

Modellare la conoscenza della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura storica con tecnologie 3D speditive

E. Fillia¹, G. Sammartano^{1,2}, C. Tocci¹, A. Spanò^{1,2}

¹ Dipartimento di Architettura e Design (DAD) - Politecnico di Torino
Viale Mattioli 39, 10125 Torino (Italy), edoardofillia@libero.it, giulia.sammartano@polito.it,
cesare.tocci@polito.it, antonia.spano@polito.it

² Polito FULL | the Future *Urban Legacy* Lab, Toolbox coworking.
Via Agostino da Montefeltro 2, 10125 Torino (Italy)

Abstract. La documentazione speditiva delle chiese tutelate, in quanto beni particolarmente vulnerabili e molto diffusi sul territorio, e la costruzione di una conoscenza del loro livello di sicurezza, in tempi ragionevolmente brevi, è ritenuto prioritario per la gestione delle risorse legate alla tutela dei beni culturali. La ricerca qui presentata, relativa al caso della Chiesa di Sant'Andrea a Campi di Norcia (PG) e i suoi resti conseguenti al sisma del 2016, vuole proporre l'impiego di tecnologie speditive integrate per modellare le chiese in muratura storica, nonché valutarne l'efficacia nel supportarne le indagini per la comprensione del sistema architettonico e la valutazione della vulnerabilità sismica.

Parole chiave: documentazione del patrimonio, CH, modelli 3D, fotogrammetria UAV, SLAM, vulnerabilità sismica

1 Introduzione

Esiste un rapporto serrato e critico, quando non tragico, tra patrimonio edilizio storico ed eventi sismici, che da secoli investono copiosamente i molti centri urbani del territorio italiano: esso è sempre più sotto lo sguardo attento delle strategie di prevenzione nonché di conoscenza e conservazione.

Una tipologia di edifici storici particolarmente diffusa sul territorio ed esposta al rischio sismico è rappresentata dalle chiese in muratura. Le ragioni vanno ricercate nelle particolari proporzioni degli elementi di questa tipologia di manufatti e nell'impegno necessario e spesso non soddisfatto alla loro manutenzione: la presenza di grandi aule senza pareti interne di spina, l'assenza di orizzontamenti intermedi, la snellezza delle pareti e soprattutto dei campanili, solitamente molto alti, presenza di elementi spingenti come volte ed archi, il degrado conseguente al limitato uso ed alla scarsa manutenzione di alcune parti. In tali contesti le tecnologie avanzate della Geomatica si dimostrano spesso strategiche nel contributo alla documentazione metrica a supporto dell'analisi strutturale e di vulnerabilità in contesti di rischio sismico [1, 2].

Il caso oggetto di studio è la chiesa di Sant'Andrea a Campi, frazione di Norcia, in provincia di Perugia [3]. Si tratta di una struttura in muratura di medie dimensioni

risalente al XIV secolo, composto da un'aula a due navate, una torre campanaria retrostante e un portico in facciata. Oggi si presenta parzialmente crollata in seguito agli eventi sismici che hanno colpito il centro Italia nel corso del 2016 con una magnitudo superiore a 5 ed un picco il 30 ottobre 2016 di magnitudo 6.5 con epicentro 4 km a nord-est di Norcia.

Grazie all'acquisizione integrata di dati fotogrammetrici da drone e dati derivati da un sistema di mobile mapping terrestre basato sulla tecnologia SLAM, è stato possibile generare un modello metrico 3D ad alta risoluzione e accuratezza, sul quale è stata fondata la modellazione per macro-elementi per la valutazione della vulnerabilità sismica. L'obiettivo della strategia operativa è quello di massimizzare l'acquisizione dei dati metrici con una robusta componente geometrica e un controllo metrico relativo agli scopi prefissati, e parallelamente minimizzare i tempi di permanenza dell'operatore nel sito, anche per questioni di sicurezza [4, 5]. La sperimentazione e la validazione di un workflow operativo basato sulla digitalizzazione 3D può portare a fornire quelle informazioni metriche e radiometriche efficaci a delineare il primo livello di conoscenza per le chiese in muratura. La ricerca in tali direzioni può inoltre far sì che queste metodologie possano essere generalizzabili e replicabili e quindi implementate nelle pratiche operative reali delle condizioni di pre-post danno.

A tal proposito, la documentazione dei beni culturali è certamente uno dei campi in cui con maggior frequenza le tecniche della geomatica sono chiamate a rispondere con soluzioni integrate operative e sostenibili in termini di tempi, costi, coinvolgimenti, complessità di utilizzo, da un lato, e qualità delle misure e delle sue accuratezze dall'altro.

