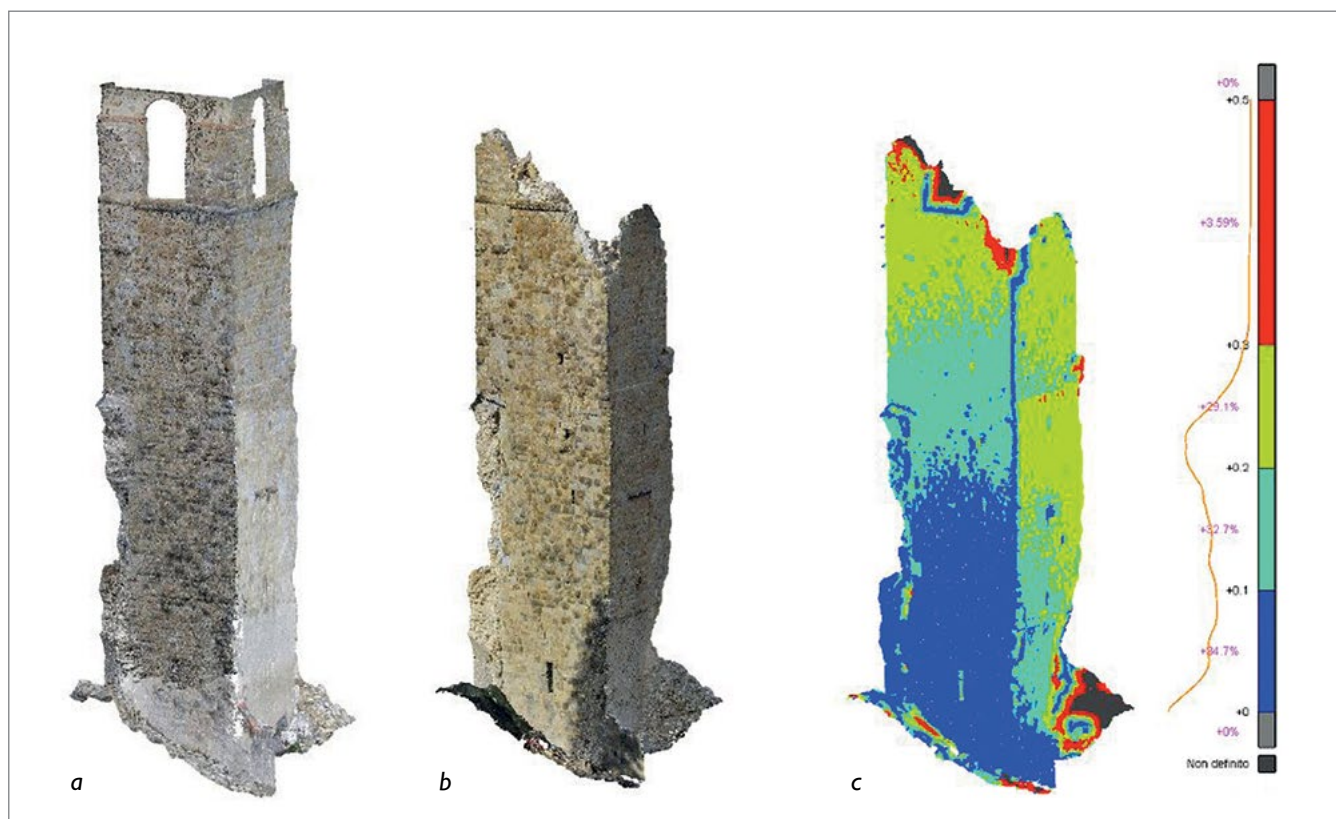


Figura 18. La documentazione del danno al campanile tramite il modello 3D multi-temporale. (a) modello (T1) rilevato in settembre; (b) modello (T2) rilevato a dicembre; (c) restituisce una mappa di spostamento lungo una direzione NE-SW.



Figura 19. Particolare della struttura in muratura multistrato e la mancanza di connessione tra le murature del fronte principale e quelle ortogonali, osservabili sul modello T2 (dopo l'evento di ottobre) e tramite foto.



