



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale
Architettura per il restauro e valorizzazione del patrimonio

Tesi di Laurea Magistrale

Modelli 3D per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura storica

Il caso studio di Sant'Andrea a Campi di Norcia

Candidato: Edoardo Fillia
Relatrice: Prof.ssa Antonia Spanò
Correlatori: Prof. Cesare Tocci
Dott.ssa Giulia Sammartano

Febbraio 2020

Abstract

3D models for seismic vulnerability assessment of historical churches. The case study of Sant'Andrea in Campi, Norcia.

Earthquakes are catastrophic events that strongly affect historic centers and cultural heritage, as these are particularly vulnerable. Italy is a country with high seismic hazard. Here, churches are a type of historical buildings particularly widespread and also exposed to risk of seismic consequences. The PCM's directive of February 9th 2011, which is referred to in this thesis, outlines the steps that lead to the implementation of a seismic prevention plan. This plan is based on an important level of knowledge, schematic but critically well-founded, so as to be suitable for a territorial vision of churches at seismic hazard. The thesis' aim is to acquire, in a reasonably short time, documentation about the safety level of these buildings.

The current work aims to develop this method in a multidisciplinary approach, using the tools provided by geomatics, whose versatility enables the achievement of an optimal solution by integrating the various techniques available.

Among modern digital techniques for rapid mapping, the 3D metric survey allows the realization of a point cloud, with particular attention to the potential of a mobile mapping system (MMS) and the photogrammetry by unmanned aerial vehicle (UAV). Multisensory surveys allow the construction of integrated 3D models, derived from point clouds, which are lifelike and an accurate digital representation of the artefact. Through these models it is possible to understand the architectural system and the assessment of the seismic vulnerability concerning the item of interest. Point clouds, mesh surfaces and volumetric models allow: the definition of the elements that characterize the architecture, the investigations aimed at the static analyses, the inspection of damages, the analysis of deformations and their monitoring over time. This approach of a rapid assessment enables the establishment of a solid database in order to structure the planning of future projects.

This thesis documents the vulnerability of a two-aisle church, Sant'Andrea in Campi, Norcia (PG), which partially collapsed as a result of the seismic events that hit central Italy during 2016.

Sommario

Il terremoto è un evento catastrofico che colpisce fortemente i centri storici ed i beni architettonici, in quanto particolarmente vulnerabili. L'Italia è un paese ad alta pericolosità sismica ed una tipologia di edifici storici particolarmente diffusa sul territorio ed esposta al rischio è rappresentata dalle chiese. La Direttiva del PCM del 9 febbraio 2011, a cui si fa riferimento nel corso della tesi, si struttura delineando i passaggi che conducono alla realizzazione di un programma di prevenzione sismica fondato su un primo importante livello di conoscenza, schematico ma criticamente fondato, tanto da essere idoneo ad una visione di insieme a scala territoriale. L'obiettivo è di acquisire, in tempi ragionevolmente brevi, una documentazione sul livello di sicurezza di questi edifici.

In questa tesi si cercherà di sviluppare questo metodo con un approccio multidisciplinare, utilizzando gli strumenti forniti dalla Geomatica, la cui versatilità può consentire il raggiungimento della soluzione ottimale attraverso un'integrazione delle varie tecniche a disposizione.

Il rilievo metrico 3D speditivo è affidato alle moderne tecniche digitali che consentono la realizzazione di una nuvola di punti, con particolare attenzione alle potenzialità del laser scanner mobile (*Mobile Mapping System* - MMS) e all'utilizzo della fotogrammetria aerea da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). I rilievi multisensore permettono di elaborare modelli 3D integrati, derivati da nuvole di punti, che sono fedele e accurata rappresentazione digitale del manufatto, di ausilio alle indagini per la comprensione del sistema architettonico e la valutazione della vulnerabilità sismica. I modelli di punti, di superfici o volumetrici consentono: la definizione degli elementi che caratterizzano l'architettura, le analisi rivolte all'individuazione delle condizioni di equilibrio, l'ispezione dei danni, le analisi delle deformazioni ed il loro monitoraggio nel tempo. Questo approccio alla valutazione speditiva consente la costituzione di una banca dati solida sulla quale strutturare la pianificazione degli interventi futuri.

Nella presente tesi viene documentata la vulnerabilità di una chiesa a due navate, Sant'Andrea a Campi, frazione di Norcia (PG), che oggi si presenta parzialmente crollata in seguito agli eventi sismici che hanno colpito il centro Italia nel corso del 2016.

Indice

Introduzione	9
Obiettivi Valutazione del rischio sismico a livello territoriale per la tipologia chiesa in muratura storica	9
Strumenti metodologici Rilievo metrico 3D applicato alla Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011	9
Introduzione del caso studio Sant’Andrea a Campi	11
Esiti attesi Un modello 3D per la conoscenza del sistema architettonico e della sicurezza sismica	11
Capitolo 1 – La Geomatica per il rilievo metrico 3D speditivo dei beni architettonici	13
1.1. Rilievo topografico per la georeferenziazione ed il controllo della precisione	14
1.2 Fotogrammetria da UAV (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)	17
1.3 Sistemi a scansione LiDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>)	20
1.3.1 <i>Mobile Mapping System</i> (MMS)	22
Capitolo 2 – Valutazione della vulnerabilità sismica per la tipologia architettonica “chiese”	25
2.1 La prevenzione antisismica nella normativa vigente	25
2.1.1 Modello semplificato per la stima dell’indice di sicurezza	25
2.2 Macroelementi e meccanismi di danno	31
2.3 Le potenzialità della Geomatica nella fase di valutazione	35
Capitolo 3 – Sant’Andrea a Campi	37
3.1 Inquadramento territoriale e storico	38
3.2 Il manufatto architettonico	40

Capitolo 4 – Generazione del modello 3D multisensore di Sant’Andrea	47
4.1 Il rilievo del Team Direct	47
4.1.1 Inquadramento topografico	48
4.1.2 Scansioni con laser scanner fisso	49
4.1.3 Scansioni con MMS	50
4.1.4 Acquisizione di immagini mediante fotogrammetria da UAV	52
4.2 Generazione delle nuvole di punti	54
4.2.1 Generazione della nuvola di punti da laser scanner fisso	54
4.2.2 Generazione della nuvola di punti da fotogrammetria con UAV	55
4.2.3 Generazione della nuvola di punti da MMS	57
4.3 Generazione del modello 3D	62
4.3.1 Integrazione della nuvola di punti da fotogrammetria da UAV e nuvola di punti da MMS	63
4.3.2 La <i>mesh</i> per le ispezioni del manufatto	65
4.3.3 Ortofoto e immagini radiometriche per le elaborazioni 2D	67
4.3.4 Il modello volumetrico dei macroelementi	72
Capitolo 5 – Valutazione della vulnerabilità sismica di Sant’Andrea	77
5.1 Letture con l’ausilio del modello 3D	77
5.2 Applicazione del modello semplificato indicato dalle linee guida	88
5.3 Schede di analisi statica integrabili derivate dal modello 3D	98
Conclusioni	103
Bibliografia	105
<i>Link ai modelli 3D</i>	109
Ringraziamenti	111

Introduzione

Obiettivi | Valutazione del rischio sismico a livello territoriale della tipologia chiesa in muratura storica

Il terremoto è un evento catastrofico che colpisce fortemente i centri storici ed i beni architettonici, in quanto particolarmente vulnerabili. In Italia negli ultimi 1.000 anni ci sono stati circa 260 eventi sismici di magnitudo pari o superiore a 5.5, in media uno ogni quattro anni.¹ I terremoti più forti si sono verificati in Sicilia, nel Gargano, nelle Alpi orientali e lungo gli Appennini. Questi dati fanno dell'Italia un paese ad alta pericolosità sismica.

Una tipologia di edifici storici particolarmente diffusa sul territorio italiano ed esposta al rischio sismico è rappresentata dalle chiese. Le ragioni vanno ricercate nelle particolari proporzioni degli elementi di questa tipologia di manufatti: la presenza di grandi aule senza pareti interne di spina, assenza di orizzontamenti intermedi, snellezza delle pareti, presenza di elementi spingenti (volte ed archi), degrado conseguente al limitato uso ed alla scarsa manutenzione di alcune parti (campanile). In queste costruzioni il sisma tende a impegnare la muratura soprattutto fuori dal proprio piano, favorendo l'insorgere dei cosiddetti meccanismi di ribaltamento di primo modo.

“L'attuazione di politiche di prevenzione sismica richiede la conoscenza del rischio a cui è soggetto il patrimonio tutelato.”² L'obiettivo della tesi è proporre una soluzione per la documentazione del patrimonio culturale tutelato, relativo alla tipologia chiesa in muratura storica, ai fini di una valutazione del rischio sismico, per la programmazione di interventi per un miglioramento diffuso della sicurezza a livello territoriale.

Strumenti metodologici | Rilievo metrico 3D applicato alla Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011

La Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 è una indicazione sulla condotta da seguire in materia di “Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per

¹ A. Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, 2011, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11>

² 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”

le Costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008”. La Direttiva specifica un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi; la finalità è quella di formulare il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione delle sole costruzioni in muratura storica. I metodi a cui fa riferimento il documento non sono vincolanti, essendo anche soggetti ad una continua evoluzione, tuttavia rappresentano le linee di indirizzo e i modelli più aggiornati. La direttiva, a cui si fa riferimento nel corso della tesi, si struttura delineando i passaggi che conducono alla realizzazione di un programma di prevenzione sismica fondato su un primo importante livello di conoscenza a scala territoriale. “La finalità è di acquisire, in tempi ragionevolmente brevi, una conoscenza del livello di sicurezza di questi edifici nelle aree maggiormente sismiche in considerazione del numero rilevante di beni tutelati.”³

La tesi si propone di sviluppare questo metodo utilizzando gli strumenti forniti dalla Geomatica, la cui versatilità può consentire il raggiungimento della soluzione ottimale attraverso un’integrazione delle varie tecniche a disposizione. La ricerca nel campo della Geomatica sta apportando un importante contributo alla prevenzione e gestione degli scenari di emergenza; in questi anni sta indagando soluzioni per la standardizzazione di un *workflow* operativo. Ogni passo in questa direzione è finalizzato al supporto diretto, in vista di un approccio multidisciplinare, alla lettura e all’interpretazione di comportamenti strutturali delle murature. Quest’operazione avverrà cercando il migliore equilibrio tra precisione di misura, scala di rappresentazione, livello di dettaglio della descrizione geometrica e tematica. “Proprio queste specificità consentono di potersi adattare a modelli di documentazione che richiedano caratteri di speditività, basso costo, e stratificazione successiva dei livelli di conoscenza, che sono ormai abbastanza diffusi e sistematicamente richiesti per la documentazione del patrimonio architettonico, ed in particolare lo sono per le specifiche finalità previste dalla Direttiva.”⁴ Il rilievo metrico 3D è affidato alle moderne tecniche digitali che consentono la realizzazione di una nuvola di punti, con particolare attenzione alle potenzialità del laser scanner mobile (*Mobile Mapping System - MMS*) e all’utilizzo della fotogrammetria aerea da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Questi sistemi rientrano nella categoria dei *rapid mapping e low cost*, per l’acquisizione di dati metrici 3D in contesti ad alta pericolosità come gli

³ Dir. PCM 9 febbraio 2011

⁴ A. Spanò, *Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica.*, 2013

scenari post-sismici, che si stanno sviluppando verso una sempre maggiore portabilità e compattezza. Inoltre, è molto importante poter operare con strumenti dal costo contenuto nell'ambito del rilievo dei beni culturali per poter massimizzare il risultato nella fase di tutela e valorizzazione del bene.

Introduzione del caso studio | Sant'Andrea a Campi

Il caso studio preso in considerazione per la tesi è la chiesa di Sant'Andrea a Campi, frazione di Norcia, in provincia di Perugia. Si tratta di un manufatto architettonico di medie dimensioni risalente al XIV secolo, composto da un'aula a due navate, da 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 Norcia⁵

Esiti attesi | Un modello 3D per la conoscenza del sistema architettonico e della sicurezza sismica

Questo approccio consente di realizzare una documentazione di base omogenea e molto solida per la conoscenza di un manufatto architettonico, nel caso specifico di Sant'Andrea. La generazione di modelli 3D per la conoscenza del sistema architettonico, la valutazione dei danni e della vulnerabilità sismica può essere di aiuto agli operatori che sono coinvolti nel processo di restauro del patrimonio architettonico.⁶ I rilievi multisensore permettono di elaborare modelli 3D integrati, derivati da nuvole di punti. Le nuvole possono essere trasformate in superfici triangolate (*mesh*) sulle quali proiettare fotogrammi orientati o ortofoto elaborate dai dati del rilievo fotogrammetrico aereo. I modelli di punti o di superfici, sui quali sia stata o meno applicata la *texture*, possono essere ulteriormente elaborati per dare origine a molteplici rappresentazioni di natura bidimensionale o 3D. Queste elaborazioni consentono: la definizione degli elementi che caratterizzano l'architettura e le analisi rivolte all'individuazione delle condizioni di equilibrio; l'ispezione dei danni, le analisi delle deformazioni

⁵ INGV, cnt.rm.ingv.it/en/event/8863681

⁶ F. Chiabrando, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè, *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, pp. 69-76

ed il loro monitoraggio nel tempo.⁷ Il modello finale è una fedele e accurata rappresentazione digitale del manufatto⁸, di ausilio alle indagini per la comprensione del sistema architettonico e la valutazione della vulnerabilità sismica. Inoltre, le informazioni metriche 3D e quelle legate alla vulnerabilità sismica possono essere organizzate e condivise su piattaforma Web GIS attraverso la generazione di un modello informativo 3D georeferenziato.

⁷ F. Chiabrando, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè, 2017

⁸ A. Spanò, E. Donadio, F. Chiabrando, "Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili", *SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell'Università degli Studi di Trieste I. La strada*, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017, pp. 79-100

Capitolo 1

La Geomatica per il rilievo metrico 3D speditivo dei beni architettonici

La Geomatica è un approccio basato su interpretazione di metodi e tecniche che permette l'acquisizione, l'elaborazione e l'organizzazione in tempi brevi di grandi quantità di dati metrici georiferiti. In questo capitolo saranno introdotti alcuni metodi quali le reti topografiche, i sistemi di scansione laser e la tecnica fotogrammetrica.

Alla base del rilievo vi è la topografia: l'obiettivo principale è la misura di punti per la georeferenziazione, nonché il controllo dei dati acquisiti nel corso dei rilievi dell'oggetto architettonico. I punti rilevati nel corso del rilievo topografico sono misurati con un'elevata accuratezza e rappresentano la base sulla quale si appoggiano i rilievi effettuati con le altre tecniche. Fra le tecniche del rilevamento la scansione laser LiDAR (*Light Detection and Ranging*) risulta tra le più interessanti "per la completezza delle informazioni prodotte, la precisione conseguibile e i livelli di automazione e di produttività che la caratterizza"⁹. I laserscanner misurano la posizione di un numero elevatissimo di punti nello spazio mediante l'uso della radiazione luminosa ad una frequenza ottica caratteristica. Un'altra tecnica impiegata nel lavoro di tesi è la fotogrammetria, che consente la determinazione delle dimensioni di un oggetto e la sua posizione nello spazio a partire dalle immagini fotografiche.

In questa tesi si approfondiranno le tecniche relative al rilievo speditivo (*rapid mapping* e *low cost*) del patrimonio architettonico:

- laser scanner mobile che acquisisce nuvole di punti nello spazio in movimento con un sistema di mappatura basato su posizionamento SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*);
- fotogrammetria aerea da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

La scelta delle tecniche e degli strumenti è adeguata agli obiettivi del rilievo e alla scala di rappresentazione degli oggetti rilevati. Le accuratezze necessarie alla realizzazione di un modello 3D per un primo importante livello di conoscenza a scala territoriale, che possa costituire una base per analisi successive, possono essere relative alla scala architettonica 1:100/1:200.

⁹ M. A. Gomasca, *Elementi di Geomatica*, Associazione italiana di rilevamento, 2004

1.1 Rilievo topografico per la georeferenziazione ed il controllo della precisione

“Il principio fondamentale che sovrintende il rilevamento del territorio consiste nella definizione della posizione di una serie discreta di punti, determinata con un’elevata precisione, a cui appoggiare le misure che serviranno per definire la geometria degli oggetti del rilievo”¹⁰.

Con il termine georeferenziazione si intende l’assegnazione di coordinate a un punto rilevato nel sistema di riferimento geodetico. Il sistema geodetico di riferimento descrive matematicamente la superficie fisica del globo terrestre attraverso l’ellissoide di rotazione come riferimento per le coordinate planimetriche ed il geoide per le coordinate altimetriche. L’ellissoide di rotazione semplifica la superficie irregolare del geoide permettendo l’applicazione di processi matematici per il posizionamento di ogni suo punto. Il geoide, definito come superficie equipotenziale del campo di gravità, è fisicamente rappresentato dal livello medio dei mari. La proiezione dell’ellissoide su un piano comporta delle deformazioni che possono essere controllate dal datum, che predispone il modello matematico da usare per le proiezioni cartografiche.

Sul territorio è distribuita una rete di vertici secondo una gerarchia decrescente che costituisce l’impianto a cui si legano i punti di dettaglio di un oggetto architettonico rilevati secondo il seguente schema:

- Rete di inquadramento (per la definizione del sistema di riferimento)
- Rete di raffittimento (misurata con GNSS e stazione totale)
- Rilievo di dettaglio (rilievo di punti dell’oggetto con stazione totale)

Per la determinazione della misura di vertici, nel corso della storia della topografia, sono stati affinati e utilizzati metodi operativi caratterizzati dalle misure angolari fino ai recenti metodi di misurazione satellitare. Il metodo della triangolazione, con la misura di angoli e distanze, oltre ad essere un sistema rigido che permette un buon controllo della propagazione dell’errore, consente di ridurre al minimo le misure. Questo metodo è stato sostituito dalla poligonazione, che consiste nella misura in successione di punti compresi tra punti noti, mantenendo le caratteristiche di rigidità e scala gerarchica. La poligonale può essere aperta o chiusa, l’aspetto fondamentale è che vengano misurati sempre tutti i lati, tutti gli angoli e da ogni punto sempre due punti: il precedente ed il successivo.

¹⁰ A. Spanò, Dispense del corso “Metodi 3D Imaging and ranging per la documentazione del patrimonio”, 2019

Effettuando misurazioni sovrabbondanti per la risoluzione geometrica della rete è possibile individuare gli scarti che, applicando il principio dei minimi quadrati, verranno minimizzati. Un ulteriore metodo è l'intersezione, che può essere utilizzata per la misurazione di un punto della rete di inquadramento che non è accessibile misurando gli angoli da due punti noti.

Per la misura dei vertici della rete di inquadramento si fa uso del sistema di posizionamento satellitare, denominato GNSS (Global Navigation Satellite System), un sistema che permette la misurazione delle coordinate di un punto sulla superficie terrestre tramite la trilaterazione distanziometrica tra almeno 4 satelliti in orbita e un ricevitore a terra. La misura della distanza tra satellite e ricevitore avviene misurando il tempo impiegato dal segnale a percorrere lo spazio che li separa.

ΔS (distanza ricevitore-satellite) = t (tempo di propagazione) · c (velocità della luce nel vuoto)

Il sistema di riferimento è il WGS84 (World Global System 1984) ed è geocentrico: l'asse z è parallelo alla direzione del polo terrestre, l'asse x è dato dall'intersezione del piano equatoriale ortogonale all'asse z con il piano del meridiano di Greenwich, l'asse y è ortogonale agli assi x e z .

I ricevitori GNSS si appoggiano su un sistema di satelliti composto dai gruppi: NAVSTAR GPS realizzato e gestito dal dipartimento della difesa degli Stati Uniti, GLONAS gestito dalla Russia, Galileo della Comunità Europea, BeiDou della Repubblica Popolare Cinese. La compatibilità ed operabilità tra i diversi gruppi di satelliti consente una copertura di molti satelliti, più dei 4 richiesti, ed un'accuratezza più elevata.

Le modalità di rilievo sono differenti e corrispondono a diverse prestazioni. Per il rilievo della rete di inquadramento si opera con due ricevitori, uno su un punto di coordinate note e uno che staziona sui punti da rilevare per mezz'ora fino ad un'ora (posizionamento differenziale).

La stazione totale è uno strumento elettronico che integra goniometro e distanziometro ad onde elettromagnetiche per la misura di vertici della poligonale o di punti nel rilievo di dettaglio. L'efficienza dello strumento risiede nell'automatismo della lettura delle direzioni angolari e delle distanze e registrazione su supporto magnetico.

Come lo strumento da cui deriva, il teodolite ottico-meccanico, la stazione totale si compone di un sistema basetta-base fissato su un treppiede, l'alidada e il cannocchiale. Si possono così definire tre assi:

- asse primario, intorno al quale ruota l'alidada,
- asse secondario, perpendicolare ad al primo, intorno al quale ruota il cannocchiale,
- asse terziario o asse di collimazione, solidale con le rotazioni degli altri due assi; può avere rotazioni indipendenti nel piano verticale.

Le letture degli angoli azimutali e zenitali sono effettuate rispettivamente su due cerchi: il cerchio azimutale (o cerchio orizzontale), normale all'asse primario, il cerchio zenitale (o cerchio verticale), normale all'asse secondario.

La condizione operativa è raggiunta con la messa in stazione dello strumento che consiste nella rettifica: l'asse primario dev'essere verticale e passante per il vertice di stazione. Le misure topografiche sono infatti sempre riferite a punti materializzati a terra con una borchia metallica. Le grandezze misurate sono invece riferite al centro dello strumento, l'intersezione tra i tre assi, per cui è indispensabile conoscere l'altezza dello strumento.

Si procede successivamente con la seconda fase del rilievo topografico: la misura dei punti di dettaglio, con il metodo celerimetrico. I punti possono essere punti naturali, appartenenti all'oggetto del rilievo, o materializzati con un target. Lo scopo del rilievo determina la scelta dei punti da collimare:

- punti che definiscono le dimensioni dell'oggetto nella sua forma tridimensionale per la realizzazione di sezioni,
- punti medi che appartengono ai piani dei fronti architettonici, ben distribuiti, per il raddrizzamento analitico di fotografie.

Tutti i punti per essere collimati devono essere ben visibili e riconoscibili. L'operazione di collimazione dev'essere affiancata dalla stesura di eidotipi per il riconoscimento dei punti misurati.

La stazione viene orientata su un punto noto, misurandolo, in questo modo tutte le direzioni misurate saranno riferite.

- Angoli azimutali (rotazione dell'alidada intorno all'asse primario): l'angolo di direzione è calcolato tra le direzioni misurate e la direzione di riferimento per l'individuazione delle coordinate planimetriche.
- Angoli zenitali (rotazione del cannocchiale intorno all'asse secondario): la quota è calcolata con la livellazione trigonometrica di dettaglio (o distanziometrica).
- Misura inclinata: acquisita automaticamente dallo strumento con un distanziometro ad onde elettromagnetiche.

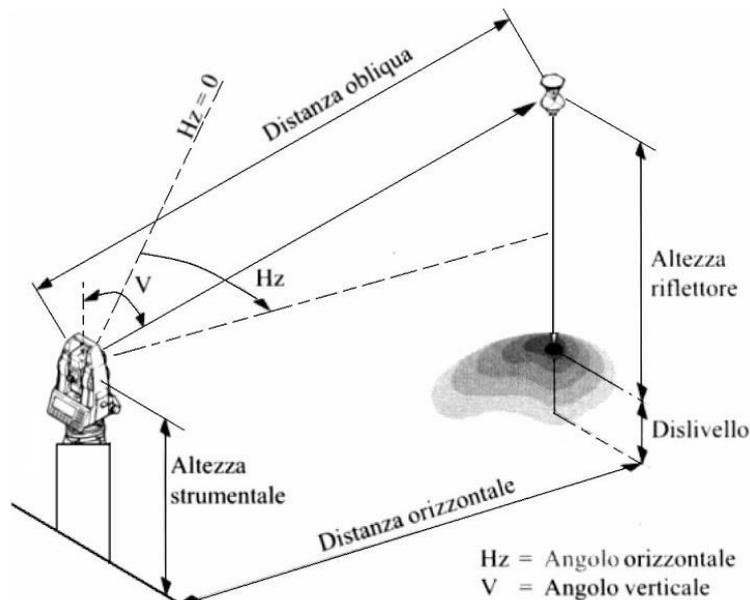


Figura 1.1 Collimazione e misura di un punto nel rilievo di dettaglio con la stazione totale. (A. Spanò, Dispense del corso “Metodi 3D Imaging and ranging per la documentazione del patrimonio”, 2019)

La stazione totale fino a non molti anni fa era largamente impiegata, oltre che per la realizzazione della rete di raffittimento, anche per il rilievo di dettaglio e tutte le applicazioni a scala architettonica. Oggi, con l'introduzione delle nuove tecnologie con un livello più elevato di automatismo che generano nuvole di punti, questo strumento viene efficacemente impiegato ad integrazione di altri, per la misura di punti di appoggio per il controllo della precisione dei rilievi fotogrammetrici e laser scanner.

1.2 Fotogrammetria da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)

“La Fotogrammetria posa i suoi fondamenti sulla volontà di ricostruire in modo rigoroso la corrispondenza geometrica tra immagine e oggetto al momento dell'acquisizione. Questo avviene definendo tra i punti immagine, i centri di presa dei singoli fotogrammi e i punti oggetto delle stelle di raggi di proiezione nello spazio secondo il modello geometrico della prospettiva centrale.”¹¹

La prospettiva centrale è fondamento per la ricostruzione geometrica della relazione tra la posizione di un punto nello spazio e il corrispettivo punto immagine. I parametri dell'orientamento interno sono forniti dal costruttore e

¹¹ M. A. Gomasca, 2004

sono caratteristici della camera, quelli dell'orientamento esterno possono essere determinati da misure di posizione e di assetto, misurati dallo strumento o stimati con l'ausilio di punti di appoggio.

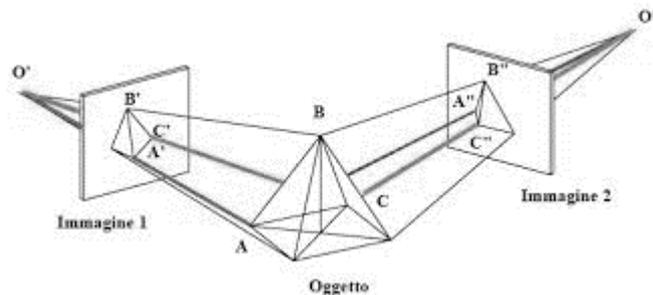


Figura 1.2 Ricostruzione geometrica della relazione tra la posizione di un punto nello spazio e il corrispondente punto immagine. (A. Spanò, 2019)

La fotogrammetria digitale ha automatizzato le fasi di orientamento e restituzione tramite processi di ricostruzione basata su algoritmi di *image matching*. Questi algoritmi permettono il riconoscimento di punti omologhi (*Tie Points*) sulle diverse immagini digitali.

“L’immagine digitale si forma partendo da un segnale elettrico analogico che viene trasformato in pixel da un convertitore analogico-digitale attraverso un processo di campionamento.”¹² Ad ogni pixel viene assegnato un valore RGB¹³ che identifica un colore. Le proprietà delle immagini digitali che ne definiscono la qualità nell’uso fotogrammetrico sono:

- Risoluzione (*dpi*): indica il numero di pixels contenuti in una lunghezza
- Profondità di colore: indica la quantità di colore registrabile con l’immagine, fino a 16 milioni.

Di seguito si tratterà la fase di acquisizione, che precede quella di orientamento delle immagini e ricostruzione del modello tridimensionale dell’oggetto. In base alla tecnica di acquisizione la fotogrammetria tradizionale si divide in:

- terrestre: se le prese di oggetti posizionati sulla superficie terrestre vengono effettuate con camere posizionate a terra.
- aerea: se le prese avvengono dall’alto, con camera a bordo di aeromobili.

¹² M. A. Gomasca, 2004

¹³ RGB, R (red) G (green) B (blue) è un sistema colorimetrico standard introdotto dal CIE (International Commission on Illumination) nel 1931. Da www.cie.co.at

L'introduzione dell'aeromobile a pilotaggio remoto UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ha ampliato le possibilità della fotogrammetria aerea che è divenuta più snella e praticabile attraverso due tipologie di droni:

- droni ad ala fissa: le ali conferiscono minore manovrabilità ma più autonomia e vengono utilizzati per coprire aree estese.
- droni a rotore: più rotori conferiscono un'ottima manovrabilità che consente di operare in spazi ridotti, ma sono caratterizzati da meno autonomia.

“In questo ambito, gli UAV dotati di camere digitali ad alta risoluzione, si rivelano sistemi a basso costo adatti alle esigenze del rilievo multiscala del patrimonio culturale e rappresentano una delle tecniche in ulteriore rapido sviluppo. Lo sviluppo e la continua miniaturizzazione della tecnologia consentono di poter disporre di sistemi sempre più flessibili e di ridotte dimensioni, fino a quelli sotto i 300g che consentono voli non pericolosi e a quote particolarmente basse tanto da non essere sottoposti alle restrizioni della normativa ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) in materia di volo. Un'altra novità particolarmente indagata e sperimentata negli ultimi anni è la possibilità di rendere particolarmente flessibile la geometria di ripresa dei sistemi, acquisendo immagini non più solo nadirali ma con inclinazioni di diversa entità (generalmente comprese tra 30° o 45°) che consentono di sviluppare di gran lunga la possibilità di riprendere e rilevare correttamente anche i fronti degli edifici o in generale lo sviluppo in elevato delle strutture, sicuramente non adeguatamente documentabile dalle sole riprese nadirali.”¹⁴

Gli UAV possono essere pilotati manualmente, controllando altezza e velocità attraverso un radiocomando collegato ad un *device* o possono essere programmati per un volo autonomo tramite sistemi di navigazione GPS e monitorati senza controllo manuale. I parametri che è necessario determinare per le acquisizioni fotogrammetriche sono: la quota di volo, la distanza focale e la risoluzione dell'immagine. Un altro parametro importante nella pianificazione del rilievo è il fattore di scala: il rapporto tra la lunghezza focale dell'obiettivo della camera e la distanza tra il sensore e l'oggetto da rilevare. Maggiore è il fattore di scala, migliore è la qualità fotogrammetrica del rilievo.

¹⁴ F. Chiabrandò, A. Lingua, P. Maschio, F. Rinaudo, A. Spanò, "Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle): un'opportunità per il rilievo 3D multiscala", *SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell'Università degli Studi di Trieste I. La strada*, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017, pp. 101-121

$$l/f = L/H \quad (1.1)$$

Dove l è la dimensione del sensore, f è la distanza focale, L è l'abbracciamento a terra e H è la quota di volo.

E' di fondamentale importanza, al fine di perfezionare l'orientamento delle immagini, il posizionamento di target artificiali sull'oggetto da rilevare, oltre che l'individuazione di punti naturali che andranno documentati attraverso la stesura di eidotipi. La misurazione delle coordinate dei target per via topografica consente il raggiungimento di una precisione maggiore e la georeferenziazione del modello tridimensionale.

Questa tecnica risulta particolarmente efficiente nel rilievo del patrimonio culturale per il costo contenuto rapportato ai risultati ottenibili: documentazione fotografica, la generazione di ortofoto, nuvole di punti e modelli di superficie (*mesh*) texturizzati. Inoltre, la tecnologia UAV trova ottime applicazioni negli ambienti come il patrimonio danneggiato, ad elevato rischio per l'essere umano.¹⁵ Infatti, nel contesto degli scenari post-sismici, gli UAV si possono avvicinare ad edifici collocati in zona rossa con il pilota posto in zona di sicurezza.

