

Rilievo 3D multisensore e indagini diagnostiche per lo studio della vulnerabilità sismica del Santuario di Santa Maria delle Grazie (località Varoni, Amatrice)

Multi-sensor 3D survey and diagnostic investigations for the study of the seismic vulnerability of the Sanctuary of Santa Maria delle Grazie (Varoni, Amatrice)

ALESSANDRO GRAZZINI, NANNINA SPANÒ, MONICA VOLINIA, GIACOMO PATRUCCO, ANTONINO QUATTRONE, MARIO GIROTTO, MARCO ZERBINATTI

Abstract

Il santuario di Santa Maria delle Grazie di Varoni per le sue peculiarità è stato prescelto come caso campione di struttura storica da sottoporre a indagini comparate. Il valore storico culturale del santuario è dovuto all'impianto della chiesa (XV secolo), ma soprattutto è significativo il richiamo devozionale dovuto al culto mariano, che sollecita una urgente esigenza di conservazione, anche per confermare il riferimento religioso come stimolo alla rigenerazione del centro. Per garantire la salvaguardia dell'organismo, è stato realizzato un rilievo 3D con tecniche innovative terrestri ed aeree integrate, oltre ad indagini diagnostiche di caratterizzazione meccanica di murature e malte, completati da indagini termografiche. L'integrazione e il confronto del complesso di analisi mirano a restituire un quadro di conoscenza dello stato di conservazione sul quale basare la valutazione della vulnerabilità sismica, a supporto dei futuri propositi di rifunzionalizzazione della fabbrica.

The sanctuary of Santa Maria delle Grazie at Varoni has unique characteristics, such as to have chosen it as a sample case of historical structure to subject to comparative geomatic and geophysical investigations for the assessment of seismic vulnerability. The historical and cultural value of the sanctuary is due to the layout of the church (XV century); above all, the devotional appeal due to the cult of Madonna urges an urgent need for conservation also to confirm the religious reference as a stimulus to the regeneration of the center.

In order to guarantee the preservation of the architectural organism, a 3D survey was carried out with innovative terrestrial and aerial integrated techniques, as well as diagnostic investigations of mechanical characterization of masonry and mortar, completed by thermographic investigations. The integration and comparison of the analysis complex aims to return a framework of knowledge of the state of conservation on which to base the assessment of seismic vulnerability, in support of the future purposes of the factory re-use.

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

alessandro.grazzini@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD

antonia.spano@polito.it

Monica Volinia, Laboratorio di Diagnostica non distruttiva, Politecnico di Torino, DAD

monica.volinia@polito.it

Giacomo Patrucco, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino, DAD Laboratorio di Geomatica

giacomo.patrucco@polito.it

Antonino Quattrone, coordinatore Laboratorio MASTRLAB, Politecnico di Torino, DISEG

antonino.quattrone@polito.it

Mario Girotto, Laboratorio di Diagnostica non distruttiva, Politecnico di Torino, DAD

mario.girotto@polito.it

Marco Zerbinatti, professore associato di Architettura tecnica, Politecnico di Torino, DISEG

marco.zerbinatti@polito.it

1. Le ragioni dell'indagine

Attraverso la firma di un Accordo di Cooperazione Scientifica e Strategica siglato in data 18/07/2018, l'Ufficio del Soprintendente Speciale per le aree colpite dal sisma del 24 agosto 2016, il Segretariato Regionale MIBACT del Lazio, la Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le Province di



Figura 1. Puntellamento della facciata del Santuario di Santa Maria delle Grazie a Varoni.

Frosinone Latina e Rieti, e la Curia vescovile di Rieti chiedevano al Politecnico di Torino di approfondire lo studio delle vulnerabilità sismiche del Santuario di Santa Maria delle Grazie, situato in località Varoni (frazione di Amatrice), tramite un rilievo tridimensionale completo e una campagna di prove diagnostiche per la caratterizzazione meccanica delle murature e della qualità della tessitura muraria.

La chiesa ha subito danni limitati dopo la scossa del 24 agosto 2016, concentrati principalmente in un innesco di ribaltamento della facciata, lesioni nel piano della stessa, nell'arco che divide la navata dall'abside e su limitati punti delle pareti laterali in corrispondenza delle finestre. La progettazione delle opere di messa in sicurezza temporanea è stata condotta dal prof. Claudio Modena sotto la supervisione della Soprintendenza, e sono consistite nella posa di profili metallici a contrasto del ribaltamento della facciata (opportunosamente vincolati alle pareti laterali mediante cavi tirantati), e l'inserimento di alcuni tiranti per contrastare meccanismi nel piano della facciata e a sostegno dell'arco dell'abside. Sono stati inoltre rinforzati i sostegni del soffitto a cassettoni ligneo, appeso al solaio del sottotetto, ed è stato eseguito il puntellamento dell'edicola in corrispondenza dell'abside.

La Soprintendenza ha fatto altresì eseguire delle iniezioni di malta di calce all'interno delle murature, al fine di offrire maggiore resistenza al contrasto dei nuovi tiranti e per cercare di aumentare le resistenze delle pareti durante la lunga sequenza sismica che ha interessato l'area anche dopo la prima grande scossa del 24 agosto 2016. Le iniezioni sono state eseguite per una profondità limitata, nel dubbio che la tessitura muraria fosse a doppio strato con all'interno una eventuale camera d'aria nella quale potessero disperdersi le iniezioni.

La costruzione della chiesa, a unica navata, è risalente al XV secolo circa, con pareti a tessitura lapidea diversificata: arenaria per la facciata principale, in pietrame disordinata nelle



Figura 2. Prospetto nord-ovest della chiesa. Sono visibili i punti delle iniezioni e, sulla destra, il capochiave del nuovo tirante incluso nelle opere di messa in sicurezza per rinforzare l'arco dell'abside.

pareti laterali. Il campanile è stato eretto recentemente, nel 1931, in parte strutturalmente slegato dalle murature della chiesa. Il soffitto della chiesa è rivestito da un cassettonato ligneo decorato, appeso al solaio del sottotetto eseguito dopo il sisma del 1997 con putrelle e tavoloni in laterizio. Anche le falde di copertura sono della medesima tipologia costruttiva del solaio di sottotetto.

La consulenza scientifica richiesta al Politecnico di Torino ha avuto molteplici obiettivi, per i quali è stata necessaria una multidisciplinarietà di azione. Il primario obiettivo è stato quello di eseguire una campagna diagnostica come base fondamentale per la futura progettazione di rifunzionalizzazione e di miglioramento sismico dell'edificio religioso, perseguendo un livello di conoscenza LC2 ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018¹. All'interno della fase preliminare di conoscenza del manufatto è stato possibile intrecciare i risultati di diverse tipologie di prova, eseguite sia *in situ* che da analisi di laboratorio, sfruttando l'interdisciplinarietà delle stesse al fine di limitare le prove semi-distruttive ed estendere quelle non invasive. In particolare il confronto tra i dati del rilievo 3D eseguito mediante metodi di scansione laser integrati a quelli fotogrammetrici tipici della geomatica, con il quale hanno trovato base di raffronto l'analisi termografica e le prove soniche eseguite sulle murature laterali della chiesa, l'insieme ha permesso di dare una risposta ai quesiti della Soprintendenza riguardo la presenza di un doppio strato murario e la scarsa efficacia offerta dalle iniezioni di malta di calce in relazione all'esigua profondità di penetrazione e alle resistenze meccaniche delle pareti murarie, riscontrate dalle prove con i martinetti piatti doppi.

Il caso studio del Santuario di Santa Maria delle Grazie ha confermato l'importanza del confronto di diverse tipologie di prove diagnostiche, possibilmente scelte tra le meno invasive, e la loro relazione al dimensionamento geometrico accurato e predefinito delle strutture offerto dalla



Figura 3. A sinistra la navata unica della chiesa; a destra il particolare della lesione in corrispondenza dell'arco dell'abside.

modellazione tridimensionale da nuvole di punti, per una più approfondita conoscenza del cantiere storico, caratterizzato spesso da molte complessità edificatorie difficilmente riconoscibili, ma incidenti sulla vulnerabilità sismica complessiva del fabbricato.

2. Il rilievo metrico 3D

Considerati gli obiettivi premessi di supportare un lavoro interdisciplinare di diagnosi della chiesa per le successive attività di conservazione della struttura, la realizzazione del rilievo metrico analitico del Santuario della Madonna delle Grazie a Varoni è stato orientato ad eseguire un rilievo laser scanning terrestre integrato da riprese fotogrammetriche a elevata risoluzione. Il rilievo della totalità della fabbrica si è avvalso anche dell'utilizzo dei sistemi di rapid mapping quali la fotogrammetria UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)², e di scansioni realizzate mediante sistema di mapping mobile basato su tecnologie SLAM (*Simultaneous Localization and*

Mapping)³, che hanno consentito di realizzare l'intera operazione di acquisizione in una sola giornata.

Dal momento che la fase di acquisizione dei dati si è configurata come un'attività didattica⁴, è stato seguito un workflow ormai standardizzato di integrazione di metodi innovativi ma consolidati (LiDAR e fotogrammetria close-range) e quelli più recenti particolarmente rapidi (acquisizioni delle immagini da drone e scansioni in movimento da tecnologia SLAM-based).

L'approccio multi-sensore, come già evidenziato in altri contributi di questo volume, cioè l'integrazione di dati acquisiti mediante l'impiego di strumenti di misura cosiddetti attivi (tecnologia LiDAR) e passivi (fotogrammetria), anche con sensore principale montato su un sistema UAV (Figura 4), risulta oggi il metodo in assoluto più vantaggioso e che garantisce i migliori risultati attualmente raggiungibili.

L'obiettivo finale è stata infatti la generazione di elaborati grafici architettonici dotati di contenuti metrici e fotografici



Figura 4. Il quadricottero DJI Phantom 4 Pro in volo nell'area del santuario di Varoni.



Figura 5. Schema della rete topografica principale: impianto di 5 vertici topografici, fra i quali uno all'interno della chiesa.

ortoproiettati, che rispondono alla necessità sia di supportare computi metrici dettagliati, sia di effettuare analisi approfondite dello stato di conservazione del complesso e degli elementi architettonici⁵.

La rete principale di inquadramento, usualmente finalizzata nel rilievo metrico di beni architettonici a ottenere il riferimento di tutte le misurazioni e degli elaborati di rilievo a un unico sistema cartesiano, nonché al controllo della propagazione degli errori al fine di garantire le tolleranze richieste, è stata realizzata in un unico ordine, con vertici che hanno abbracciato l'intera area d'interesse, ed un vertice al suo interno (Figura 5).

La rete topografica è stata elaborata con il software Leica Geo Office (LGO) utilizzando le stazioni permanenti di Aquila, Macerata, Roseto degli Abruzzi adottando il sistema di riferimento WGS84-ETRF2000; l'intera elaborazione del rilievo del santuario è quindi georiferita (l'accuratezza del calcolo delle coordinate è attestata su un paio di centimetri).