La Direttiva del PCM del 9/02/2011 [6] delinea e chiarisce i limiti e i modi per l'applicabilità di un programma di prevenzione sismica fondato su diversi livelli di conoscenza. Essa richiede di formulare una valutazione di sicurezza relativa alle costruzioni in muratura storica, con tempi e con soluzioni consone al cospicuo numero di beni distribuiti sul nostro territorio. Il rilievo geometrico viene impostato in base a livelli di approfondimento di conoscenza, e, sulla base di questi step, viene associato un fattore di confidenza per graduare l'attendibilità del modello.

La Direttiva prevede inoltre un modello semplificato per la stima dell'indice di vulnerabilità delle chiese in muratura storica basato sul principio per il quale le chiese risultano composte da macroelementi, porzioni architettoniche che presentano un comportamento autonomo nei confronti della struttura nel suo complesso [7, 8, 9].

In questo contesto, la disponibilità di metodi di rilievo 3D operativo mediante tecniche geomatiche e la loro applicabilità per la determinazione dei livelli di conoscenza e per individuare e dimensionare i macroelementi risulta un terreno interessante di confronto tanto metodologico quanto olistico.

2 Metodologia

2.1 Sant'Andrea a Campi e generazione del modello 3D multisensore

Il centro storico di Campi, che ospita la chiesa di Sant'Andrea oggi parzialmente crollata, è arroccato su un pendio con conformazione urbana tipica dei Castelli di pendio, circondato da mura. (Figura 1)

Il rilievo metrico 3D a Campi di Norcia è stato impostato a partire da un inquadramento topografico con metodo GNSS e stazione totale. La documentazione digitale si è basata sull'integrazione di acquisizioni fotogrammetriche da voli con micro-droni multi-rotore, di scansioni mediante laser scanning tradizionale (TLS) e da scansioni con scanner mobile (MMS) all'esterno e all'interno del manufatto.

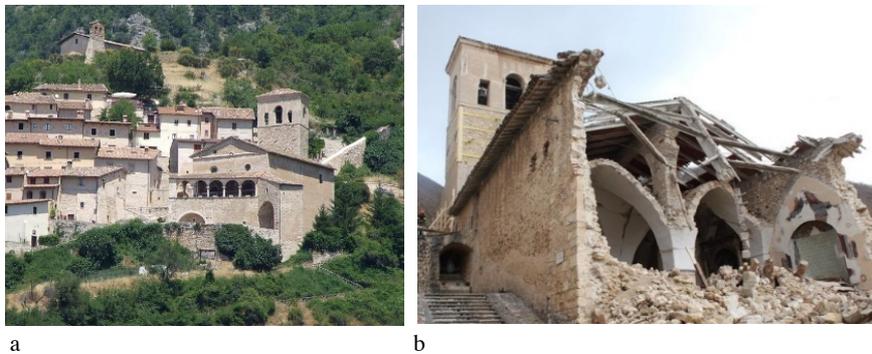


Fig. 1. a) La chiesa di Sant'Andrea, con la sua torre campanaria ed il portico, precedentemente al sisma del 2016. **b)** La chiesa in seguito ai crolli legati al sisma del 2016.

I voli realizzati mediante droni Mavic e Spark DJI, hanno adottato riprese nadirali, inclinate a 45° su traiettoria orbitale intorno alla chiesa ed al suo campanile. La quota media di volo attestata a poco più di 35m rispetto al punto più basso del sito, ha consentito di ottenere un GSD medio pari a 9.6 mm.; il *bundle block adjustment* e la conseguente tecnica *Structure from Motion*, hanno consentito di ottenere un'accuratezza di poco inferiore ai 2 cm. (valutata tramite i consueti sqm calcolati sui GCPs e CPs).

Di particolare interesse è stata l'acquisizione (anche in condizioni di crollo e con presenza di presidi di sicurezza temporanei) e la co-registrazione delle nuvole terrestri basate su tecnologia SLAM realizzate negli interni del campanile e della navata della chiesa, con la nuvola fotogrammetrica aerea relativa alle zone di più difficile accesso del complesso architettonico come la parete verso il pendio, le coperture e la porzione alta del campanile. Le nuvole acquisite mediante l'hand-held scanner Zeb-Revo di GeoSLAM, sono state registrate con medesimo punto di partenza porzioni in comune. Questa condizione è fondamentale per l'allineamento delle nuvole mediante algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) integrato nel software GeoSLAM Hub (*merge tool*): dal momento che tale procedura non prevede una rototraslazione rigida ma anche un adattamento di forma delle nuvole, è necessaria un'attenta verifica preventiva della qualità complessiva delle nuvole e di quella della traiettoria stimata dall'algoritmo

SLAM che può essere soggetto a deriva. (Figura 2) Le nuvole integrate, valutate e validate tramite la nuvola TLS che costituisce il *ground truth*, hanno fornito una precisione centimetrica in linea con gli scopi e risultati attesi. (Figura 3,4).