1.3 Sistemi a scansione LiDAR (*Light Detection and Ranging*)

I sistemi di rilevamento laser scanner stanno rivoluzionando l'approccio al rilievo metrico. Lo sviluppo tecnologico in questo ambito è molto elevato, così come l'automatismo dei processi, e ha permesso la riduzione dei tempi di acquisizione dei dati e l'abbassamento dei costi. Attraverso la luce laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) questi strumenti sono in grado di misurare un elevatissimo numero di punti, in modo molto rapido, per un rilievo ad alta risoluzione. La tecnica è anche nota come LiDAR: Light Detection and Ranging. La mole di dati acquisiti consiste in un modello digitale sotto forma di nuvola di punti, che viene processato in un secondo momento attraverso la selezione dei dati necessari, invertendo la logica operativa tradizionale che antepone la selezione dei punti da misurare alla fase di misurazione.

I sistemi a scansione laser si possono distinguere in due categorie:

- sistemi distanziometrici
- sistemi triangolatori

¹⁵ A Calantropio, F. Chiabrando, A spanò, *UAV Photogrammetry and thematic maps for enviromental risk assessment in construction safety*, EUG General Assembly 2018, 2018

I sistemi distanziometrici operano in modo simile alla stazione totale, misurando due angoli ed una distanza. Le coordinate polari che definiscono la posizione del punto misurato sono poi convertite in coordinate cartesiane calcolate in un sistema di riferimento solidale allo strumento di acquisizione. La distanza può essere misurata in due modi:

- tempo di volo (Time Of Flight)
- comparazione di fase

Con il metodo del tempo di volo (TOF), attraverso l'utilizzo di specchi rotanti, viene misurato il tempo che intercorre tra l'emissione del raggio laser e la sua ricezione.

$$D = (t \cdot c) / 2$$

D = distanza da misurare

t = tempo di volo

c = velocità della luce

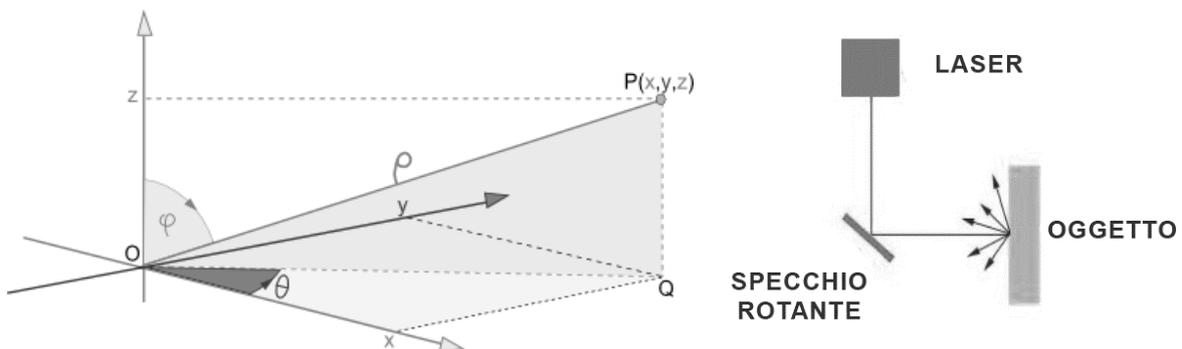


Figura 1.3 Sistema di misura distanziometrici. (A. Spanò, 2019)

Con il metodo della comparazione di fase, conoscendo la lunghezza d'onda, si misura la differenza di fase tra la partenza e il ritorno con un comparatore di fase. L'applicazione della tecnica di acquisizione laser scanner avviene a molte scale, in questo caso i metodi che saranno affrontati sono inerenti al rilievo di dettaglio con sistemi di scansione terrestre fisso e mobile.

La prima fase è quella di pianificazione del rilievo. La progettazione della fase di acquisizione è fondamentale per non ottenere un modello digitale errato, incompleto o non funzionale agli obiettivi del rilievo. Bisogna considerare le caratteristiche dell'oggetto da rilevare, l'ambiente in cui è inserito e lo strumento scelto. Inoltre, è fondamentale la stesura di un eidotipo e la definizione dei target

per la registrazione e georeferenzazione. Il sistema di misura infatti restituisce, oltre alle coordinate di un punto, anche la sua risposta radiometrica legata alla riflettività che permette il riconoscimento dei target. L'operatore ha la possibilità di impostare sullo strumento i parametri principali come l'area da rilevare e la densità di punti. I tempi di acquisizione si allungano con l'aumentare della qualità, in termini di risoluzione e precisione. Dopo l'avvio lo strumento opera in autonomia in modo sistematico secondo passi angolari predefiniti e costanti, indipendentemente dalle caratteristiche morfologiche dell'oggetto rilevato. Questo comporta misurazioni esuberanti in corrispondenza di superfici piane e ortogonali, e rade in corrispondenza di superfici inclinate o discontinue. Per acquisire un rilievo completo sono necessarie più scansioni da posizioni diverse. Una delle tecniche che si possono adottare con il laser scanner fisso è l'organizzazione delle scansioni ad anello. Questo assicura una scansione completa e un sovra-campionamento, l'overlapping per la gestione degli errori legati alla precisione: errore nel calcolo del tempo di volo, errore meccanico angolare, errore di incidenza del raggio, errore di calibrazione.

L'unione delle diverse scansioni viene denominato registrazione ed avviene con un allineamento tramite forma e algoritmo ICP (Iterative Closest Point) e con l'utilizzo dei target se una scansione contiene almeno tre punti noti, rispetto ad una scansione di riferimento o ad un sistema definito per via topografica. La registrazione può essere perfezionata dall'operatore assegnando ad alcuni punti le coordinate misurate con un'elevata precisione per via topografica. Quest'operazione è fondamentale per la georeferenziazione della nuvola di punti, oltre che per il controllo metrico.

1.3.1 *Mobile Mapping System (MMS)*

Una tecnologia nuova, che si sta sviluppando negli ultimi anni, è rappresentata dai sistemi MMS basati sugli algoritmi SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Si tratta di sistemi di mappatura a corto raggio, destinati al rilievo di spazi di edifici interni, in caso di ridotta accessibilità agli spazi e per integrare rilievi effettuati con sistemi consolidati. Questa tecnologia si inserisce bene in un quadro dominato dal rapporto costo-tempo e disponibilità di risorse limitate come quello relativo alla gestione del patrimonio culturale e la necessità di rilievi multi-scala. Si tratta di sistemi LiDAR che si stanno evolvendo verso una crescente portabilità e compattezza.

Gli MMS basati su LiDAR possono essere generalmente definiti come la combinazione di diversi sensori per l'acquisizione della nuvola di punti: un sensore di misura (LiDAR), un'unità di misura inerziale per il monitoraggio della dinamica del movimento e un'unità per il riferimento temporale. In base alla modalità di movimento di acquisizione le piattaforme si dividono in: veicoli (su terra, aria o acqua) o portatili (carrello rimorchio, zaino, a mano). Di recente i sistemi equipaggiati su veicoli sembrano essere una risposta efficace per ricoprire distanze considerevoli nei densi centri abitati di città storiche; e l'integrazione con dati aerei permette l'impiego di questa tecnologia anche sulla scala urbana.

Il posizionamento delle scansioni si basa sugli algoritmi SLAM, che progressivamente associano profili corrispondenti rilevati dal dispositivo in continuo movimento in spazi ricchi di riferimenti geometrici.

Questo tipo di soluzione di mappatura è caratteristica del sistema ZEB di GeoSLAM. Il suo impiego per il rilievo del patrimonio architettonico, anche in danneggiato è stato sperimentato per la prima volta nel 2014¹⁶. Più in generale si può dire che questa tecnologia è efficace nei seguenti contesti:

- Contesti complessi dal punto di vista spaziale
- Complessi paesaggistici articolati da percorrere attraverso diverse configurazioni di percorsi
- Patrimonio strutturato in esterni ed interni, ambienti sotterranei, caratterizzato da sconessioni e superfici strette
- Necessità di prestazioni rapide
- Necessità di ottenere volumetrie essenziali per pianificare la progettazione di elementi specifici

Il sistema ZEB di GeoSLAM si basa essenzialmente su una testa mobile dotata di un profilometro che cattura profili di punti 2D, senza ricevitore GNSS o dati RGB. Il sistema comprende anche un'unità di misura inerziale. Nel dispositivo ZEB, la testa del sensore è montata su una molla che oscilla liberamente e passivamente durante il movimento dell'operatore e del veicolo.

La traiettoria viene stimata dallo strumento e i profili grezzi vengono continuamente catturati in finestre temporali e progressivamente allineati nella ricostruzione 3D secondo la migliore corrispondenza con la caratterizzazione della superficie. E' possibile che si generi un errore di deriva che può essere

¹⁶ R. Zlot, M. Bosse, K. Greenop, Z. Jarzab, E. Juckes, J. Roberts, *Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system*. J Cult Herit, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.009>

corretto chiudendo la traiettoria e tornando al punto di partenza del rilievo. Il risultato è una nuvola di punti associata ad una traiettoria ed un riferimento temporale; inoltre è possibile visualizzare con una scala di colori il tempo e la qualità stimata della registrazione SLAM.

La validazione dei sistemi è sempre essenziale per determinare come utilizzarlo in diversi campi di applicazione e determinare l'efficacia dei sistemi in base ai diversi contesti. Come è noto, la complessità della documentazione e della modellizzazione del patrimonio culturale, oltre ad essere motivata da ragioni fisiche, si riflette negli usi e nell'estrema varietà di confronti interdisciplinari che i prodotti devono soddisfare. Il primo parametro statistico che contribuisce alla valutazione dell'affidabilità complessiva è l'accuratezza. Alcune superfici o nuvole derivate da sistemi di misurazione più precisi possono essere considerate come *ground truth* per valutare la deviazione delle nuvole. È inoltre necessario valutare la precisione delle nuvole, poiché la precisione è legata al concetto di ripetibilità delle misurazioni.¹⁷

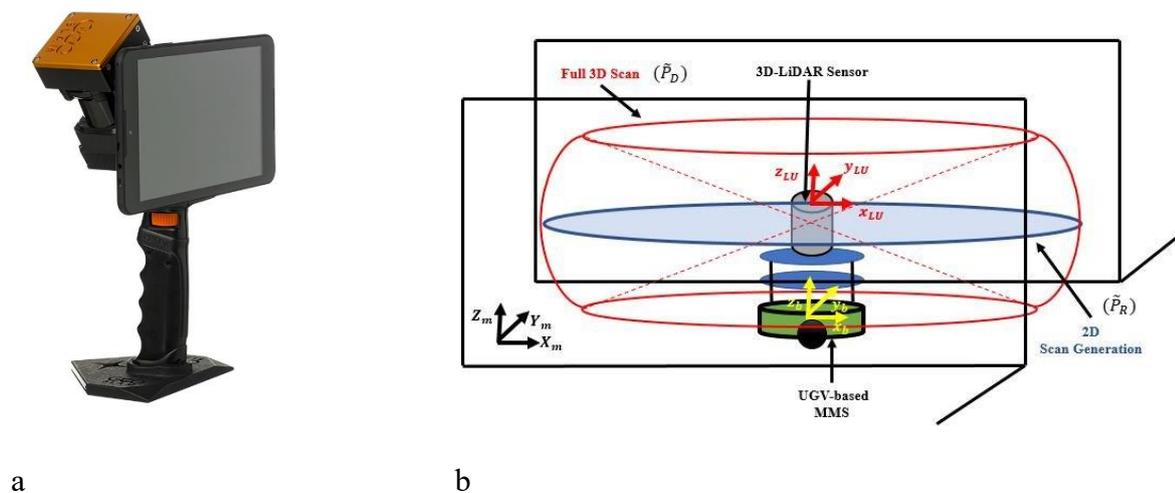


Figura 1.4 Modello ZEB Revo di GeoSLAM (a). Sistema di mappatura mobile LiDAR (MMS) (b). (immagini reperite sul sito www.geoslam.com)

¹⁷ G. Sammartano, A. Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*. Appl Geomat 10, 317–339, 2018, doi:10.1007/s12518-018-0221-7

Capitolo 2

Valutazione della vulnerabilità sismica per la tipologia architettonica “chiese”

2.1 La prevenzione antisismica nella normativa vigente

Le norme in materia di prevenzione antisismica sono oggetto delle NTC 2018, le Norme Tecniche per le Costruzioni in vigore. Tali norme “definiscono i principi per il progetto, l’esecuzione e il collaudo delle costruzioni, le prestazioni richieste in termini di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio e di durabilità, forniscono i criteri generali di sicurezza e trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere”¹⁸. In modo particolare sono definiti dalle NTC 2018: gli stati limite, la vita nominale, la classe d’uso e il periodo di riferimento, nonché la procedura di valutazione dell’azione sismica.

Un riferimento più centrato sul tema è costituito dalle linee guida in materia di prevenzione antisismica del patrimonio culturale nazionale: la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 è una indicazione sulla condotta da seguire in materia di “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”. La Direttiva specifica un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi; la finalità è quella di formulare il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione delle sole costruzioni in muratura storica. I metodi a cui fa riferimento il documento non sono vincolanti, essendo soggetti ad una continua evoluzione non sono ancora armonizzati con i recenti aggiornamenti delle NTC del 2018, tuttavia rappresentano le linee di indirizzo e i modelli più aggiornati.

Nel corso del capitolo questi testi saranno i riferimenti utilizzati per lo sviluppo del metodo di valutazione della sicurezza sismica.

2.1.1 Modello semplificato per la stima dell’indice di sicurezza

Le strutture storiche in muratura sono state realizzate secondo la regola dell’arte. Tale regola è frutto di sperimentazioni e accorgimenti affinati nel corso dei secoli. Questo metodo, pur non prevedendo l’utilizzo di modelli matematici moderni, ma semplici regole costruttive, è funzionale e praticabile per quanto riguarda una

¹⁸ D.M. 14 gennaio 2018, *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*, cap. 1, “Oggetto”, p. 1

valutazione sulla qualità della struttura. Le notevoli incertezze legate alle proprietà dei materiali e alle condizioni di vincolo, infatti, comportano una difficoltà nell'applicare un modello matematico legata alle innumerevoli variabili. La regola dell'arte è mutata notevolmente nel corso del tempo e presenta caratteristiche peculiari anche al variare dell'area geografica in cui si è costruito il manufatto. Questo è legato, ad esempio, ai materiali differenti presenti in aree diverse e anche in considerazione della pericolosità sismica, adottando accorgimenti specifici. Nonostante la varietà di soluzioni architettoniche è possibile riconoscere caratteri ricorrenti e definire delle tipologie: palazzi, ville e strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi; chiese, luoghi di culto ed altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi; torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale; ponti in muratura, archi trionfali ed altre strutture ad arco.

Le chiese risultano composte da porzioni architettoniche che presentano un comportamento autonomo nei confronti della struttura nel suo complesso. L'analisi preventiva può essere condotta quindi sui singoli macroelementi individuati. Essa consiste nell'analisi della qualità degli elementi, delle connessioni, dei presidi antisismici e degli indicatori di vulnerabilità.

Per la valutazione della sicurezza sismica la normativa individua tre livelli di analisi di completezza crescente: LV1, preliminare, con efficacia a livello territoriale; LV2, in presenza di interventi locali su zone limitate del manufatto; LV3, per interventi che incidono sulla struttura in modo complessivo o quando comunque sia richiesta una valutazione molto accurata.

La direttiva indica la possibilità di ricorrere ad un modello semplificato per la stima dell'indice di sicurezza sismica per la valutazione LV1.

“Ferma restando la possibilità di definire modelli semplificati specifici, validi per il caso in esame o per gruppi di manufatti, un'alternativa per la valutazione LV1 è fare ricorso ai parametri della scheda di rilievo del danno e della vulnerabilità, che costituisce un'esperienza precedente alla stesura di questa Direttiva e già consolidata; l'accelerazione massima al suolo corrispondente ai diversi stati limite può essere correlata ad un indicatore numerico, l'indice di vulnerabilità i_v , ottenuto attraverso una opportuna combinazione di punteggi assegnati ai diversi elementi di vulnerabilità e di presidio antisismico.

La scheda per il rilievo del danno e della vulnerabilità delle chiese è stata utilizzata nelle emergenze sismiche a partire dal 1995; la notevole mole di dati raccolti (oltre 4000 chiese) ha consentito, attraverso elaborazioni statistiche, di stabilire una relazione tra l'azione sismica ed il danno, in funzione di un parametro di vulnerabilità della chiesa. E' evidente che una stima così eseguita assume una valenza puramente statistica, ma questo approccio può essere considerato corretto

se rivolto ad un'analisi territoriale, al fine di stabilire liste di priorità e programmare al meglio valutazioni più approfondite ed indirizzare verso interventi di prevenzione. Peraltro, l'uso di un modello unitario, per valutazioni di questa natura, consente un più oggettivo confronto relativo in termini di rischio sismico.

La metodologia considera 28 meccanismi di danno, associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti in una chiesa. Con riferimento alla valutazione della vulnerabilità, è necessario rilevare quei particolari tipologici e costruttivi che giocano un ruolo fondamentale nella risposta sismica del manufatto; in particolare vengono considerati indicatori di vulnerabilità e di presidio antisismico. In allegato sono elencati i 28 meccanismi, unitamente ad una lista di presidi e di indicatori di vulnerabilità, cui è possibile aggiungerne altri, in relazione agli aspetti caratteristici della chiesa o del costruito nell'area geografica in esame.¹⁹

Questo metodo consente un'analisi del comportamento sismico dell'intero edificio che esprime una valutazione attraverso un indice di vulnerabilità i_v , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa, a cui è stato attribuito un punteggio in relazione a indicatori di vulnerabilità v_{ki} e presidi antisismici v_{kp} .

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (2.1)$$

Tabella 2.1 Indicazioni per la valutazione del punteggio di vulnerabilità per ogni meccanismo di danno

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	v_k
Almeno 1	3	3
Almeno 2	2	
1	2	2
Almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

L'analisi statistica dei danni subiti dalle chiese correlati a diverse intensità sismiche e vulnerabilità rilevate ha permesso di individuare una correlazione tra queste variabili. L'obiettivo è quello di ricavare i valori dell'accelerazione al

¹⁹ Dir. PCM 9 febbraio 2011, cap. 5.4, "Modelli di valutazione per tipologie", pp. 38-39

suolo corrispondenti allo stato limite di danno (SLD) ed allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

$$a_{\text{SLD}S} = 0.025 \cdot 1.8^{2.75-3.44i_v} \quad (2.2)$$

$$a_{\text{SLV}S} = 0.025 \cdot 1.8^{5.1-3.44i_v} \quad (2.3)$$

Ai manufatti architettonici tutelati è richiesto un livello di sicurezza riferito a tre stati limite: due definiti dalle NTC e uno specifico per i beni culturali. Gli stati limite sono la condizione oltre la quale si verifica un determinato fenomeno che determina significativi danni strutturali nel caso dello Stato Limite Ultimo (SLU) e danni che, però, non ne compromettono la stabilità nel caso dello Stato Limite di Danno (SLD). Lo Stato Limite di danno ai beni Artistici (SLA) è relativo alla tutela dei beni artistici contenuti nel manufatto. La verifica dello SLV consente di garantire l'incolumità delle persone e la conservazione del manufatto, che subisce danni non gravi in seguito ad un terremoto. La verifica dello SLD comporta lievi danni che non interrompono la fruibilità del manufatto; tali danni sono ritenuti imprescindibili per una costruzione storica in muratura nei riguardi di un'azione sismica frequente.

Il livello di sicurezza sismica varia in funzione del tipo di costruzioni e dal loro uso ed è relativo ad un periodo di riferimento. Il periodo di riferimento è ottenuto moltiplicando la vita nominale di un tipo di costruzione per la classe d'uso.

$$V_R = V_N C_U \quad (2.4)$$

La vita nominale di un'opera è il periodo di tempo che una struttura deve mantenersi in funzione e per questo periodo essa viene progettata. Per quanto riguarda i beni culturali, essendo edifici esistenti, la progettazione è relativa ad un miglioramento della sicurezza sismica. L'intervento garantisce una conservazione per un periodo di tempo ridotto, "anche inferiore a 50 anni"²⁰, infatti una verifica nei confronti di un periodo temporale molto elevato, come dovrebbe auspicarsi, sarebbe troppo gravosa.

²⁰ Dir. PCM 9 febbraio 2011, cap. 2.4, "Livelli di sicurezza sismica", p. 12

Tabella 2.2 Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie, opere provvisionali, strutture in fase costruttiva	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

La classe d'uso è un coefficiente di sicurezza relativo alla gravità dei danni che causerebbe un evento sismico. Una chiesa, essendo un edificio destinato al culto e ad accogliere in molte occasioni un numero significativo di persone, rientra nella Classe III: "costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi."

Le valutazioni sulla sicurezza sismica sono relative ad un periodo di ritorno T_R che varia in relazione periodo di riferimento V_R e allo stato limite considerato, a cui è associata una probabilità di superamento P_{VR} . Tale probabilità di eccedenza è di 10% per SLV e di 63% per SLD.

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} \quad (2.5)$$

Le NTC forniscono i parametri dell'azione sismica in funzione delle coordinate geografiche di un punto. Questi valori possono essere confrontati con quelli per i quali si raggiunge il corrispondente stato limite e quantificare un indice di sicurezza sismica. Tale indice è dato dal rapporto tra il periodo di ritorno T_{SLV} dell'azione sismica che porta allo stato limite ed il periodo di ritorno T_R .

$$T_{SLV} = T_{R1} \cdot 10^{\log(T_{R2}/T_{R1}) \cdot \log(a_{SLV}^{S/F} \cdot a_1 S_1) \cdot \log(a_2 S_2 / a_1 S_1)} \quad (2.6)$$

T_{R1} e T_{R2} sono i periodi di ritorno per i quali è fornita la pericolosità sismica, $a_1 S_1$ e $a_2 S_2$ sono i corrispondenti valori dell'accelerazione di picco su suolo rigido e del coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, F_C tiene conto dell'attendibilità delle informazioni che concorrono alla stima della vulnerabilità del manufatto.

$$I_S = \frac{T_{SLV}}{T_R} \quad (2.7)$$

Tale valore può essere maggiore o minore di uno. Nel caso sia maggiore significa che il manufatto è in condizioni di sicurezza. L'indice di sicurezza viene utilizzato per stilare una graduatoria dei beni a rischio. Per una comparazione è quindi però necessario definire un unico valore di vita nominale V_N , ad esempio 50 anni, o associare a beni culturalmente più rilevanti una vita nominale differente ma specificando i valori assunti nell'analisi.

Il fattore di confidenza F_c è un valore che viene assunto per graduare l'attendibilità del modello di analisi in relazione all'approfondimento del rilievo geometrico e delle indagini sui materico-costruttiva, meccanica, sul terreno e le fondazioni.

Tabella 2.3 Definizione dei livelli di approfondimento delle indagini sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza.

Rilievo geometrico	Rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0.05$
	Rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C1} = 0.12$
	Restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondante su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C1} = 0.06$
	Restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondante su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie tematiche, eventuali indagini diagnostiche)	$F_{C1} = 0$
Proprietà meccaniche dei materiali	Parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C1} = 0.12$
	Limitate indagini su parametri meccanici dei materiali	$F_{C1} = 0.06$
	Estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C1} = 0$

Terreno e fondazioni	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità di informazioni sulle fondazioni	$F_{C1} = 0.06$
	Disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C1} = 0.03$
	Estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C1} = 0$

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck} \quad (2.8)$$

I metodi semplificati possono anche fornire come risultato la vita nominale V_N per la quale il manufatto può essere utilizzato con un livello di sicurezza I_S uguale a 1. Nel caso di progettazione di un intervento di miglioramento sismico, la direttiva indica come opportuno riferirsi direttamente alla vita nominale, per una valutazione che si confronti con un riferimento temporale. Poiché “per un bene culturale non è prescritto il raggiungimento di un prefissato livello di sicurezza”²¹ l’indicazione di un riferimento temporale può essere utile anche per la valutazione a livello territoriale in funzione di un programma che dev’essere fondato sulle priorità di intervento.

$$V_N = - \frac{T_{SL}}{C_U} \ln(1 - P_{VR}) \quad (2.9)$$

2.2 Macroelementi e meccanismi di danno

La costruzione muraria storica è realizzata mediante l’assemblaggio di elementi strutturali semplici vincolati tra loro. Un muro, ad esempio, si può considerare elemento quando rispetta la regola dell’arte: si considera buono un muro in cui gli elementi che lo compongono sono sfalsati, disposti con buoni allineamenti orizzontali e pezzi di maggiori dimensioni sono collocati trasversalmente. Queste caratteristiche permettono ad un muro di comportarsi come un corpo rigido, come un elemento singolo, assumendo un cinematismo in qualche modo controllabile. Il concetto di assemblaggio vale a diverse scale: dalla scala del singolo elemento strutturale, alla scala dell’edificio e alla scala urbana.

“Una suddivisione in elementi fortemente discretizzati rispetto all’intero manufatto, rischia di non rendere osservabile in modo efficace la specifica funzionalità e il comportamento della parte rispetto all’organismo architettonico nel suo insieme. Per queste considerazioni e difficoltà si è orientati ad assumere

²¹ Dir. PCM 9 febbraio 2011, cap. 2.4, “Livelli di sicurezza sismica”, p. 14

come unità di riferimento, per lo studio e la comparazione del danno, una parte costitutiva convenzionalmente definita macroelemento.”²² Si definisce macroelemento una parte architettonica formata da più elementi verticali e orizzontali connessi tra loro che costituiscono una parte che si comporta in modo unitario quando sollecitata da un sisma. La suddivisione in parti è comunque di carattere convenzionale, esistono, infatti, delle zone di sovrapposizione poiché la divisione non è netta, ma costituita da un’area in cui i fenomeni che si verificano vengono descritti più volte, in ciascuno dei macroelementi interessati. Il vantaggio della suddivisione in macroelementi è la possibilità di comparare tipologie differenti di chiese analizzando la composizione di macroelementi che le formano. I macroelementi in cui si suddivide una chiesa sono:

- Facciata
- Pareti laterali
- Colonnato
- Volte
- Archi trionfali
- Cupola
- Abside
- Copertura
- Torre campanaria

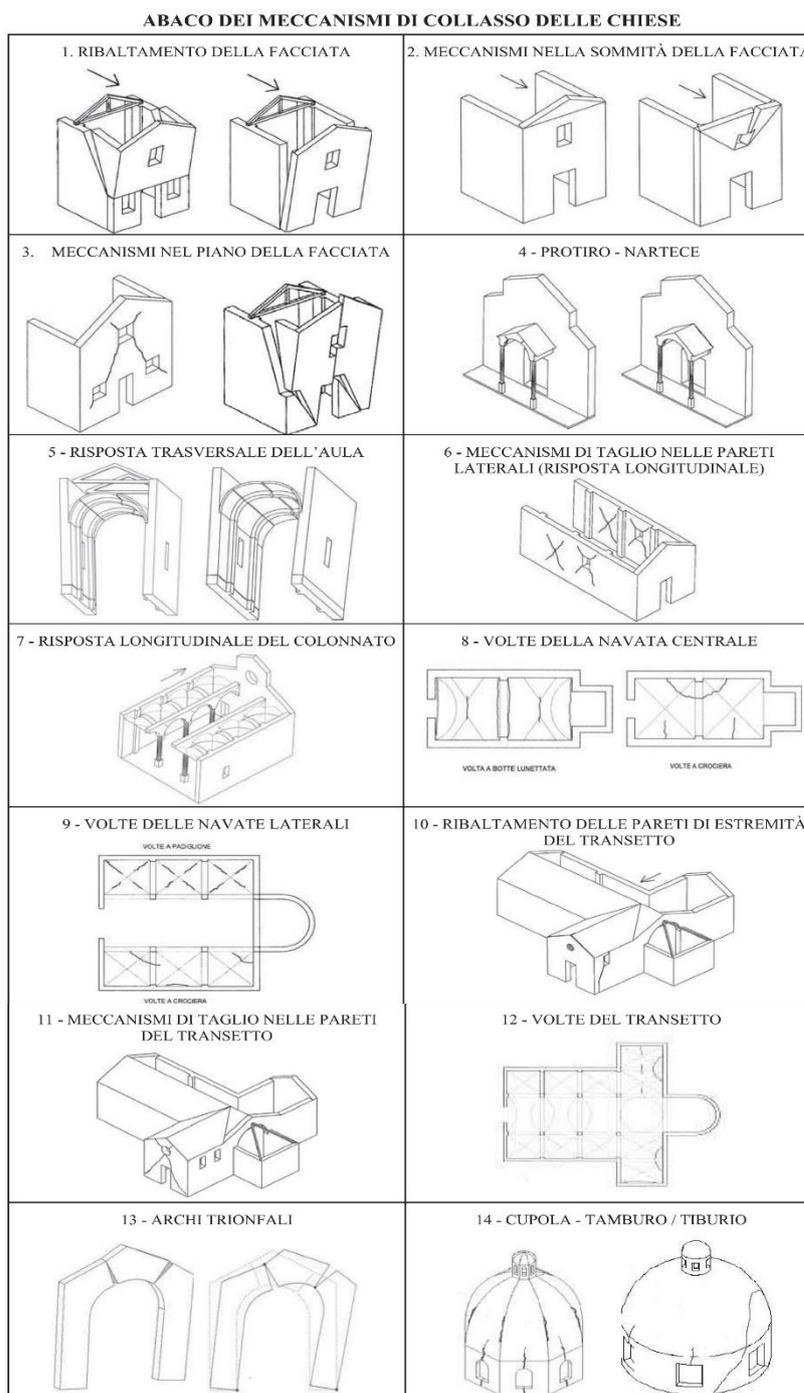
Lo studio dei fenomeni che modificano le condizioni iniziali del manufatto presuppone la definizione del termine “meccanismo” che risulta molto puntuale, sintetica e accurata nel libro “Le chiese e il terremoto”, riferimento importante per questo capitolo. “Il meccanismo rappresenta la ricostruzione schematica del cinematisma costituito dal procedere delle discretizzazioni di parti del macroelemento e degli spostamenti relativi; può interessare un macroelemento nel suo insieme o una parte di esso.”²³ L’azione sismica sottopone le costruzioni in muratura a forze che possono agire nel piano o fuori dal piano. I meccanismi di danno si differenziano in meccanismi di primo modo, quando sono legati alle forze agenti fuori dal piano, e meccanismi di secondo modo, che invece agiscono nel piano della parete. I primi investono la parete ortogonalmente, provocando un collasso per ribaltamento. I secondi, colpendo la parete in direzione parallela, innescano rotture a taglio. Gli indicatori di vulnerabilità sono le caratteristiche che

²² A. De Colle, F. Doglioni, “L’osservazione per macroelementi”, in F. Doglioni, A. Moretti, V. Petrini (a cura di), *Le chiese e il terremoto*, Trieste, Lint, 1994, p. 71

²³ A. De Colle, F. Doglioni, 1994, p. 74

favoriscono l'innescarsi del meccanismo di danno. Tali meccanismi possono essere controllati attraverso il comportamento scatolare della costruzione muraria. Questo comportamento è favorito dai presidi antisismici.

Di seguito sono elencati nell'immagine i meccanismi di danno individuati dalla Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011. Per ogni macroelemento sono stati individuati i meccanismi di danno caratteristici e i relativi indicatori di vulnerabilità e presidi antisismici.