Per soddisfare gli obiettivi di descrizione della forma architettonica dell'oggetto di studio e dell'articolata situazione degli interventi recenti di miglioramento della capacità statica delle murature riferiti nel paragrafo successivo, per documentare cioè con elevato dettaglio la condizione attuale delle murature interne ed esterne della fabbrica, si è prevista l'acquisizione di un'articolata serie di scansioni laser (20 circa), per ottenere la completa copertura tridimensionale dei paramenti murari (ogni scansione ha acquisito mediamente 20 milioni di punti, con una distanza media tra punti successivi di ciascuna nuvole di circa 3-4 mm).

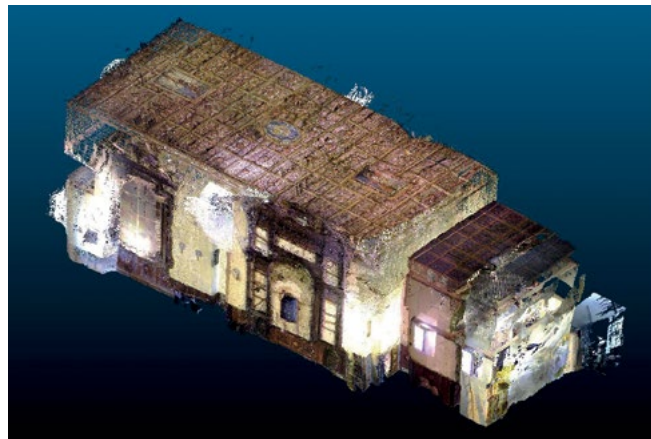


Figura 6. Visualizzazione della nuvola di punti interna alla chiesa.



Figura 7. Visualizzazione della nuvola di punti esterna.



Figura 8. Visualizzazione del modello di punti generato dal processo fotogrammetrico applicato alle immagini riprese dal drone.

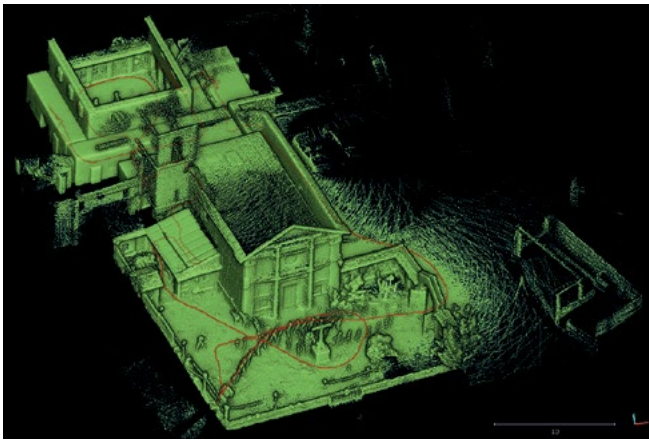


Figura 9. Visualizzazione della nuvola di punti generata dal sistema di mapping mobile basato su tecnologia SLAM, con visualizzazione della traiettoria (in rosso), che consente il controllo della qualità metrica della nuvola. A sinistra: vista 3D della nuvola con percorso esterno nel sagrato e negli ambienti interni della zona del campanile, del presbiterio e del chiostro; a destra: vista in pianta della stessa nuvola con colorazione relativa al tempo di acquisizione.

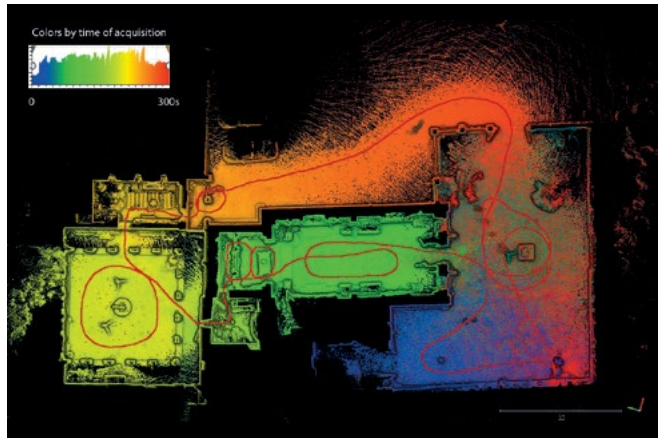


Figura 10. Una vista a volo d'uccello della nuvola di punti da volo UAV.



Figura 11. Integrazione delle nuvole derivate dal volo UAV e dal sistema di mapping mobile Zeb Revo.

Le misure topografiche di numerosi punti di controllo hanno consentito la registrazione delle nuvole in un unico sistema di riferimento con una precisione complessiva (tensione media sui target) che è inferiore a 1,5 mm per il blocco di scansioni all'interno della chiesa (Figura 6), mentre si attesta sui 2 mm per le scansioni esterne (Figura 7).

Il rilievo laser scanning terrestre è stato integrato da un volo a bassa quota eseguito tramite il sistema multirottore Phantom 4 Pro della DJI, equipaggiato con camera digitale FC6310 dotata di risoluzione pari a 5472x3648 pixel. Il volo è stato realizzato secondo uno schema che ha previsto numerose strisciate adiacenti incrociate, con un ricoprimento tra fotogrammi consecutivi dell'80-90%. Dei circa 400 fotogrammi, 262 sono stati ripresi in assetto nadirale e 152 impostando l'asse della camera a 45° per ricoprire opportunamente anche le superfici verticali delle murature, e processati per ottenere il DSM (*Digital Surface Model*) e le ortofoto, cioè il mosaico di immagini corrette dal punto di vista proiettivo, quindi misurabili e sovrapponibili agli elaborati di disegno.

L'appoggio fotogrammetrico, ovvero il rilievo topografico di un insieme di punti segnalizzati da target analoghi a quelli impiegati per il rilievo laser scanning, ha previsto markers posizionati sulla pavimentazione del sagrato e nelle aree limitrofe

in posizioni ben visibili sulle immagini digitali. I dati essenziali del rilievo da drone possono essere riassunti nei seguenti: quota media del volo 40 m, dimensione del pixel a terra (*GSD - Ground Sampling Distance*) 8,3 mm, errore medio riscontrato sui GCPs (*Ground Control Points*) pari a 7 mm.

La nuvola finale è rappresentata da più di 70 milioni di punti, equivalenti a circa 26000 punti per m³.

Secondo la previsione, è stato inoltre sperimentato l'innovativo sistema di scansione 3D mobile che impiega la tecnologia SLAM, risultata ottima per la rapidità di acquisizione e per la sua efficacia nel rilievo degli ambienti articolati e di ridotte dimensioni, limitrofi al corpo principale della chiesa. Il sistema impiegato, denominato Zeb Revo GeoSLAM, ha consentito un rilievo 3D particolarmente adatto per gli ambienti indoor, offrendo scarti finali della chiusura delle nuvole attestati sotto i 2-3 cm.

La nuvola complessiva risulta meno densa rispetto al corrispondente sistema laser scanning fisso, ma raggiunge facilmente spazi angusti e ristretti nei quali l'uso del Lidar sarebbe particolarmente oneroso.

Tale nuvola, unita a quelle derivate dal LiDAR ha consentito di realizzare gli elaborati del disegno completi degli ambienti limitrofi alla navata principale della chiesa.

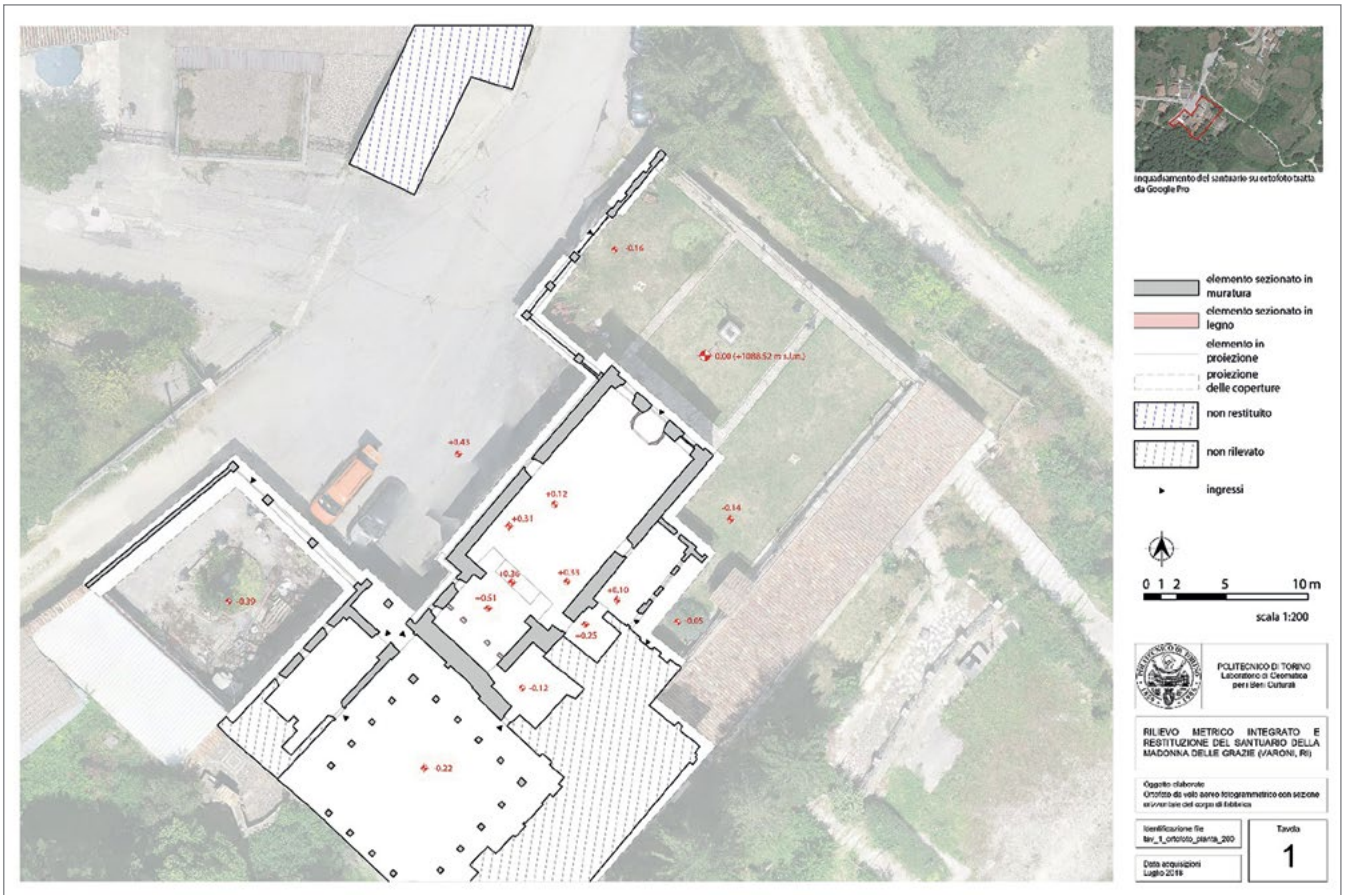


Figura 12. Planimetria del complesso, restituita alla scala 1:200, sovrapposta all'ortofoto nadirale.