Il complesso dei dati di documentazione 3D, resi disponibili dall'integrazione delle tecniche, per l'interpretazione del sistema architettonico e la valutazione della vulnerabilità sismica si distingue in:

- I fotogrammi ripresi da UAV offrono un punto di vista privilegiato, dall'alto e secondo posizioni e inclinazioni diverse, sia per una ispezione da punti di vista inaccessibili sia per una restituzione completa dell'esterno della fabbrica
- Ortofoto ed elaborazioni bidimensionali (Figura 5b) nella forma di sezioni e prospetti in scala dove i dati geometrici e radiometrici risultano armonizzati e controllati metricamente.
- *Mesh* texturizzata: la trasformazione della nuvola di punti in superfici triangolate genera una mesh poligonale, formata da vertici, che individuano spigoli e facce. Inoltre, alle superfici esterne può essere applicata la *texture* derivata dai fotogrammi ri-proiettati con controllo metrico; il risultato è un modello 3D navigabile per analisi del manufatto da parte di esperti della conservazione. (Figura 5a)
- la completezza del modello 3D consente la realizzazione di modelli volumetrici caratterizzati da geometrie semplificate per le analisi rivolte all'individuazione delle condizioni di equilibrio.

Il modello 3D ad alta precisione della chiesa generato a partire da questi può supportare:

- L'ispezione dei danni e l'analisi delle deformazioni
- Il monitoraggio dell'evoluzione delle deformazioni e dei danni confrontando e analizzando secondo un punto di vista multi-temporale e multi-scala rilievi effettuati in periodi differenti [10].
- La definizione di volumetrie per analisi rivolte all'individuazione degli elementi che compongono il sistema architettonico e delle condizioni di equilibrio.

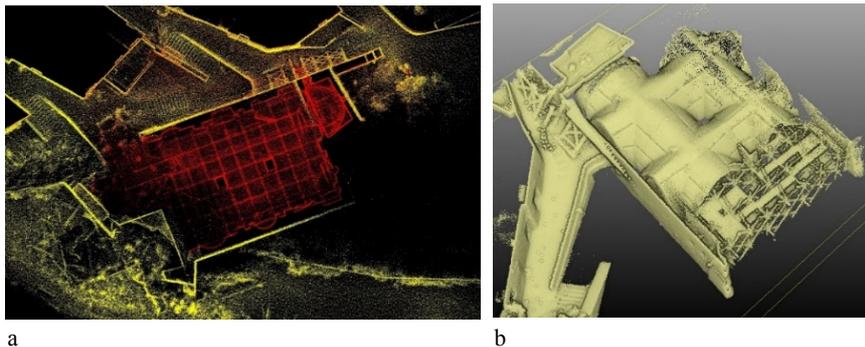


Fig.2. a) Operazione di *merge* delle due nuvole di punti acquisite da laser scanner mobile tramite il software GeoSLAM Hub. In giallo la prima, esterna. In rosso la seconda, interna.
b) Primo risultato dell'unione delle due nuvole acquisite con laser scanner mobile.

Come sarà meglio dettagliato nel paragrafo 3.1, i modelli derivati dalle tecniche reality based sono più idonei rispetto a tecniche tradizionali nel supportare l'identificazione delle principali alterazioni geometriche relative a comportamenti strutturali che innescano dei meccanismi di danno quali la perdita di collegamento tra le murature e fessurazioni, nonché i loro fuori piombo e fenomeni di spanciamento, oltre a disallineamenti delle murature su differenti piani.

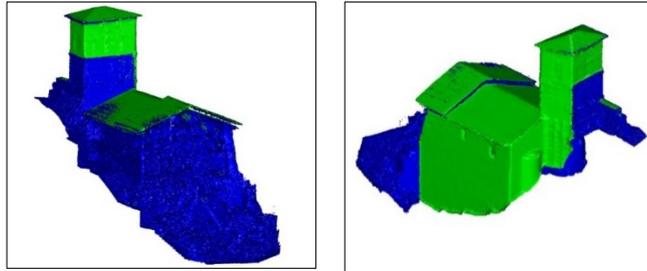


Fig.3. Integrazione della nuvola di punti da laser scanner mobile (in blu) con la nuvola di punti da fotogrammetria UAV (in verde).