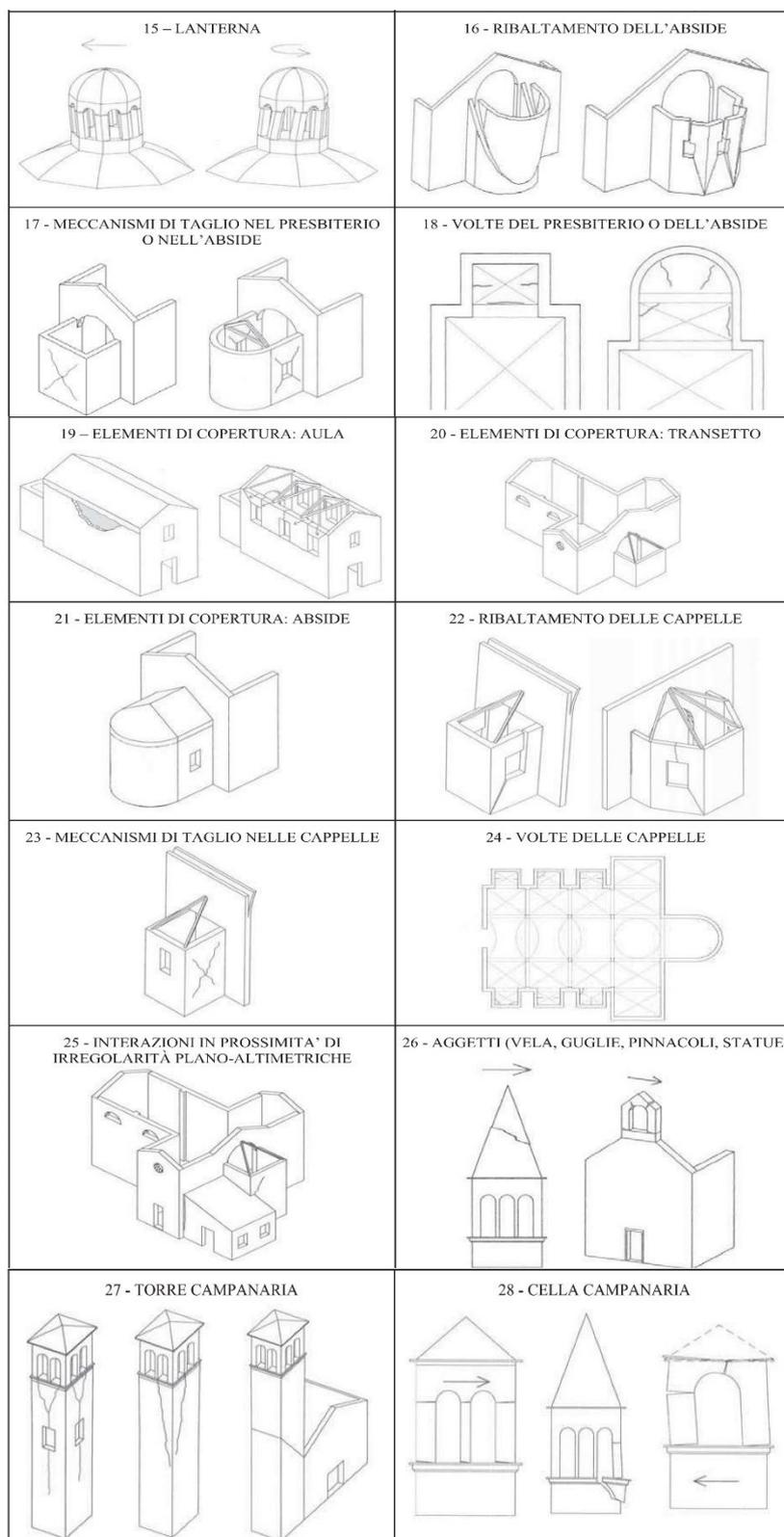


Figura 2.1 Abaco dei meccanismi di danno delle chiese. (immagine reperita dalla Dir. PCM 9 febbraio 2011)

2.3 Le potenzialità della Geomatica nella fase di valutazione

La Geomatica, impegnata nel rilievo del manufatto, esprime il suo potenziale anche nella valutazione del rischio sismico, permette infatti di costruire una base solida ed omogenea su tutti i casi in modo speditivo.

Un modello 3D ad alta precisione della chiesa 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.²⁴
- La definizione di volumetrie per analisi rivolte all'individuazione degli elementi che compongono il sistema architettonico e delle condizioni di equilibrio.

Il rilievo con le moderne tecniche basate sulla nuvola di punti permette lo studio di alcune caratteristiche del manufatto che potrebbero rivelarsi criticità che rimangono celate durante un rilievo tradizionale. E' possibile osservare le principali alterazioni geometriche relative a comportamenti strutturali che innescano dei meccanismi di danno:

- perdita di collegamento della muratura e fessurazioni
- fuori piombo e spanciamiento delle pareti
- disallineamento delle pareti su differenti piani

Inoltre, l'adozione di un metodo valido per tutti i casi permette una comparazione efficace. L'adozione di valori differenti di fattori di confidenza nei diversi manufatti, infatti, potrebbe alterare la graduatoria di rischio. Un rilievo dello stato attuale consente inoltre di apprezzare deformazioni e trasformazioni recenti, non riscontrabili nei rilievi più recenti a disposizione.

²⁴ F. Chiabrando, A. Di Lolli, G. Patrucco, A. Spanò, G. Sammartano, L. Teppati Losè, 2017

Capitolo 3

Sant'Andrea a Campi

La scelta del caso studio è stata guidata dall'opportunità di poter elaborare dei dati già acquisiti dal team DIRECT (*Disaster Recovery Team*). Questo gruppo è composto da studenti e tutors che fanno parte delle aree di architettura e quelle di ingegneria del Politecnico di Torino e ha come obiettivo la realizzazione e il mantenimento di una formazione studentesca continua nel campo delle tecnologie avanzate del rilievo metrico 3D e del telerilevamento con tecniche innovative.²⁵ Sant'Andrea a Campi, nel comune di Norcia, è un manufatto architettonico dalla composizione interessante, composto da un'aula a due navate, una torre campanaria retrostante e un portico in facciata. Oggi si presenta parzialmente crollato in seguito alle scosse sismiche che hanno interessato questa zona nel 2016 culminate con la scossa del 30 Ottobre di magnitudo 6,5. Per tale ragione le analisi che seguiranno nei capitoli della tesi, alcune di esse sullo stato di fatto precedente al sisma, sono da considerarsi esercizi sviluppati all'interno di un metodo che non si riferisce a manufatti che si presentano in una condizione provvisoria legata ad un recente sisma e relativi danni. La direttiva delinea, infatti, le linee guida per la valutazione della sicurezza sismica per la progettazione di interventi preventivi, al fine di ridurre il rischio sismico.

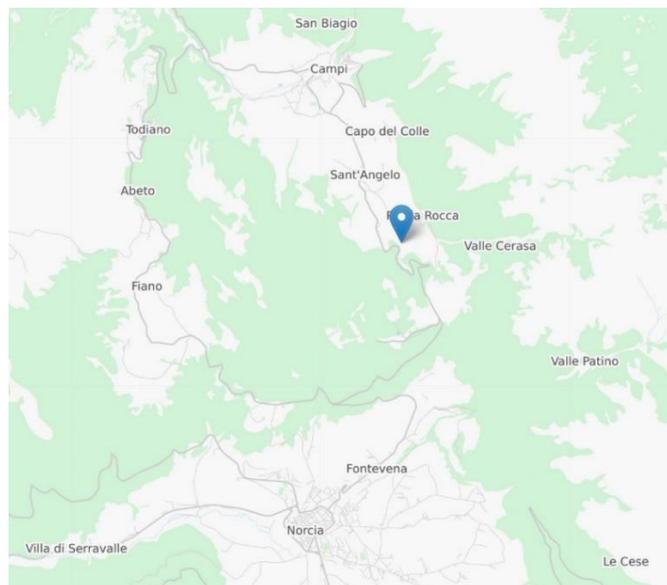


Figura 3.1 Localizzazione dell'epicentro del sisma del 30 Ottobre 2016 di magnitudo 6.5, a circa 2 Km da Campi. (INGV, cnt.rm.ingv.it/en/event/8863681)

²⁵ Team Direct, areweb.polito.it/direct

3.1 Inquadramento territoriale e storico

Campi di Norcia è un centro abitato di origine medioevale ubicato nella valle del Campino. L'insediamento è suddiviso in due nuclei: Campi Vecchio, arroccato su un pendio, e la sua zona di espansione, lungo la via che collega il centro storico alla strada che conduce a Norcia. Il centro storico si struttura secondo diverse fasce edificate parallele, disposte lungo le curve di livello. Il tessuto è omogeneo e le case sono quasi nella totalità a corpo semplice servito da due strade, una a valle e l'altra a monte; il piano più basso degli edifici in molti casi è scavato nella roccia.

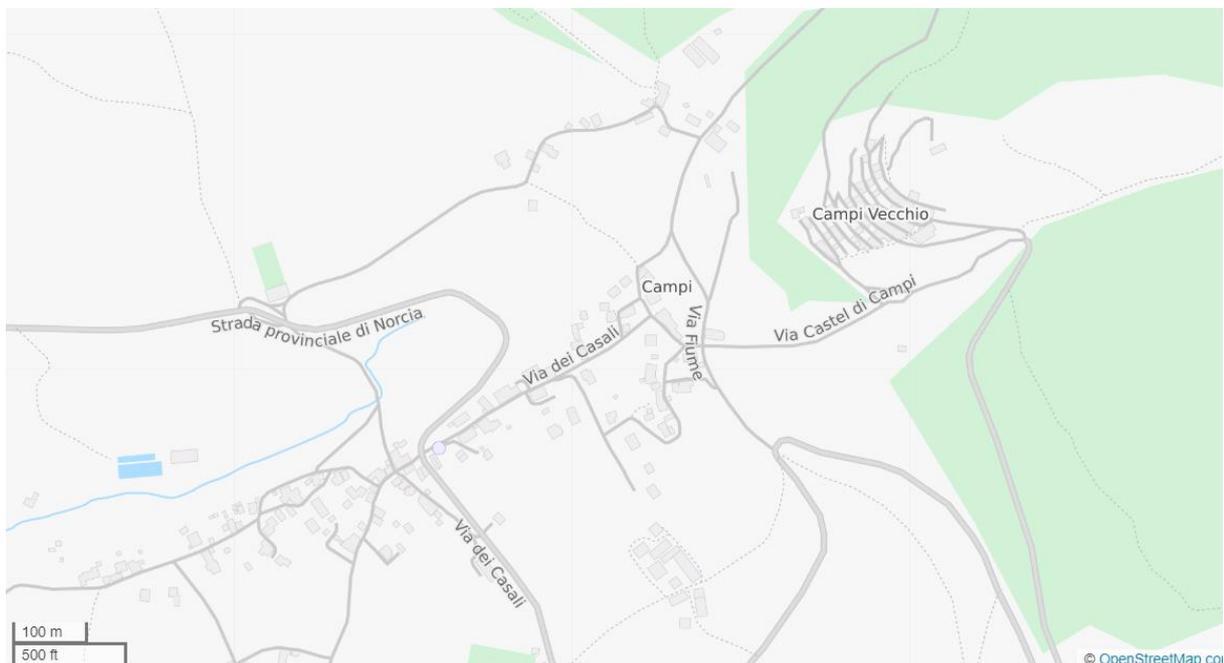


Figura 3.2 I due nuclei di Campi: Campi Vecchio e la zona di espansione lungo Via dei Casali che collega Campi Vecchio alla Strada Provinciale di Norcia. (OpenStreetMap.org)

La conformazione urbanistica è tipica dei Castelli di pendio, con un vertice ed una base, circondato da mura. Le porte di accesso al paese sono due, disposte lateralmente: quella a nord-ovest è distrutta mentre quella rivolta verso sud-est forma un unico complesso con la chiesa di Sant'Andrea. Le porte di accesso servivano una strada che taglia il pendio in direzione Castelsantangelo sul Nera.

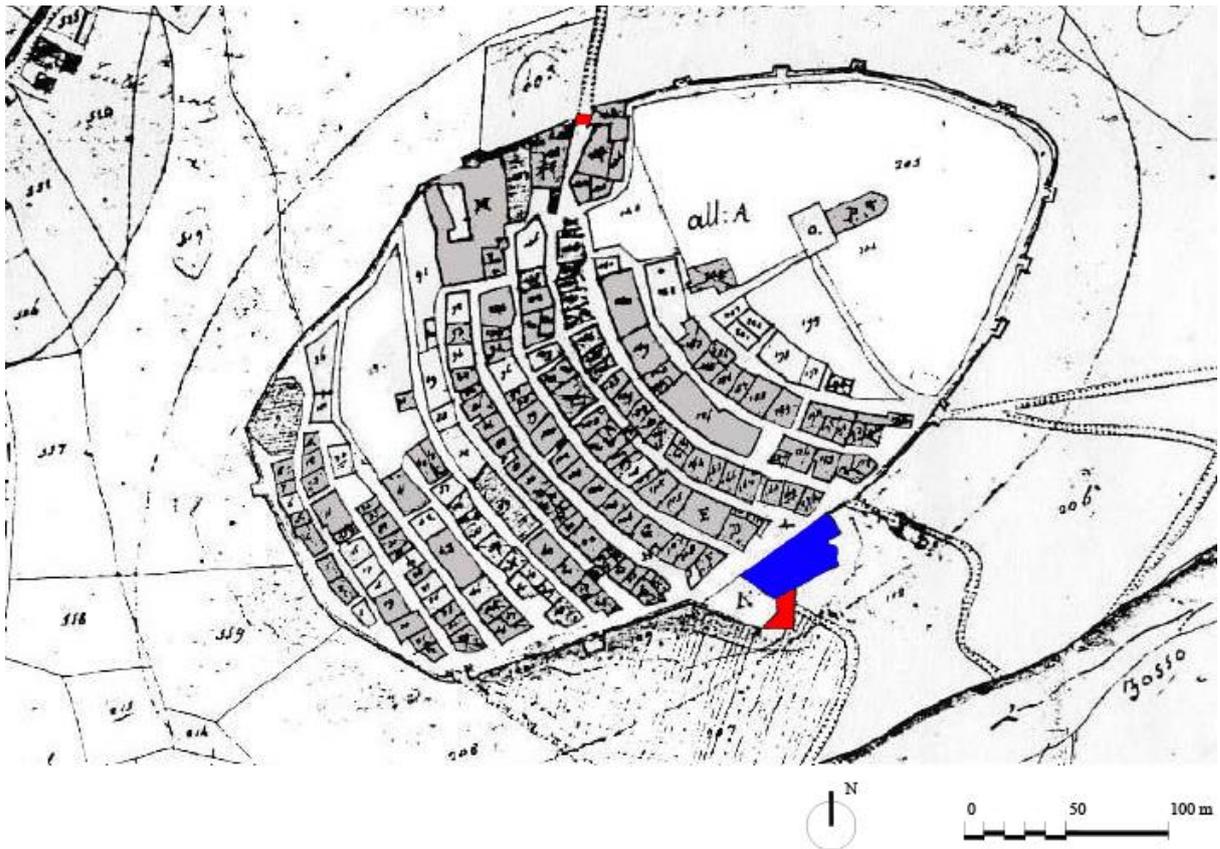


Figura 3.3 Mappa del Catasto Gregoriano 1820-35, Archivio di Stato di Perugia. Nell'immagine sono state evidenziate in rosso le porte cittadine ed in blu la chiesa di Sant'Andrea.

La tecnica costruttiva è con muri in pietra, solai e coperture con travi in legno. Le murature sono costruite con delle bozze poco lavorate, mentre i cantonali degli edifici più importanti ed i portali sono realizzati con dei conci squadri.

La soluzione interna degli edifici, con un primo piano scavato nel pendio coperto da una volta a botte è abbastanza tipica dei centri urbani situati su pendio. In Campi però “si osserva un particolare alquanto insolito nella tecnica costruttiva: in molti edifici del paese le volte a botte dei piani terra risultano staccate dalla facciata a valle, quasi fossero un elemento indipendente; esse si appoggiano su un fondo di roccia viva e a livello della facciata terminano lasciando un'intercapedine che può essere di pochi centimetri fino a raggiungere il metro. L'ipotesi è che Campi ha subito nel corso della storia diversi eventi sismici e le volte ai piani terra potrebbero conservare l'origine medioevale, mentre le facciate potrebbero essere state ricostruite ex-novo.”²⁶

²⁶ G. Cardini, relatori: L. Binda, S. Della Torre, A. Saisi, Tesi di dottorato di ricerca: “La vulnerabilità sismica dei centri storici: il caso di Campi Alto di Norcia. Linee guida per la

3.2 Il manufatto architettonico

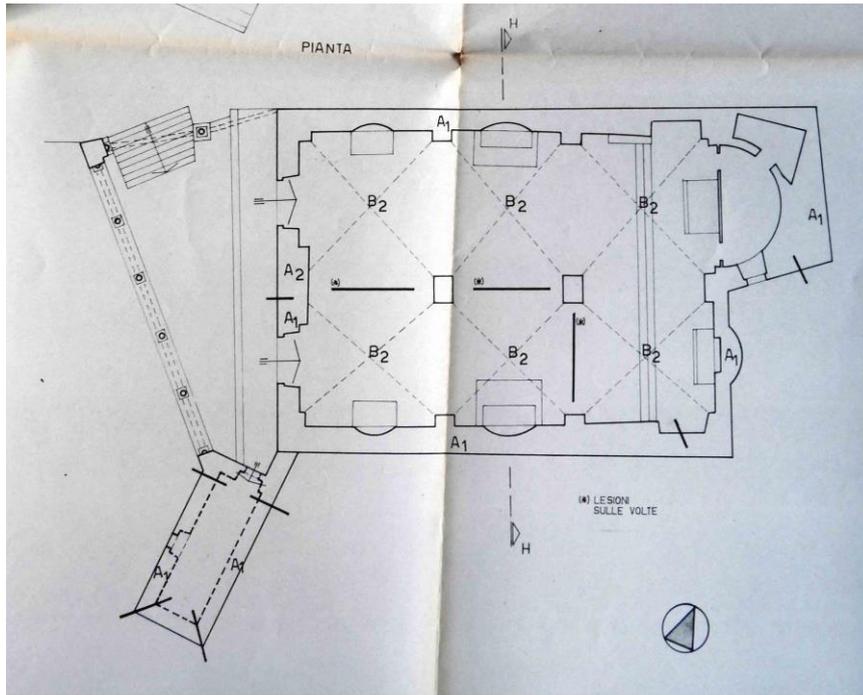
La chiesa si trova nella frazione di Campi, nel comune di Norcia ed è collocata su un pendio. L'edificio, di origini trecentesche, ha subito molte trasformazioni nel corso dei secoli. Originariamente era composto dalla torre campanaria e dall'aula, costituita da una sola navata voltata. Successivamente, nel corso del XIV secolo, in una seconda fase fu raddoppiata l'aula ed in una terza fase fu aggiunta una porta cittadina adiacente. Il portico è risalente al XVI secolo.²⁷



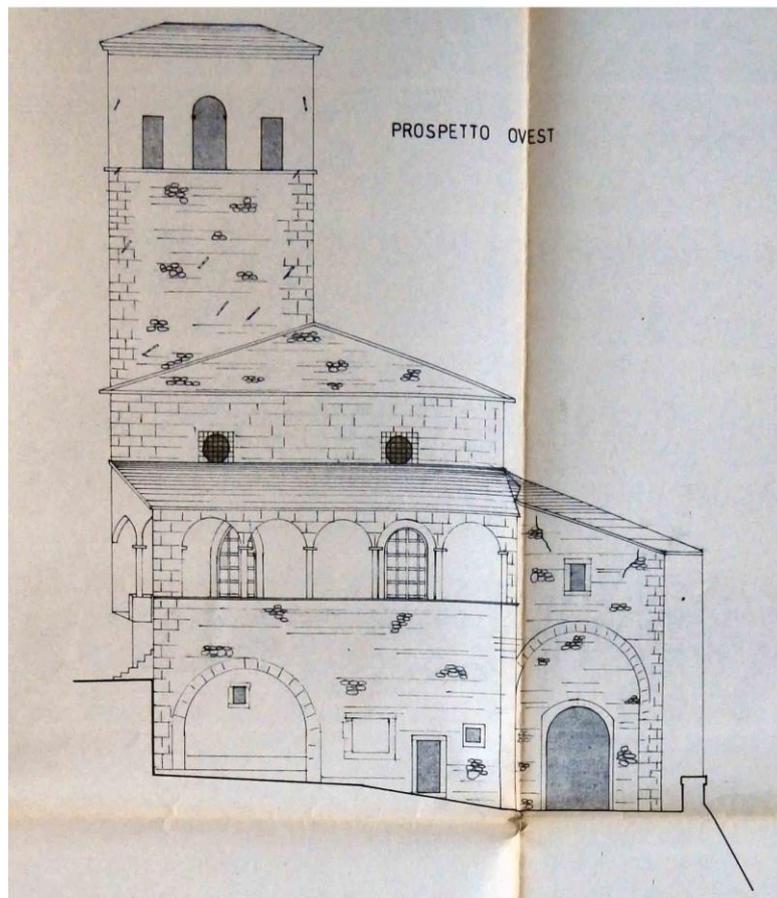
Figura 3.4 Frazione di Campi, Norcia. Nell'immagine la chiesa di Sant'Andrea, con la sua torre campanaria ed il portico. Adiacente vi era una porta cittadina che costituiva l'ingresso al nucleo abitativo. (immagine reperita dal sito www.giobbe.org/NORCIA-CULTURA).

Nel 1979 un sisma di intensità IX della scala Mercalli, con epicentro a Norcia, danneggiò la chiesa. Per tale ragione, l'edificio fu oggetto di un progetto di restauro nel 1982. I disegni del rilievo, disponibili all'Archivio Storico della Diocesi di Spoleto sono di aiuto nel delineare la condizione del manufatto prima dei danni subiti dal sisma.

²⁷ P. Pirri, *L'Abbazia di Sant'Eutizio in Val Castoriana presso Norcia e le chiese dipendenti*, Roma, Herder, 1960, p. 226.



0 5 10 m



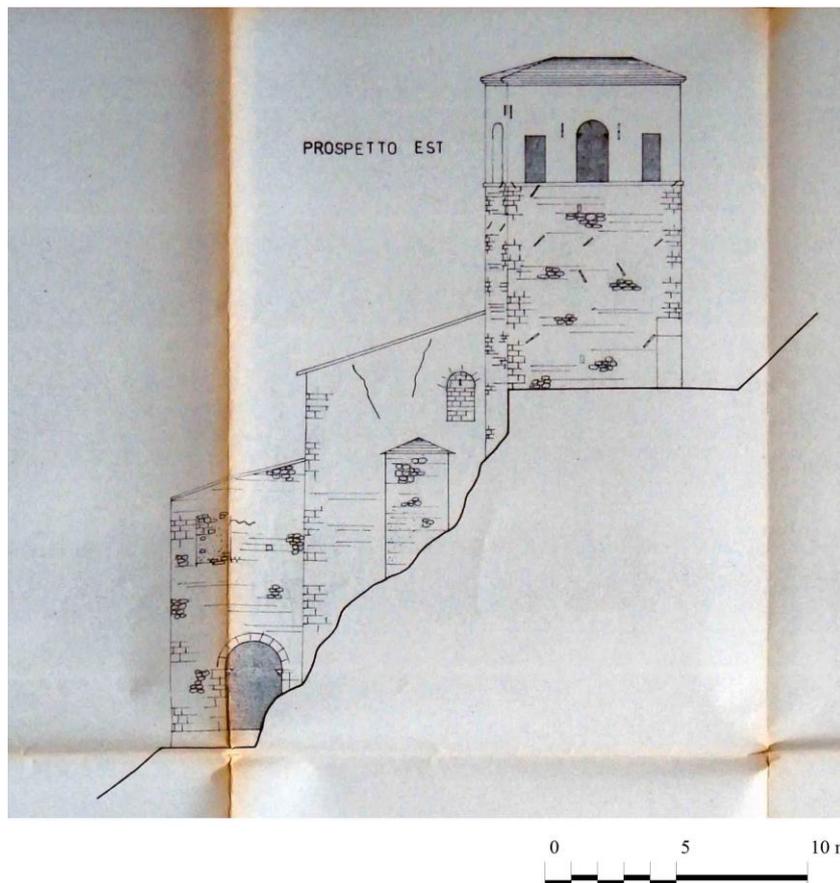
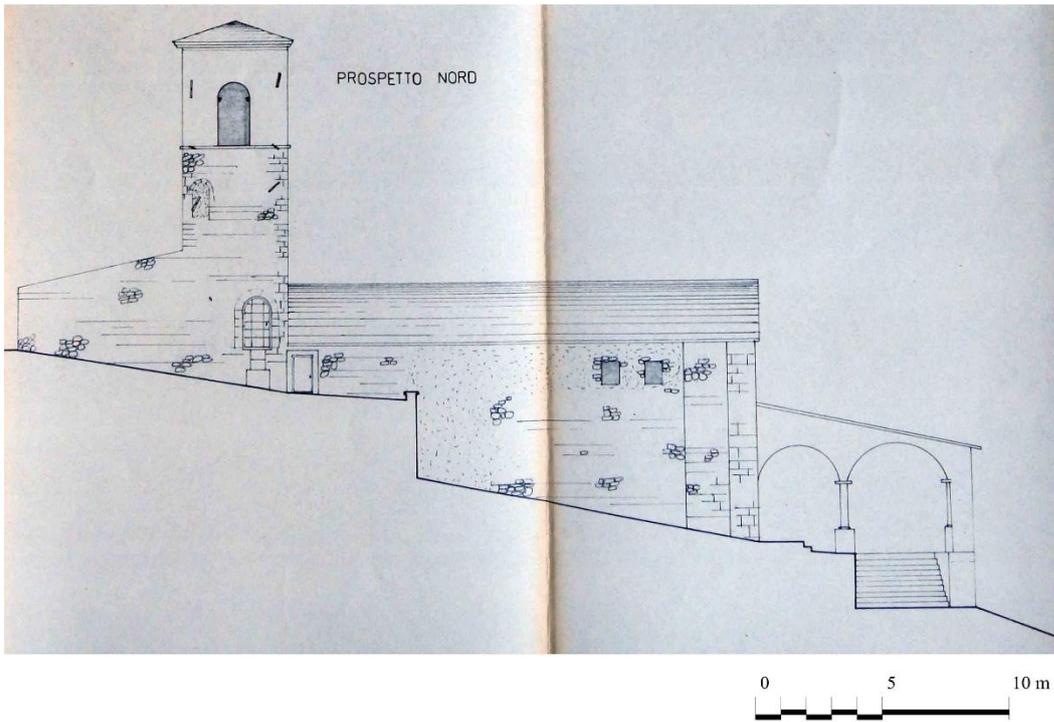


Figura 3.5 Rilievo dello Studio tecnico associato R. V. per il progetto “Ripristino dell’edificio di culto Chiesa di Sant’Andrea in Campi, Archivio Storico della Diocesi di Spoleto, 1982

La chiesa è composta da un'aula divisa in due navate voltate, una torre campanaria collocata sopra l'abside e un portico anteriore. Due pilastri disposti lungo l'asse centrale dell'aula contribuivano al sostegno delle 6 volte a crociera. Le due navate asimmetriche furono costruite in due tempi, questa trasformazione è riscontrabile da una traccia sulla facciata che fu raddoppiata e da altri indizi, come la diversità delle due finestre della facciata. Tre campate di archi in mezzeria nascevano sopra le volte scaricando sui pilastri il peso del colmo del tetto a due falde realizzato in occasione del progetto di restauro datato 1982. Un cordolo in calcestruzzo armato collegava le pareti laterali alla facciata e sostiene il tetto formato da travetti in calcestruzzo armato precompresso. Un sistema di tiranti ancorati al cordolo collega le due pareti laterali. Le pareti laterali sono una in parte contro terra (a sud-ovest), l'altra (a nord-est) getta le fondazioni molti metri sotto il piano terra a causa di una differenza altimetrica della topografia.



Figura 3.6 Schema delle fasi di costruzione dell'impianto architettonico così come si presentava prima delle scosse sismiche del 2016. (elaborato autoprodotta)

La porzione anteriore era composta da diversi elementi. Alla facciata era addossato un fragile portico cinquecentesco sorretto da colonne esili a sostegno di archi rinforzati con delle catene. Il portico fu oggetto di un restauro nel 2009: l'intervento consistè nel rinforzo delle travi lignee con travi IPE controventate da un sistema di bande metalliche che vennero ancorate alla facciata (fig 3.8).



Figura 3.7 Portico della chiesa (fotografia reperibile attraverso il motore di ricerca www.google.it/maps)



Figura 3.8 Ancoraggio del portico alla facciata tramite travi metalliche nel 2009 (immagine reperita dal sito www.antenucciugosrl.it).

Le colonne sul lato lungo, quello anteriore, poggiavano su un muro che presentava un grande arco ed un'apertura che conduceva nei due ambienti interni voltati sottostanti al piano del portico. Il portico era di forma trapezoidale e nel lato più corto (a sud) era collocata una porta cittadina su due livelli. Il primo livello, destinato al passaggio, era voltato. Il secondo livello era destinato ad un ambiente con accesso dal portico.



Figura 3.9 Porzione anteriore della chiesa (fotografia reperibile attraverso il motore di ricerca www.google.it/maps)

La porzione posteriore era caratterizzata da una torre campanaria, la cui muratura risulta uniforme e di buona qualità, inoltre è presente un buon sistema di tiranti, le cui chiavi sono ben visibili in facciata. La cella campanaria è rinforzata da radiciamenti le cui chiavi si notano all'esterno. La torre campanaria poggiava a terra su un altro livello, rispetto all'aula della chiesa, in corrispondenza dell'abside maggiore contro-terra su due lati. Al primo livello, sopra l'abside, era presente un ambiente, la cui volta era rinforzata da travi lignee ancorate alle pareti con delle chiavi che fungono da tiranti a contrasto della spinta che si genera. Al di sopra un sistema di soppalchi di legno leggeri e non spingenti conduceva alla cella campanaria. Gli interventi di restauro legati al progetto del 1982 avevano interessato la torre, le cui fessurazioni erano state stuccate.



Figura 3.10 Interventi di restauro. Fessurazioni stuccate in seguito al sisma del 1979, legate al meccanismo di danno della cella campanaria (fotografia reperibile attraverso il motore di ricerca www.google.it/maps)

Capitolo 4

Generazione del modello 3D multisensore di Sant'Andrea

4.1 Il rilievo del Team Direct

La fase di rilievo dell'oggetto architettonico è stata condotta dal team DIRECT il 5 settembre 2018. Le attività si sono collocate all'interno di una serie di rilievi sul patrimonio architettonico colpito dagli eventi sismici tra il 2016 e il 2017 in centro Italia. In particolare, le indagini vertono sull'analisi di molte chiese che hanno subito danni molto gravi, superiori rispetto alle altre strutture storiche presenti nella zona.

Il rilievo a Campi di Norcia si è sviluppato a partire da un inquadramento topografico con GPS e stazione totale. Successivamente sono state acquisite una serie di scansioni con laser scanner fisso all'esterno e alcune scansioni con il laser scanner mobile (MMS) all'esterno e all'interno. Infine, sono stati effettuati due voli con droni multi-rotore di piccole dimensioni per l'acquisizione del rilievo fotogrammetrico.



Figura 4.1 Ortofoto di Campi di Norcia post-sisma. (immagine elaborata dal team)

La difficoltà principale è stata la caratterizzazione articolata dell'intorno della chiesa. Infatti, l'intero lato sud-est si trova su un pendio scosceso e parzialmente coperto da alberi; la porzione anteriore è caratterizzata dalle macerie relative al crollo totale della facciata, del portico e della porta cittadine; il lato nord-ovest è articolato in tre livelli collegati da due scalinate.

4.1.1 Inquadramento topografico

La costruzione di una rete di inquadramento, su cui appoggiare tutti i dati acquisiti è la prima operazione ed è fondamentale per georeferenziare l'intero rilievo metrico. La rete è stata calcolata a partire dai punti 100 e 400 che sono stati misurati con ricevitori GNSS GEOMAX ZENITH 35. Il rilievo è stato georiferito nel sistema di riferimento globale WGS84. Gli altri due vertici della rete, 200 e 300, sono stati misurati con la stazione totale ed un prisma su treppiede. La rete è stata poi compensata con il software *StarNet* dal team per ridurre gli errori residui.