Figura 13. Esempi di elaborati architettonici con viste in proiezione della nuvola di punti colorata: sezione trasversale; prospetto del fronte della chiesa; sezione trasversale con evidenziazione degli elementi di arredo interni.

La rappresentazione di piante, prospetti, profili di sezione è stata realizzata attraverso la vettorializzazione di sottili porzioni della nuvola di punti, individuate da piani sezione orizzontali e verticali.

La precisione metrica degli elaborati è attestata sulla scala 1:50, mentre i dettagli degli elementi costruttivi estraibili dalle viste ad alta risoluzione della nuvola LiDAR integrati negli elaborati del rilievo, consentono il dettaglio della scala 1:20.

3. Prove di caratterizzazione meccanica delle murature e delle malte

Al fine di caratterizzare la resistenza meccanica delle murature della chiesa è stata eseguita una prova con i martinetti piatti. Trattandosi di una prova semi-invasiva che interessa la rimozione di 1m x 1m di intonaco, è stata limitata a una sola esecuzione, confrontando i valori con le indicazioni qualitative riscontrate in altre tipologie di prove non distruttive, quali la prova sonica, l'endoscopia e la caratterizzazione in laboratorio di alcuni campioni di malta prelevati *in situ*.

La prova di caratterizzazione della muratura mediante martinetti piatti consente di stimare la tensione di esercizio e le caratteristiche di deformabilità del pannello murario in esame attraverso l'iniezione di olio in pressione in martinetti cavi posizionati in tagli eseguiti sulla muratura, misurando le conseguenti deformazioni indotte sul paramento murario. La prova con martinetto piatto singolo consiste nel posizionamento di tre o più trasduttori di spostamento in verticale a cavallo del giunto di malta interessato dal taglio, registrandone le distanze iniziali. Si esegue il taglio (con rototroncatrice ad anello diamantato) su un giunto di malta a cavallo dei trasduttori, i quali registreranno la deformazione locale a seguito di esso. Si inserisce il primo martinetto piatto, consistente in un disco cavo piatto di forma semicircolare, avente una profondità massima di 35 cm, e lo si collega alla pompa idraulica dotata di manometro. Viene immesso dell'olio all'interno del martinetto, eseguendo cicli di carico e scarico fino all'azzeramento delle deformazioni registrate dai trasduttori verticali a seguito del taglio. Il valore di pressione raggiunto, a meno di alcuni coefficienti correttivi, consente di stimare la tensione di esercizio del paramento murario in esame.

La prova con martinetto piatto doppio ha invece lo scopo di stimare i parametri di deformabilità della muratura e fornire, ove possibile, una stima della resistenza a rottura della stessa. La prova consiste nel sottoporre a cicli di compressione progressivamente crescenti un'area di muratura mediante due martinetti piatti collegati in parallelo alla pompa idraulica. Sul paramento in esame, nell'area compresa tra i due martinetti, si posizionano tre o più trasduttori di spostamento in direzione verticale e uno in direzione orizzontale in modo da registrare le deformazioni corrispondenti durante le fasi di prova. La stima del modulo elastico della muratura viene eseguita sulla base della tensione applicata dai martinetti e dalle deformazioni verticali determinate

tramite i trasduttori di spostamento. L'incremento della deformazione orizzontale consente di stimare il superamento della fase elastica della muratura. Incrementando ulteriormente la pressione è possibile quindi raggiungere la tensione di rottura per compressione della muratura in esame⁶.

Se si esegue un ulteriore taglio, sotto (o sopra) ai trasduttori, per l'inserimento di un secondo martinetto, si potrà eseguire una prova di compressione, preceduta da cicli di carico-scarico crescenti per la determinazione del modulo elastico, fino ad arrivare al carico di rottura per compressione⁷. La prova è stata eseguita impiegando martinetti piatti semicircolari di spessore 4 mm e di area 77765 mm², con una pompa oleodinamica equipaggiata con manometro digitale AEP DMM2 (linearità e isteresi 0,05%) di portata 100 bar. La misura delle variazioni di lunghezza è stata registrata in continuo mediante trasduttori di spostamento potenziometrici (costruttore: Novotechnik; modello: TR50; corsa: 50 mm; deviazione dalla linearità: 0,2%). I valori di pressione e di spostamento sono stati acquisiti in continuo mediante acquirente HBM Spider8 con frequenza di campionamento pari a 5 Hz. Per la realizzazione del taglio in cui alloggiare i martinetti è stata impiegata una troncatrice idraulica con disco diamantato (Figura 14).

I grafici di Figura 15 descrivono l'andamento della prova con il martinetto singolo (determinazione della tensione di esercizio) e quelli doppi (determinazione modulo elastico e resistenza a compressione). In Tabella 1 sono riportati i risultati ottenuti, i cui valori sono in sintonia con quanto riscontrabile nella Tabella C8.5.I della Circolare 21/01/2019⁸ in relazione alla tessitura muraria classificata come "muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari). La muratura dimostra modeste resistenze, anche a seguito dell'intervento delle iniezioni di malta di calce.

Per meglio comprendere la qualità e la stratigrafia della tessitura muraria delle pareti longitudinali, sono state eseguite sia una prova endoscopica (sfruttando una forometria già predisposta della profondità di 48 cm) sia delle prove soniche. I test sono stati eseguiti sempre sulla parete sud-est,

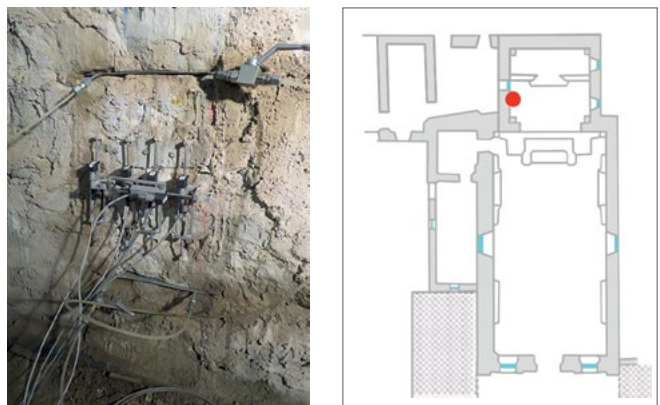


Figura 14. A sinistra i martinetti doppi applicati insieme ai trasduttori di spostamento, a destra l'ubicazione della prova indicata sulla pianta dell'edificio.

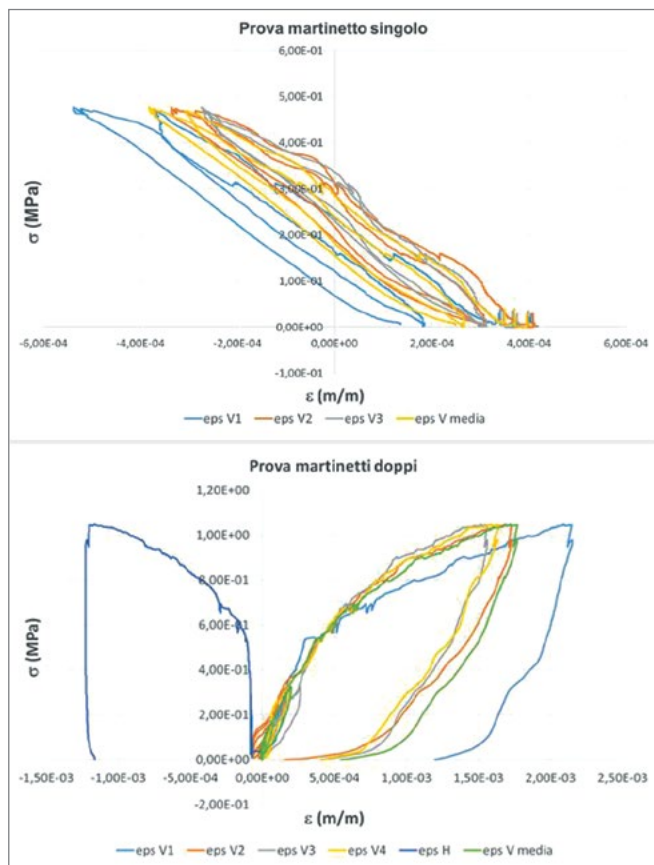


Figura 15. Diagramma σ - ϵ prova martinetti (singolo e doppi). Per convenzione, si intendono positivi i valori di tensione di compressione e la deformazione conseguente a una riduzione della base di misura.

Tensione di esercizio (MPa)	Modulo Elastico (MPa)	Tensione di rottura (MPa)
0,3	1220	1,0

Tabella 1. Risultati prova martinetti piatti.

la medesima della prova con i martinetti piatti, ma in zona diversa in modo da poter confrontarne i risultati. Il modello di endoscopio utilizzato è RIDGID micro-CA 330 (lunghezza della sonda 96 cm).

La stratigrafia rilevata è la seguente:

- cm 0-15: pietra compatta (Figura 17a);
- cm 15-22: prima discontinuità (Figura 17b);
- cm 22-48: pietre intervallate da discontinuità (Figura 17c).

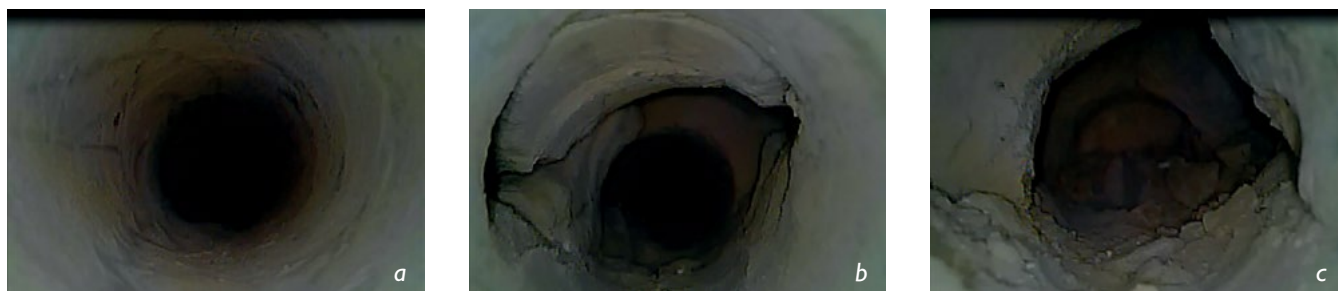


Figura 17. Rilievi fotografici delle diverse stratigrafie emerse dalla prova endoscopica.



Figura 16. Ubicazione ed esecuzione della prova endoscopica all'interno della forometria esistente.