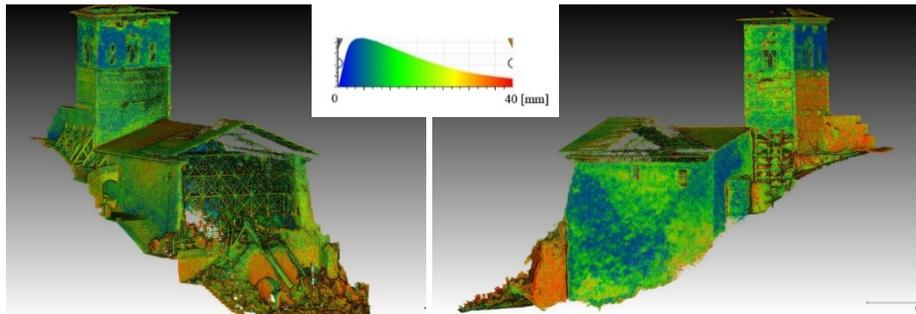


Fig.4. Confronto fra la nuvola di punti integrata, acquisita con le tecniche di rilievo speditivo UAV e SLAM-based con nuvola TLS. La scala dei colori rappresenta la distanza tra i punti delle due nuvole, da un minimo di 0 mm in blu ad un massimo di 40 mm in rosso, raggiunti raramente.



Fig. 5. a) Mesh texturizzata b) Pianta dell'aula della chiesa

2.2 Modello volumetrico per macroelementi

Per l'analisi dei macroelementi e dei relativi meccanismi di danno è molto importante tradurre la visualizzazione dei soli dati geometrici spaziali, equivocabili nel loro rapporto di connessione, in elementi volumetrici che rappresentano le parti del sistema architettonico che si comportano in modo unitario quando sollecitate dal sisma (facciata, pareti laterali, volte ecc.). Questa operazione avviene attraverso una rappresentazione concettuale del reale, estraendo i profili delle volumetrie da modellare attraverso una sistematica riduzione delle informazioni geometriche. (Figura 6)

Eseguita l'interpretazione dei macroelementi, la modellazione operativa dei volumi mediante strumento CAD (*Computer Aided Design*) è stata strutturata in due fasi: (1) importazione dei profili delle superfici rilevate nello spazio 3D derivati da sezioni orizzontali e verticali; (2) modellazione dei volumi con diverse tecniche: i volumi costituiti da superfici regolari sono stati modellati estrudendo i relativi poligoni e scolpendoli attraverso superfici di taglio; le volte, il cui profilo è complesso, sono state modellate creando una superficie basata sulle generatrici delle superfici curve a partire da *spline* derivate da sezioni trasversali, la superficie è poi stata estrusa per la creazione del volume.

Gli elementi sono stati successivamente aggregati in diversi *layer* per la suddivisione in macroelementi. Il modello può essere condiviso su Autodesk Viewer, un visualizzatore online che consente di effettuare diverse operazioni come la navigazione nello spazio 3D, la creazione di sezioni orizzontali e verticali, la misura gli elementi, la navigazione in modalità passeggiata nonché la selezione gli elementi per visualizzarne le proprietà, quali il macroelemento di appartenenza oppure ancora è nascondere alcuni elementi/macroelementi per comprendere meglio il rapporto spaziale tra di essi. (Figura 7).

Il modello volumetrico realizzato con AutoCAD è inoltre predisposto per l'integrazione e la condivisione su piattaforma GIS (*Geographic Information System*), per la costituzione di una banca dati finalizzata alla valutazione del rischio sismico a livello territoriale armonizzata secondo la direttiva INSPIRE (*Infrastructure for spatial information in Europe*). Una ricerca condotta a partire da simili presupposti [11] ha affrontato e validato la possibilità di integrare una rappresentazione per macroelementi e meccanismi di danno di un bene architettonico secondo la direttiva italiana del 2011 con gli standard INSPIRE.

- L'oggetto *Building* deve essere caratterizzato dal LoD (*Level of Detail*).
- I macroelementi vengono considerati *Building Part*, definiti da INSPIRE come “*sub-division of a Building that might be considered itself as a building*”.
- Il nome dei macroelementi deve rispettare l'AAT *Getty Vocabularies* per una definizione univoca.