Figura 20. Diversi particolari dei punti di iniezioni cementizie rilevabili sulle superfici e all'interno della tessitura muraria.

di dicembre e gennaio) presentano le stesse direzioni e andamenti delle lesioni originarie.

Riguardo la torre campanaria, le fessure rilevate dopo gli eventi sismici del 2016 sembrano aprirsi nei punti in cui erano già sigillate da iniezioni di cemento e chiuse mediante cuciture da nuove pietre di colore più chiare (nei precedenti lavori di rafforzamento dopo il terremoto della Valnerina del 1979). L'individuazione dei blocchi di muratura recenti aggiunti nel lavoro di consolidamento del 1979 è visibile nell'ortofotografia della torre nel settembre 2016 (Figura 17a). La relazione tra questo intervento e il modello di crack dopo gli eventi di ottobre 2016 è visibile nella Figura 17b.

L'analisi delle superfici dei modelli multi-temporali del campanile ci informa che la comparazione tra i rilievi di settembre e dicembre restituisce una mappa di spostamento con direzione NE-SW (Figura 18).

La scossa sismica del 30 ottobre (magnitudo 6.5) ha inevitabilmente aumentato il livello di danneggiamento e favorito nuovi crolli parziali del campanile e della chiesa, per esempio quello del lato superiore destro della facciata in corrispondenza del precedente danneggiamento già evidenziato (Figura 19, a, b).

Nella Figura 20 è possibile osservare, all'interno della tessitura muraria messa a nudo dalle lesioni del sisma, la presenza di iniezioni di cemento precedentemente eseguite, negli anni '80, per riparare una fessura aperta dal terremoto del 1979. Non sono presenti barre d'armatura per la cucitura trasversale delle precedenti fessure (come preventivato nel progetto del 1980), bensì solo colli di cemento a semplice risarcitura. Inoltre è stato possibile constatare, da riprese interne all'edificio, che, diversamente da quanto riportato nel progetto iniziale, i lavori di consolidamento dei primi anni '80 hanno previsto anche un generale e diffuso rinforzo delle pareti lesionate mediante iniezioni cementizie (Figura 20b, c, d). Tuttavia, come oramai ampiamente riconosciuto nel dibattito scientifico, l'inserimento di materiali cementizi, di natura molto rigida, è spesso causa di incompatibilità

con l'originaria e più debole muratura storica. In particolare la semplice risarcitura puntuale delle lesioni non ha assolutamente risolto le vulnerabilità dei precedenti quadri fessurativi, che, come dimostrato dalle analisi geomatiche, si sono riaperti prevalentemente nei medesimi punti del passato. Occorre altresì constatare il buon ammassamento del cordolo sommitale che, sebbene realizzato con struttura in c.a. molto pesante, è stato tuttavia realizzato con degli inghisaggi verticali molto efficaci che durante le prime scosse sono riusciti a trattenere le pareti sottostanti evitandone il ribaltamento, e contemporaneamente garantire un buon comportamento scatolare all'edificio.

4. Analisi della risposta sismica locale della chiesa

Le registrazioni dei movimenti sismici della stazione di Amatrice (AMT), facente parte della Rete accelerometrica italiana (RAN), sono state analizzate per ricostruire la risposta sismica nel sito della chiesa. La stazione si trova su un'arenaria stagionata ed è classificata come categoria del sottosuolo B rispetto alle disposizioni dell'Eurocodice 8. Le condizioni locali del sito sono state investigate con un pozzo trivellato nelle immediate vicinanze della chiesa, nell'ambito della microzonazione sismica dell'intero Comune di Amatrice. La stratigrafia locale è composta da sabbie di media densità nella parte superiore ad una profondità di 5 m, seguite da 15 m di ghiaie grossolane dense con ciottoli che poggiano sulla stessa formazione arenacea su cui si trova la stazione AMT.