Dopo il primo strato di pietra intera, la stratigrafia è caratterizzata da alternanza di pietre di dimensioni inferiori alla prima intervallate da discontinuità che non risultano interamente riempite dalle iniezioni di malta. Al termine della forometria compare un'altra pietra compatta (Figura 17c), che lascerebbe supporre la probabile, anche se non confermabile con certezza, presenza di un analogo paramento accostato a quello analizzato. Tra i due macro paramenti non sembra essere presente nessuna camera d'aria (in Figura 17c i detriti precedenti la fine del carotaggio non sono caduti in basso). La probabile presenza di un paramento a due strati accostati potrebbe derivare da interventi di rinforzo strutturale eseguiti nei secoli precedenti dopo il grande terremoto del 1703 che danneggiò la chiesa.

Per completare l'analisi della qualità stratigrafica della tessitura muraria e valutare l'efficacia del rinforzo con le iniezioni di malta sono stati eseguiti una serie di test sonici su una griglia di punti già precedentemente definita dal gruppo di lavoro del prof. Claudio Modena durante la redazione della sua relazione tecnica delle opere di messa in sicurezza. La Soprintendenza ha voluto infatti rieseguire le prove per avere conferma sulla validità di penetrazione dei colli di malta. La prova sonica è di tipo non distruttivo, in grado di fornire informazioni per la valutazione delle caratteristiche elastiche dei materiali utilizzati in campo edilizio (calcestruzzo, laterizi, malte, materiali lapidei ecc.).

In questo contesto il test sonico è stato eseguito nella medesima ubicazione delle prove endoscopiche e mediante un

particolare martellino elettrico dotato di una piccola massa battente, che consente di applicare una forza impulsiva sulla superficie della muratura in esame. L'onda sonora generata è stata quindi acquisita mediante un accelerometro collocato sulla superficie opposta della muratura, lungo la direzione di applicazione dell'impulso. La registrazione simultanea della forza impulsiva e dell'onda meccanica generata, noto lo spessore della muratura, consente di stimare la velocità di propagazione delle onde meccaniche nel paramento in esame. Tale misura è correlabile alla qualità della tessitura muraria: la presenza di vuoti o disomogeneità comporta infatti una riduzione della velocità di propagazione. In Tabella 2 sono descritti i risultati della prova sonora, riportando la medesima denominazione dei punti già utilizzata in precedenza. La tessitura muraria in pietrame ha evidenziato una risposta molto eterogenea agli impulsi sonici, con valori spesso inferiori a 1000 m/s, valore soglia al di sotto del quale si trovano generalmente tessiture disomogenee di scarsa coesione. Purtroppo, non è stato possibile eseguire il test su superfici non iniettate, poiché tutte le murature erano già state consolidate. Tuttavia, i valori così bassi di velocità sonora dimostrano come le iniezioni, applicate per di più a una profondità ridotta, non abbiano apportato alcun incremento di resistenza sulle murature, la cui eterogeneità è stata rilevata anche dalla prova sonora. I risultati delle prove con i martinetti piatti sono pertanto in sintonia con la qualità e l'eterogeneità della tessitura muraria analizzata. Infine, sono stati eseguiti le prove di caratterizzazione in laboratorio dei piccoli prelievi di malta eseguiti *in situ*, sia in corrispondenza dei giunti di malta che di frazioni di intonaco interno. Sono state eseguiti osservazioni al microscopio, definite le curve granulometriche ed eseguite le analisi diffrattometriche ai raggi X. Le indagini hanno messo in

Punto	Spessore muratura [m]	Tempo di volo [s]	Velocità V [m/s]	V [m/s] Relazione prof. Modena
P 2.5	0,85	0,002028	419	531
P 2.6	0,85	0,002309	368	769
P 3.3	0,85	0,000815	1044	857
P 3.4	0,85	0,001016	837	609
P 3.5	0,85	0,001600	531	761
P 3.6	0,85	0,002078	409	618
P 4.3	0,85	0,001117	761	1114
P 4.4	0,85	0,001281	663	935
P 4.5	0,85	0,001548	549	667
P 4.6	0,85	0,001376	618	519
P 5.4	0,85	0,000755	1125	672

Tabella 2. Risultati delle prove soniche.



Figura 18. a) griglia interna dei punti di prova; b) martellino elettrico strumentato per la determinazione dell'onda sonora; c) griglia esterna dei punti con l'applicazione dell'accelerometro.

risalto l'utilizzo di materiali locali. I litotipi sono ricorrenti, anche se al momento non sono note le loro origini (corsi d'acqua, sedimenti, cave, per esempio); gli aggregati sono con ogni probabilità riconducibili a minerali tipici della zona (è possibile mettere in relazione questi con la geologia dei luoghi) e le forme dei grani sono di solito angolose o sub angolose (non ci sono granuli ben arrotondati, come quelli provenienti da lunghi corsi d'acqua). Tutte le malte prelevate presso la chiesa di Santa Maria delle Grazie sono a base di calce, tra loro molto simili e molto probabilmente a base di leganti aerei (a base di carbonato di calcio, con ogni probabilità grassello di calce, data la costante elevata presenza di granuli di legante non ben miscelati) con alcuni aggregati silicatici (quarzo, muscovite e clinocloro). I campioni con colore ocreo intenso possono contenere argilla; l'ipotesi è compatibile con la presenza di alcune specie minerali.



Figura 19. Frammenti del campione n° 1.

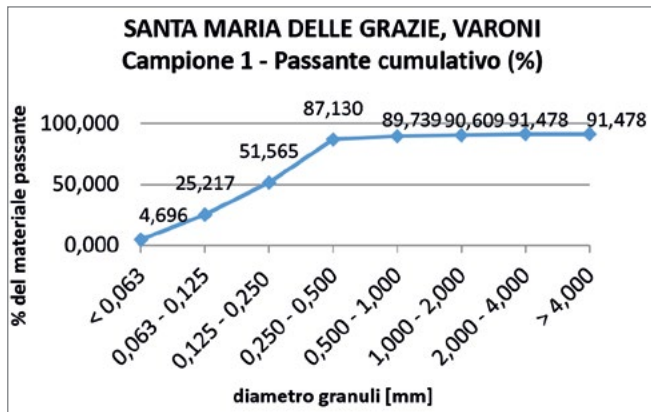


Figura 20. Curva di distribuzione cumulativa degli aggregati del campione 1.

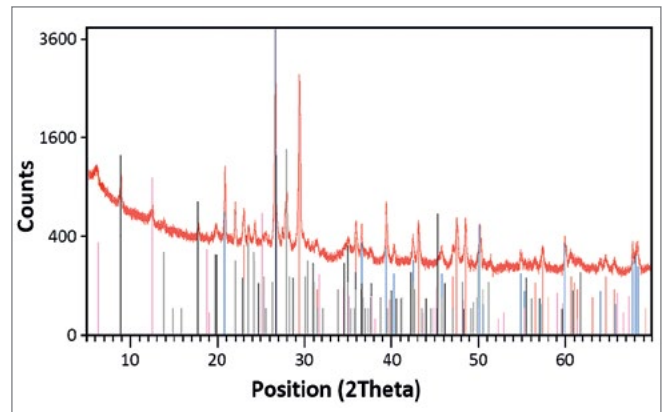


Figura 21. Diffattogramma a raggi X del campione n° 1 da Santa Maria delle Grazie.

4. Indagini termografiche

A integrazione e completamento di un percorso multidisciplinare finalizzato alla salvaguardia nonché al miglioramento sismico del Santuario di Santa Maria delle Grazie si inserisce la campagna termografica condotta nel luglio 2018. Nel settore delle tecniche di indagine non distruttiva, la termografia all'infrarosso rappresenta un importante strumento per la lettura, oltre il visibile, delle caratteristiche tecniche e tecnologiche del manufatto architettonico. La possibilità di ottenere informazioni sulla tessitura muraria senza dover rimuovere lo strato di finitura, così come avere l'opportunità di monitorare il comportamento termico nel tempo di un paramento murario sono caratteristiche che costituiscono il valore aggiunto che la tecnica possiede rispetto ad altre metodiche più dirette, nell'ottica della salvaguardia del bene⁹. Nel caso specifico di Varoni la termografia all'infrarosso ha interessato i fronti esterni della chiesa (prospetti intonacati sud-est e nord-ovest) con verifiche interne nell'aula, inclusa la sua copertura lignea (Figura 22).

La campagna d'indagine (29-30 luglio) è stata progettata considerando di effettuare i rilievi in modalità passiva; ragioni di sicurezza hanno infatti escluso l'impiego di riscaldatori artificiali che, negli interni, avrebbero permesso una più definita lettura del segnale sotto intonaco.

Le riprese all'infrarosso si sono avvalse dell'impiego di due termocamere a elevate prestazioni (SC660 e T1030 Flir Systems) al fine di rilevare contestualmente più superfici per poter operare il confronto tra dati acquisiti in condizioni termiche confrontabili, ma anche per contenere le tempistiche di indagine *in situ*. Sono state impiegate ottiche con campo visivo da 45° al fine di ottimizzare il rapporto pixel/superficie in funzione della distanza tra le camere IR utilizzate e le aree inquadrature.

In concomitanza con le indagini termografiche sono stati monitorati i parametri di temperatura e umidità relativa all'interno e all'esterno della chiesa.

Le acquisizioni che hanno interessato le pareti esterne SE (sud-est) e NW (nord-ovest) hanno sfruttato il transitorio

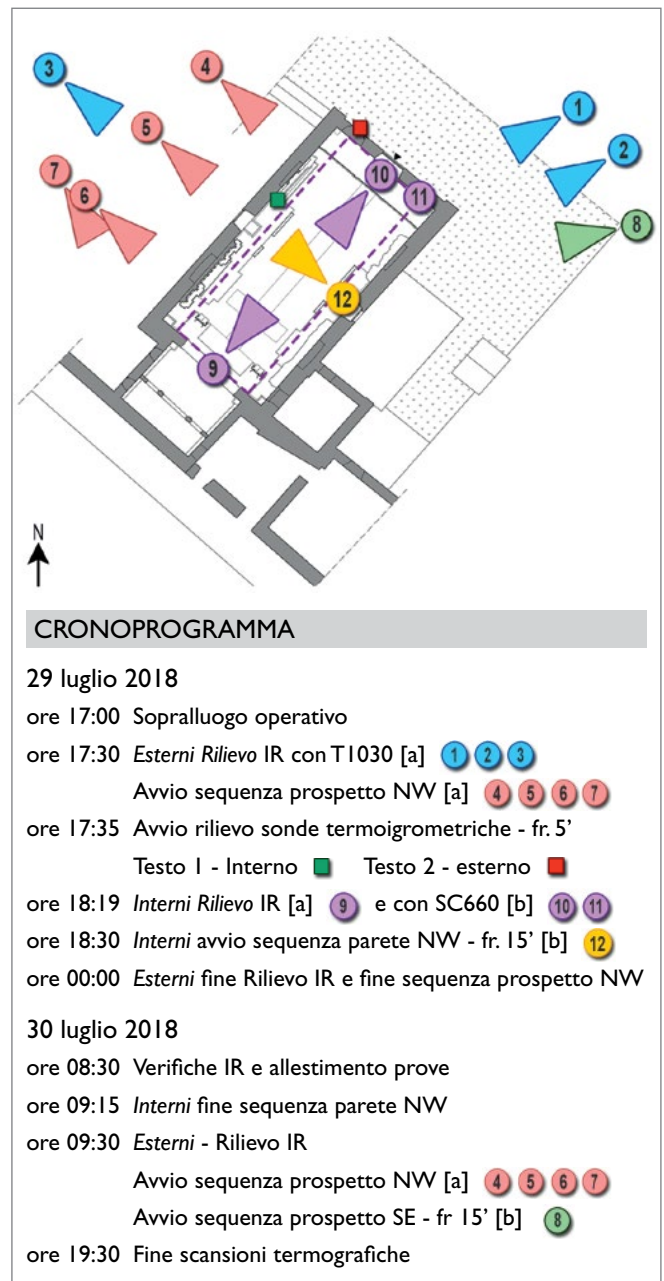


Figura 22. Pianta con indicazione delle postazioni di ripresa e cronoprogramma.