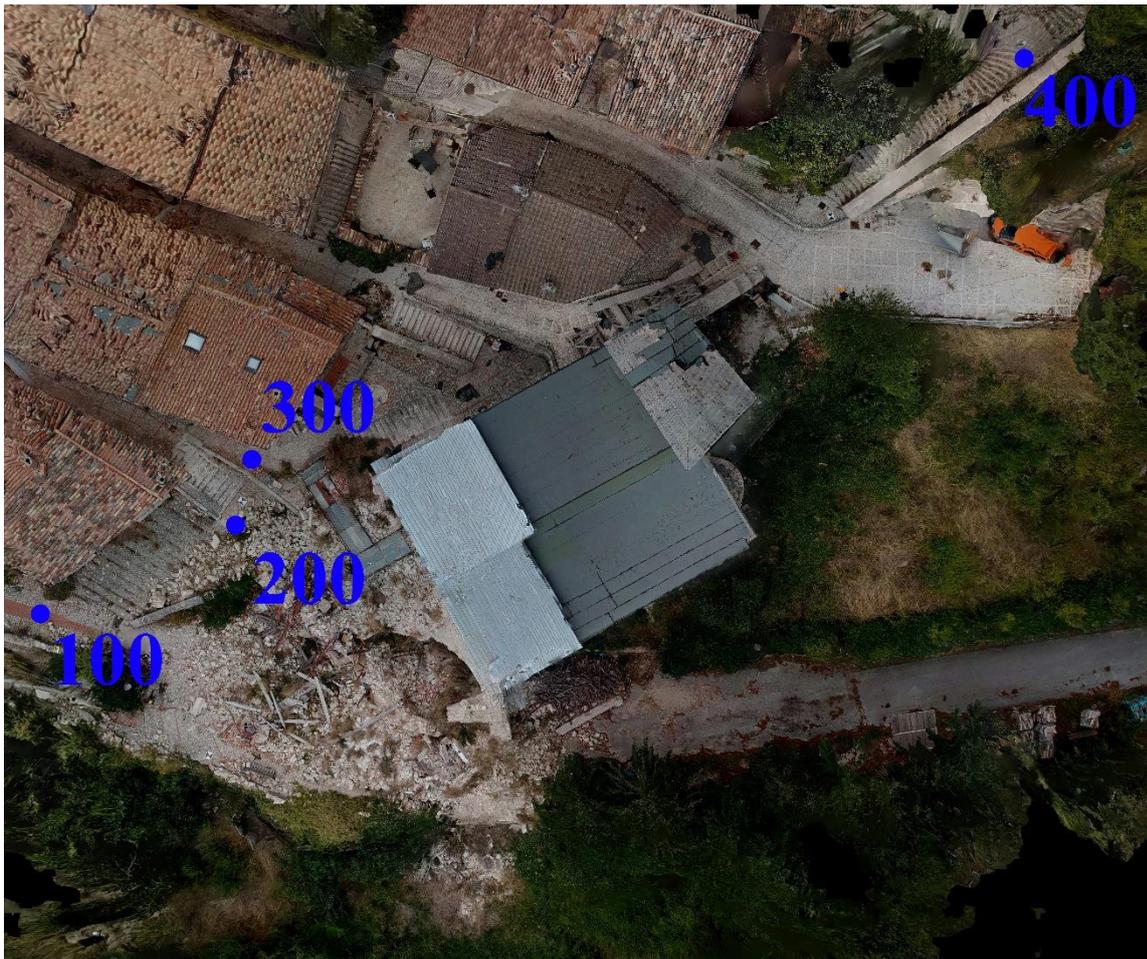


Figura 4.2 Vertici della rete collocati nell'ortofoto

4.1.2 Scansioni con laser scanner fisso

Il rilievo con laser scanner Faro Fous 3D X330 ha richiesto molte ore e la predisposizione di 11 punti di stazione. E' stato necessario progettare il rilievo in modo tale da coprire tutte le superfici esterne della chiesa. Inoltre, posizionando la stazione totale su ogni vertice sono stati misurati 77 punti di dettaglio, materializzati come target o naturali. Durante questa fase è stato indispensabile realizzare una serie di eidotipi per la documentazione della rete di inquadramento e dei punti misurati, annotando nome e posizione.

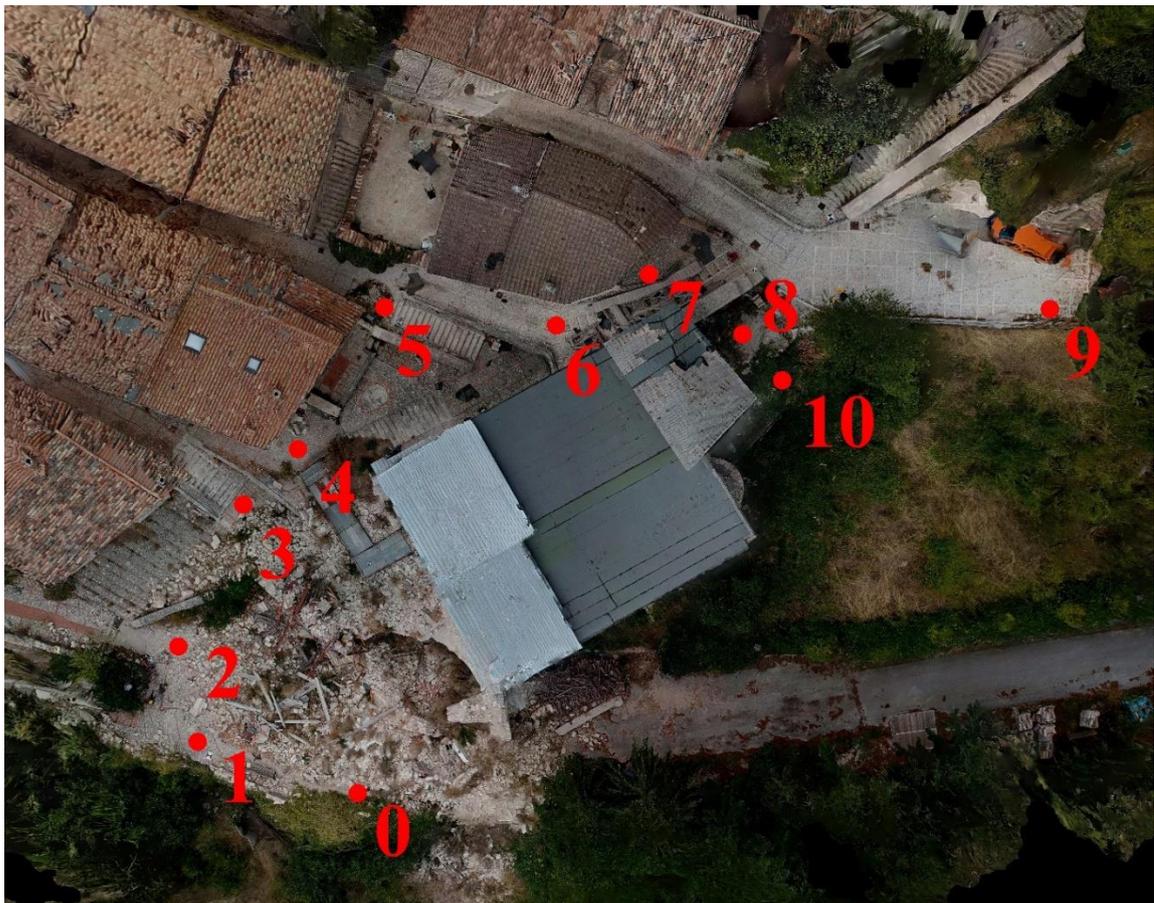


Figura 4.3 Punti di stazione con il laser scanner fisso.

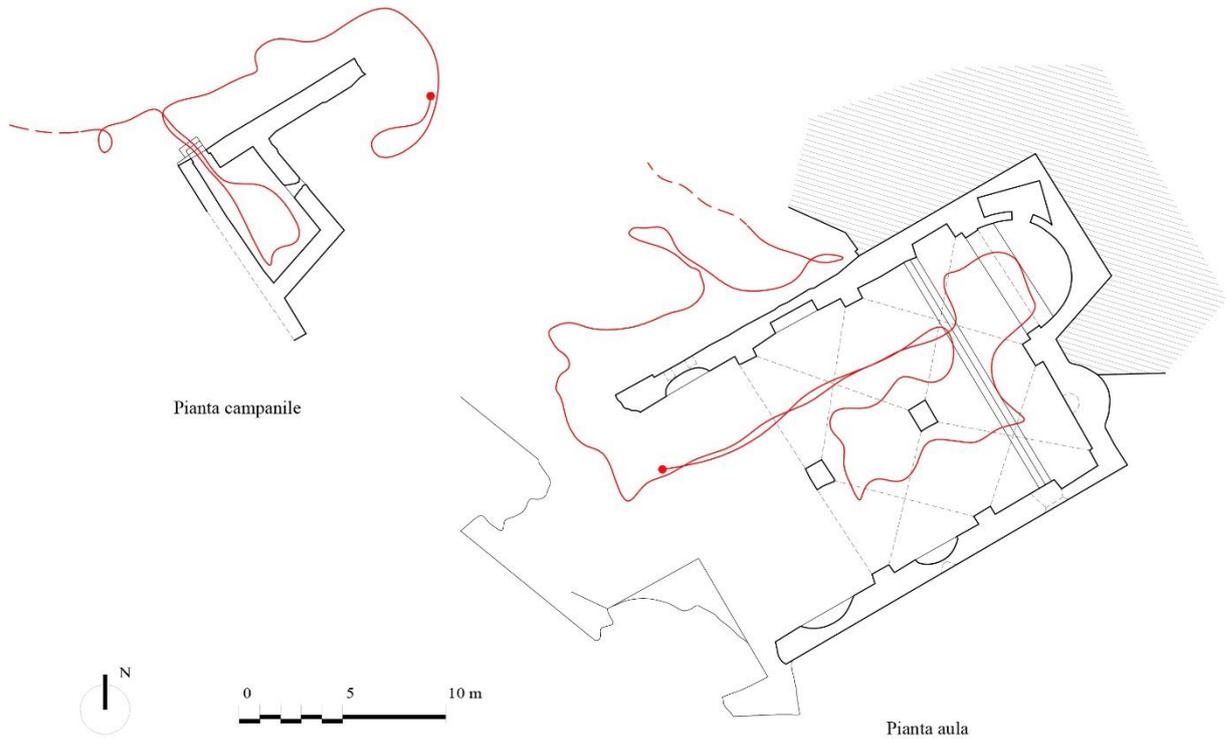


Figura 4.5 Zoom sulla traiettoria della seconda scansione con il laser scanner mobile, in rosso, all'interno del manufatto architettonico.

Con il laser scanner mobile Zeb REVO di GeoSLAM sono stati effettuati molti tentativi di scansione, ma solo tre scansioni sono andate a buon fine: una per le vie di Campi e due che interessano la chiesa (fig 4.4), una all'esterno (fig 4.4.a) e una anche all'interno (fig 4.4.b e 4.5). Le scansioni che sono state selezionate per la tesi sono queste ultime due. Entrambe hanno il medesimo punto di partenza, nella zona esterna a nord-ovest del campanile. L'obiettivo era la chiusura di entrambe le traiettorie ma solo la prima è completa; malgrado ciò è stato possibile utilizzare comunque utilizzarla. L'operazione di rilievo è stata condotta con la finalità di acquisire anche le geometrie degli ambienti interni: il piano terra del campanile e l'aula della chiesa. La presenza di superfici rilevate comuni nelle due scansioni è indispensabile per la loro successiva unione in fase di elaborazione.

4.1.4 Acquisizione di immagini mediante fotogrammetria da UAV

Il rilievo fotogrammetrico aereo è stato realizzato mediante due piccoli droni (UAV): Mavic e Spark di DJI. Entrambi i droni hanno effettuato un'acquisizione completa della chiesa. Con il modello Mavic sono state scattate delle fotografie in un unico volo intorno al manufatto con acquisizione inclinata (fig 4.6.a). Invece, con il modello Spark sono stati effettuati voli più dettagliati con acquisizioni sia nadirali che inclinate: sul campanile e sulla sua copertura, sul corpo principale della chiesa e sulla sua copertura, sulla porzione anteriore. E' stato possibile effettuare delle ottime riprese sul fronte sud-est verso il pendio, invece il fronte nord-ovest è prospiciente ad altri edifici a distanza ridotta e le riprese presentano delle zone ciecche.

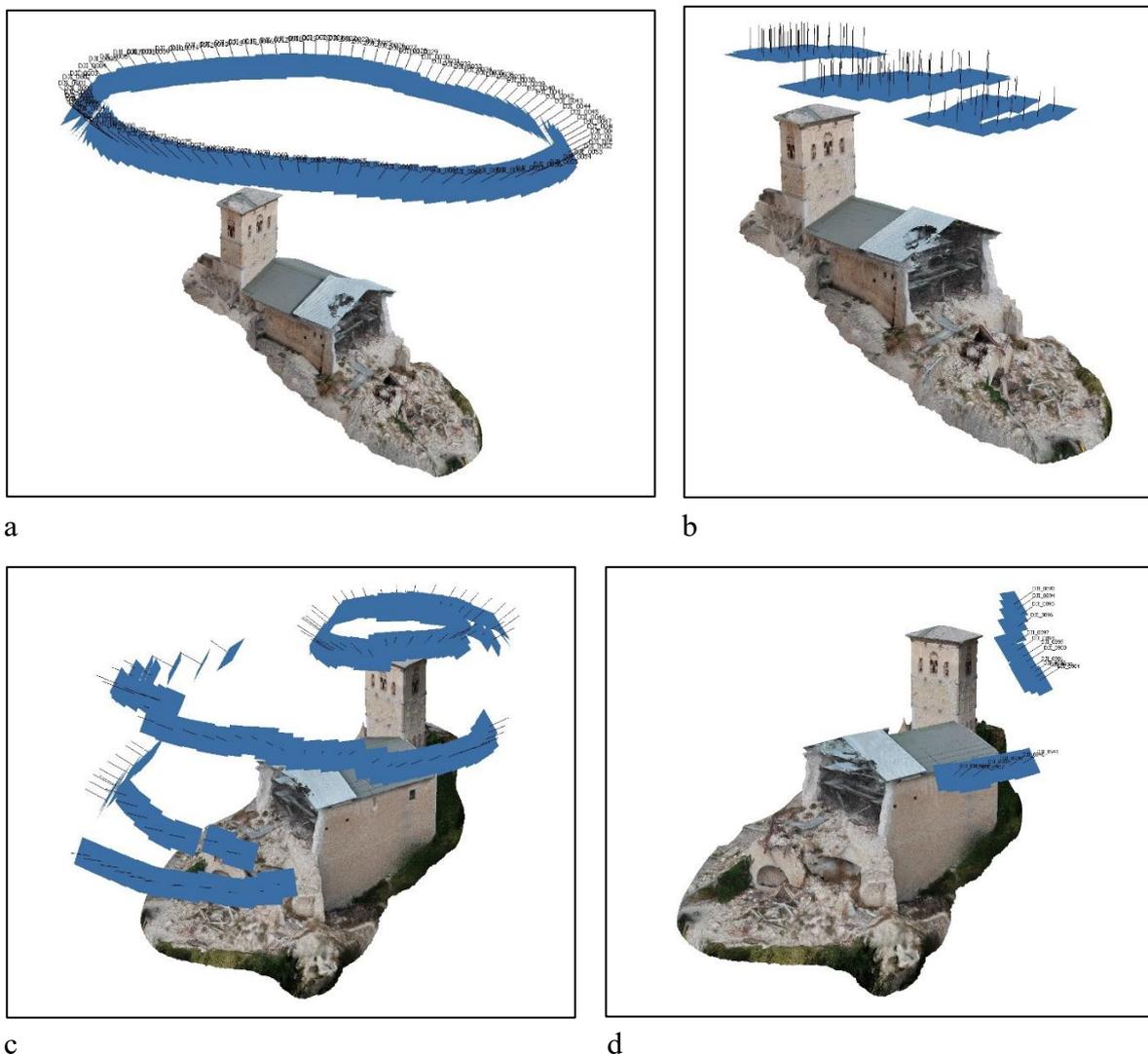


Figura 4.6 Riprese fotogrammetriche da UAV della chiesa

Queste soluzioni hanno consentito la progettazione di un GSD (*Ground Simple Distance*), la distanza in mm/pixel tra il centro di due pixel vicini di un'immagine della ripresa fotogrammetrica inferiore a 2 cm, impostando la quota di volo media inferiore a 60 m circa. (1.1)

Tabella 4.1 Caratteristiche dei droni (UAV) utilizzati

Caratteristiche	Mavic	Spark
Peso al decollo	743 g	300 g
Dimensione diagonale (senza eliche)	335 mm	170 mm
Velocità massima orizzontale	18 m/s	14 m/s
Velocità massima ascensionale	5 m/s	3 m/s
Velocità massima discensionale	3 m/s	3 m/s
Autonomia di volo (stazionario)	24 minuti	15 minuti
Dimensione immagine (pixel)	4000 x 3000	3968 x 2976
Pixel effettivi	12,35 MP	12 MP
Sensore	6,17 mm x 4,56 mm	6,17 mm x 4,56 mm
Lente	4,73 mm	4,49 mm
Distanza minima di scatto	0,5 m	2 m



a



b

Figura 4.7 Mavic DJI (a). Spark DJI (b).

I fotogrammi acquisiti, circa 500, sono stati ottimizzati dal team prima di essere orientati. Quest'operazione consiste nella correzione di radiometrica delle immagini digitali, che in seguito al rilievo risultavano troppo luminose e sovraesposte, causando problemi durante le successive fasi di processamento. E' stata diminuita la luminosità ed aumentato il contrasto; corretta l'esposizione è stata regolata la curva dell'istogramma di ogni immagine per calibrare al meglio le zone di ombra e luce.

4.2 Generazione delle nuvole di punti

Alla cosiddetta fase in campagna segue quella in ufficio, in cui avvengono le operazioni che consentono di ricavare delle informazioni metriche e radiometriche dai dati acquisiti in relazione alle finalità del rilievo. L'obiettivo principale in questa tesi è l'indagine delle potenzialità delle tecniche di rilievo speditivo (*rapid mapping*), per una gestione più efficiente dei tempi di acquisizione e dei costi. La fase di acquisizione massiccia di nuvole di punti è stata condotta con tre differenti tecniche: LiDAR con laser scanner fisso, con sistema MMS e fotogrammetria aerea da UAV. Le ultime due rientrano nella famiglia del *rapid mapping* e *low cost*. La disponibilità di misurazioni da laser scanner fisso, con un livello di accuratezza e risoluzione alti, permetterà un confronto tra le nuvole di punti e la valutazione della qualità del rilievo speditivo. Il trattamento preliminare delle nuvole di punti è la fase intermedia che, attraverso l'utilizzo di diversi software, predispose la massiccia quantità di dati raccolti ad una successiva interpretazione e ed elaborazione 2D e 3D.

4.2.1 Trattamento della nuvola di punti da laser scanner fisso

Il trattamento della nuvola di punti acquisita con laser scanner fisso si compone di diverse fasi:

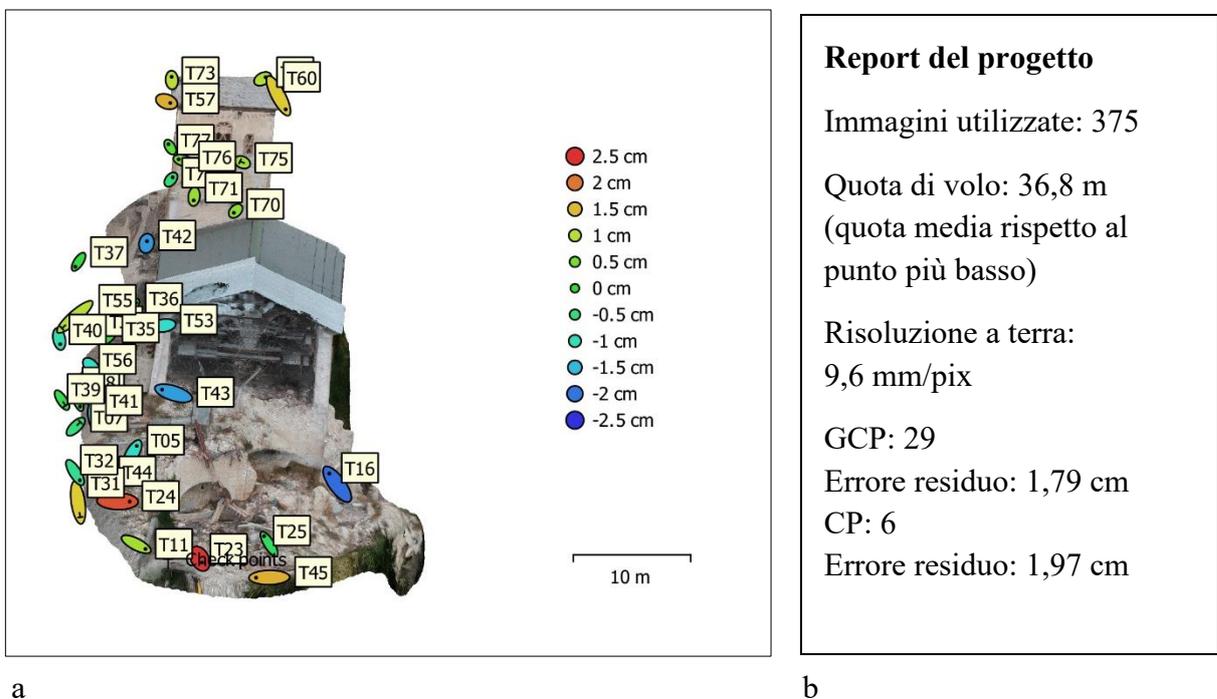
- Allineamento/registrazione: le diverse scansioni vengono unite in un'unica nuvola di punti con un allineamento tramite forma e algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*), perfezionato con l'utilizzo dei target
- Georeferenzazione: è sufficiente assegnare le coordinate a tre punti nello spazio per rototraslare l'interna nuvola
- Filtraggio: l'eliminazione del rumore (noise), ovvero quei punti che hanno elevata probabilità di non appartenere ad una superficie
- Pulizia: la selezione delle zone di interesse (le superfici architettoniche della chiesa e perimetrazione della zona esterna) che comporta un alleggerimento significativo della nuvola

La nuvola LiDAR è stata elaborata dal team e servirà, in questa tesi, come ground truth per la valutazione delle nuvole acquisite con le tecniche di rilevamento speditivo. I software utilizzati sono stati Scene per la registrazione e georeferenzazione e 3DReshaper per il filtraggio e la pulizia. La precisione raggiunta corrisponde a 2 mm.

4.2.2 Generazione della nuvola di punti da fotogrammetria con UAV

Le immagini scattate dai droni sono state scaricate e sono state selezionate le più idonee, scartando quelle fuori fuoco e superflue. Successivamente sono state importate sul software Agisoft Metashape, per la generazione di dati 3D a partire dalle fotografie: nuvole di punti, *mesh* e ortofoto.

Oltre alle immagini vengono importati anche i nomi dei punti di dettaglio misurati con la stazione totale e le loro coordinate sotto forma di file testo. Questa operazione consente la georeferenziazione dei dati e il raggiungimento di una precisione maggiore durante l'orientamento del blocco di immagini. Assegnati manualmente 3 punti, tutti visibili su 3 immagini, il programma riconosce in modo automatico la posizione di tutti gli altri punti. La loro posizione può essere perfezionata, correggendone alcuni ed escludendo quelli che presentano errori troppo elevati, trattando tutta l'area in modo omogeneo. I punti utilizzati per orientare il rilievo vengono denominati *Ground Control Points* (GCP). Alcuni dei punti sono stati utilizzati invece come *Check Points* (CP) per valutare lo scostamento rispetto ai punti topografici riferiti alla rete. Successivamente si lancia un nuovo orientamento del blocco di immagini e si controllano gli errori residui sui GCP e sui CP.



a b
Figura 4.8 GCP ed errore residuo (a). Report del progetto (b).

La nuvola di punti generata con Metashape è stata pulita e filtrata. Successivamente è stata importata su CloudCompare e confrontata con la nuvola di punti derivante dal laser scanner fisso. Le due nuvole importate mantengono i dati relativi alla georeferenziazione e, risultando sovrapposte, il programma consente la misura della distanza tra i punti delle due nuvole.

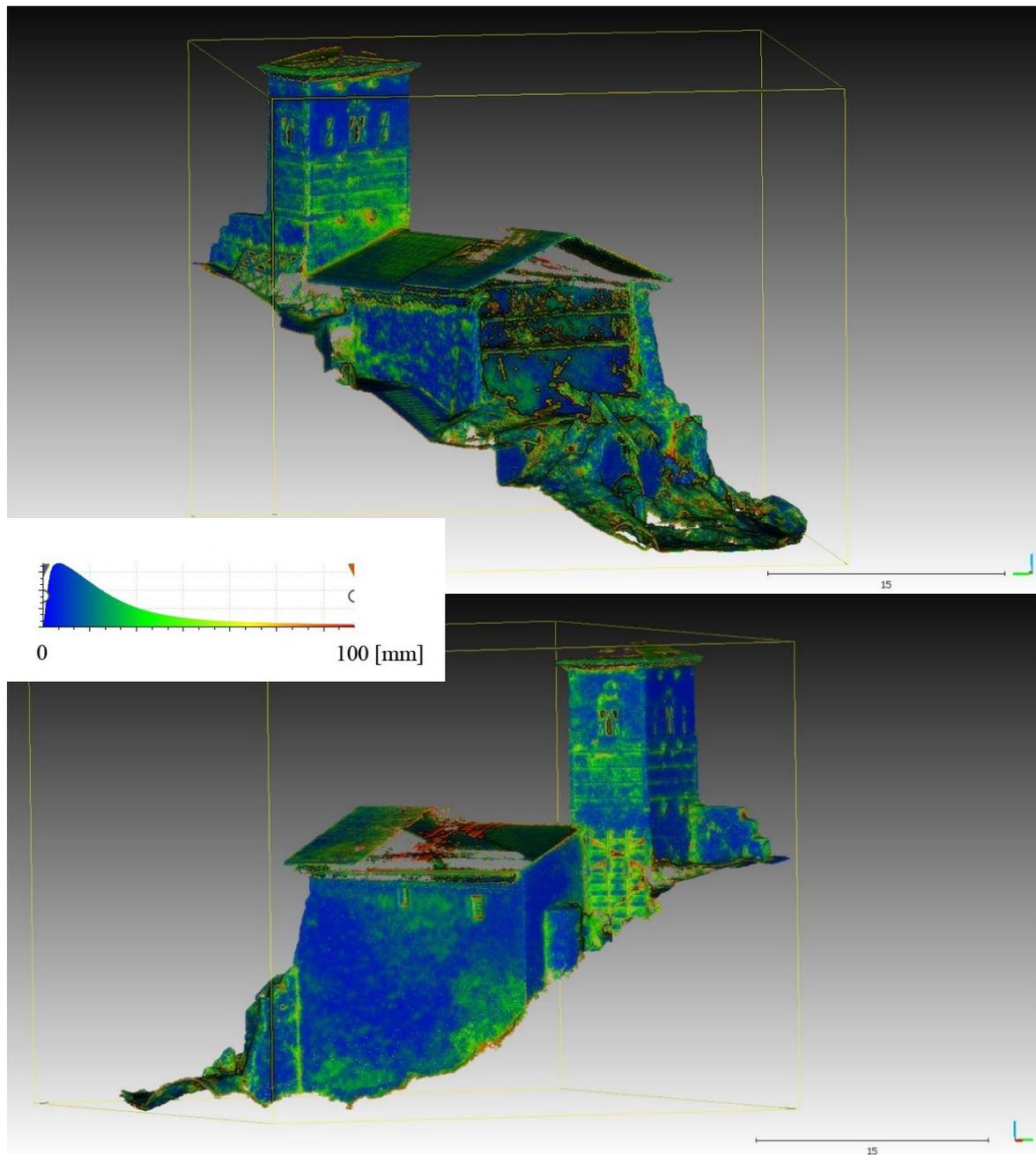


Figura 4.9 Confronto fra la nuvola di punti generata da Metashape e quella generata dal laser scanner fisso. La scala dei colori rappresenta una distanza tra i punti delle due nuvole, da un minimo di 0 mm in blu ad un massimo di 100 mm in rosso. Nel grafico l'analisi della distribuzione degli scarti.

4.2.3 Trattamento della nuvola di punti da MMS

Come anticipato, le scansioni da MMS selezionate sono state 2: una completamente esterna ed una esterna e interna. Il punto di partenza è il medesimo per entrambe, nella zona esterna a nord-ovest del campanile ed hanno in comune le superfici relative alla zona nord della chiesa e la zona nord-ovest del campanile, rilevate dallo strumento con più facilità rispetto alla zona interna, disturbata dalle impalcature e la zona anteriore, caratterizzata da macerie e poche superfici utili allo strumento per l'allineamento dei profili scansionati.

I due set di dati devono essere processati dal software GeoSLAM Hub per la generazione e l'esportazione delle due nuvole di punti. Il risultato è valutabile con CloudCompare, il software consente di visualizzare la nuvola di punti con una scala di colori relativa alla qualità stimata e la traiettoria dello strumento. Verificata la qualità delle nuvole acquisite si procede con l'operazione di *merge*, l'unione delle due nuvole con GeoSLAM Hub. Il software, dopo una sovrapposizione manuale approssimativa, riconosce in modo automatico tramite algoritmo ICP le superfici in comune, condizione indispensabile per l'unione, e unisce le due nuvole di punti effettuando anche delle correzioni al fine di ottimizzare l'unione. Per questo motivo è importante controllare preventivamente la qualità delle nuvole che vengono inserite nel processo di unione perché potrebbero compromettere la qualità del risultato finale.

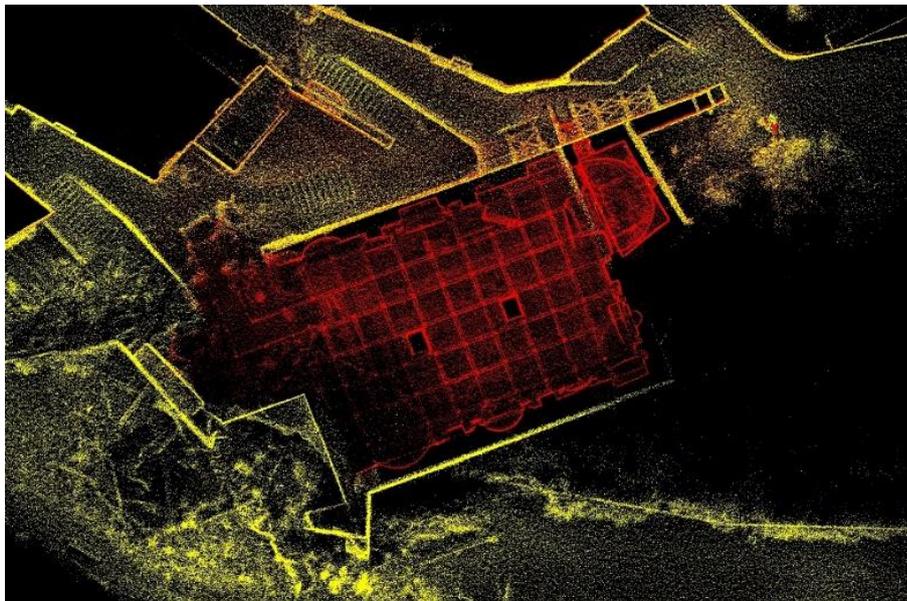


Figura 4.10 Operazione di *merge* delle due nuvole di punti acquisite da laser scanner mobile con il software GeoSLAM Hub. In giallo la prima, esterna. In rosso la seconda, interna.