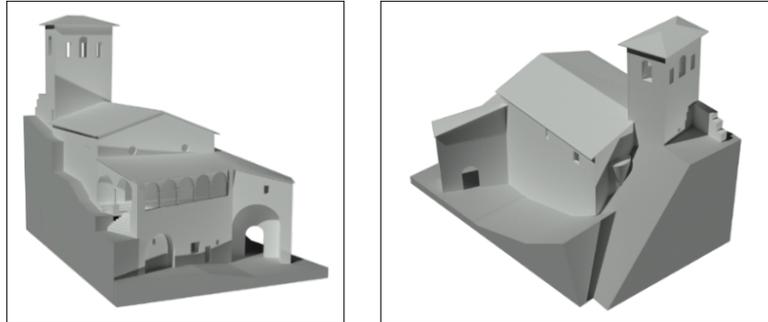


Fig. 6. Modello volumetrico della chiesa di Sant'Andrea



Fig. 7. Alcuni esempi di operazioni effettuabili sul modello condiviso su Autodesk Viewer. **a)** Misurare degli elementi, **b)** individuare degli elementi e visualizzazione delle proprietà come il macroelemento di appartenenza, **c)** occultare alcuni elementi, ad esempio porzioni di volta.

3 Valutazione vulnerabilità

L'ausilio del modello metrico 3D consente di effettuare analisi sicuramente più approfondite rispetto alle indicazioni delle linee guida che suggeriscono l'applicazione di un modello semplificato fondato sul materiale conoscitivo già a disposizione e sull'interrogazione e interpretazione visiva come principale strumento di analisi.

3.1 Analisi integrate del modello

La chiesa di Sant'Andrea presenta i danni maggiori nella porzione anteriore, a causa del crollo totale della facciata e del portico (Figura 8a,b), che suggerisce immediatamente come il manufatto abbia ricevuto una sollecitazione longitudinale. Questa ipotesi è consolidata dall'analisi delle fessurazioni presenti sulle pareti laterali dell'aula e del campanile. Le indagini sui crolli dovuti al secondo evento sismico del 30/10/2016 (facciata, la prima campata di volte, portico e la porta cittadina addossata al fianco della chiesa) sono state condotte con l'ausilio della *mesh* texturizzata.

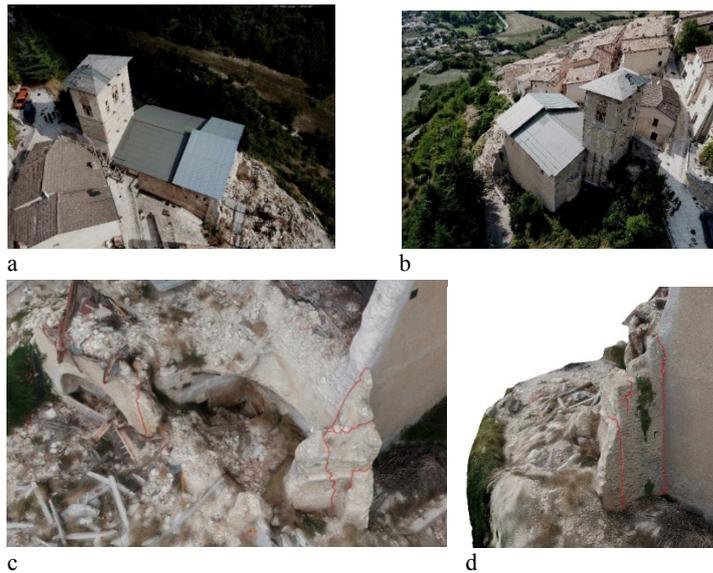


Fig. 8 a, b) La chiesa di Sant'Andrea dopo le scosse sismiche del 2016, in fotografie scattate da drone durante rilievo fotogrammetrico. c, d) Mappatura delle fessurazioni e riconoscimento delle diverse porzioni di muratura non ammassate o separate dalle fessurazioni

Questa modalità di lettura, attraverso un modello navigabile, ha permesso l'ispezione della porzione danneggiata da diversi punti di vista. (Figura 8 c,d)

Quello che emerge è una sostanziale mancanza di collegamenti tra la porta cittadina, il corpo della chiesa e il muro di sostegno delle colonne che è addossato ad un altro muro, forse di epoca precedente (figura 8c,d). La solidità del sistema architettonico è compromessa in modo particolare dal rischio di ribaltamento del muro su cui poggiano

le colonne che sostengono il tetto del portico, costituito da due parti non collegate tra loro. Le travi IPE ancorate al muro della facciata e introdotte in un recente restauro, hanno aggravando un quadro critico che, esposto all'azione sismica che ha colpito l'edificio in senso longitudinale, ha determinato il ribaltamento della facciata della chiesa. La muratura di facciata, con il suo ribaltamento ha trascinato con sé nel crollo l'ultima campata degli archi a sostegno del colmo con conseguente crollo delle ultime travi di calcestruzzo precompresso del tetto che hanno sfondato l'ultima campata di volte. Sul retro della chiesa (a nord-ovest) la sollecitazione longitudinale ha determinato pochi danni poiché l'aula e l'abside maggiore sono parzialmente contro-terra. L'ausilio del modello 3D ha consentito lo studio della composizione architettonica di questa porzione della chiesa attraverso alcune sezioni della nuvola di punti.