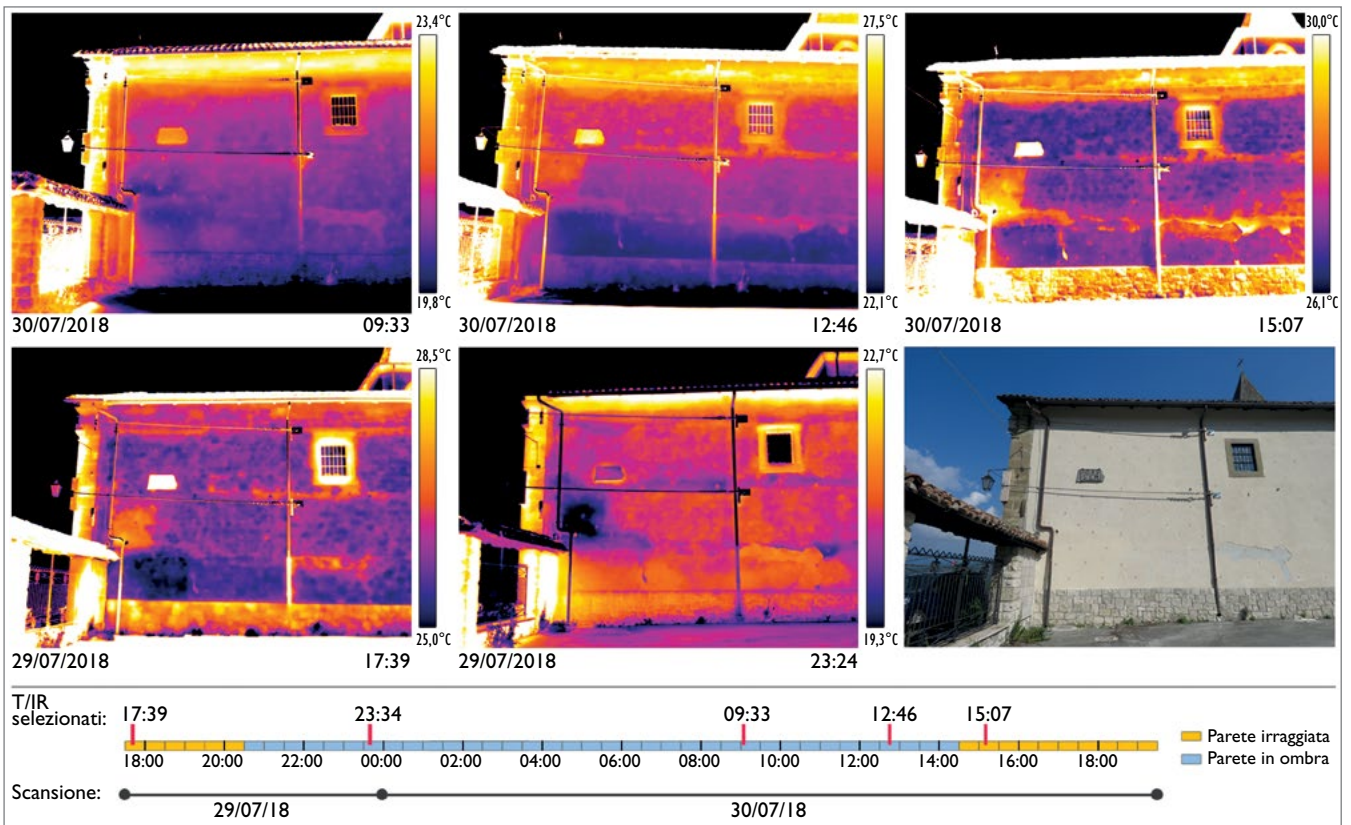


Figura 23. Parete NW, postazione 4. Selezione termogrammi da scansione temporale.

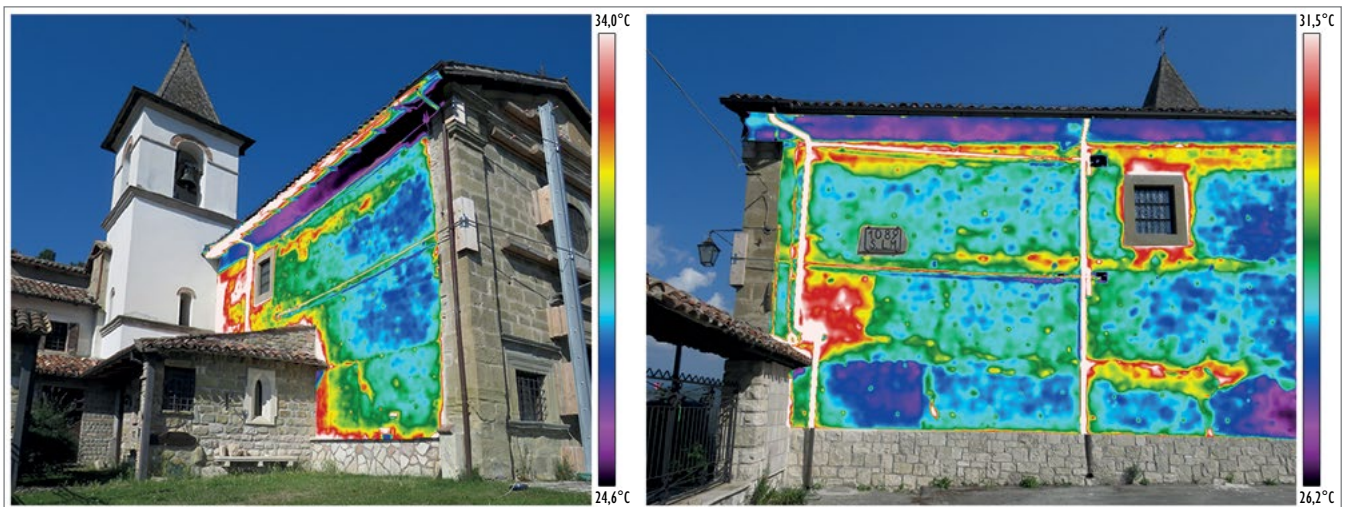


Figura 24. Parete SE (sx) e NW (dx). Sovrapposizione tra rilievo IR e visibile.

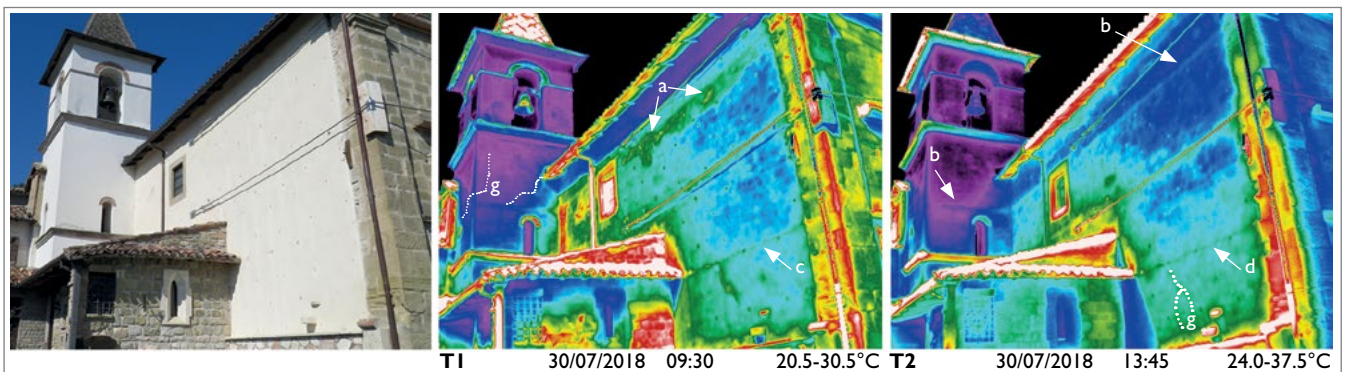


Figura 25. Parete SE, rilievo termografico e indicazione delle principali anomalie. T1: parete irraggiata, T2: parete in ombra.

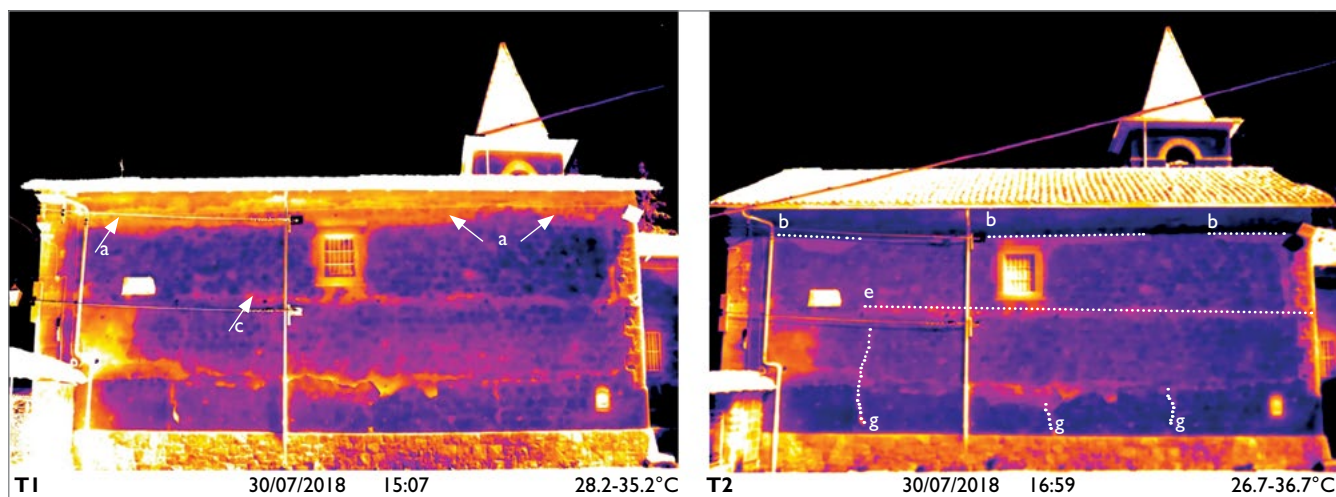


Figura 26. Parete NW, rilievo termografico e indicazione delle principali anomalie. T1: parete irraggiata, T2: parete in ombra.

termico naturale determinato dalla variazione di irraggiamento solare delle superfici a seguito della loro esposizione. Il monitoraggio termico della parete SE è stato condotto da postazione fissa con la termocamera SC660 posizionata con angolo di inclinazione tale da riuscire ad inquadrare una superficie quanto più ampia possibile dato il limitato spazio disponibile.