Il primo risultato relativo alla nuvola di punti acquisita con laser scanner mobile è apprezzabile su CloudCompare, che permette anche di sezionare la nuvola ed esprimere alcune iniziali valutazioni sul manufatto architettonico e sull'efficienza dello strumento. La principale criticità è legata alla presenza della struttura a sostegno delle volte, composta da innumerevoli tubi metallici che ostacolano le misure. Nonostante questa condizione operativa la superficie interna delle volte è restituita in modo omogeneo ed è stato verificato che le porzioni mancanti corrispondono ad effettivi crolli. La presenza di un terreno impervio ed alcuni alberi sul lato sud-est ha comportato una restituzione delle superfici incompleta per quanto riguarda il campanile e da valutare con una comparazione con la nuvola di punti acquisita con laser scanner fisso per quanto riguarda la parete laterale dell'aula.

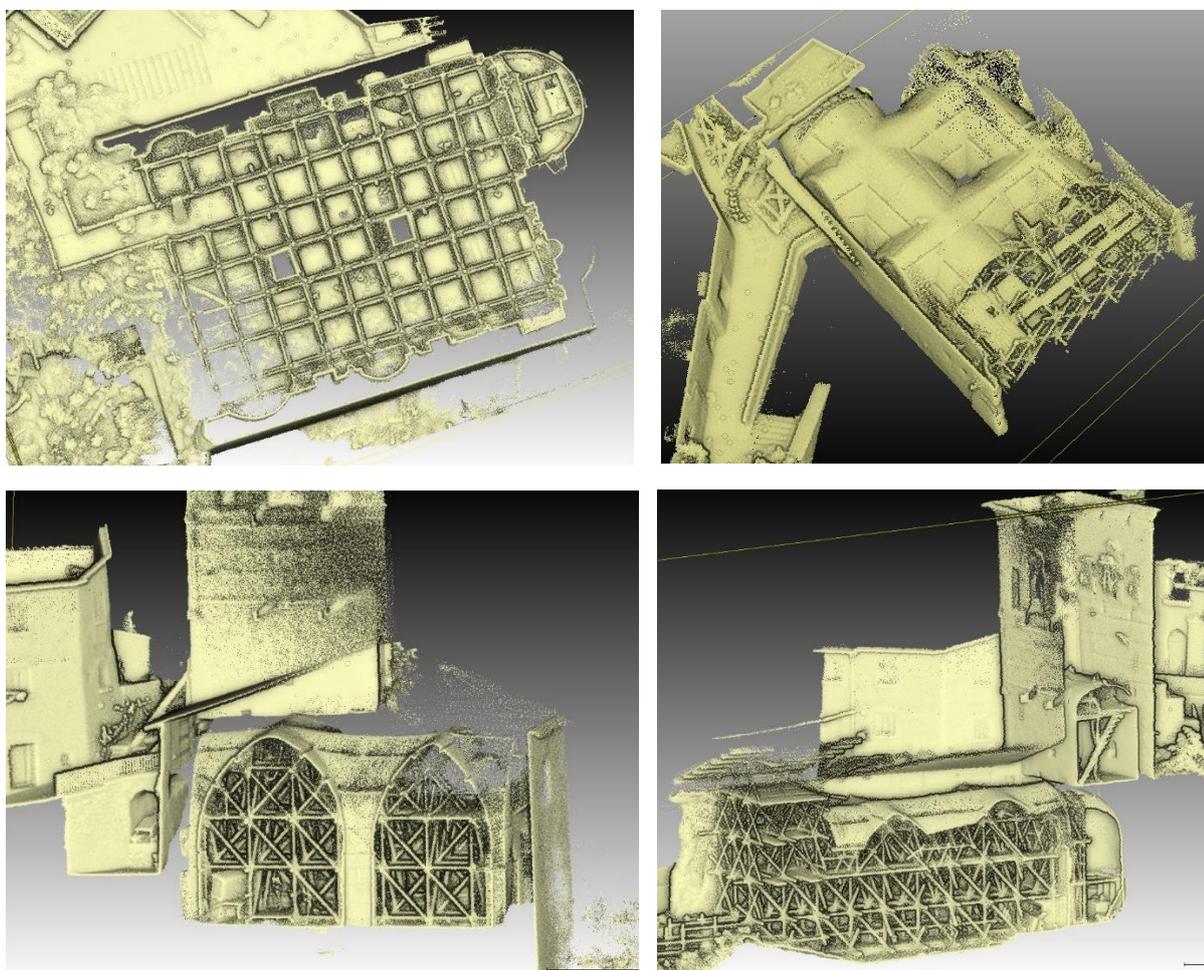


Figura 4.11 Risultato grezzo dell'unione delle due nuvole acquisite con laser scanner mobile, apprezzabile con il software CloudCompare.

L'operazione seguente è quella di pulizia e filtraggio della nuvola di punti. E' importante perimetrare la nuvola, eliminare il rumore, i punti appartenenti alla vegetazione e quelli generati dalla presenza di persone nel raggio di azione dello strumento, come l'operatore non perfettamente posizionato dietro allo strumento.

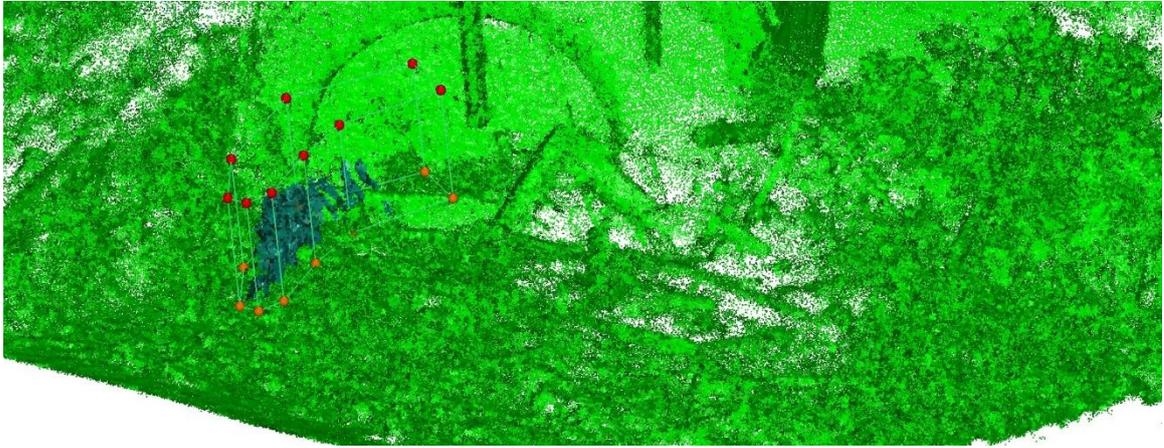


Figura 4.12 Operazione di pulizia e filtraggio della nuvola di punti acquisita con laser scanner mobile. L'immagine è relativa all'eliminazione di punti generati dall'operatore in movimento non perfettamente posizionato dietro allo strumento.

La valutazione della precisione della nuvola avviene, come precedentemente per quella acquisita da fotografia aerea, comparandola a quella acquisita con laser scanner fisso. Per tale operazione è necessario georeferenziare la nuvola in modo che siano sovrapponibili nel software CloudCompare.

La georeferenziazione di questa nuvola avviene allineandola a quella di riferimento già georeferenziata. Questa operazione può essere gestita in modo automatico dal software 3DReshaper, che minimizza l'errore medio su tutti i punti, o manualmente selezionando alcuni punti su una nuvola e i corrispondenti sull'altra. Sono state percorse entrambe le strade ed è stata valutata come migliore l'operazione manuale. Infatti, le numerose macerie costituiscono un elemento di disturbo per l'allineamento automatico. Sono stati fatti alcuni tentativi e quello finale prevede l'utilizzo di 8 punti, distribuiti maggiormente sulla zona Ovest (punti 1-5), 1 nella zona anteriore caratterizzata dalle macerie (punto 6), 2 sulla zona Est che è stata rilevata con difficoltà dallo strumento a causa delle condizioni topografiche. La parte alta del campanile non è stata utilizzata perché fuori dalla portata dello strumento, indicata come ottimale entro i 10m. Il risultato è buono: i punti 1-6 presentano un errore nell'ordine dei 4 cm, i due punti sulla zona sud-est, invece, per i motivi già anticipati presentano errori più significativi, nell'ordine dei 7-8 cm.



Coppia di punti (n°)	Distanza (mm)
1	24
2	28
3	51
4	8
5	32
6	35
7	71
8	80



Figura 4.13 Punti utilizzati per l'operazione di georeferenziazione della nuvola di punti acquisita con laser scanner mobile tramite sovrapposizione alla nuvola di punti acquisita con laser scanner fisso e distanza fra le coppie di punti corrispondenti.

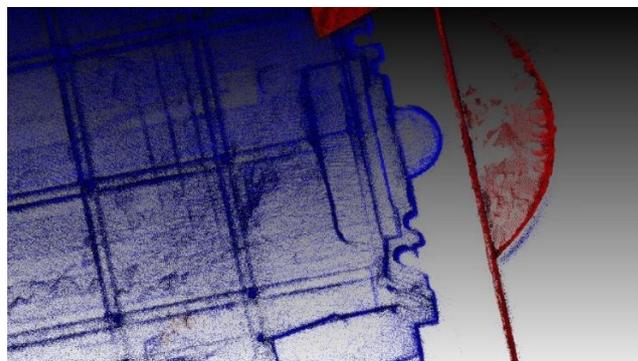


Figura 4.14 Differenza fra la nuvola acquisita con laser scanner mobile e quella di riferimento. L'immagine mostra la zona posteriore, lontana dalla traiettoria dello strumento e che presenta la differenza maggiore.

La nuvola di punti, dopo essere stata georeferenziata, è stata importata su CloudCompare e confrontata con la nuvola di punti derivante dal laser scanner fisso. Le due nuvole importate risultano sovrapposte e il programma consente la misura della distanza tra i punti che vengono considerati corrispondenti.

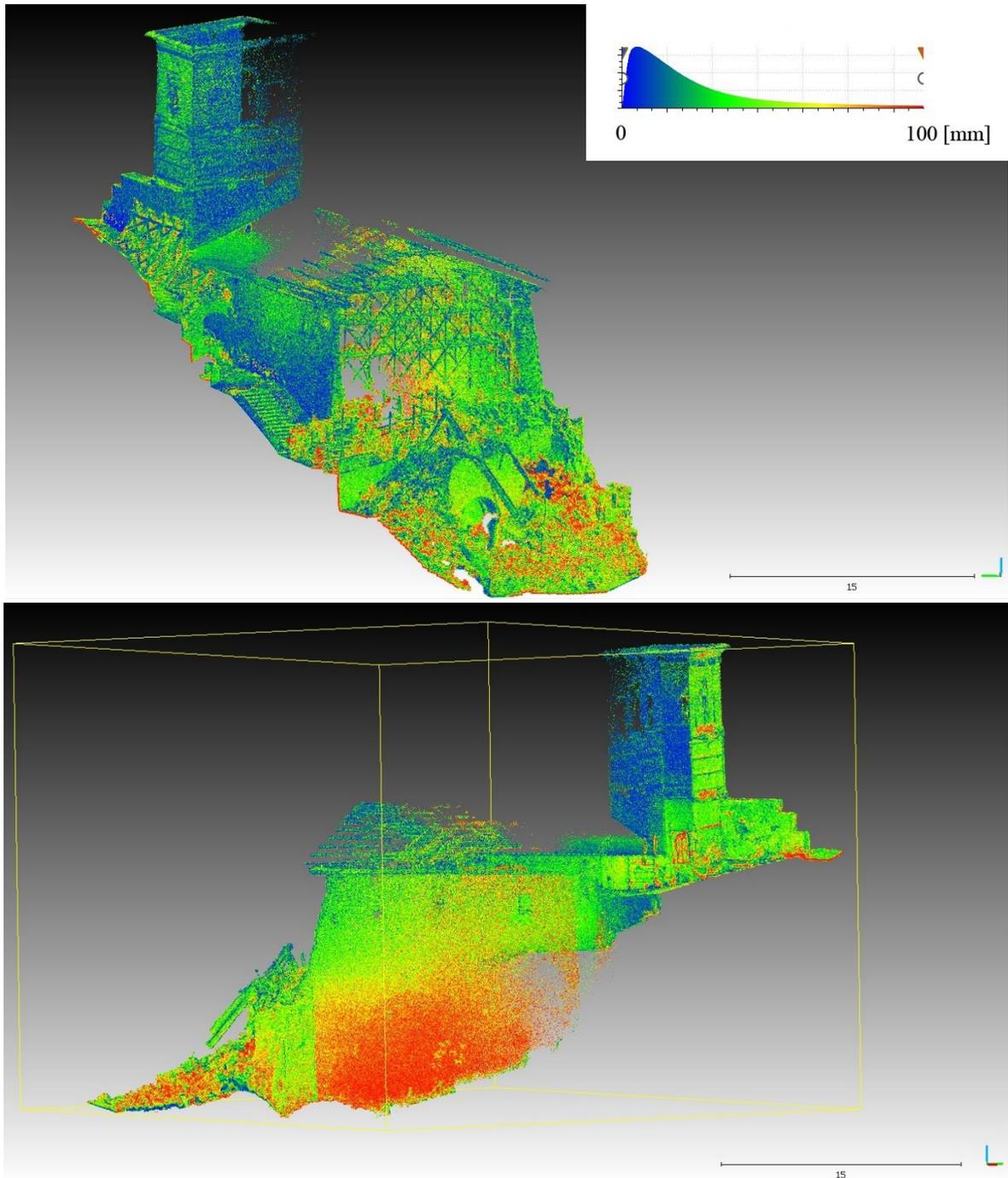


Figura 4.15 Confronto fra la nuvola di punti acquisita con laser scanner mobile e quella generata dal laser scanner fisso. La scala dei colori rappresenta una distanza tra i punti delle due nuvole, da un minimo di 0 mm in blu ad un massimo di 100 mm in rosso. Nel grafico l'analisi della distribuzione degli scarti.

4.3 Generazione del modello 3D

L'obiettivo, come anticipato, è la documentazione ed interpretazione del manufatto architettonico a livello preliminare, ai fini di poter compiere ragionamenti ed analisi statistiche a scala territoriale. Il metodo di rilievo metrico 3D speditivo, basato sull'utilizzo di un sistema MMS e della fotogrammetria aerea da UAV, risulta il più adatto per la completezza, il contenimento dei costi, la velocità di acquisizione, il livello di precisione e accuratezza raggiunti. Le difficoltà legate alla condizione ambientale operativa rendono inoltre questo metodo l'unico praticabile per il raggiungimento di questi standard.

La documentazione che questa tecnica permette di acquisire e rende disponibile per l'interpretazione del sistema architettonico e la valutazione della vulnerabilità sismica si distingue in:

- Immagini fotografiche: le fotografie scattate da UAV offrono un punto di vista privilegiato, dall'alto e secondo molte posizioni e inclinazioni diverse, per una restituzione completa dell'esterno della fabbrica
- Nuvola di punti: l'integrazione delle nuvole di punti acquisite con MMS e fotogrammetria da UAV consente la generazione di una nuvola di punti unica, completa di esterni, interni e coperture, con un grado di accuratezza e precisione relativi alla scala 1:100/1:200
- *Mesh* texturizzata: la trasformazione della nuvola di punti in superfici triangolate genera una mesh poligonale, formata da vertici, spigoli e facce. Inoltre, alle superfici esterne può essere applicata una *texture*, un colore ricavato dalle immagini acquisite. Il risultato è un modello 3D navigabile ed indagabile per l'analisi del manufatto.
- Ortofoto ed elaborazioni bidimensionali: dal modello 3D si possono estrapolare immagini in scala per la generazione delle sezioni e dei prospetti attraverso le ortofoto e le sezioni della nuvola di punti.
- Modelli volumetrici: la completezza del modello 3D consente la realizzazione di modelli volumetrici delle geometrie per le analisi rivolte all'individuazione delle condizioni di equilibrio.

4.3.1 Integrazione della nuvola di punti da fotogrammetria da UAV e nuvola di punti da MMS

La nuvola acquisita da MMS e quella generata con fotogrammetria da UAV presentano caratteristiche differenti. Le analisi condotte hanno evidenziato alcune carenze della nuvola da laser scanner mobile: la mancanza delle coperture, l'accuratezza insufficiente lungo il lato sud-est dell'aula e la mancanza di sufficiente densità di punti rilevati sul retro della chiesa, sul lato est e sulla parte sommitale del campanile. Queste carenze sono legate alla distanza eccessiva della traiettoria dello strumento rispetto alle superfici da rilevare. Viceversa, la zona interna, nonostante la complessità geometrica, risulta omogeneamente restituita, a riprova dell'efficacia dello strumento in ambienti interni e contesti complessi. La nuvola da laser scanner mobile è stata perciò integrata con quella da fotogrammetria aerea per quelle aree carenti prima indicate, segmentandola e sostituendo i punti.

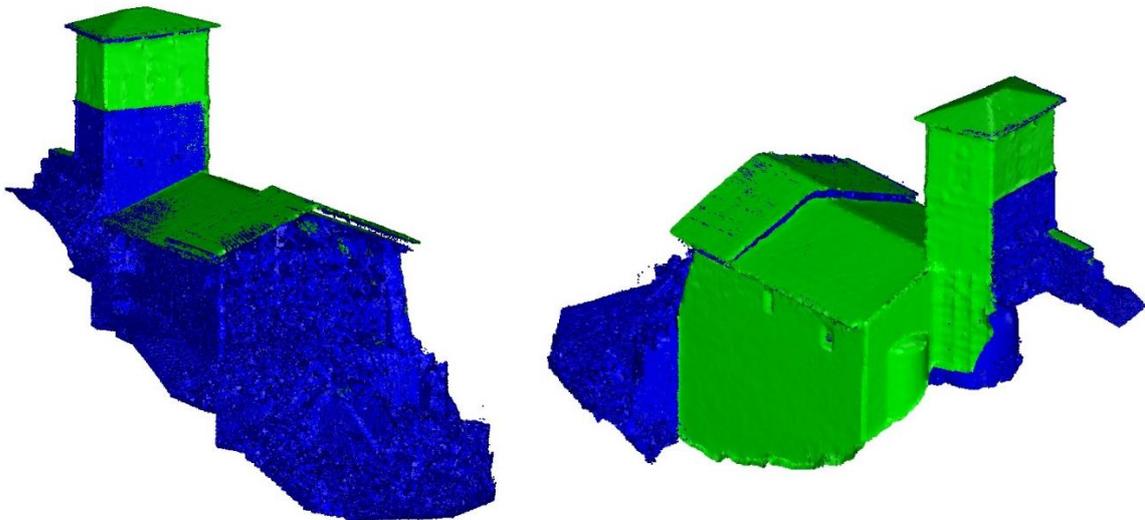


Figura 4.16 Integrazione della nuvola di punti da laser scanner mobile, in blu, con la nuvola di punti da fotogrammetria aerea, in verde.

La nuvola di punti integrata, acquisita con le tecniche di rilievo speditivo, è stata importata su CloudCompare e confrontata con la nuvola di punti derivante dal laser scanner fisso, di riferimento. La misura della distanza tra i punti che vengono considerati corrispondenti risulta contenuta all'interno dei 40 mm di scarto.

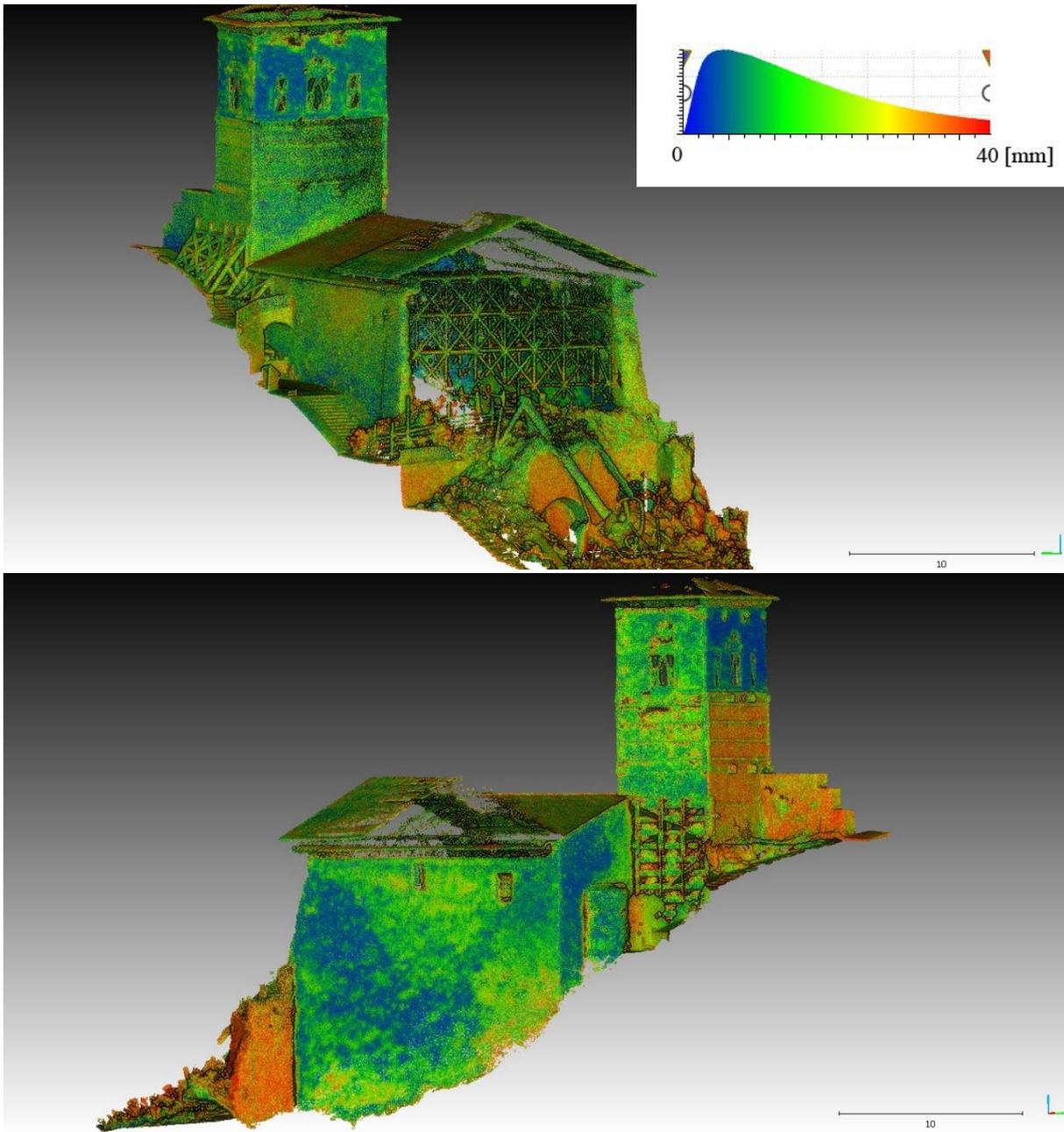


Figura 4.17 Confronto fra la nuvola di punti integrata, acquisita con tecniche di rilievo speditivo e quella generata dal laser scanner fisso, di riferimento. La scala dei colori rappresenta una distanza tra i punti delle due nuvole, da un minimo di 0 mm in blu ad un massimo di 40 mm in rosso. Nel grafico l'analisi della distribuzione degli scarti.

4.3.2 La *mesh* per le ispezioni del manufatto

Le nuvole di punti possono essere utilizzate per la costruzione di *mesh* del modello. La *mesh* è una superficie generata dall'unione dei punti nello spazio 3D tramite linee che formano triangoli con facce piane.²⁸ Il livello di dettaglio del modello di superficie deriva dalla dimensione dei triangoli. Per la generazione di una *mesh* ben delineata è necessario controllare il rumore della nuvola di punti, che potrebbe determinare la formazione di frastagliature e gibbosità.

Le nuvole a disposizione, per la produzione di questi modelli sono:

- La nuvola di punti da fotogrammetria aerea con UAV
- La nuvola di punti integrata da MMS e fotogrammetria aerea con UAV

La nuvola di punti da fotogrammetria aerea con UAV riproduce solo gli esterni del manufatto architettonico, ma può generare una *mesh* texturizzata, che trova ottime applicazioni nella fase di ispezione del manufatto.

La nuvola integrata è una nuvola completa, di esterni ed interni, ma il sistema MMS non cattura le immagini fotografiche necessarie alla texturizzazione. Questa nuvola può essere utilizzata per la realizzazione di un modello di superficie degli spazi interni, in particolare per l'analisi della volta. In questo caso però la pulizia della nuvola è stata resa molto complessa dalla presenza di tantissimo rumore generato dalle impalcature che la sostengono. Inoltre, la presenza di pannelli che sostengono le porzioni più danneggiate, impedisce la restituzione di un modello preciso per la mappatura dei crolli. Perciò il risultato presenta criticità di lettura.

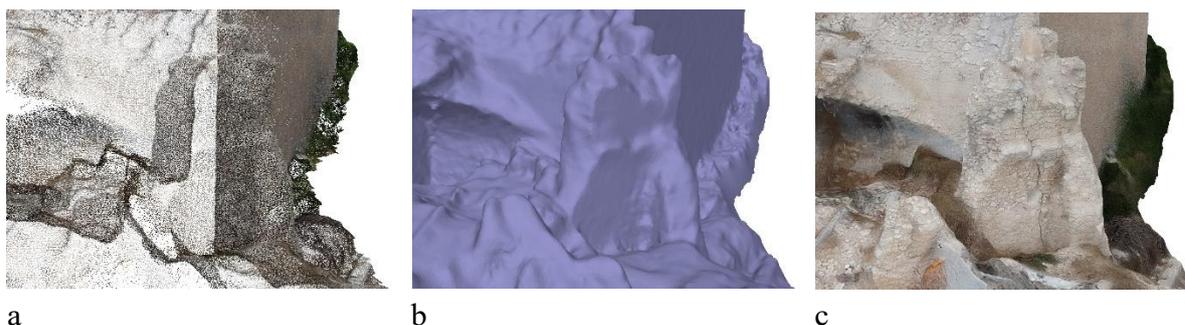


Figura 4.18 La formazione della *mesh* texturizzata degli esterni nelle tre fasi: generazione della nuvola di punti da fotogrammetria aerea, triangolazione dei punti per la formazione della superficie piana, proiezione delle ortofoto sulla superficie per la texturizzazione.

²⁸ Triangolazione Delaunay, introdotta nel 1934 dal matematico da cui prende il nome.



Figura 4.19 Mesh texturizzata

4.3.3 Ortofoto e immagini radiometriche per le elaborazioni 2D

Il rilievo con le moderne tecniche della Geomatica, attraverso l'acquisizione di una nuvola di punti, consente la realizzazione di elaborati grafici 2D tradizionali, arricchiti con immagini *raster* della nuvola di punti ed ortofoto dalla tecnica fotogrammetrica, proiezioni su un piano della texture della *mesh*, in cui ogni pixel è corrispondente ad un punto georiferito nello spazio.

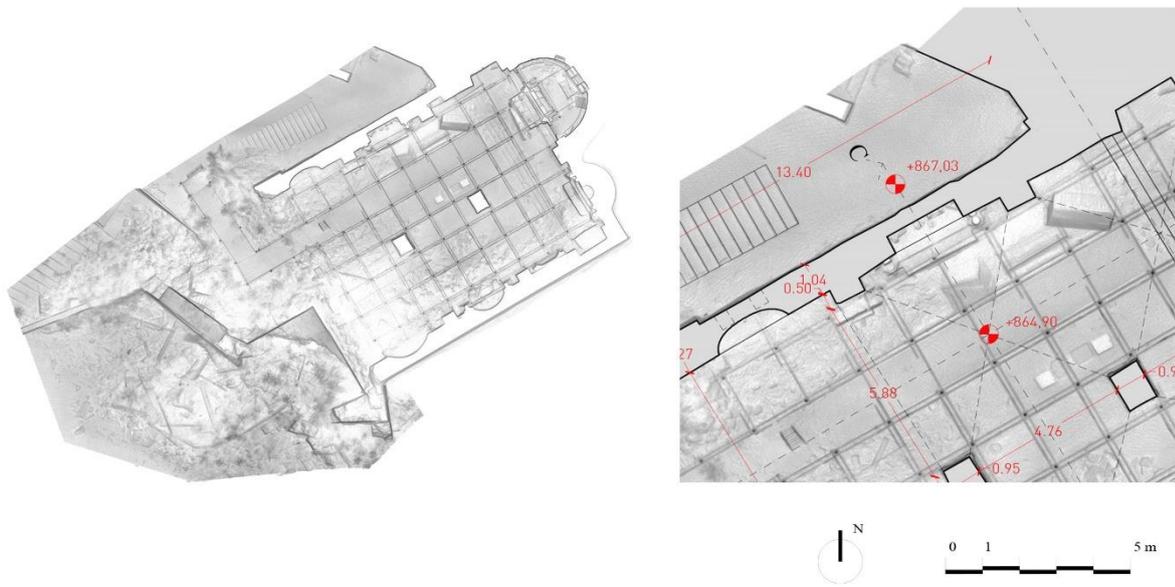
I profili di punti, generati dalla sezione della nuvola, vengono visualizzati ed esportati in formato immagine *raster* con il software PointCab. Questo programma consente di disegnare dei piani di sezione orizzontali e verticali e di impostare la profondità di sezione, che può essere di pochi centimetri per la realizzazione di sezioni, o di alcuni metri per la realizzazione di prospetti.

Successivamente le immagini generate vengono importate su AutoCad, per la vettorializzazione e realizzazione degli elaborati grafici tradizionali in scala. La scala scelta è 1:200, che è adeguata allo scopo del rilievo e alla precisione conseguita, che è stata mantenuta entro i 40 mm.

Oltre alle immagini raster della nuvola di punti è possibile importare anche le ortofoto. Il procedimento per l'estrazione delle ortofoto dal fronte dell'edificio sul modello 3D texturizzato prevede la definizione di un piano di proiezione parallelo al piano di facciata. E' necessario definire 3 punti nello spazio del modello 3D per creare un nuovo sistema di riferimento localmente concorde al piano di facciata poiché il sistema di riferimento globale del rilievo non è concorde con la essa. Si è proceduto individuando due punti appartenenti allo stesso piano di facciata su tre fotografie. Indentificato uno come origine, è stata impostata la stessa quota dell'origine all'altro punto, definendo così l'asse x, parallelo al piano di facciata. Perché il piano fosse verticale, è stato creato un terzo punto con le coordinate dell'origine ma la quota maggiore per la definizione dell'asse y (fig. 4.21).

Le ortofoto sono sia un metadato che arricchisce il disegno architettonico, sia per la definizione delle geometrie che per l'analisi delle consistenze murarie.

Nei disegni sono state riportate le geometrie del sistema architettonico, coerentemente con la scala di disegno, e sono stati esclusi gli arredi ed i sistemi provvisori di messa in sicurezza del manufatto collocati in seguito agli eventi sismici del 2016. I profili delle macerie sono stati riportati così come rilevati e indicati con un tratteggio differente. Sui prospetti, arricchiti dalle ortofoto, sono state mappate le fessurazioni e le caratteristiche principali della muratura.



a

b

Figura 4.20 Sezione della nuvola di punti su PointCab (a). La nuvola è stata sezionata da un piano orizzontale ad 1 m dalla quota del pavimento dell'aula per la realizzazione di un disegno tradizionale che rappresenta le consistenze murarie sezionate, arricchito da quote ed immagine raster della nuvola di punti (b).