Dalle elaborazioni bidimensionali (Figura 9) si evince che la torre poggia a terra in corrispondenza dell'abside e la parete sud-ovest scarica il suo peso sull'arco trionfale. L'arco risulta in buone condizioni, non sono presenti meccanismi di danno, anche in considerazione dei vincoli laterali molto solidi: verso nord contro terra, verso sud contro un pannello murario in buone condizioni.

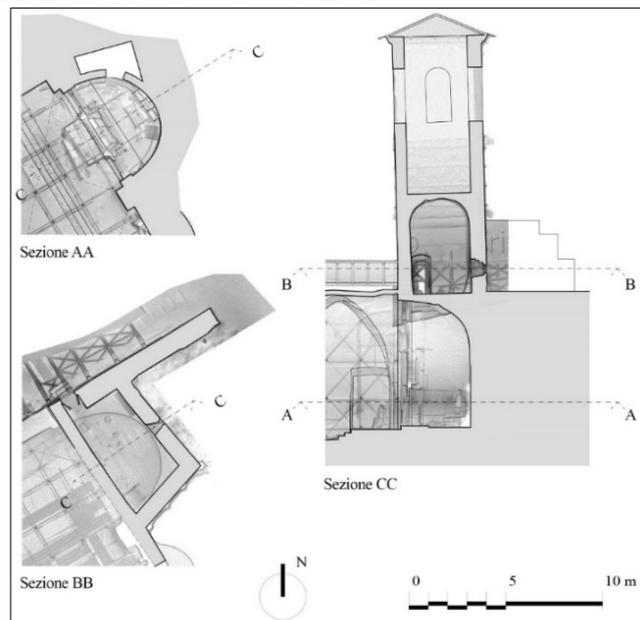


Fig. 9. Rappresentazione bidimensionale della torre generata dalle sezioni della nuvola di punti

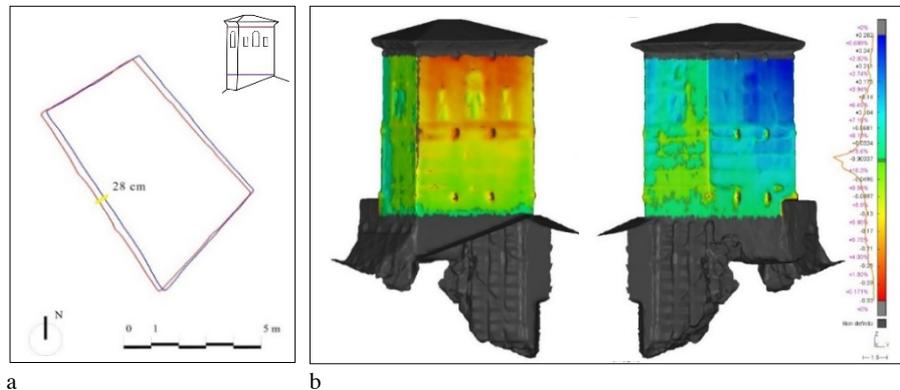


Fig. 10 a) Analisi del fuori-piombo della torre campanaria. Profilo della *mesh* alla base (blu) e profilo della *mesh* alla sommità della torre (rosso). **b)** Misura della distanza tra la *mesh* della torre e il profilo alla base estruso lungo la verticale.

La torre campanaria presenta però un'inclinazione verso sud-ovest ed un fuori piombo corrispondente a circa 28 cm rispetto alla base. E' possibile effettuare un'ulteriore analisi per una documentazione più accurata di questo fenomeno attraverso la misura della distanza tra la *mesh* della torre e una superficie estrusa dal profilo alla base lungo la verticale. (Figura 10) Questo quadro non è risultato compromettente in occasione degli eventi sismici del 2016 in considerazione dell'ottima compattezza del campanile, che favorisce un comportamento scatolare.