Le scansioni sono state programmate con l'obiettivo di seguire l'evoluzione della temperatura della parete in fase di riscaldamento e di successiva cessione del calore a seguito dell'ingresso in ombra delle superfici; i rilievi sono avvenuti ogni 15 minuti a partire dalle 9:30 del 30 luglio per le 10 ore successive. A causa della variabilità delle condizioni meteorologiche non è stato possibile continuare le acquisizioni durante il periodo notturno.

I rilievi relativi alla parete NW hanno presentato alcune difficoltà dovute all'esigenza di applicare un protocollo di monitoraggio simile a quello adottato sul fronte SE finalizzato a ottenere aree con geometrie sovrapponibili nel tempo; in questo caso però le maggiori dimensioni della superficie di analisi hanno imposto l'effettuazione di riprese da quattro postazioni che hanno dovuto necessariamente essere rimovibili in quanto collocate al centro di una strada a transito pubblico. Le acquisizioni sono avvenute con la termocamera T1030 con frequenza di acquisizione di 1 immagine ogni 30 minuti, in un arco temporale che – anche in questo caso – ha dovuto escludere il periodo notturno (dalle 17:30 alla mezzanotte del 29 luglio e dalle 9:30 alle 19:30 del giorno successivo; cfr. Figura 23).

I dati acquisiti nelle scansioni temporali che hanno interessato i prospetti sono stati oggetto della valutazione qualitativa dell'andamento del segnale e dello studio – quantitativo – dell'evoluzione della temperatura nel tempo di aree rappresentative prese in esame.

L'applicazione di diversi protocolli d'indagine, ma soprattutto il monitoraggio delle superfici nel tempo ha permesso di ottenere informazioni su vari livelli.

Il primo dato utile derivante dall'analisi delle immagini nelle fasi di transitorio termico riguarda la lettura, al di là dello strato di intonaco, della tessitura muraria in pietra lavorata a spacco; in generale è stato possibile individuare l'impiego di conci perlopiù squadriati, di dimensioni diversificate, orditi con piani di giacitura abbastanza regolari. Un'analisi più dettagliata effettuata comparando la distribuzione delle temperature sui due fronti indagati, ha evidenziato però che la parete NW è caratterizzata da una maggior disomogeneità termica (Figura 24).

Continuando la lettura all'infrarosso di segnali sub-superficiali relativi all'individuazione dell'apparecchiatura muraria si segnala, su entrambi i prospetti laterali, la presenza di una anomalia termica ad andamento rettilineo e giacitura orizzontale localizzata nella porzione alta della chiesa a partire dal raccordo con i capitelli inferiori delle lesene di facciata; tale anomalia interessa con continuità tutta la parete SE e il campanile alla stessa altezza (Figura 25); a tratti si intercetta anche sul prospetto NW dove l'architrave della finestra risulta altresì ben leggibile (Figura 26).

Durante l'irraggiamento solare diretto delle superfici l'alterazione termica rilevata, che presenta un profilo irregolare, è da attribuire alla presenza di distacchi localizzati di intonaco (Figure 25 e 26, T1, a). In questa fase di monitoraggio prevalgono all'infrarosso i segnali più superficiali che potrebbero però celare ulteriori informazioni; risulta pertanto opportuno analizzare il segnale rilevato valutando anche la successiva fase di cessione del calore in cui è possibile – per l'abbattimento dei segnali superficiali – la lettura di anomalie situate più in profondità. L'ingresso in ombra delle superfici ha permesso di evidenziare, al di là dei distacchi, elementi dal contorno ben definito il cui segnale risulta compatibile per livello termico con la presenza di catene lignee, elementi strutturali tipici dell'architettura locale (Figure 25 e 26, T2, b).

Altre discontinuità termiche ad andamento rettilineo perlopiù continuo e sempre associate a distacco d'intonaco sono evidenti anche a quote differenti su entrambi i prospetti

(Figure 25 e 26, T1, c); in questi casi il controllo operato nella fase di raffreddamento delle superfici non ha portato sempre all'individuazione di un segnale per intensità e geometria ascrivibile alle catene lignee: mentre a SE può essere riferito a una traccia molto superficiale (Figura 25, T2, d), a NW pare invece avere una maggiore importanza per dimensioni e soprattutto per collocazione (Figura 26, T2, e). Si trova infatti all'altezza dell'attestamento delle catene metalliche che attraversano l'aula e risulta leggibile in continuità anche sul prospetto relativo alla zona absidale (retroaltare) in cui si evidenzia altresì il collegamento tra le due finestre (Figura 27, e). Proprio in quest'ultima zona meriterebbe ulteriori approfondimenti la traccia termica riscontrata nella fascia superiore alle finestre stesse; in particolare sopra a quella più vicina al convento si identifica un segnale riconducibile al tamponamento di un'apertura arcuata di cui, dall'elaborazione del segnale, paiono addirittura individuarsi i conci di imposta dell'arco (Figura 27, f).

Per quanto riguarda la diagnosi del degrado, è stato possibile, come già accennato, mappare i distacchi d'intonaco effettuando la comparazione tra i dati termici ottenuti dai termogrammi registrati durante il riscaldamento delle superfici con quelli relativi alla successiva fase di cessione di calore (pareti in ombra).

Sulle sequenze termografiche acquisite è stata condotta l'analisi dell'evoluzione delle temperature nel tempo che ha permesso di definire nel dettaglio i livelli termici di aree prese in esame in quanto anomale rispetto a una superficie sana, considerata il riferimento per i calcoli; le curve temporali ricavate hanno permesso di identificare con chiarezza il comportamento differenziato delle zone distaccate, riconoscibili

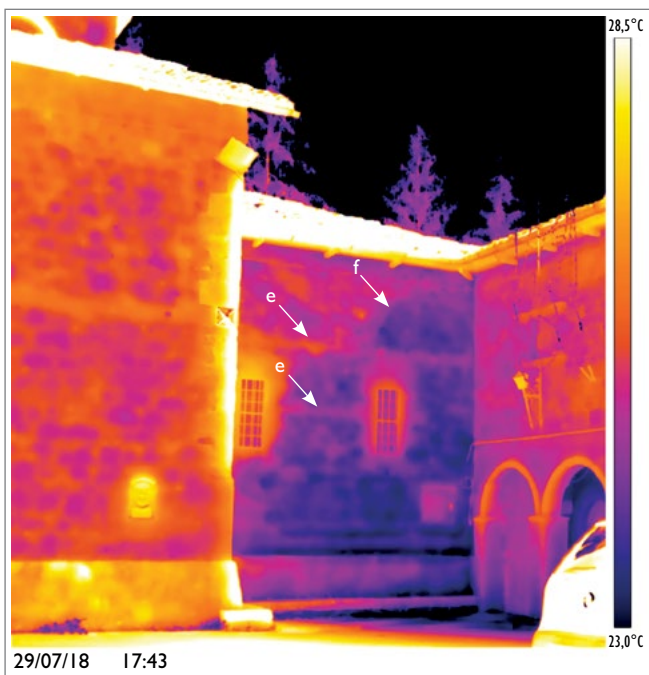


Figura 27. Parete NW, zona absidale, rilievo termografico e indicazione delle principali anomalie.

in quanto caratterizzate dalla rapida cessione del calore durante la fase di raffreddamento delle superfici.

Le alterazioni puntiformi che sono visibili sui prospetti disposte con scansione regolare, risultano ben leggibili anche all'infrarosso (Figura 24); sono relative alle iniezioni di consolidante realizzate dopo il sisma, con materiale dalle proprietà termofisiche evidentemente diverse rispetto a quelle della superficie adiacente. Analizzando la temperatura della muratura nell'intorno delle perforazioni si osserva una maggior uniformità di segnale sul prospetto SE, mentre a NW le alterazioni riscontrate potrebbero confermare la disomogeneità della muratura già osservata nell'analisi qualitativa delle immagini (presenza di sacche?).

Considerando le peculiarità di un'analisi termografica è necessario sottolineare che solo il confronto con una mappatura termica del pregresso permetterebbe di valutare gli eventuali effetti del sisma e del successivo intervento; va comunque evidenziato che il tipo di acquisizioni condotte, in riflessione, consente esclusivamente la lettura di un segnale di superficie che esclude la possibilità di effettuare considerazioni sul comportamento della struttura in profondità.

I rilievi termografici hanno altresì permesso di localizzare alcune lesioni, solo parzialmente visibili a seguito di riscontro autoptico. Si tratta di alterazioni di modesta entità che riguardano i prospetti SE e NW; occorrerebbe meglio indagare il campanile (non oggetto di richiesta di analisi) in cui sono presenti alcuni segnali ascrivibili alla presenza di lesioni sul fronte NE, unica facciata di cui disponiamo del rilievo IR, seppur a distanza (Figure 25 e 26, g).

Le riprese termografiche condotte all'interno della chiesa hanno interessato in particolare una porzione della parete NW che è stata oggetto di monitoraggio in periodo notturno (Figura 28).