Il profilo di velocità dell'onda di taglio, ottenuto con un'indagine sismica down-hole nello stesso sondaggio, riporta velocità intorno a 200 m/s per i metri superiori che aumentano nella formazione di ghiaia. Raggiungono circa 600 m/s, che può essere considerata la velocità equivalente di quella per la formazione alterata di arenaria alla stazione AMT, a 16 m di profondità. Considerando che il tipo di terreno non consentirebbe di recuperare campioni indisturbati per eseguire test di laboratorio, le proprietà non lineari del materiale

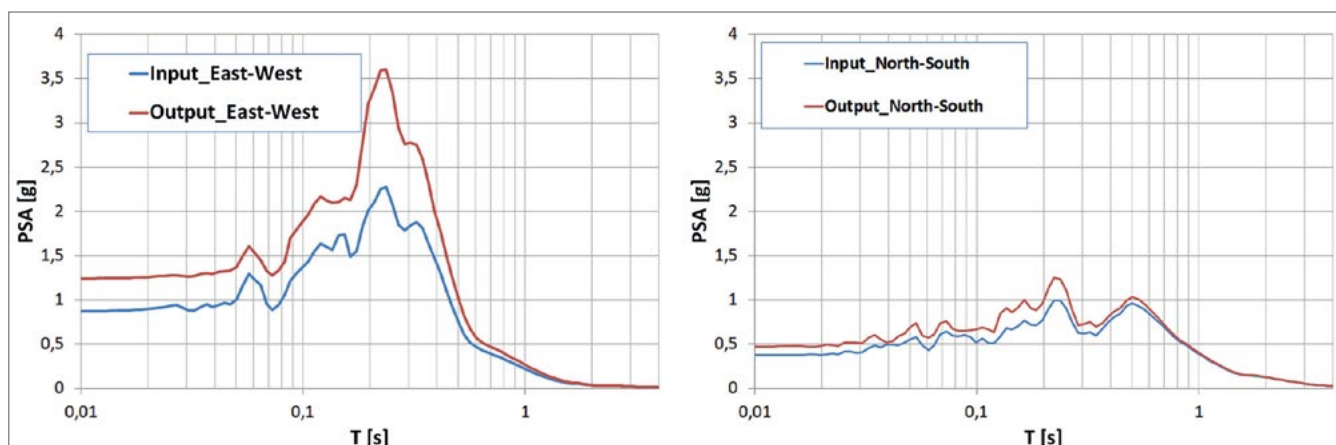


Figura 21. Confronto degli spettri di risposta dell'accelerazione per il moto del suolo stimato al livello di fondazione per la chiesa di Sant'Agostino e le registrazioni alla stazione AMT (componente orizzontale est-ovest a sinistra e componente nord-sud a destra).

sono state stimate sulla base di relazioni bibliografiche consolidate¹⁵. L'analisi di risposta al suolo è stata quindi eseguita considerando come input motion i record ottenuti dalla stazione AMT disponibili nel database ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>). L'analisi della risposta al suolo 1D è stata eseguita con l'approccio elastico lineare equivalente implementato nel codice Deepsoil¹⁶ per valutare le modifiche dei moti terrestri associate alla risposta del deposito del suolo. L'analisi del campo libero è stata eseguita, e l'elevazione della fondazione è stata presa in considerazione nella valutazione del movimento del terreno.

Un confronto tra gli spettri di risposta all'accelerazione al livello base con le registrazioni della stazione AMT è riportato nella Figura 21 per entrambe le direzioni orizzontali con riferimento allo shock sismico principale del 24 agosto 2016. È rilevabile una chiara prevalenza della componente est-ovest del movimento della componente nord-sud nelle registrazioni alla stazione AMT. Questa differenza è coerente ai danni e agli effetti superficiali osservati durante la ricognizione post-terremoto¹⁷. I risultati dell'analisi di risposta al suolo mostrano un'amplificazione coerente in un ampio intervallo di periodi, considerando le diverse condizioni del sottosuolo nella chiesa di Sant'Agostino rispetto al sito AMT. L'amplificazione del movimento del suolo osservata ha sicuramente svolto un ruolo molto rilevante nella distruzione osservata nel centro di Amatrice.