3.2 Applicazione del modello semplificato indicato dalla direttiva

Le valutazioni scaturite dall'analisi del modello 3D della chiesa confluiscono nella scheda di valutazione detta "modello semplificato", che prevede l'identificazione dei macroelementi, l'analisi dei meccanismi e l'assegnazione del punteggio relativo alla probabilità che si verifichino (da -3 molto improbabile a +3 molto probabile). (Tabella 1)

Tab.1 Meccanismi di danno associati al punteggio di vulnerabilità (vk) nella scheda di valutazione degli indicatori di vulnerabilità, con evidenziazione dei meccanismi con vulnerabilità alta, ≥ 2

Macroelemento	Meccanismo di danno	Vulnerabilità (vk)
Facciata	1 - Ribaltamento della facciata	2
	2 - Meccanismi nella sommità della facciata	2
	3 - Meccanismi nel piano della facciata	0
Portico	4 - Meccanismi del portico	2
Pareti laterali	5 - Ribaltamento delle pareti laterali	2
	6 - Meccanismi di taglio nelle pareti laterali	-3
Colonnato	7 - Risposta longitudinale del colonnato	1
Volte	8 - Meccanismi delle volte	2
Arco trionfale	13 - Meccanismo dell'arco trionfale	-2
Abside	16 - Ribaltamento dell'abside	-3
	17 - Meccanismi di taglio nell'abside	-2

	18 - Meccanismi delle volte dell'abside	-2
Copertura	19 - Meccanismi negli elementi di copertura	-2
Torre campanaria	27 - Meccanismi della torre campanaria	-2
	28 - Meccanismi della cella della torre campanaria	-1

La qualità dell'impianto non appare ottima e la valutazione della struttura tramite la scheda di analisi restituisce un quadro negativo. La seguente tabella 2 riporta il calcolo di altri parametri indicati dalla direttiva. La vita nominale è indice del periodo di tempo entro il quale provvedere ad un intervento ed una nuova verifica, oltre a provvedere un idoneo programma di monitoraggio. "Per la progettazione di opere provvisoria si può assumere un valore di vita nominale pari a 10 anni." [6]

Tab.2. Parametri e valori calcolati secondo indicazioni della direttiva

Nome	Parametro	Valore
Indice di vulnerabilità	i_v	0,45
Accelerazione di picco al suolo SLD	a_{SLD}	0,051 g
Accelerazione di picco al suolo SLV	a_{SLV}	0,203 g
Vita nominale	V_N	2 anni
Indice di sicurezza sismica	I_S	0,04

Il pericolo sismico molto alto della zona non consente il raggiungimento di standard di sicurezza elevati e che non presuppongano un adeguato programma di monitoraggio e progettazione di nuovi interventi e nuove verifiche. Il risultato relativo ad una vita nominale inferiore a 10 anni può quindi considerarsi gravemente insufficiente.

Il modello 3D consente inoltre di effettuare, sui macroelementi più vulnerabili, analisi più approfondite, verificando le condizioni di equilibrio e determinando il coefficiente sismico utile per la determinazione dell'accelerazione di picco al suolo per la quale si verifica il ribaltamento. Sono state realizzate due analisi, una per la verifica della parete laterale sud e una per la torre campanaria, fornendo i seguenti risultati:

- Verifica al ribaltamento della parete laterale sud: $a = 0,296 \text{ g} < 0,444 \text{ g}$
- Verifica al ribaltamento della torre campanaria: $a = 0,632 \text{ g} > 0,444 \text{ g}$

Conoscendo l'accelerazione di picco al suolo attesa ($a = 0,444 \text{ g}$) le verifiche relative alla parete laterale sud non risultano superate.

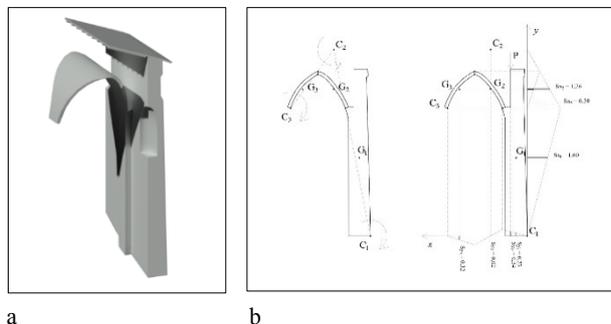


Fig.11 a) Analisi statica della parete laterale sud; modello 3D estrapolato dal modello volumetrico semplificato, **b)** analisi delle condizioni di equilibrio per il calcolo del coefficiente sismico.