Il protocollo adottato ha permesso di valutare l'andamento nel dominio del tempo della temperatura media superficiale di parete con l'obiettivo di verificare lo sfasamento termico tra esterno ed interno. Le scansioni IR sono state eseguite con la termocamera SC660 e frequenza di acquisizione pari a 1 termogramma ogni 15 minuti. Nelle 14 ore di rilievo (tra le 19:30 del 29 e le 9:30 del 30 luglio) l'analisi dell'evoluzione temporale della temperatura superficiale condotta su 4 aree selezionate a quote diverse sul fronte murario indagato, ha evidenziato una sostanziale stabilità termica: l'oscillazione delle singole curve è risultata contenuta nel decimo di grado, mentre la variazione reciproca tra le aree – limitata nel tempo a 1 °C – è da attribuirsi alla presenza di un modesto fronte di umidità di risalita. Sul paramento murario non si è pertanto riscontrato il tipico andamento periodico dovuto alla variazione delle condizioni ambientali esterne solitamente leggibile con uno sfasamento di alcune ore rispetto al massimo irraggiamento termico della superficie direttamente esposta. Poiché il tempo impiegato dall'onda termica per attraversare la sezione muraria dipende dalle proprietà termofisiche e dallo spessore della parete stessa,

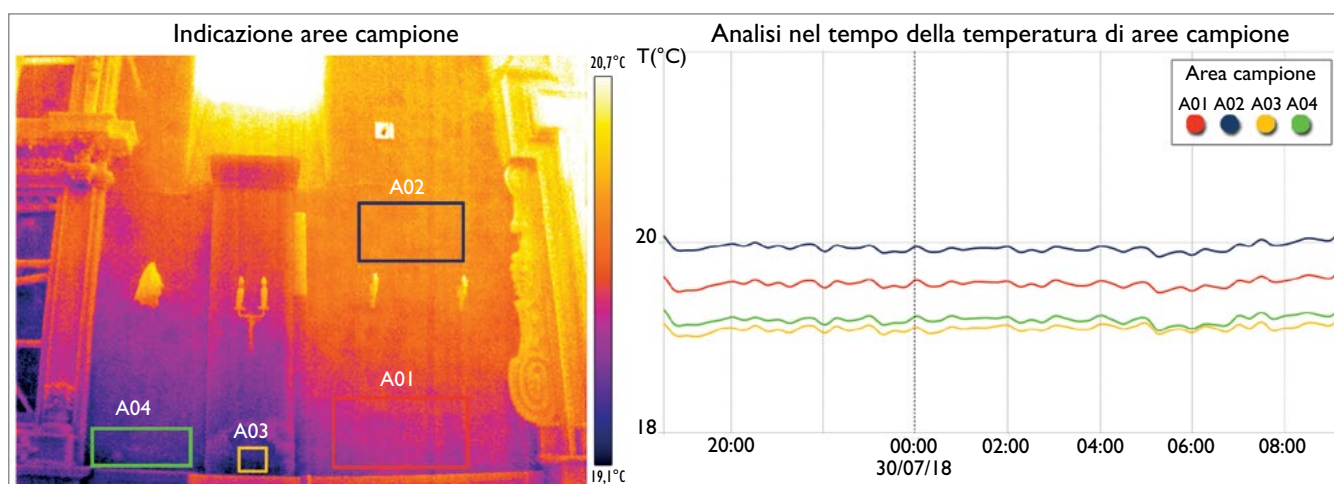


Figura 28. Parete NW, monitoraggio termografico.

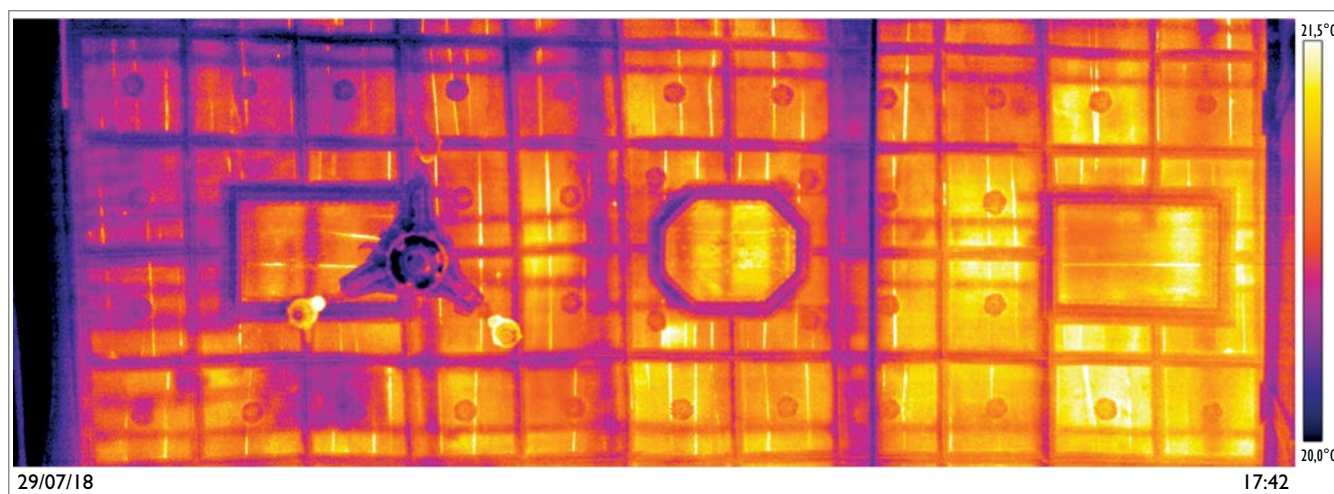


Figura 29. Soffitto ligneo. Mosaico termografico.

questo comportamento – che fa supporre una dissipazione del calore tra l'esterno e l'interno – potrebbe confermare anche per la parete NW la probabile presenza di un paramento non continuo in sezione (a due strati accostati), come quello già evidenziato a SE nelle indagini endoscopiche svolte. Ulteriori rilievi – qualitativi – hanno interessato le superfici interne della chiesa, in particolare il soffitto dell'aula il cui mosaico termico ha evidenziato le discontinuità presenti tra gli elementi lignei e i recenti interventi di rinforzo (Figura 29).

5. Ortofoto nel visibile e nell'infrarosso

Gli elaborati orto-fotografici che è possibile produrre a partire dal rilievo laser scanning e fotogrammetrico integrati sono sostanzialmente di due nature, una esclusivamente fotogrammetrica e la seconda che sfrutta il modello tridimensionale, di origine fotogrammetrica o derivato da tecnica laser scanning, sul quale vengono ri-proiettate le immagini, per le quali è stato determinato il centro di proiezione e l'assetto nello spazio tramite l'orientamento dei fotogrammi, anche detto *bundle block adjustment*¹⁰.

A seconda della tecnica che si utilizza possiamo distinguere differenti prodotti:

- ortofoto digitali rigorose, bidimensionali;
- modello texturizzato, cioè modello 3D sul quale possono essere riproiettate sia le ortofoto complessive sia singoli fotogrammi orientati per via fotogrammetrica; a volte questa secondo tipo di prodotto viene anche indicato come ortofoto tridimensionale.

L'ortofoto da immagini acquisite da UAV (Figura 5 e 12) nonché quella calcolata per il soffitto ligneo a lacunari (Figura 31) sono della prima natura, cioè la matrice immagine è ricostruita pixel a pixel predisponendo una interpolazione di ciascun pixel sul DSM, e riproiettando il valore RGB di ciascun pixel sulla base dei raggi proiettanti il cui assetto nello spazio è ormai noto.

Le immagini così trasformate, generate da un mosaico con origine dei pixel da immagini diverse, costituiscono un'*ortofoto bidimensionale* che ha gli stessi requisiti metrici di una cartografia, di un elaborato architettonico in prospettiva o di qualsiasi altro elaborato in proiezione ortogonale. Anche i

modelli 3D texturizzati sono largamente impiegati nella documentazione del patrimonio, ne è un esempio il modello del soffitto ligneo della chiesa di Varoni (Figura 30); altri esempi si possono osservare nel prossimo contributo inerente gli studi e le analisi multi-temporali eseguiti sulla Chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice.

Data la disponibilità di immagini del soffitto ligneo riprese sia nello spettro del visibile che nell'infrarosso¹¹, si è sperimentata un'integrazione di tali dati utilizzando un approccio

fotogrammetrico rigoroso, per valutare la possibilità di arricchire con dati termici i consueti prodotti fotogrammetrici.

Le immagini nel visibile sono state acquisite mediante una camera professionale Reflex, con lunghi tempi di esposizione dovuti alla scarsa illuminazione interna e secondo una geometria di presa largamente opportuna per ottenere elevati overlapping, contrariamente alle immagini termiche che hanno seguito una procedura standard indipendente dagli scopi fotogrammetrici.

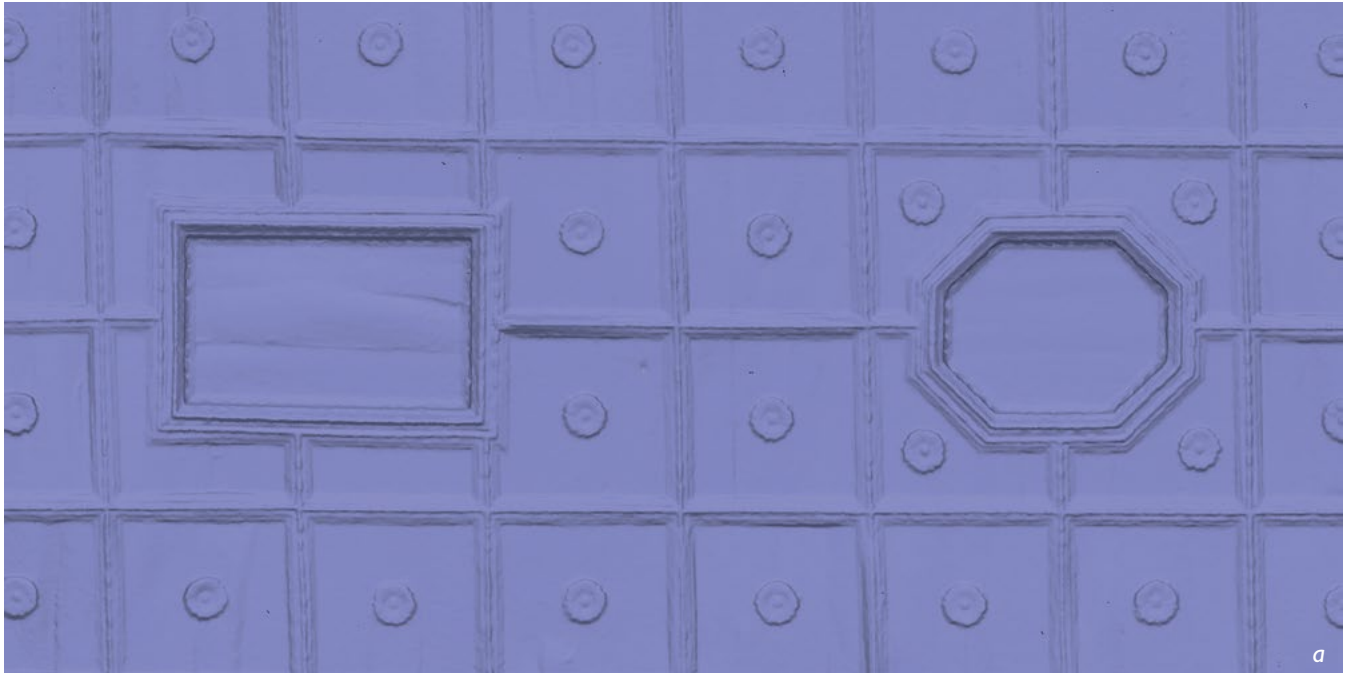


Figura 30. Prodotti fotogrammetrici. (a) Modello triangolato (mesh) ad altissima definizione del soffitto ligneo della chiesa di Santa Maria delle Grazie; (b) modello 3D texturizzato tramite proiezione dell'ortofoto (GSD pari a 1mm) che consente una lettura ad altissima risoluzione dei motivi dipinti dei lacunari.