5. Analisi delle vulnerabilità dell'edificio a seguito del sisma 24 agosto 2016

La finalità della modellazione agli elementi finiti è di confrontare il primo danneggiamento rilevato durante la scossa del 24 agosto 2016 con quello derivante dall'elaborazione numerica implementata con i dati delle caratteristiche meccaniche e con lo spettro di risposta sismica locale. In questo modo la modellazione numerica potrà essere utile anche per le future fasi progettuali di ricostruzione.

Il modello (Figura 22a) è stato realizzato mediante software Pro_Sap® (2Si). La geometria è stata derivata dal modello digitale 3D generato dai rilievi geomatici descritto nei paragrafi precedenti. La mancanza di connessione tra la facciata e le pareti ortogonali è stata modellata inserendo corrette condizioni al contorno negli involucri di interfaccia tra pareti.

Riguardo le resistenze meccaniche con cui caratterizzare la muratura, il modello ha tenuto in considerazione i risultati forniti dalla prova con il martinetto piatto doppio sulla parete sud-est, dalle prove di caratterizzazione delle malte e delle pietre prelevate in situ ed eseguite dai tecnici del MastrLab del Politecnico di Torino, in seno alla convenzione descritta nell'articolo sul Santuario di Santa Maria delle Grazie a Varoni. L'analisi svolta è di tipo dinamica lineare in accordo con le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), utilizzando lo spettro di risposta sismica locale desunti dai rilievi microsismici nei pressi della chiesa. L'analisi ha preso in considerazione circa 100 modi di vibrare per raggiungere

una massa partecipante superiore all'85%, come richiesto dalle NTC2018. Molti di questi modi si riferiscono a modalità locali che hanno attivato la risposta delle travi del tetto di copertura in legno.

La deformazione dell'edificio, mostrata nella Figura 22b associata alla combinazione di carico relativa alle azioni sismiche simultaneamente in atto nelle due direzioni ortogonali, evidenzia notevoli somiglianze con il danno rilevato in situ in occasione della scossa sismica del 24 agosto 2016. In particolare, anche dalla modellizzazione numerica risulta che la deformazione principale che ha condotto al collasso è legata alla parte superiore della facciata (Figura 22b), perché la componente sismica rilevante (est-ovest) era ortogonale ad essa. Come spesso accade per gli edifici religiosi, il meccanismo di danno più frequente per le chiese è riconducibile a cinematismi fuori piano di macroblocchi murari.

La Figura 23 mostra due principali modalità di vibrazione valutate dall'analisi dello spettro di risposta modale. La Figura 23a rappresenta una deformazione modale corrispondente al ribaltamento della porzione superiore della facciata, con un periodo di vibrazione di 0,18 secondi. La Figura 23b illustra una deformazione modale principale che interessa la cella del campanile con un periodo di vibrazione di 0,23 secondi. Questi periodi di vibrazione corrispondono ai valori massimi di accelerazione sismica all'interno degli spettri sismici locali di Figura 21 e al danno reale subito dalla chiesa. Lo spettro di progetto utilizzato è stato ridotto dal fattore di struttura "q" = 2,24 (in funzione della regolarità geometrica e della tipologia costruttiva della chiesa) che ha tenuto conto del comportamento non lineare della muratura, in accordo con le normative tecniche e in linea con i valori presenti nella casistica degli edifici storici in muratura.

Il tetto era costruito con capriate in legno e quindi a tipologia non spingente. Tuttavia, esso era costituito da arcarecci semplicemente appoggiati sul muro di facciata e quindi non costituivano un vincolo efficace per trattenere il meccanismo fuori piano. Sul manto di copertura non era presente alcun pannello ligneo di irrigidimento, pertanto la rigidità della copertura è stata considerata trascurabile all'interno del modello.

Il campanile, essendo una struttura snella, è stato soggetto ad alte oscillazioni nella cella campanaria, le quali risultano evidenti anche nel modello numerico (Figura 23b). La mappa delle tensioni principali, in particolare l'alto livello di sollecitazione sui lati della facciata, è in accordo con il reale quadro fessurativo (Figura 24).