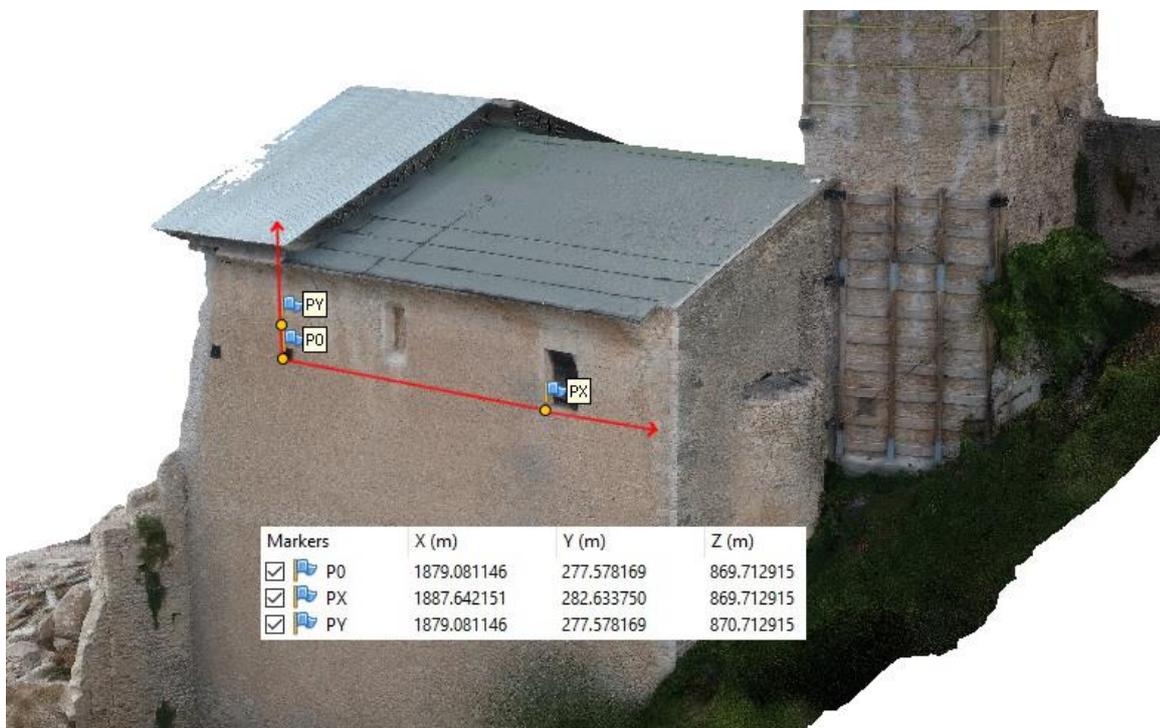
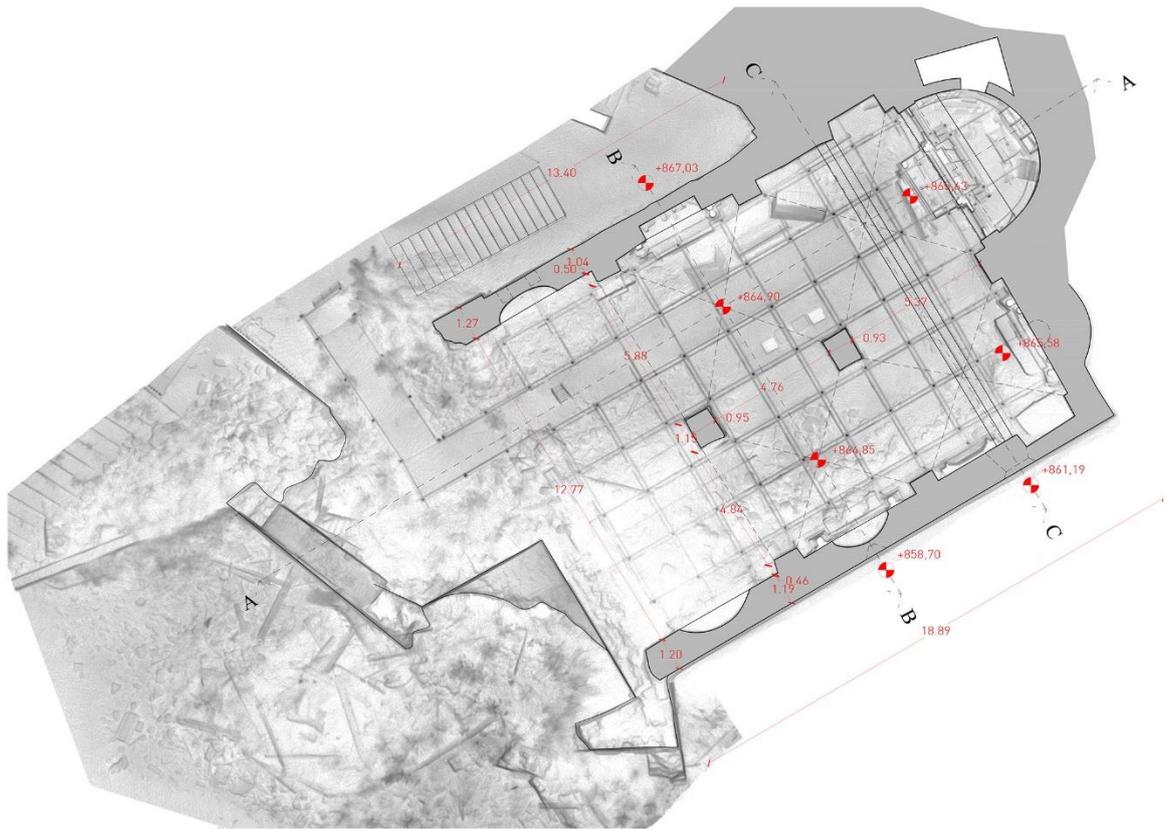
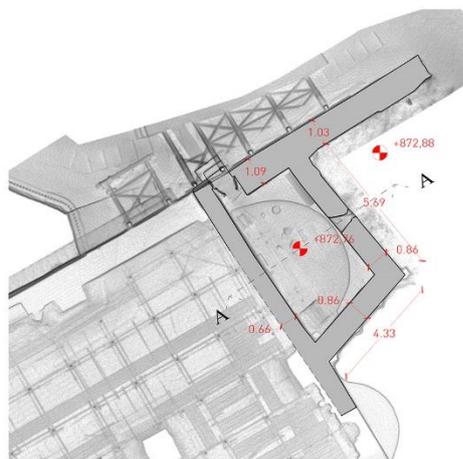


Figura 4.21 Estrazione delle ortofoto. Nell'immagine sono stati individuati i tre punti appartenenti allo stesso piano di facciata che definiscono il sistema di riferimento locale.



Pianta dell'aula

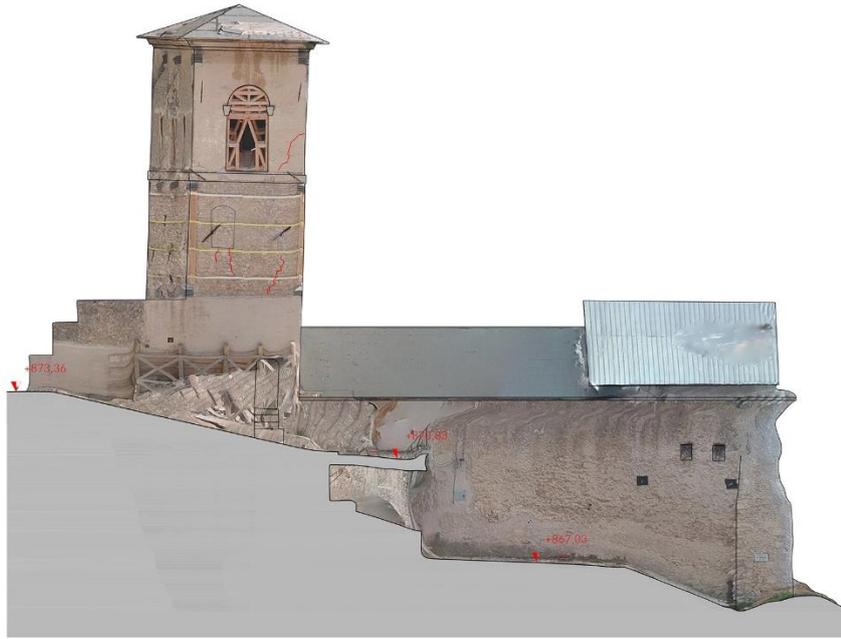


Pianta del campanile



Prospetto Nord-Est



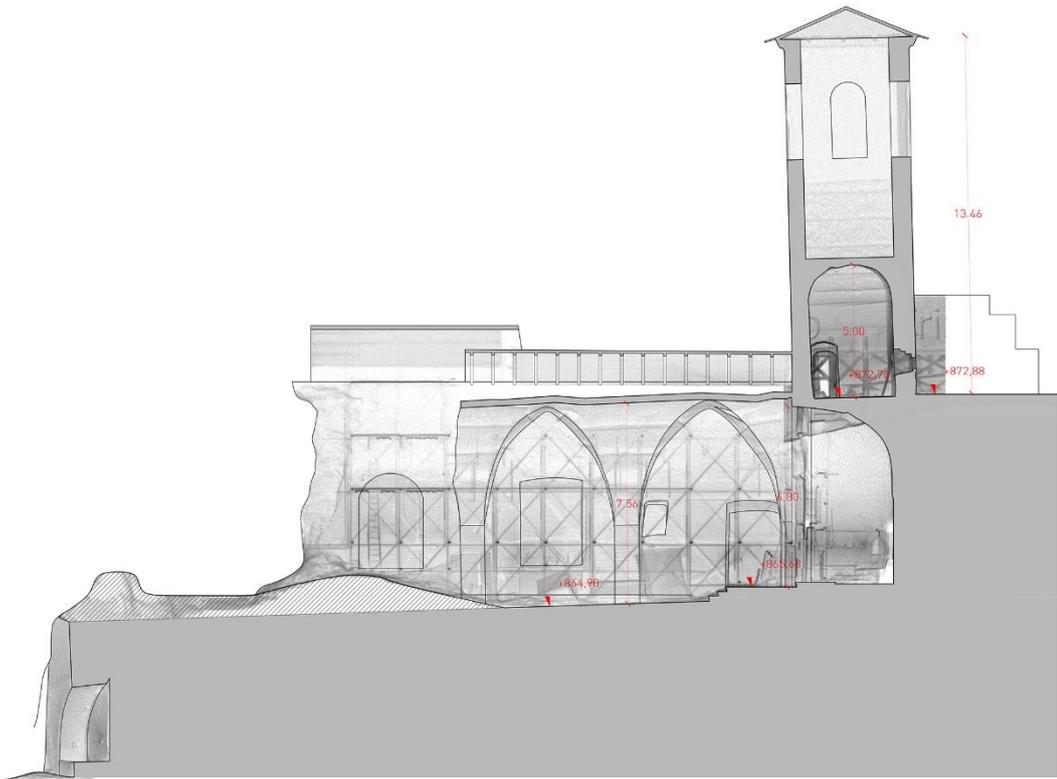


Prospetto Nord-Ovest

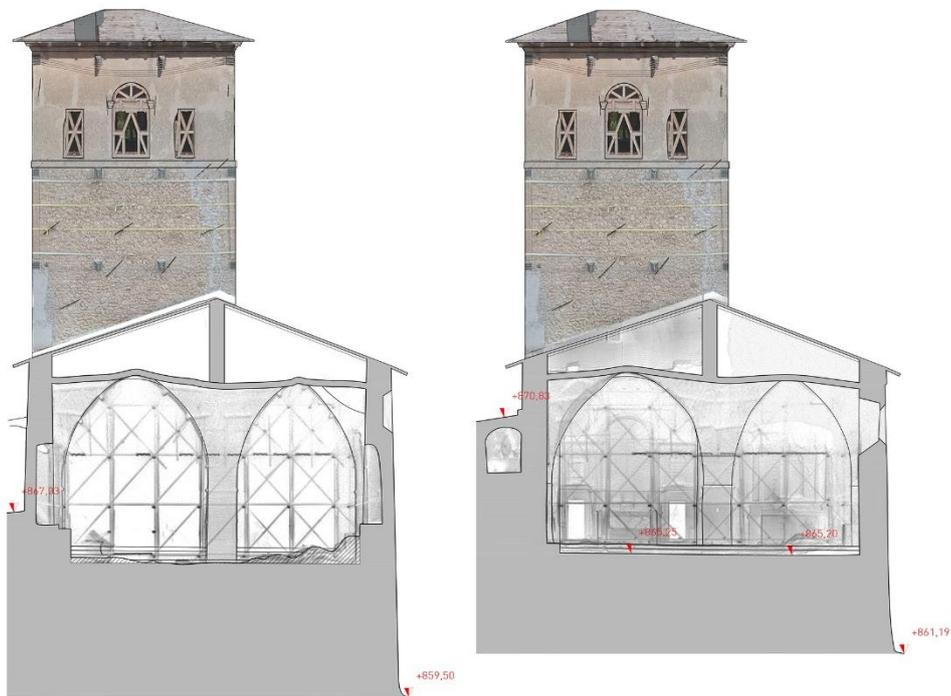


Prospetto Sud-Est





Sezione AA



Sezione BB

Sezione CC



Figura 4.22 Elaborati bidimensionali

4.3.4 Il modello volumetrico dei macroelementi

Il dato acquisito e la sua rielaborazione affrontata nei capitoli precedenti “può essere considerato come un elemento geometrico quantitativo (coordinate spaziali) che deve essere interpretato qualitativamente (con nesso di contiguità, consecutività, distacco, ecc..) per offrire la possibilità di estendere i gradi di correlazione del carattere veramente descrittivo del reale. In altre parole, se non si conosce il nesso di causalità che collega due coordinate nello spazio, e non altre, non si può scegliere di unirle fra loro per poter determinare l'estensione di quantità metriche che rappresentano un profilo o una volumetria.”²⁹ Il vincolo alla base è perciò la determinazione dello scopo della rappresentazione.

Per l'analisi dei macroelementi e dei relativi meccanismi di danno è molto importante tradurre la visualizzazione dei meri dati geometrici spaziali, equivocabili nel loro rapporto di relazione, in elementi volumetrici che rappresentano le parti del sistema architettonico che si comportano in modo unitario quando sollecitate dal sisma (cap.2.2).

Quest'operazione avviene attraverso una rappresentazione concettuale del reale. “Il percorso di investigazione che conduce alla scoperta della forma, attraverso le informazioni generate dal rilievo 3D ad alta densità, può essere fundamentalmente descritto in due ambiti di sviluppo:

- 1) Estrazione delle coordinate, linee o superfici dalla banca dati 3D per costruire quella sintesi descrittiva ottenuta normalmente attraverso il rilievo discreto finalizzato ad una rappresentazione prevalentemente definita, un percorso selettivo che punta alla sistematica riduzione delle informazioni geometriche.
- 2) Interrogazione visuale del dato metrico in scala per costruire processi di navigazione nuovi sul rapporto volumetrico.

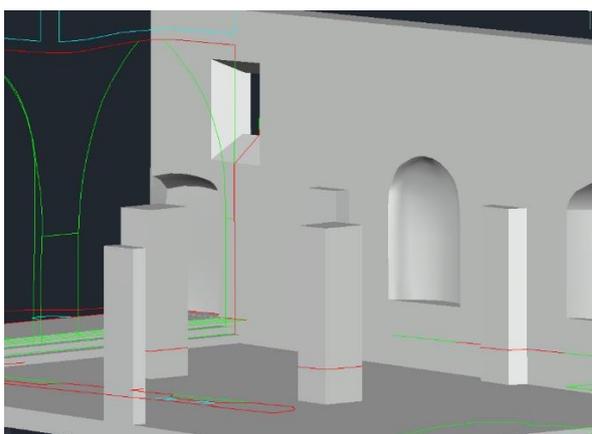
La possibilità di correlare volumetricamente i principali ambiti architettonici di ogni architettura, senza vincoli di piani sezione predeterminati, apre a possibilità investigative molto ampie, che sfruttano i potenziali di lettura del database 3D, ad esempio attraverso una *silhouette* in trasparenza. Il database 3D si presenta come

²⁹ M. Balzani, “Tecniche di rilievo con laser scanner 3D per la creazione di banche dati integrate per l'architettura e il paesaggio” in E. Chiavoni, P. Paolini (a cura di), *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell'architettura e della città*, 2004

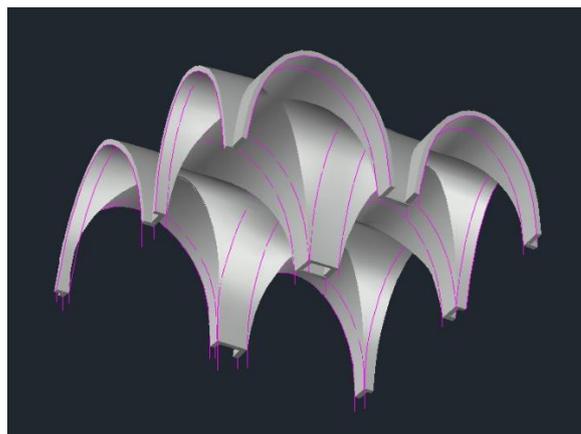
un corpo consistente, nel quale si può decidere di amputare parti, filtrare i dati, posizionare l'osservatore in condizioni libere.”³⁰

Per la ricostruzione del modello è stato scelto uno strumento CAD (*Computer Aided Design*). La modellazione dei volumi si è strutturata in tre fasi:

- 1) Importazione dei profili delle superfici rilevate nello spazio 3D vettorializzate precedentemente attraverso la realizzazione di sezioni orizzontali e verticali.
- 2) Identificazione degli elementi che compongono il sistema architettonico (facciata, pareti laterali, volte ecc.).
- 3) Modellazione dei volumi con diverse tecniche: i volumi costituiti da superfici regolari sono stati modellati estrudendo dei poligoni e scolpendoli attraverso superfici di taglio; le volte, il cui profilo è complesso sono state modellate creando una superficie passante per una serie di generatrici delle superfici curve formate da *spline* derivate dall'uso di sezioni trasversali, la superficie è poi stata inspessita per la creazione del volume.



a



b

Figura 4.23 Modellazione dei volumi definiti da superfici regolari (a) e *spline* (b)

Gli elementi volumetrici sono stati successivamente aggregati in diversi *layer* per la suddivisione in macroelementi.

Sono stati costruiti due modelli: uno derivato dal rilievo con la nuvola di punti relativo allo stato di fatto post-sisma ed uno derivato dall'integrazione del rilievo e la documentazione relativa allo stato di fatto precedente agli eventi sismici del 2016 per la creazione di un modello volumetrico completo e la comprensione del sistema architettonico e la composizione degli elementi.

³⁰ M. Balzani, 2004

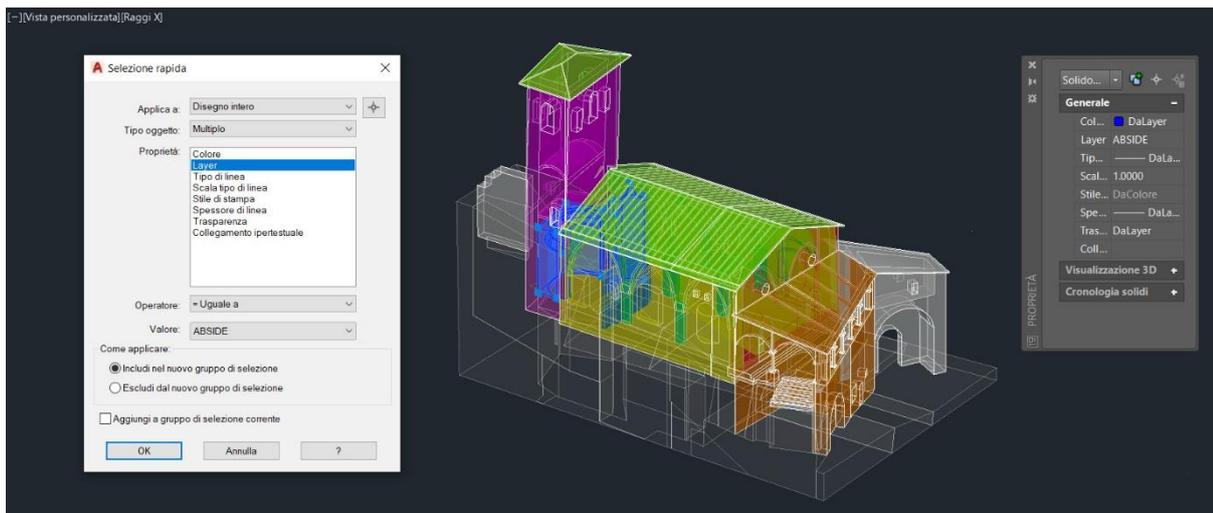


Figura 4.24 Modello volumetrico dello stato di fatto precedente al sisma derivato dall'integrazione della nuvola di punti dello stato post-sisma e la documentazione relativa allo stato di fatto precedente agli eventi sismici del 2016. Esempio di visualizzazione del sistema architettonico in trasparenza, suddiviso in macroelementi definiti da colori diversi ed interrogabile.

I metodi per l'archiviazione di dati spaziali in questa tesi non sono stati indagati, ma, sulla base di un'altra ricerca³¹, di seguito è indicata una possibile soluzione per l'organizzazione e condivisione delle informazioni legate ai macroelementi ed ai meccanismi di danno correlati. L'obiettivo è la costituzione di una banca dati GIS (*Geographic Information System*) finalizzata alla valutazione del rischio sismico a livello territoriale dei beni architettonici armonizzata secondo la direttiva INSPIRE (*Infrastructure for spatial information in Europe*).

“Il tempo e le risorse dedicati a ricercare i dati territoriali esistenti o a decidere se possano essere utilizzati per una finalità particolare rappresentano un ostacolo decisivo allo sfruttamento ottimale dei dati disponibili.”³² La direttiva INSPIRE, entrata in vigore il 15 maggio 2007, mira a creare un'infrastruttura di dati territoriali dell'Unione europea al servizio delle attività e politiche dell'UE che potrebbero avere un impatto sull'ambiente. Questa infrastruttura europea di dati territoriali consentirà la condivisione di informazioni spaziali ambientali tra le organizzazioni del settore pubblico, faciliterà l'accesso del pubblico alle

³¹ E. Colucci, F.Noardo, F. Matrone, A. Spanò, A. Lingua, *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

³² Direttiva 2007/2/CE

informazioni spaziali in tutta Europa e contribuirà alla condivisione delle politiche oltre i confini.³³

La ricerca dal titolo “*High-level-of-detail semantic 3D GIS for risk and damage representation of Architectural Heritage*”³⁴ 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 possono essere considerati *Building Part*, la cui definizione secondo INSPIRE è “*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.

Lo studio si propone di catalogare dati relativi ai meccanismi di danno e vulnerabilità dei macroelementi, nonché quella complessiva dell’edificio. Ogni macroelemento è collegato ad uno o più meccanismi di danno, a cui è assegnato l’indice di vulnerabilità e l’analisi del meccanismo.

Successivamente lo studio descrive come generare, a partire da un modello CAD, le geometrie 3D per il database, un’operazione complessa che implica seri problemi di interoperabilità tra gli strumenti oggi disponibili:

“Si è deciso di importare il file .igs 3D (IGES) da Autocad, in 3DReshaper, permettendo la conversione della geometria solida in *mesh* poligonale ed esportandola nuovamente in .dxf da questo software. Infine, la *mesh* è stata importata in ArcScene (da ESRI). La piattaforma GIS riconosce il modello come geometria rappresentata da punti, poligoni e polilinee. Dopo la creazione del *database*, l’entità del modello è stata popolata in QGIS, importando il *shapefile* da ArcScene. Per inserire la geometria del modello (formato multipoligono) in PostGIS è stato necessario impostare il tipo di geometria in PostgreSQL come “*geometry MultyPolygonZ*”. Dopo aver ottenuto il modello, è stato possibile suddividere le geometrie secondo i macroelementi ed associare le informazioni ad ognuna di esse.”³⁵

³³ INSPIRE KNOWLEDGE BASE, www.inspire.ec.europa.eu

³⁴ E. Colucci, F.Noardo, F. Matrone, A. Spanò, A. Lingua, 2018

³⁵ E. Colucci, F.Noardo, F. Matrone, A. Spanò, A. Lingua, 2018

Capitolo 5

Valutazione della vulnerabilità sismica di Sant'Andrea

5.1 Letture con l'ausilio del modello 3D

L'ausilio del modello 3D consente di effettuare analisi 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 visiva come principale strumento di analisi.

La chiesa in oggetto, successivamente al sisma del 30 ottobre 2016, si presenta fortemente danneggiata dal sisma, in modo consistente nella porzione anteriore (fig. 5.1). Essa risulta infatti colpita da un crollo totale della facciata e del portico. Questa situazione suggerisce immediatamente che il manufatto abbia ricevuto una sollecitazione longitudinale. Questa ipotesi è consolidata dall'analisi delle fessurazioni presenti sulle pareti laterali dell'aula e del campanile (fig. 4.22).

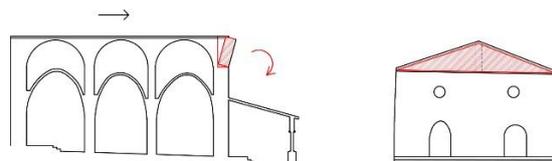


Figura 5.1 La chiesa di Sant'Andrea dopo le scosse sismiche del 2016. (fotografie scattate da drone durante il rilievo fotogrammetrico).

Una prima scossa, del 26 ottobre 2016, danneggiò in modo significativo la struttura (fig. 5.2 e 5.3). Due foto pubblicate dalla rivista “Lavoce” mostrano la facciata con evidente meccanismo di disgregazione del timpano e il portico. Nella seconda immagine (fig. 5.3), si può notare il principio di ribaltamento della facciata e un meccanismo di rottura del sistema di archi del portico. Inoltre, è visibile una fessurazione che si genera da una delle due finestre in facciata.



a

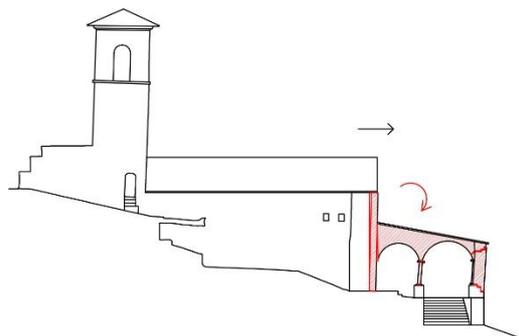


b

Figura 5.2 Stato del danno dopo le scosse del 26 ottobre 2016 (a) e schema del meccanismo di disgregazione del timpano (b). (fotografia reperita dal sito www.lavoce.it)



a



b

Figura 5.3 Stato del danno dopo le scosse del 26 ottobre 2016. Principio di ribaltamento della facciata (a), schema del meccanismo di danno (b) e mappatura delle fessurazioni (c). (immagine reperita dal sito www.lavoce.it)



Figura 5.4 Stato del danno dopo le scosse del 26 ottobre 2016. Principio di ribaltamento della facciata. Mappatura delle fessurazioni. (immagine reperita dal sito www.lavoce.it)

Il tetto del portico è stato soggetto a recente restauro nell'anno 2009. Questo intervento ha previsto il rinforzo delle travi lignee con travi IPE controventate da un sistema di bande metalliche che hanno reso il sistema molto rigido (fig 3.5). La soluzione progettuale ha però compromesso la stabilità del sistema architettonico. Come è visibile nella figura 5.4, in concomitanza con il principio di ribaltamento della facciata si è innescato un meccanismo nel portico che lo ha reso instabile. Il risultato è un quadro critico in cui il portico aggrava il principio di ribaltamento della facciata. Nel punto di ancoraggio è infatti possibile vedere anche delle fessurazioni (fig. 5.5).

La seconda scossa del 30 ottobre 2016 comportò il crollo della porzione anteriore composta dalla facciata, la prima campata di volte, il portico e la porta cittadina. Le indagini sono state condotte con l'ausilio della *mesh* texturizzata. Questa modalità di lettura, attraverso un modello navigabile, ha permesso l'ispezione della porzione danneggiata da diversi punti di vista.



a



b



c

Figura 5.5 Indagine della porzione anteriore attraverso il modello 3D. Mappatura delle fessurazioni



a



b



c

Figura 5.6 Indagine della porzione anteriore attraverso il modello 3D. Riconoscimento delle diverse porzioni di muratura non ammassate o separate dalle fessurazioni.

L'indagine della porzione anteriore attraverso il modello 3D ha evidenziato delle criticità legate al muro di sostegno delle colonne del portico:

- a) E' diviso in due porzioni non ammortate (in rosso e blu)
- b) Una delle due porzioni (in rosso), caratterizzata da un arco, è addossata ad un altro muro
- c) Il muro divide il corpo principale della chiesa dalla porta cittadina (in giallo) e non risulta ammortato ad entrambi gli elementi

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. 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.

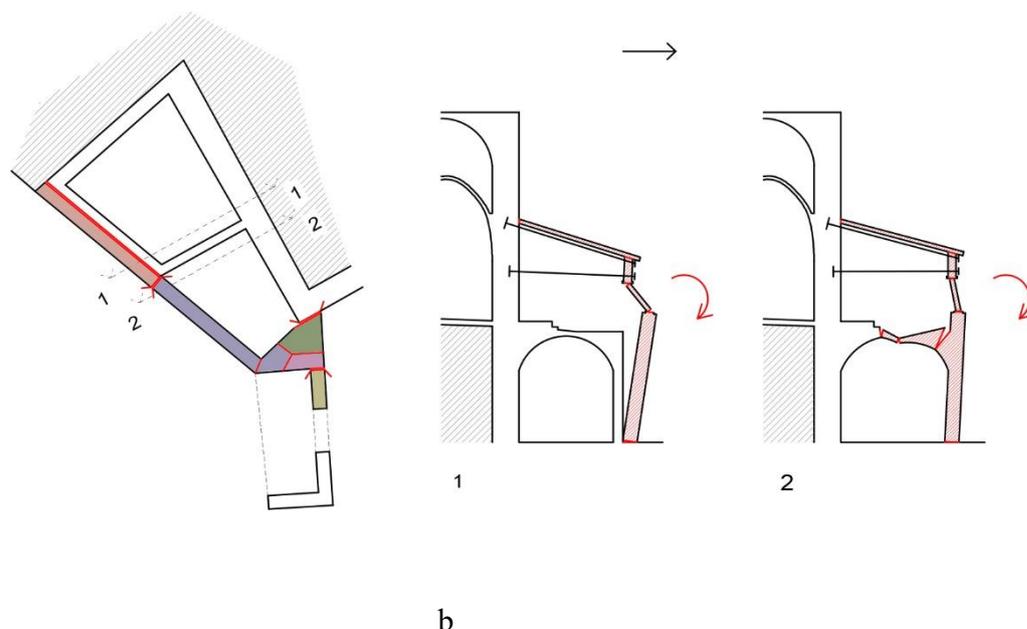


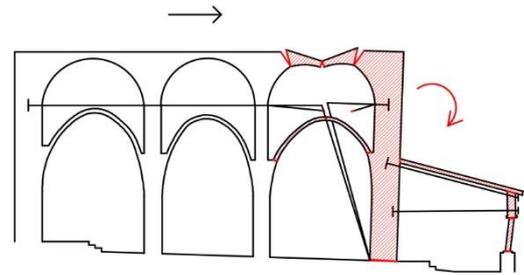
Figura 5.7 Schema che illustra la mancanza di collegamenti tra il muro di sostegno del portico, la porta cittadina e il corpo della chiesa (a). Schema dei meccanismi di danno che si sono innescati lungo il muro, che presenta due situazioni diverse (b).