4 Conclusioni e prospettive.

Il contributo all'analisi della vulnerabilità sismica dei modelli 3D innovativi, derivati dall'integrazione delle tecniche geomatiche speditive, consiste essenzialmente nella costituzione di una banca dati solida, ricca di informazioni metriche e descrittive, che supportano la documentazione metrica e perfezionano con più accuratezza la rappresentazione e l'analisi dei sistemi costruttivi per la valutazione della vulnerabilità sismica. Le tecniche utilizzate, la fotogrammetria UAV e l'impiego di un sistema MMS, si sono rivelate molto efficaci nella strategia di integrazione adottata. La compattezza e portabilità di questi strumenti risolve in modo ottimale la generazione di una nuvola di punti completa, relativa alle superfici esterne e interne. La versatilità dei prodotti derivanti da queste tecniche si traduce in un contributo a svariate indagini che è necessario condurre sul manufatto architettonico per la valutazione della vulnerabilità sismica e che la direttiva, nella fase preliminare, speditiva, relega alla sola ispezione visiva, con una forte componente esperienziale per l'applicazione di un modello fondato su basi statistiche.

Inoltre, se in una prima fase è stata esplorata la generazione del modello 3D ad elementi geometricamente definiti, in un secondo step di ricerca ci si dirigerà verso l'integrazione delle informazioni multi-scala nell'ambiente GIS (sez. 2.2), nella prospettiva di una gestione integrata di tali modelli per macroelementi. Il grande interesse verso tale strategia risulta potenziale se si considera l'analisi della vulnerabilità, relativa alla singola struttura (sez. 3), in relazione al suo territorio e agli altri edifici tutelati. Le analisi della struttura delle chiese e dei loro macroelementi alla scala architettonica nel modello semanticamente caratterizzato potranno cioè essere intese come un sistema a scala territoriale, in linea con le indicazioni della Direttiva, ed essere soggette quindi ad analisi spaziali che tengano conto anche dei dati relativi alla pericolosità territoriale riferita all'indice di sicurezza sismica.

In definitiva, considerando la vastità del patrimonio architettonico presente sul territorio italiano e la sua estrema vulnerabilità, questi modelli caratterizzati da speditività e contenimento dei costi possono essere un valido supporto per la realizzazione di un programma destinato alla promozione di un miglioramento diffuso della sicurezza sismica sul territorio e costituiscono una solida base per altri rilievi finalizzati a progetti di restauro, perseguendo l'obiettivo di costituire una banca dati composta da modelli completi, multiscala e multitemporali.

Riferimenti bibliografici

1. Pieraccini, M.; Dei, D.; Betti, M.; Bartoli, G.; Tucci, G.; Guardini, N. Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy). *J. Cult. Herit.* 2014, 15, 1–8
2. Sammartano, G.; Spanò, A. High scale 3D modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment / - In: INTERNATIONAL

- ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES. 42:5W1(2017), pp. 245-252.
3. Fillia E., Modelli 3D per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura storica., Master thesis, Politecnico di Torino, 2020.
 4. Grazzini, A., Chiabrandò, F., Foti, S., Sammartano, G., Spanò A., A Multidisciplinary Study on the Seismic Vulnerability of St. Agostino Church in Amatrice following the 2016 Seismic Sequence, *International Journal Of Architectural Heritage*, Taylor & Francis, pp. 18, 2019, ISSN: 1558-3066, DOI: 10.1080/15583058.2019.1575929
 5. Calantropio, A., Chiabrandò, F., & Spanò, A. (2018). Impiego di tecniche di fotogrammetria digitale speditiva a supporto delle opere provvisorie negli interventi tecnici in emergenza sismica. *Bollettino SIFET*, (3), 22-31.
 6. Dir. PCM 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. 14/01/2008, 2.1, “Strumenti per la valutazione della sicurezza sismica a scala territoriale”
 7. Lagomarsino, S., Podestà, S., 2004(a) Seismic Vulnerability of Ancient Churches: I. Damage Assessment and Emergency Planning. *Earthquake Spectra*, Vol 20, N. 2, pp. 377–394, 04/2004.
 8. Lagomarsino, S., Podestà, S., 2004(b) Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis
 9. NIKER (New Integrated Knowledge Based Approaches to the Protection of Cultural heritage from Earthquake-induced Risk), 2010. Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials, Deliverable 3.1
 10. Chiabrandò F., Di Lolli A., Patrucco G., Spanò A., Sammartano G., Teppati Losè L., Multitemporal 3D modelling for cultural heritage emergency during seismic events: Damage assesment of S. Agostino church in Amatrice (RI), *International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, vol. 42 n. 5W1, 2017
 11. Colucci E., Noardo F., Matrone F., Spanò A., Lingua A., High-level-of-detail semantic 3D GIS for risk and damage representation of Architectural Heritage, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018.

#AsitaAcademy2021