Conclusioni

L'uso delle moderne tecniche integrate di rilievo 3D offerte dalla Geomatica è stato molto importante per eseguire l'analisi dei danni della chiesa di Sant'Agostino durante la sequenza sismica ad Amatrice. Oltre a consentire l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni occorsi alle strutture in muratura con approccio *step-by-step*, nel corso del tempo, hanno permesso di recuperare un rapporto spaziale tra le fonti storiche, foto e disegni, e la

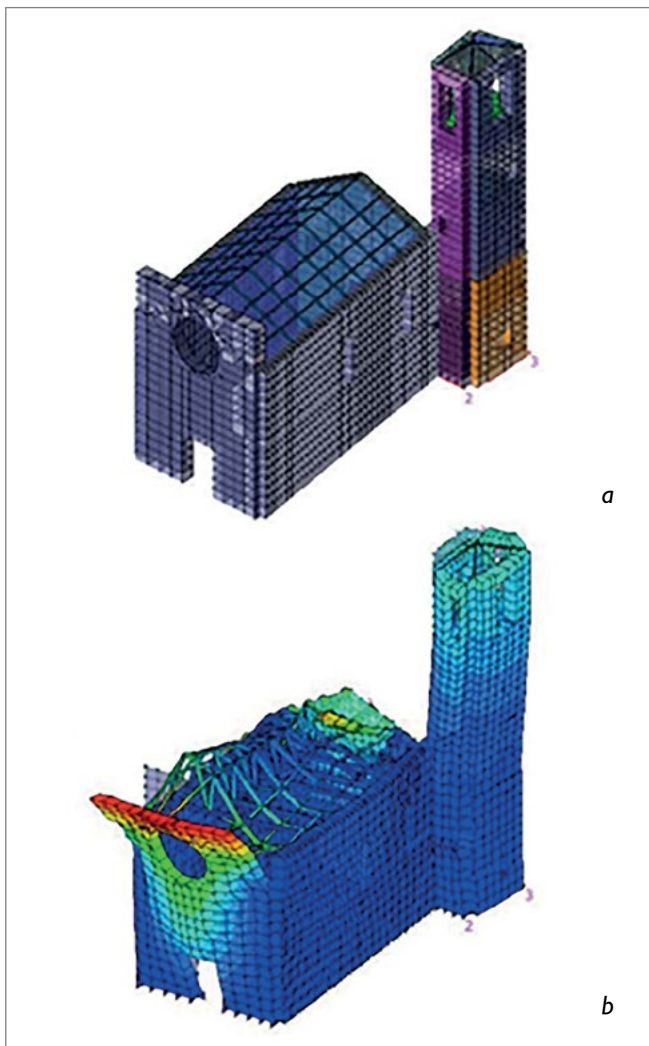


Figura 22 (a) Modello strutturale agli elementi finiti; (b) simulazione numerica della deformazione della chiesa durante la scossa sismica del 24 agosto 2016