Le travi IPE ancorate al muro della facciata, 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. Il meccanismo si è manifestato in modo chiaro con una rottura diagonale delle pareti laterali in corrispondenza della connessione con la facciata.

Il muro di facciata ribaltandosi ha determinato il crollo dell'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. La presenza di radiciamenti lignei che agganciavano la facciata alle pareti laterali a circa mezza altezza non ha potuto impedire il ribaltamento.



a



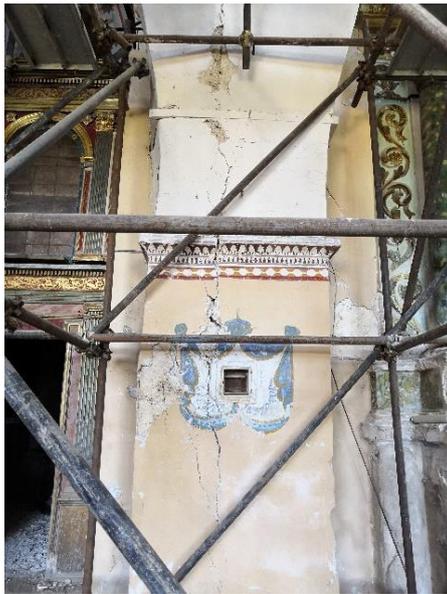
b

Figura 5.8 Crollo della porzione anteriore dell'aula della chiesa: si può notare la rottura diagonale delle pareti laterali e uno radiciamenti lignei presenti in esse, uno per parete; un tirante agganciava la facciata e stabilizzava il sistema di archi a sostegno del colmo (a). Schema del meccanismo di ribaltamento della facciata (b). (immagine reperita dal sito www.google.it/maps).

La responsabilità di un eventuale cedimento del terreno risulta poco significativa all'interno di un quadro fortemente compromesso dalla mancanza di collegamenti tra gli elementi in muratura alla base del portico e aggravato da un intervento di irrigidimento del portico e ancoraggio alla facciata.

Le volte a crociera all'interno risultano fortemente danneggiate. Le due campate congiunte alla facciata sono interamente crollate. Le altre quattro risultano molto fessurate ed alcune porzioni crollate, compromettendo la stabilità delle volte. Non sono presenti catene. I pilastri a sostegno delle volte che separano le due navate presentano una fessurazione che le percorre per tutta l'altezza, proseguendo lungo la volta (fig. 5.9). Queste tracce sono coerenti con l'evoluzione della chiesa, le cui navate risultano costruite in due tempi.

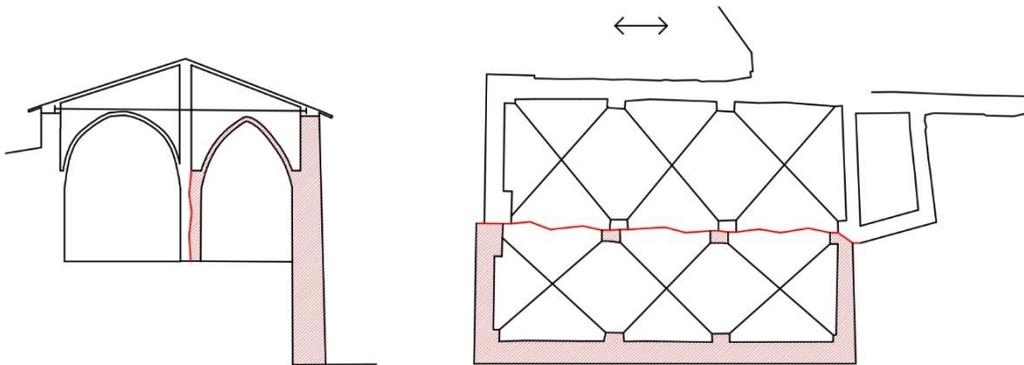
La presenza delle impalcature e dei pannelli a sostegno delle volte ha impedito una restituzione di una nuvola di punti sufficientemente densa e ricca di informazioni tale da consentirne una trasformazione in mesh che potesse essere di ausilio all'analisi.



a



b



c

Figura 5.9 Lesione sui pilastri (a), sulle volte in corrispondenza dell'ampliamento (b) e schema del meccanismo (c). (immagini scattate durante il sopralluogo).

L'azione longitudinale è confermata dalle fessurazioni presenti sui pilastri e sulle volte (fig. 5.9).

Un altro indizio sulla direzione dell'azione sismica, come già anticipato, si osserva nelle fessurazioni oblique presenti nelle pareti laterali, in particolare modo in quella sud-est, da cui una ha origine da un'apertura. Queste lievi fessurazioni trovano corrispondenza all'interno, dove quella relativa dell'apertura risulta visibile in modo più marcato. La parete sud-ovest si presenta in buono stato, essendo infatti in parte contro-terra. Un irrobustimento esterno in prossimità della connessione con la facciata ha determinato un crollo coerente con il meccanismo di ribaltamento della facciata ma meno evidente rispetto all'altra parete. Sono presenti fessurazioni di entità molto lieve in prossimità di due piccole aperture. Sul retro della chiesa (a nord-ovest) la sollecitazione longitudinale ha determinato pochi danni poiché l'aula e l'abside maggiore sono in parte contro-terra.

Per quanto riguarda gli absidi è presente una fessurazione che taglia l'abside più piccolo e una che taglia l'abside maggiore, che ha origine da un'apertura murata. La torre campanaria ha risposto bene alle sollecitazioni del sisma. Questo è dovuto alla muratura uniforme e di buona qualità delle pareti e ad un buon sistema di tiranti, le cui chiavi sono ben visibili in facciata. Le pareti presentano fessurazioni stuccate in seguito al sisma del 1979. La cella campanaria risulta rinforzata da radiciamenti, le cui chiavi si notano all'esterno. Il tetto è crollato senza causare ulteriori danni.

L'ausilio del modello 3D ha consentito lo studio della composizione architettonica di questa porzione della chiesa attraverso alcune sezioni della nuvola di punti.

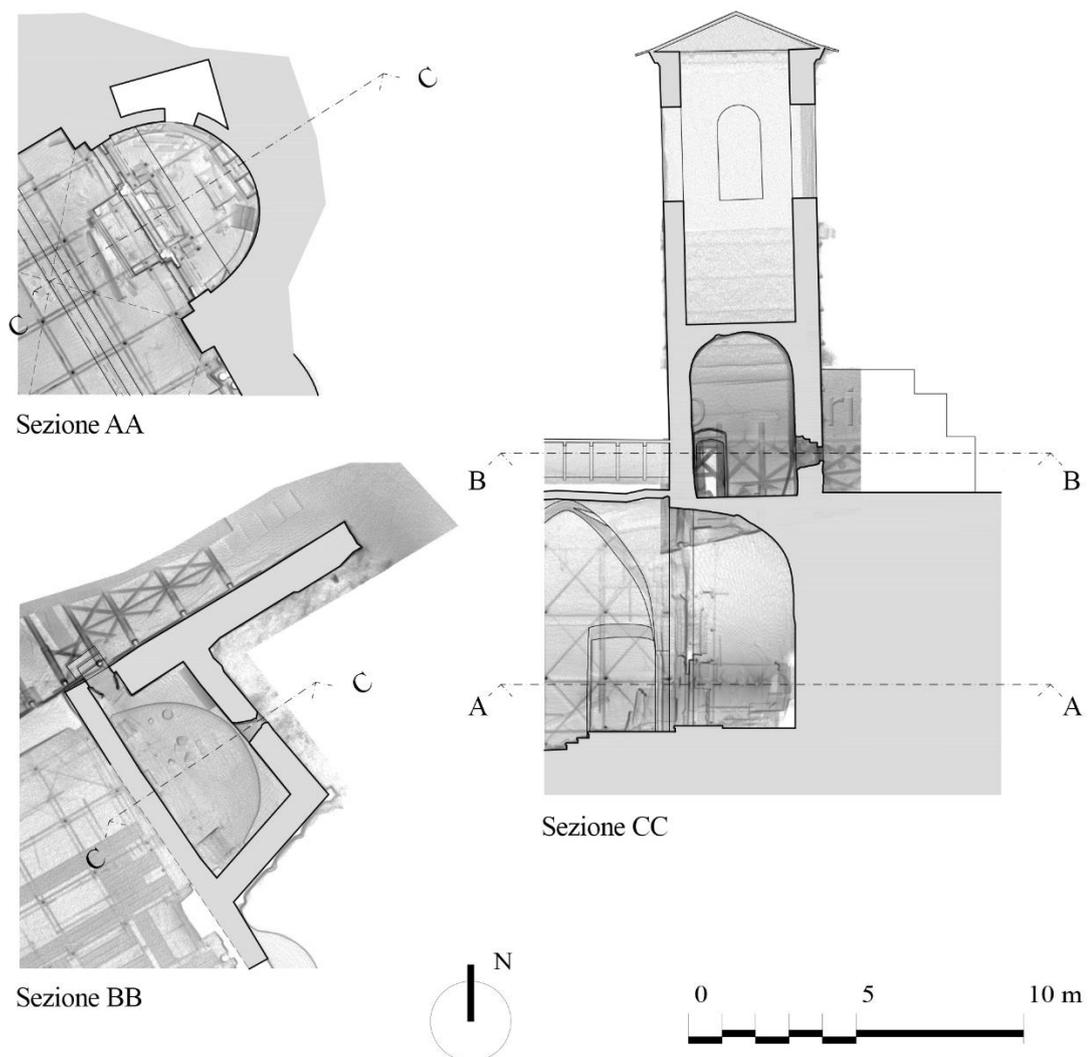


Figura 5.10 Rappresentazione bidimensionale della torre campanaria generata dalle sezioni della nuvola di punti.

Dalle elaborazioni bidimensionali 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.

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.³⁶

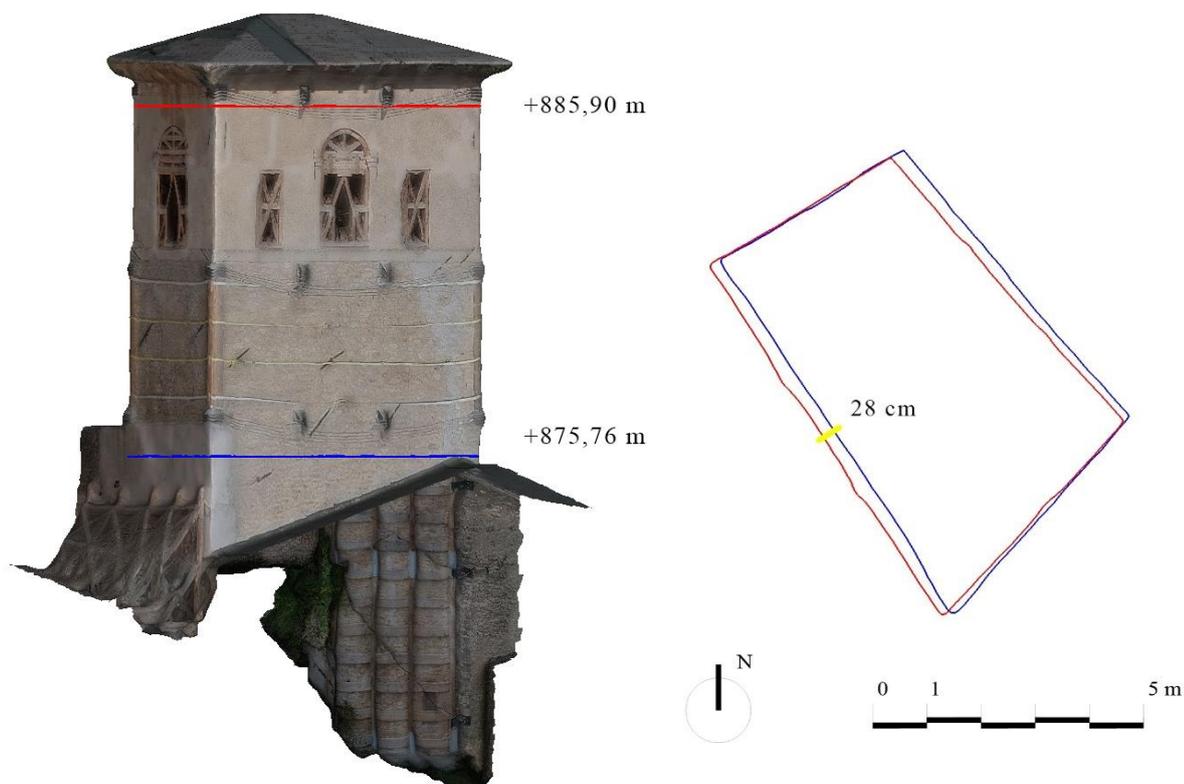


Figura 5.11 Analisi del fuori-piombo della torre campanaria. Profilo della *mesh* alla base (blu) e profilo della *mesh* alla sommità della torre (rosso).

³⁶ G. Sammartano, A. Spanò, *High scale 3D modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5/W1, 2017 GEOMATICS & RESTORATION – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, 2017

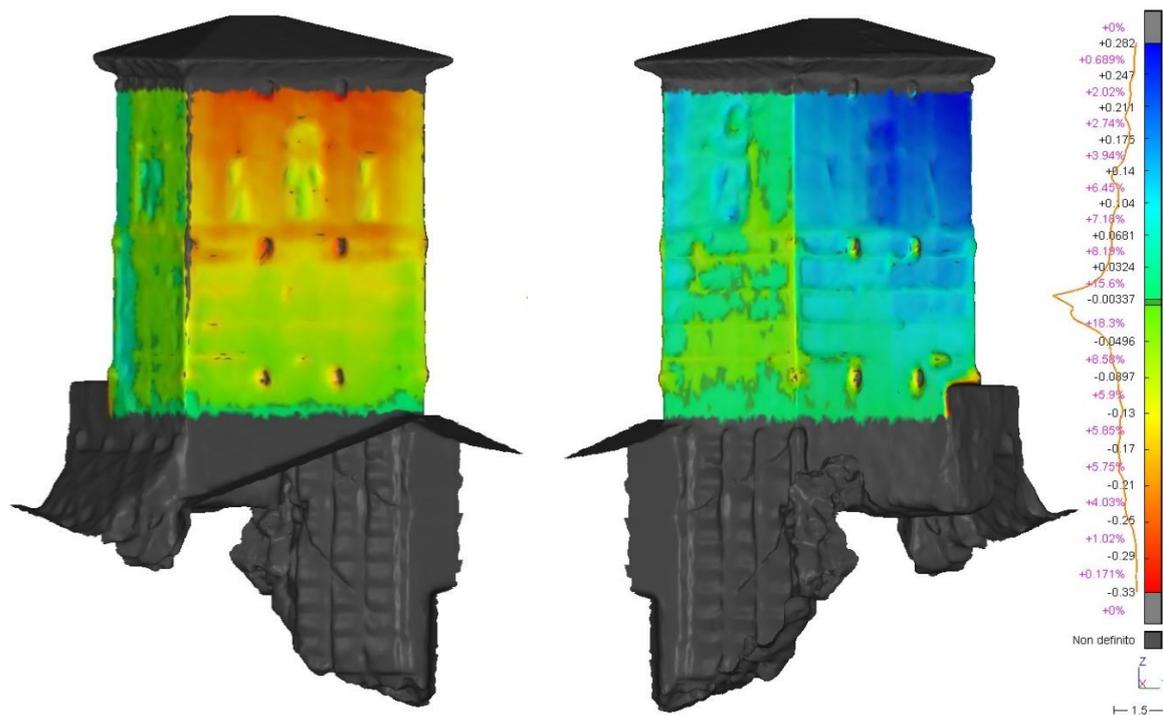


Figura 5.12 Analisi del fuori-piombo della torre campanaria. Misura della distanza tra la *mesh* della torre e il profilo alla base estruso lungo la verticale.

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.

5.2 Applicazione del modello semplificato indicato dalle linee guida

La direttiva in materia di prevenzione del rischio sismico del patrimonio culturale traccia le linee guida per una valutazione che si differenzia a seconda del livello di approfondimento e della tipologia di manufatto in esame. La valutazione a scala territoriale (LV1) della tipologia chiesa consente l'applicazione di un modello semplificato, preliminare, che prevede un coefficiente di sicurezza: il fattore di confidenza. Il fattore di confidenza permette di valutare il grado di attendibilità delle informazioni alla base.

Tabella 5.1 Fattori parziali di confidenza assunti.

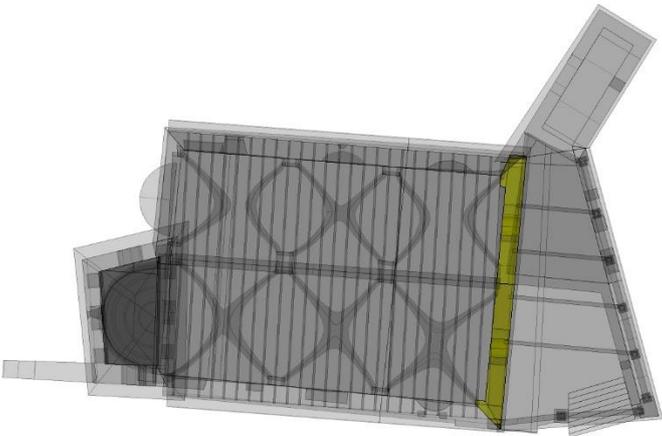
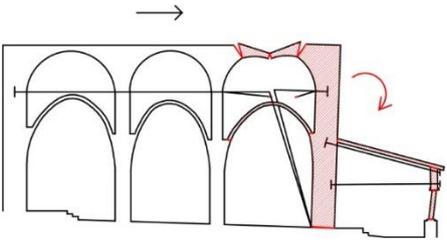
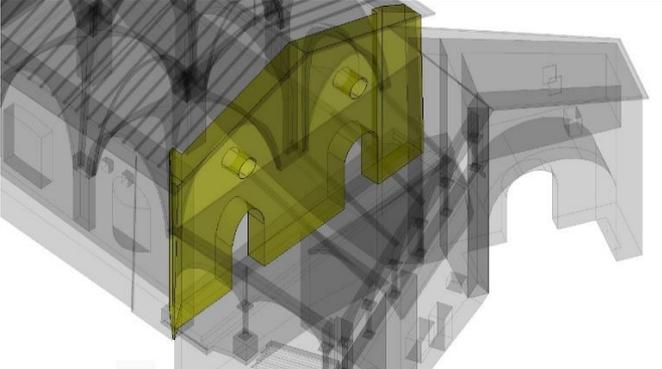
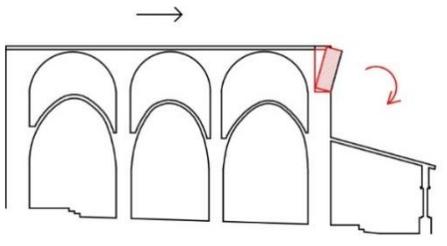
Rilievo geometrico	Rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondante su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche)	$F_{C1} = 0.06$
Proprietà meccaniche dei materiali	Parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C1} = 0.12$
Terreno e fondazioni	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità di informazioni sulle fondazioni	$F_{C1} = 0.06$

$$F_C = 1.24 \quad (8)$$

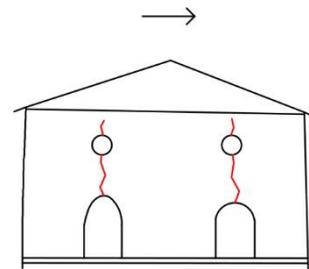
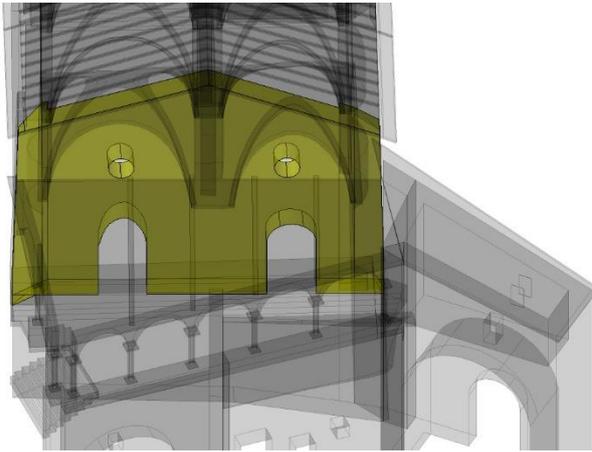
In seguito all'acquisizione di tutte le informazioni relative al manufatto che consentono l'applicazione del metodo illustrato nel capitolo 2.1.1 è possibile procedere con la definizione dei macroelementi e i meccanismi di danno correlati e lo studio degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici.

Nella tabella seguente sono elencati i meccanismi di danno associati ai macroelementi. Per ogni meccanismo sono indicati i presidi antisismici (v_p), gli indicatori di vulnerabilità (v_i) a cui viene assegnato un giudizio sull'incidenza da 0 a 3. Secondo la tabella 2.1 viene calcolato il punteggio relativo a v_p e v_i e calcolato il punteggio relativo alla probabilità di innesco del meccanismo ($v_p - v_i$): da -3 molto improbabile a 3 molto probabile.

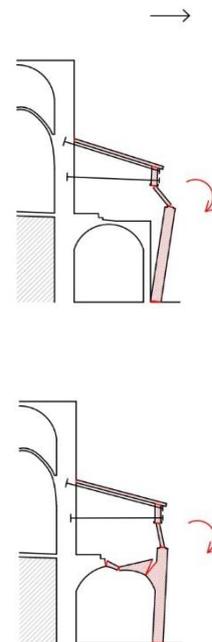
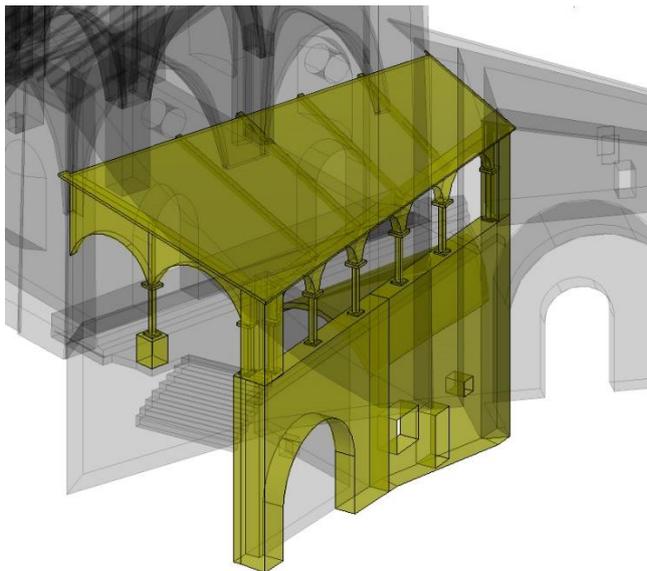
Tabella 5.2 Meccanismi di danno associati agli indicatori di vulnerabilità, ai presidi antisismici con relativi punteggi che generano il punteggio di vulnerabilità vk

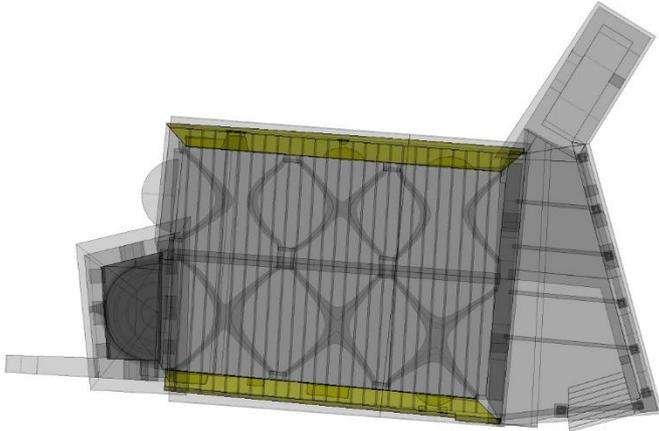
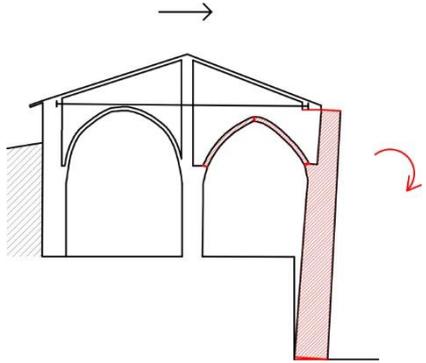
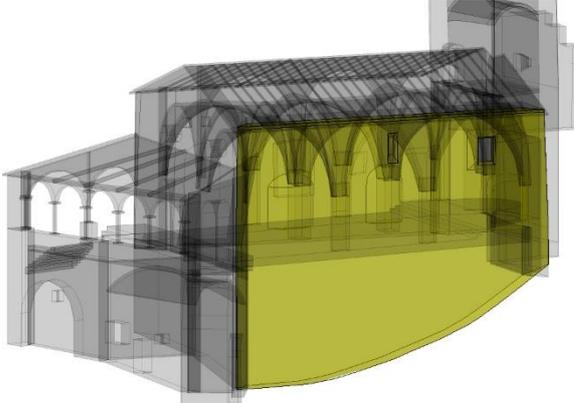
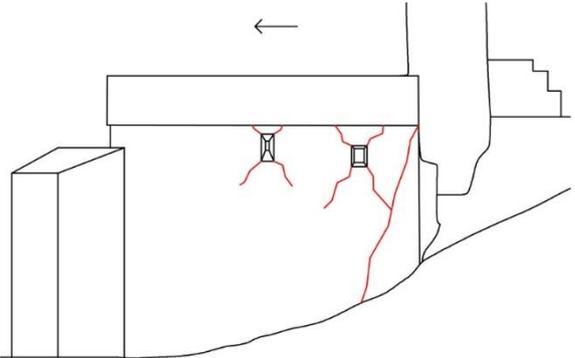
1	RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA	v	Presenza di catene longitudinali	0	1	2
			Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)	0		
			p	Ammorsamento di buona qualità tra la facciata ed i muri della navata		
		v	Presenza di elementi spingenti	2	3	
			Presenza di grandi aperture nelle pareti laterali in vicinanza del cantonale	0		
			i	Portico a forte rischio ribaltamento ancorato alla facciata		
						
2	MECCANISMI NELLA SOMMITA' DELLA FACCIATA	v	Presenza di collegamenti puntuali con gli elementi della copertura	0	0	2
			Presenza di controventi di falda	0		
			p	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)		
		v	Presenza di grandi aperture (rosone)	0	2	
			Presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso	0		
			i	Cordiali rigidi, trave di colmo in c.a., copertura pesante in c.a.		
						

3	MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA	V	Presenza di una catena in controfacciata	0	0	0
			P	Contrasto laterale fornito da corpi addossati; chiesa inserita in aggregato		
		V	Presenza di aperture di grandi dimensioni o il numero elevato (anche se tamponate)	0	0	
			i	Elevata snellezza (rapporto altezza/larghezza)		

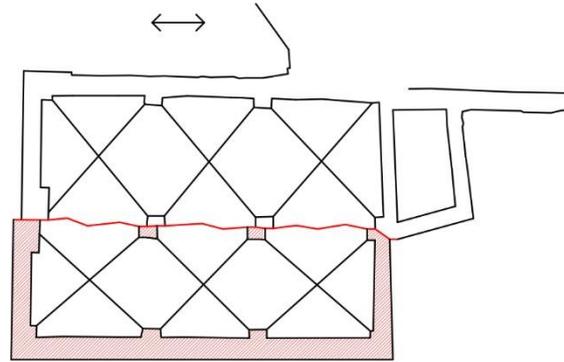
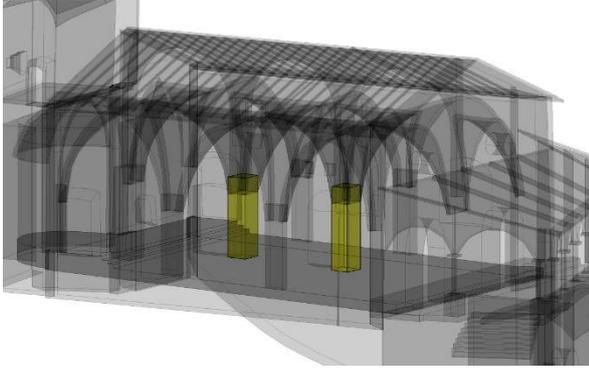


4	MECCANISMI DEL PORTICO	V	Presenza di catene	1	1	2
			P	Presenza di colonne/pilastrini di adeguata dimensione		
		V	Presenza di elementi spingenti (archi, volte)	3	3	
			i	Muro di sostegno non ammortato		

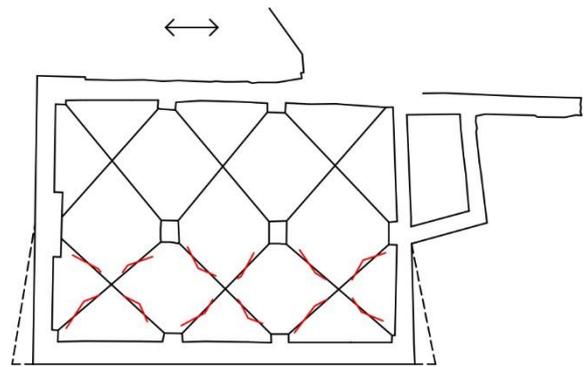
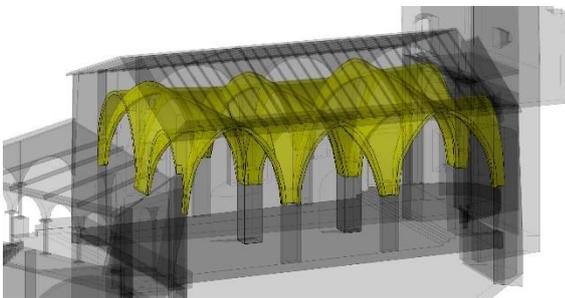


5	RIBALTAMENTO DELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA TRASVERSALE)	v	Presenza di paraste o contrafforti esterni	0	1	2
			Presenza di corpi annessi adiacenti	1		
		p	Presenza di catene trasversali	0	3	
			v	Presenza di pareti con elevata snellezza		
		i	Presenza di volte e archi	2		
						
6	MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)	v	Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità	3	3	-3
			Presenza di buoni architravi nelle aperture	0		
		p	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	0	0	
			v	Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore		
		i	Cordoli in c.a. molto rigidi, copertura pesante in c.a.	0		
						

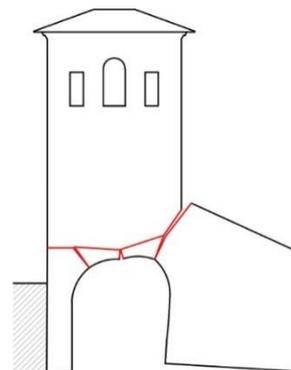
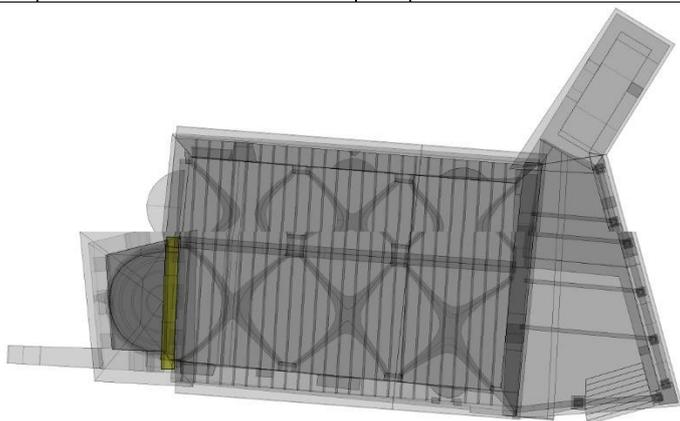
7	RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO NELLE CHIESE A PIU' NAVATE	v	Presenza di catene longitudinali	0	1	1
		p	Presenza di contrafforti in facciata	1		
		v	Presenza di volte pesanti nella navata centrale	0	2	
			i	Copertura pesante che grava sul colonnato in modo asimmetrico		