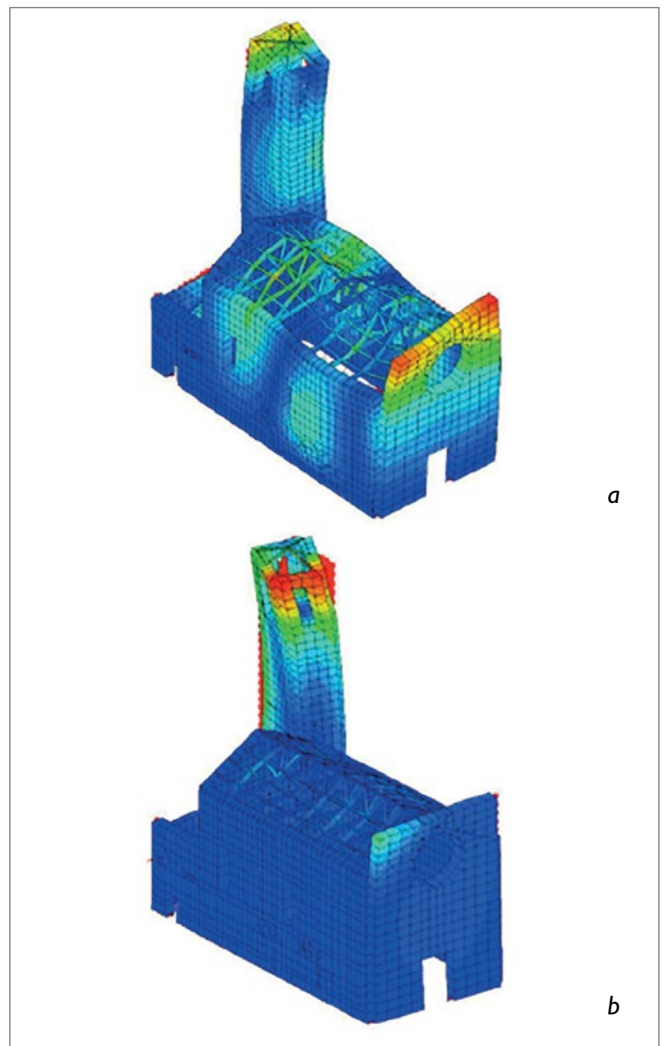


Figura 23. Principali modalità di vibrazione valutate nell'analisi modale: (a) deformazione modale corrispondente al ribaltamento della porzione superiore della facciata (periodo di vibrazione 0,18 secondi); (b) deformazione modale che interessa la cella campanaria (periodo di vibrazione 0,23 secondi).



Figura 24. (a) Mappa delle tensioni principali nelle strutture murarie della chiesa di Sant'Agostino dopo scossa sismica del 24 agosto 2016; (b) stato di danno reale nella facciata vista dall'interno chiesa.

realtà documentata dalla modellazione 3D multi-temporale; ciò è stato possibile in primo luogo in virtù dell'assegnazione di un unico sistema di riferimento spaziale per tutti i prodotti della restituzione, tridimensionali e bidimensionali. Inoltre, si è rilevato anche primario il contributo delle immagini acquisite da UAV nelle fasi post evento, in quanto possono consentire ispezioni e analisi visive da punti di vista privilegiati, permettendo di agire in sicurezza, in operazioni di esame delle strutture parzialmente o completamente collassate.

Il rilievo geometrico e l'analisi del danno consentiti dalle nuove tecnologie, l'analisi locale della risposta sismica effettuata per derivare il moto reale del terreno sul sito, sono stati molto utili per eseguire un'analisi a ritroso tramite l'uso di una modellazione agli elementi finiti della chiesa Sant'Agostino, al fine per studiare la sua vulnerabilità sismica. I risultati numerici risultano in accordo con il sistema delle fessurazioni e meccanismi di collasso rilevati e analizzati, saranno quindi utili per programmare gli interventi. In definitiva, gli approcci metrici e strutturali avanzati ed integrati per la modellazione digitale e multi-dimensionale dei fenomeni, correlati all'analisi dei danni precedenti, ha permesso di comprendere meglio le reali vulnerabilità di questo edificio storico, potendo trasferire le riflessioni anche ad altri casi di architettura storica soggetta a rischio.

Note

¹ Il presente contributo consiste in una edizione rivista di: Alessandro Grazzini, Filiberto Chiabrandò, Sebastiano Foti, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *A Multidisciplinary Study on the Seismic Vulnerability of St. Agostino Church in Amatrice following the 2016 Seismic Sequence*, in «International Journal of Architectural Heritage», 2019; DOI: 10.1080/15583058.2019.1575929.

² Giovanni Carbonara, *Gli insediamenti degli ordini mendicanti in Sabina*, in *Lo spazio dell'umiltà*, Atti del Convegno di studi sull'edilizia dell'Ordine dei Minori, Fara Sabina, 3-6 novembre 1982, Centro Franciscano Santa Maria in Castello, Fara Sabina 1984.

³ Giovanni Carbonara, *Gli insediamenti...* cit.

⁴ Ivi.

⁵ Cfr. in questo volume il contributo a p. 41.

⁶ Cfr. in questo volume il contributo a p. 54.