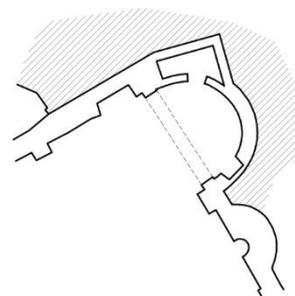
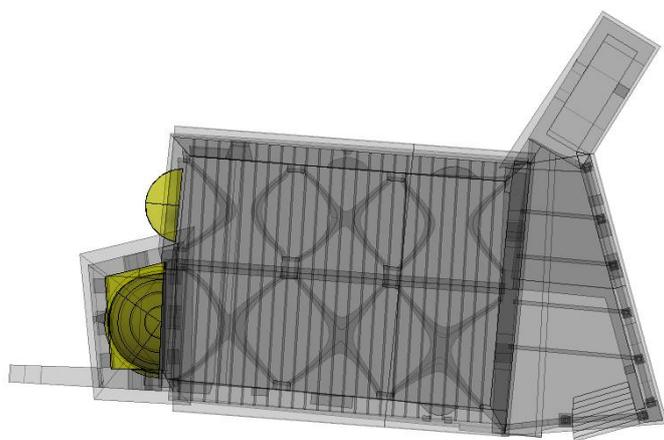
8	MECCANISMI DELLE VOLTE	v	Presenza di catene in posizione efficace	0	1	2	
		p	Presenza di rinfianchi o frenelli	1			
		v	Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura	0	3		
			i	Volte in foglio, specialmente su campate di grande luce			0
			Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte	3			



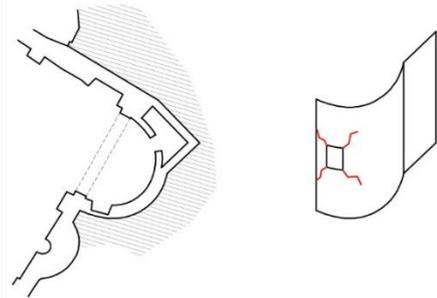
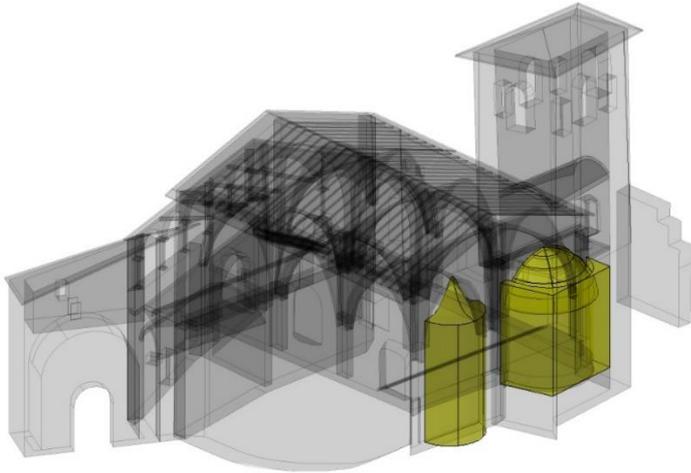
13	MECCANISMO ARCO TRIONFALE	v p	Pareti di contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula, transetto, altri corpi di fabbrica)	3	3	-2
			Presenza di una catena in opposizione efficace	0		
			Conci di buona fattura e/o adeguato spessore dell'arco	0		
		v i	Presenza di copertura pesante	1	1	
			Presenza di cupola o tiburio	0		



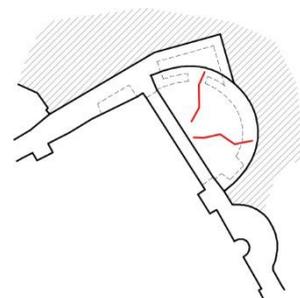
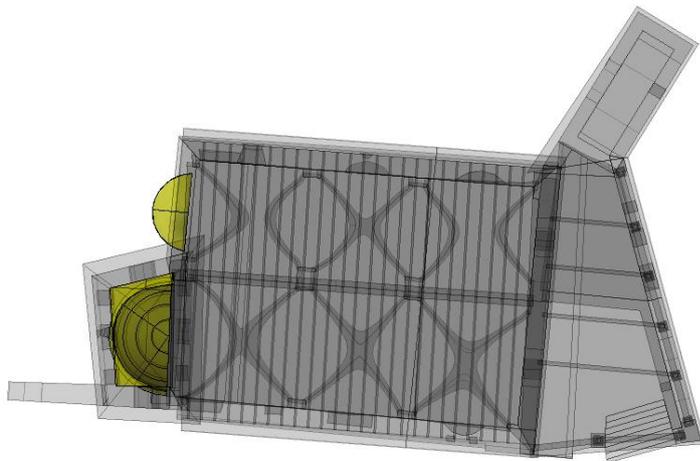
16	RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE	v p	Presenza di cerchiatura (semicircolare e poligonale) o catene (rettangolare)	0	3	-3
			Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati)	3		
			Presenza di copertura controventata, non spingente	0		
		v i	Presenza di un forte indebolimento per la presenza di aperture (anche tamponate) nelle pareti	0	0	
			Presenza di volte spingenti	0		
			Cordoli rigidi, copertura pesante, puntoni di falda in c.a.	0		



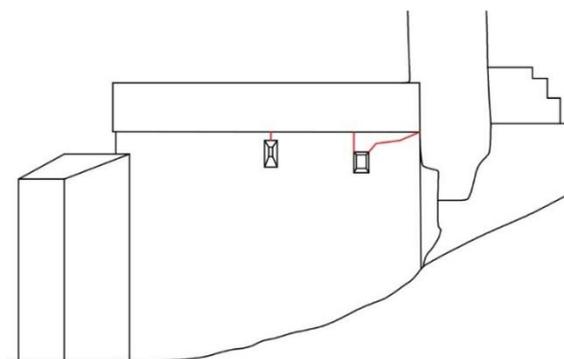
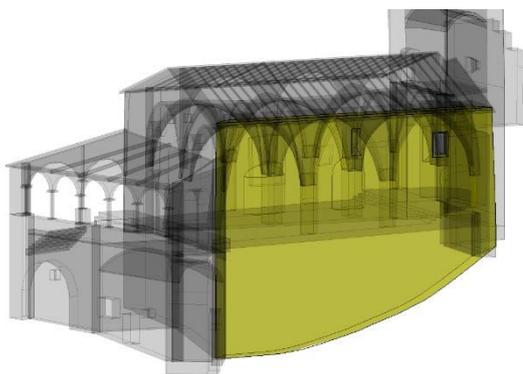
17	MECCANISMI DI TAGLIO NELL'ABSIDE	V P	Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità	3	3	-2
			Presenza di buoni architravi nelle aperture	0		
			Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	0		
		V i	Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante	0	1	
			Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore	0		



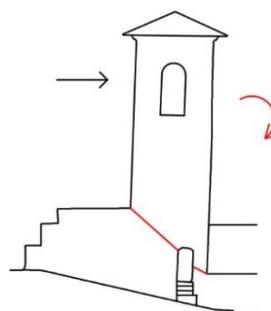
18	MECCANISMI DELLE VOLTE DELL'ABSIDE	V P	Presenza di catene in posizione efficace	0	2	-2
			Presenza di rinfranchi o frenelli	2		
		V i	Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura	0	0	
			Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce	0		
			Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte	0		

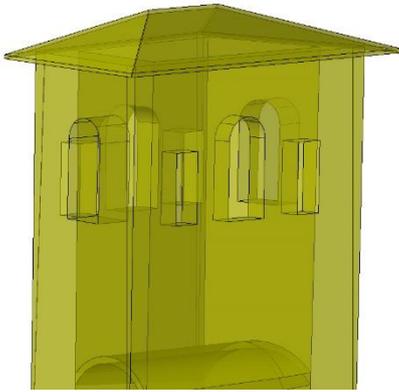
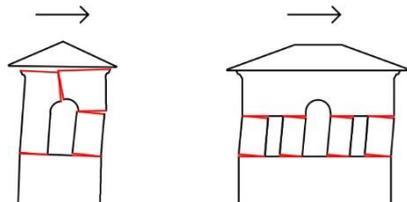


19	MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA – PARETI LATERALI DELL’AULA	V p	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	3	3	-2
			Presenza di collegamenti delle travi alla muratura	1		
			Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)	3		
			Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura	3		
		V i	Presenza di copertura staticamente spingente	0	1	
			Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante	1		



27	MECCANISMI DELLA TORRE CAMPANARIA	V p	Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità	2	3	-2
			Presenza di catene ai diversi ordini	3		
			Presenza di adeguata distanza dalle pareti della chiesa (se adiacente)	0		
			Presenza di buon collegamento con le pareti della chiesa (se inglobata)	2		
		V i	Presenza di aperture significative su più livelli	0	1	
			Vincolo asimmetrico sulle murature alla base (torre inglobata)	0		
			Appoggia irregolare a terra della torre (presenza di archi su alcuni lati, pareti a sbalzo)	1		



28	MECCANISMI DELLA CELLA DELLA TORRE CAMPANARIA	v	Presenza di piedritti tozzi e/o archi di luce ridotta	1	2	-1
		p	Presenza di catene o cerchiature	1		
		v	Presenza di copertura pesante o di altre masse significative	0	1	
		i	Presenza di copertura spingente	1		
						

La qualità dell'impianto non appare ottima e la valutazione tramite la scheda di rilievo restituisce un quadro negativo. L'elevato rischio sismico della zona richiede infatti accorgimenti particolari ed attenti. A questa lista possono essere aggiunti altri elementi che emergono, significativi per la valutazione del comportamento sismico della chiesa. In questo caso specifico appare indispensabile poiché è stato evidenziato un quadro critico legato alla porzione anteriore, che interessa la facciata e il portico, la parete laterale nord-est e l'ampliamento a due navate. E' opportuno segnalare i meccanismi a cui è assegnata una vulnerabilità particolarmente alta, maggiore o uguale a 2:

- Ribaltamento della facciata
- Meccanismi nella sommità della facciata
- Meccanismi del portico (ribaltamento)
- Meccanismi delle volte

Ai meccanismi presenti si assegna $\rho_k = 1$ ad eccezione del meccanismo 4 ($\rho_k = 0.5$) secondo la normativa. Questo metodo consente di attribuire un peso ad ogni meccanismo di danno e calcolare la vulnerabilità complessiva della struttura.

$$i_v = 0.45 \quad (2.1)$$

L'indice di vulnerabilità è un dato significativo che consente il calcolo dei valori dell'accelerazione di picco al suolo corrispondenti allo stato limite di danno (SLD) e allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

$$a_{SLDS} = 0.051 \text{ g} \quad (2.2)$$

$$a_{SLVS} = 0.203 \text{ g} \quad (2.3)$$

Il periodo di riferimento considerato è calcolato come la vita nominale V_N di 50 anni a cui è applicato il coefficiente di uso relativo alla classe III di 1,5.

$$V_R = 50 \cdot 1.05 = 75 \text{ anni} \quad (2.4)$$

Le NTC forniscono per 10751 punti del reticolo di riferimento i parametri dell'azione sismica. I valori del punto geografico di interesse non sono noti ma sono calcolabili attraverso una media pesata tra i 4 punti del reticolo in cui è inserito.

$$T_{R1} = 75 \text{ anni} \quad s1 = 1.8 \quad I_S = 0.04 \quad (2.7)$$

$$T_{R2} = 712 \text{ anni} \quad s2 = 1.536 \quad V_N = 2 \text{ anni} \quad (2.9)$$

$$a1 = 0.123 \text{ g}$$

$$a2s2 = 0.444 \text{ g}$$

$$a2 = 0.289 \text{ g}$$

$$T_{SLV} = 28 \text{ anni} \quad (2.6)$$

$a2s2$ è l'accelerazione di picco al suolo attesa (a_{SLV}). 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 provvisionali si può assumere un valore di vita nominale pari a 10 anni.”³⁷ 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.

³⁷ Dir. PCM 9 febbraio 2011, cap. 2.4, “Livelli di sicurezza sismica”, p.15

5.3 Schede di analisi statica integrabili derivate dal modello 3D

La definizione delle volumetrie del modello 3D consente le analisi rivolte all'individuazione delle condizioni di equilibrio. Lo studio della nuvola di punti ha messo alla luce due situazioni in particolare che meritano un approfondimento attraverso due schede:

- 1) la snellezza della parete laterale nord-est dell'aula
- 2) il fuori piombo della parete sud del campanile.

La parete sud del campanile è caratterizzata da un fuori-piombo evidenziato durante l'analisi della nuvola di punti e anche dall'appoggio su un arco. Questo quadro critico si traduce in una significativa inclinazione della parete fuori dal proprio piano. In caso di azione sismica questa parete risulta vulnerabile ed è amplificato il rischio di ribaltamento.

Il collasso della struttura muraria avviene per perdita dell'equilibrio di porzioni strutturali. L'analisi è quindi sempre rivolta all'individuazione delle condizioni di equilibrio. Una parete generica è caricata in direzione verticale dal peso proprio W che genera un momento stabilizzante M_S . Al momento stabilizzante corrisponde un momento M_R ribaltante pari al primo moltiplicato per il coefficiente sismico α .

$$M_R = \alpha \cdot M_S \quad (5.1)$$

E' possibile calcolare con una formula inversa l'accelerazione di picco al suolo corrispondente allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

$$\alpha = \frac{a}{g \cdot r} \quad a = \alpha \cdot g \cdot r \quad (5.2)$$

Dove a è l'accelerazione di picco al suolo attesa, g è l'accelerazione di gravità e r è un coefficiente che tiene conto degli spostamenti ammissibili dell'opera, pari a 2.

Scheda n.1 – Analisi della parete muraria laterale dell’aula soggetta a forza sismica ortogonale

L’analisi statica della parete dell’aula si effettua prendendo in considerazione una porzione caratteristica che corrisponde ad una campata della volta a crociera. Tale porzione comprende tutti gli elementi che innescano il meccanismo di danno:

- 1) la parete laterale dal suo centro di rotazione alla sommità, compreso il pilastro ad essa addossato su cui appoggia la volta
- 2) la porzione di volta che genera una spinta che insiste sulla parete laterale ortogonalmente
- 3) la porzione di volta opposta che si genera dalla rottura in chiave della volta a crociera
- 4) il tetto che genera una forza peso verticale

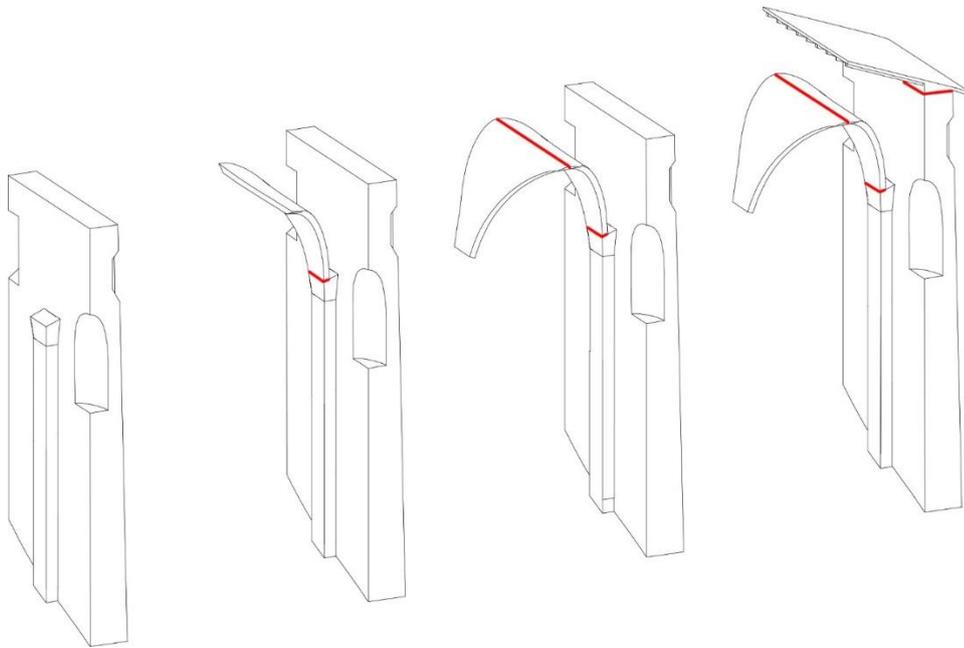


Figura 5.14 Schema degli elementi che innescano il meccanismo di danno della parete laterale. Il modello 3D per l’analisi è estrapolato dal modello volumetrico generato dalla nuvola di punti.

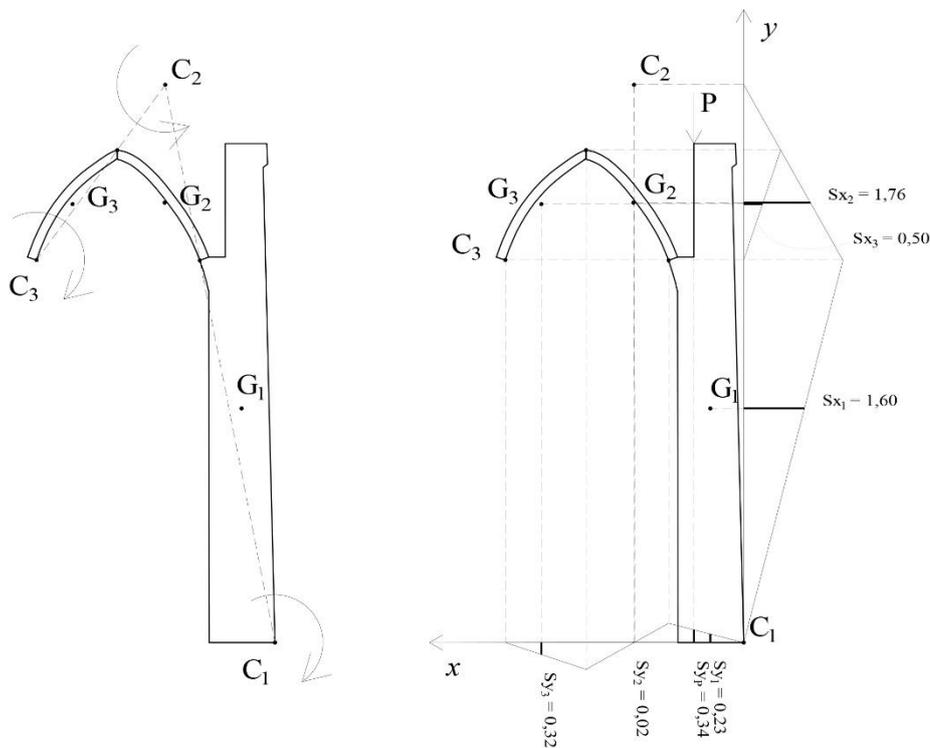
E’ presente un tirante alla sommità ma la sua influenza è da escludersi nell’ipotesi di ribaltamento poiché utile alla stabilità della copertura in calcestruzzo armato ma non a trattenere la parete laterale, infatti risulta posizionato troppo in alto. Per ogni elemento è nota la posizione del relativo centro di rotazione C e del baricentro G. Il modello 3D volumetrico consente infatti, il calcolo automatico

del volume di ogni elemento e delle coordinate del suo baricentro rispetto al centro di rotazione C_1 .

Si calcolano le forze che corrispondono ai carichi verticali stabilizzanti W_S e P . Il tetto è realizzato in calcestruzzo armato il cui peso specifico è di circa 23 KN/mc, gli altri elementi sono in muratura di pietra il cui peso specifico è di circa 20 KN/mc.

$V_1 = 92,44 \text{ mc}$	$V_3 = 2,46 \text{ mc}$	$W_{S1} = 1\ 848,80 \text{ KN}$
$X_{G1} = 0,88 \text{ m}$	$X_{G3} = 5,34 \text{ m}$	$W_{S2} = 49,00 \text{ KN}$
$Y_{G1} = 6,22 \text{ m}$	$Y_{G3} = 11,65 \text{ m}$	$W_{S3} = 49,20 \text{ KN}$
$V_2 = 2,45 \text{ mc}$	$V_P = 4,32 \text{ mc}$	$P = 99,23 \text{ KN}$
$X_{G2} = 2,91 \text{ m}$		
$Y_{G2} = 11,69 \text{ m}$		

Per l'analisi si applica il principio dei lavori virtuali imprimendo una rotazione virtuale ai corpi e calcolando gli spostamenti dei baricentri e del punto di applicazione del carico³⁸:



³⁸ Carocci F.C., Tocci C. (a cura di), *Leggendo il libro delle antiche architetture*, Roma, Gangemi, 2010, p. 116

La condizione di equilibrio si raggiunge con $M_S + \alpha M_S = 0$, quindi:

$$-W_{S1} \cdot S_{Y1} + \alpha W_{S1} \cdot S_{X1} - P \cdot S_{YP} + W_{S2} \cdot S_{Y2} + \alpha W_{S2} \cdot S_{X2} + W_{S3} \cdot S_{Y3} + \alpha W_{S3} \cdot S_{X3} = 0$$

$$\alpha = (-W_{S1} \cdot S_{Y1} - P \cdot S_{YP} + W_{S2} \cdot S_{Y2} + W_{S3} \cdot S_{Y3}) / (W_{S1} \cdot S_{X1} + W_{S2} \cdot S_{X2} + W_{S3} \cdot S_{X3})$$

$$\alpha = 0,148$$

$$a = 0,296 \text{ g} < 0,444 \text{ g} \quad (5.2)$$

L'accelerazione di picco al suolo (a) che innesca il meccanismo di ribaltamento ($2\alpha g$) risulta minore dell'accelerazione di picco al suolo attesa, perciò non è verificata la condizione di SLV.

Scheda n. 2 – Verifica al ribaltamento della torre campanaria

In considerazione della compattezza del campanile, favorita anche dai numerosi tiranti, è prevedibile un comportamento scatolare che comporta un'analisi della torre come elemento unitario. Il fuori-piombo della torre campanaria favorisce il suo ribaltamento, che potrebbe avvenire con una rottura inclinata.

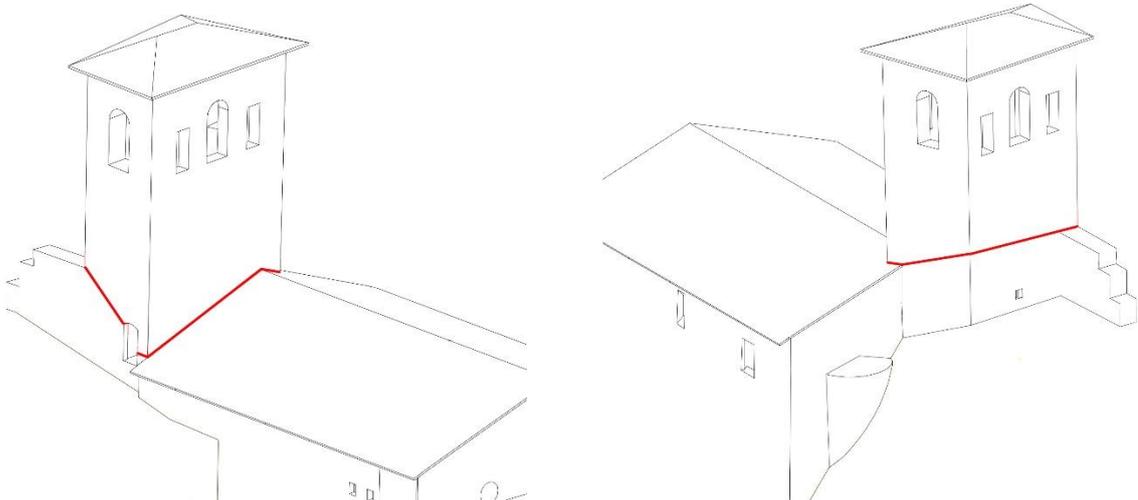
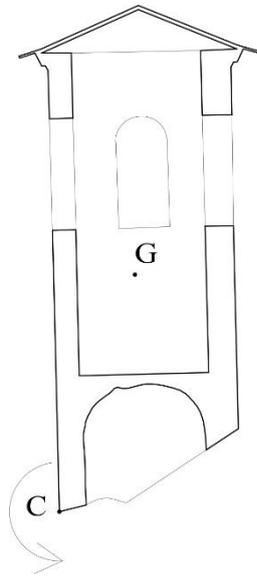


Figura 5.15 Rottura inclinata della torre campanaria che ne innesca il ribaltamento. Il modello 3D è generato con AutoCAD, a partire dalla nuvola di punti.

Ipotizzata la linea di rottura sulla base delle caratteristiche dell'oggetto architettonico si procede con il calcolo delle coordinate del baricentro relative al centro di rotazione C. Il pacchetto del tetto, essendo caratterizzato da un peso specifico differente dalla muratura, è stato modellato come volume equivalente.



$$\begin{aligned} X_G &= 1,92 \text{ m} \\ Y_G &= 6,08 \text{ m} \end{aligned}$$

La condizione di equilibrio si raggiunge con $W_S + \alpha W_S = 0$, quindi:

$$-W_S \cdot S_Y + \alpha W_S \cdot S_X = 0$$

$$\alpha = \frac{S_Y}{S_X} = \frac{X_G}{Y_G}$$

$$\alpha = 0,316$$

$$a = 0,632 \text{ g} > 0,444 \text{ g} \tag{5.2}$$

L'accelerazione di picco al suolo (a) che innesca il meccanismo di ribaltamento ($2\alpha g$) risulta minore dell'accelerazione di picco al suolo attesa, perciò è verificata la condizione di SLV.

Conclusioni

Il contributo di modelli 3D derivati dall'innovazione e dall'integrazione delle tecniche della Geomatica consiste nella costituzione di una banca dati solida, ricca di informazioni metriche e descrittive, che supportano e migliorano la documentazione, la rappresentazione e l'analisi dei sistemi costruttivi per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Le tecniche di acquisizione utilizzate, la fotogrammetria aerea da UAV e l'impiego di un sistema MMS si sono rivelati molto efficaci. La compattezza e portabilità di questi strumenti risolve in modo ottimale la fase di acquisizione di una nuvola di punti completa relativa alle superfici esterne e interne. La versatilità dei prodotti che queste tecniche consentono di realizzare 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.

La nuvola di punti ha consentito la realizzazione di elaborati bidimensionali tradizionali, arricchiti da immagini della nuvola di punti sezionata e ortofoto dei prospetti esterni. La trasformazione della nuvola di punti da rilievo fotogrammetrico in *mesh* texturizzata è un supporto valido all'ispezione del manufatto edilizio che permette la navigazione del modello a distanza e da punti di vista privilegiati. Il modello volumetrico è molto efficace per la documentazione degli elementi che compongono il sistema architettonico e lo stile di visualizzazione in trasparenza favorisce la comprensione del ruolo di ogni volume all'interno del sistema architettonico. Inoltre, questo modello è molto utile per le analisi statiche che perfezionano l'indice di vulnerabilità individuato con il metodo semplificato. Il metodo semplificato fondato su basi statistiche proposto dalla direttiva per la valutazione a livello territoriale presenta criticità, come la componente esperienziale legata all'ispezione visiva, che alcuni accorgimenti, come il fattore di confidenza che pondera il risultato sulla base della documentazione disponibile, e la segnalazione dei meccanismi con indice di vulnerabilità superiore a 2, potrebbero non essere sufficienti a risolvere completamente. L'estensione di questo metodo, applicato alla chiesa di Sant'Andrea a Campi di Norcia, ad una casistica più ampia potrebbe fornire maggiori indicazioni sulla sua validità per quanto concerne la realizzazione di una lista di priorità più efficace. Quello che emerge dalla tesi è sicuramente la

possibilità di effettuare analisi più approfondite con la disponibilità di misurazioni derivate dalla nuvola di punti, che ha un impatto considerevole sulla qualità del risultato finale.

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.

Bibliografia

Balzani M., “Tecniche di rilievo con laser scanner 3D per la creazione di banche dati integrate per l’architettura e il paesaggio” in Chiavoni E., Paolini P. (a cura di), *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell’architettura e della città*, 2004

Calantropio A., Chiabrando F., Spanò A., *UAV Photogrammetry and thematic maps for enviromental risk assessment in construction safety*, EUG General Assembly 2018, 2018

Cardini G., relatori: Binda L., Della Torre S., Saisi A., Tesi di dottorato di ricerca: “La vulnerabilità sismica dei centri storici: il caso di Campi Alto di Norcia. Linee guida per la diagnosi finalizzata alla scelta delle tecniche di intervento per la prevenzione dei danni”, 2003

Carocci F.C., Tocci C. (a cura di), *Leggendo il libro delle antiche architetture*, Roma, Gangemi, 2010

Chiabrando 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

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

De Colle A., Doglioni F., “L’osservazione per macroelementi”, in Doglioni F., Moretti A., Petrini V. (a cura di), *Le chiese e il terremoto*, Trieste, Lint, 1994

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*

D.M. 14 gennaio 2018, *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*

Gomasasca M. A., *Elementi di Geomatica*, Associazione italiana di rilevamento, 2004

IKER (New Integrated Knowledge Based Approaches to the Protection of Cultural heritage from Earthquake-induced Risk), *Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials*, Deliverable 3.1, 2010,
www.niker.eu/assets/Files/Download/D3.1%20-%20Annex1%20-%20Damage%20Abacus.pdf

Lagomarsino S.. *Damage survey of ancien churches: the Umbria-Marche experience, in Seismic Damage to Masonry Buildings*, Proceeding of International Workshop on “Measures of seismic damage to masonry buildings”, Monselice, Padova, Italy, June 25-26, 1998, Bernardini Ed. A., Balkema A.A., Rotterdam, 1999

P. Pirri, *L'Abbazia di Sant'Eutizio in Val Castoriana presso Norcia e le chiese dipendenti*, Roma, Herder, 1960

Rovida A., Camassi R., Gasperini P. e Stucchi M. (a cura di), *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, 2011, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11>

Sammartano G., Spanò A., *High scale 3D modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5/W1, 2017 GEOMATICS & RESTORATION – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, 2017

Sammartano G., Spanò A., *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*. *Appl Geomat* 10, 317–339, 2018, doi:10.1007/s12518-018-0221-7

Spanò A., *Dispense del corso “Metodi 3D Imaging and ranging per la documentazione del patrimonio”*, 2019

Spanò A., Donadio E., Chiabrando F., "Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili", *SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell'Università degli Studi di Trieste 1. La strada*, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017

Spanò A., *Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica.*, 2013

Zlot R., Bosse M., Greenop K., Jarzab Z., Juckes E., Roberts J., *Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system*. J Cult Herit, 2014, doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.009

Sitografia

Geoportale Nazionale,
www.pcn.minambiente.it

INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
www.ingv.it

INSPIRE
www.inspire.ec.europa.eu

Link ai modelli 3D

Di seguito sono presenti gli i *link* con i quali è possibile visionare *online* gli elaborati 3D. Il modello delle volumetrie generato con AutoCAD è navigabile attraverso un link ad Autodesk Viewer. Il visualizzatore consente di orbitare il modello, misurarlo, sezionarlo, esploderlo, spegnere i layer dei macroelementi e navigarlo in modalità “passeggiata”. La *mesh* texturizzata è stata esportata da Metashape e caricata su Sketchfab. Il visualizzatore consente di orbitare il modello.

Modello delle volumetrie

Link: autode.sk/2w3wX8w



Mesh texturizzata

Link: skfb.ly/6QuTJ



Ringraziamenti

Alcuni sentiti ringraziamenti.

Alla mia relatrice la Prof.ssa Antonia Spanò e al Prof. Cesare Tocci, per avermi guidato nelle appassionanti discipline della Geomatica e del Restauro.

Alla Dr.ssa Giulia Sammartano, per i preziosi consigli, e a tutti i ragazzi del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali.

Al Team Direct, per l'entusiasmante esperienza vissuta sul campo.