⁷ Piero Boccardo, *New perspectives in Emergency Mapping*, in «Eur J Remote Sens», 46, 2013 pp. 571-582; DOI: 10.5721/EuJRS20134633. Daniele Giordan, Yuichi Hayakawa, Francesco Nex, Fabio Remondino, Paolo Tarolli, *Review article: the use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management*, in «Nat. Hazards Earth Syst. Sci.», 18, 2018, pp. 1079-1096; DOI: 10.5194/nhess-18-1079-2018. Rui Hirokawa, Daisuke Kubo, Shinji Suzuki, Jun-Ichi Meguro, Taro Suzuki, *A small UAV for immediate hazard map generation*, in *Proceedings of AIAA Infotech@ Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, 2725; DOI: 10.2514/6.2007-2725. Li-Li Wang, Wang-ping Zhou, Shilin Zhao, *Application of Mini-UAV in Emergency Rescue of Major Accidents of Hazardous Chemicals*, in *Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, Atlantis Press 2013; DOI: 10.2991/tsete.2013.38. Filiberto Chiabrandò, Andrea Di Lolli, Giacomo Patrucco,

Antonia Spanò, Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati Losè, *Multi-temporal 3D modelling for cultural heritage emergency during seismic events: Damage assessment of S. Agostino church in Amatrice (RI)*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 42, n. 5W1, (2017), pp. 69-76.

⁸ Evelina Rupnik, Francesco Nex, Fabio Remondino, *Oblique multicamera systems-orientation and dense matching issues*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», IL-3, 2014, pp. 107-114.

⁹ Marc Pierrot-Deseilligny, Livio De Luca, Fabio Remondino, *Automated Image-Based Procedures for Accurate Artifacts 3D Modeling and Orthoimage Generation*, in «Geoinformatics FCE CTU», 6(0), 2011, pp. 291-299. Grazia Tucci, Valentina Bonora, Alessandro Conti, Lidia Fiorini, *High-quality 3d models and their use in a cultural heritage conservation project*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XLII-2/W5, 2017, pp. 687-693; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-687-2017.

¹⁰ Giulia Sammartano, *Suitability of 3D dense models from rapid mapping strategies for Cultural Heritage documentation and conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions*, tesi di dottorato in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino, XXX ciclo (2018), tutors Antonia Spanò. Filiberto Chiabrandò.

¹¹ *Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, version 2015; https://emidius.mi-ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/.

¹² *Parametric Catalogue*, cit.

¹³ D.P.C.M. 09/02/2011, *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008, Allegato C*, in «Gazzetta Ufficiale», n. 47, 26/02/2011. Sergio Lagomarsino, Stefano Podestà, *Seismic vulnerability of ancient churches: Damage assessment and emergency planning*, in «Earthquake Spectra», 20 (2), 2004, pp. 377-394; DOI: 10.1193/1.1737735.

¹⁴ Bruno Silva, Massimo Della Benetta, Francesca Da Porto, Claudio Modena, *Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls*, in «Construction and Building Materials», 53, 2014, pp. 149-161; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.084. Maria Rosa Valluzzi, Francesca Da Porto, Claudio Modena, *Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls*, in «Materials and Structures», 37, 2004, pp. 184-192; DOI: 10.1007/BF02481618.

¹⁵ Per lo strato sabbioso: Mehmet B. Darendeli, Kenneth Stokoe, *Development of a new family of normalized modulus and material damping curves*, Geotechnical Engineering Report GD01-1, University of Texas at Austin, 2001. Per le ghiaie: Kyle M Rollins, Mark D. Evans, Nathan B. Diehl, William D. Daily, *Shear modulus and damping relationships for gravels*, in «Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering», 124 (5), 1998, pp. 396-405; DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:5(396).

¹⁶ Youssef M. Hashash, J. Musgrove, J. Harmon, D. Groholski, C. Phillips, D. Park, *DEEPSOIL 6.1, user manual*, Urbana: Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.

¹⁷ Jonathan Stewart, Paolo Zimmaro, Giuseppe Lanzo, S. Mazzoni, E. Ausilio, S. Aversa, F. Bozzoni, R. Cairo, M. C. Capatti, M. Castiglia et al., *Reconnaissance of 2016 Central Italy earthquake sequence*, in «Earthquake Spectra», 34 (4), 2018, pp. 1547-1455; DOI: 10.1193/080317EQS151M.