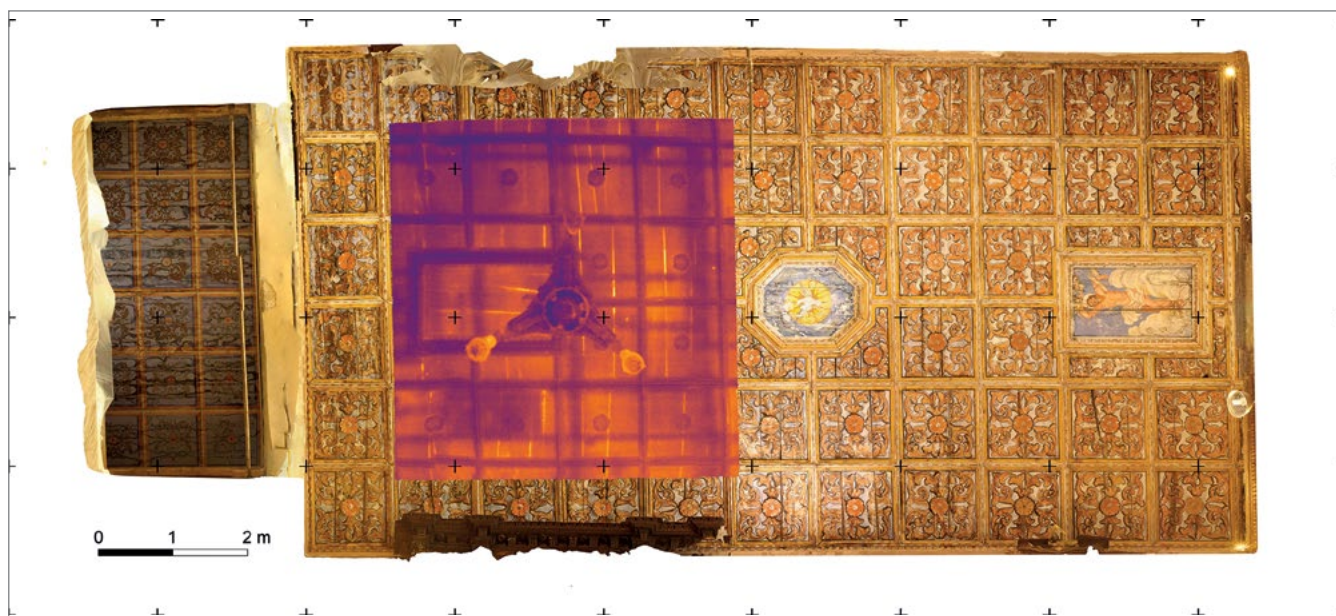


Figura 31. Integrazione di termogrammi ortoproiettati con tecnica fotogrammetrica nell'ortofoto del soffitto della chiesa.

La strategia adottata per il calcolo è stata quella di sfruttare le capacità di “fusione” delle tecniche, processando in un unico progetto fotogrammetrico sia le immagini RGB che i termogrammi, e sfruttando la tecnica di co-registrazione già adottata per le sperimentazioni multi-temporali a Pescara del Tronto¹².

La bassa risoluzione dei dati termici, l'impossibilità di trovare facilmente le corrispondenze geometriche opportune tra i due set di fotogrammi da parte degli algoritmi di *image matching*, oltre che altri problemi ancora, quali la difficoltà di calibrare automaticamente la camera infrared, hanno ovviamente condotto a risultati scarsamente significativi per quanto riguarda il modello di punti termico, ma certo è stato possibile ortoproiettare con metodo rigoroso le immagini termiche sul DSM del visibile ottenendo una buona integrazione di dati osservabile in figura 31¹³.

Conclusioni

L'esperienza sperimentale mediante tecniche aggiornate di rilievo geometrico e diagnostica strutturale presso il Santuario di Santa Maria delle Grazie a Varoni ha evidenziato l'importanza fondamentale della fase conoscitiva, da operare *in situ* e anche in laboratorio, per un maggiore dettaglio delle vulnerabilità strutturali di un edificio storico. La fase di conoscenza dovrebbe diventare momento obbligatorio di analisi, indispensabile per comprendere le vulnerabilità strutturali dell'edificio, soprattutto quelle non visibili che potrebbero attivare altri potenziali meccanismi di danno. Spesso il maggior investimento iniziale nella diagnostica si traduce in un grande risparmio nell'esecuzione delle sole opere strettamente necessarie al conseguimento di un adeguato livello di sicurezza strutturale dell'edificio monumentale, evitando opere inutili e invasive.

Il rilievo geometrico eseguito mediante aggiornate tecnologie geomatiche ha consentito una base di informazioni dimensionali, di forma e di evidenziazione di possibili anomalie, restituendo modelli 2D e 3D precisi e densi, prefigurando anche una sperimentazione di fusione tra tecniche fotogrammetriche e mapping termico¹⁴.

L'interdisciplinarietà delle diverse prove non invasive utilizzate, dalle soniche alla termografia, ha permesso di ridurre al minimo l'utilizzo di test semi-distruttivi quali i martinetti piatti doppi, peraltro indispensabili per una precisa caratterizzazione numerica delle resistenze meccaniche al fine di procedere alle successive verifiche sismiche dell'edificio. Le prove soniche hanno verificato non solo la qualità muraria ma anche l'efficacia delle iniezioni di rinforzo post sisma, che non sempre risultano facilmente penetrabili in tutte le tessiture murarie, laddove la loro efficacia è proporzionale alla profondità di iniezione. Il test sonico e i rilievi endoscopici hanno avvalorato l'ipotesi della presenza di un doppio paramento murario con una principale discontinuità al contatto delle due murature.

Il rilievo termografico ha fornito informazioni che hanno permesso indirettamente di confermare la tipologia costruttiva del paramento murario esterno. Gli esiti dei rilievi dimostrano come la termografia all'infrarosso risulti tecnica con grandi potenzialità anche nel caso di supporto all'analisi strutturale, nonostante i dati qualitativi forniti e la lettura di segnali superficiali tenderebbero a relegarla a un ruolo marginale. Il complesso dei risultati desunto è ascrivibile, per completezza, ad un livello di conoscenza LC2 ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018, rappresentando un ottimo supporto di conoscenza per la futura progettazione del miglioramento sismico del Santuario.

Note

¹ D.M. 17 gennaio 2018, *Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"*, in G.U. n. 42 del 20/02/2018 – Supplemento Ordinario n. 8, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma.

² La letteratura inerente alle applicazioni di fotogrammetria UAV su complessi architettonici è oggi consolidata, due esempi recenti sono i seguenti: Andrea Adami, Luigi Fregonese, Mara Gallo, Jacopo Helder, Massimiliano Pepe, Daniele Treccani, *Ultra light UAV systems for the metrical documentation of Cultural Heritage: applications for architecture and archaeology*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XLII-2/W17, 2019, pp. 15-21. Filiberto Chiabrando, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Alessandra Spreafico, *Hybrid 3D Models: When Geomatics Innovations Meet Extensive Built Heritage Complexes*, in «International Journal of Geo-Information», 8 (3), 2019, p. 124; DOI: 10.3390/ijgi8030124.

³ Il sistema acquisito dal Laboratorio di geomatica per i beni culturali, tramite la collaborazione con il centro interdipartimentale FULL, è lo scanner Zeb Revo RT della GeoSlam, che negli ultimi anni si è affermato in molti campi applicativi, fra i quali il patrimonio architettonico: Michael Bosse, Robert Zlot, Paul Flick, *Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping*, in «IEEE Transactions on Robotics», 28 (5), 2012, pp. 1104–1119; DOI: 10.1109/TRO.2012.2200990. Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*, in «Applied Geomatics», 10 (4), 2018, pp. 317-339.

⁴ Si è trattato di un'attività didattica di addestramento al rilievo metrico 3D, realizzata il 19/7/2018 dal team DIRECT del Politecnico di Torino (Nannina Spanò, Stefano Angeli e Giacomo Patrucco come tutors e una serie di studenti); le elaborazioni del rilievo invece, si sono svolte presso il Laboratorio di geomatica del Dipartimento di Architettura e Design, con la collaborazione di Alessio Calantropio, Alessandra Spreafico, e ancora Giacomo Patrucco, che si è anche dedicato alle elaborazioni delle immagini termiche.

⁵ La standardizzazione dell'integrazione dei metodi fotogrammetrici e laser scanning, così come la rappresentazione integrata dei disegni architettonici vettoriali arricchiti dal contenuto radiometrico e geometrico delle ortofoto generate con tramite applicazioni di fotogrammetria digitale si è consolidata negli anni e si adegua continuamente agli sviluppi tecnologici delle tecniche e dei software.

⁶ Alessandro Grazzini, Giuseppe Lacidogna, *La diagnostica per le murature storiche. Conoscere bene prima, per intervenire meglio dopo*, in «Recupero e Conservazione magazine», 153, 2019, pp. 50-58.

⁷ Alessandro Grazzini, Giuseppe Lacidogna, *La diagnostica...* cit.

⁸ Circolare 21 gennaio 2019 n. 7, *Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto Ministeriale 17 gennaio 2018*, in G.U. n. 35 del 11-2-2019 – Supplemento Ordinario n. 5, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma.

⁹ Ermanno Grinzato, *IR Thermography Applied to Historical Buildings*, in «Proceedings of 6th International Conference on Quantitative Infrared Thermography», September 24-27, 2002. Xavier P. Maldague, *Theory and practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons, New York, 2001. M. Volinia, *Integration of qualitative and quantitative infrared surveys to study the plaster conditions of Valentino Castle*, in «Thermosense XXII», Proceedings of SPIE, Orlando, USA, 2000, pp 324-334.

¹⁰ Per la teoria fotogrammetrica e gli algoritmi e tecniche integrati in essa si rimanda, in questo stesso volume, al contributo Nuove tecnologie di rapid mapping q p. 41.

¹¹ La Figura 29 rappresenta un mosaico di immagini rettificate; è generata cioè apportando trasformazioni complessive alle intere immagini, e senza al contrario imprimere trasformazioni differenziali per ogni singolo pixel, che solo la fotogrammetria può risolvere. Nel caso attuale, il soffitto è un oggetto di interesse sufficientemente piano, per cui gli errori metrici sono sicuramente ridotti. Il metodo ovviamente è stato sperimentato per verificare l'applicabilità anche ad oggetti più articolati nelle tre dimensioni.

¹² Cfr. in questo volume il contributo a p. 54.

¹³ L'ortofoto true color e quella da dati termici sono state calcolate nel medesimo sistema di riferimento; l'accuratezza della prima è risultata pari a 1 cm, con risoluzione (GSD) di 1 mm, mentre per quanto riguarda l'ortofoto termica, l'accuratezza risultata di 3,5 cm, con risoluzione prossima al centimetro (8 mm).

¹⁴ Questa tecnica di fusione è sicuramente possibile grazie alla disponibilità degli algoritmi di matching di immagine e della tecnica SfM, che consentono di evitare onerosi test di calibrazione delle camere termiche a cui ci si dedicava alcuni anni fa: Antonia Spanò, Alessandro Massa, Patrick Testa, Monica Volinia, *Integrazione e confronto di dati termografici e fotogrammetrici per la diagnosi e la conservazione dei beni culturali*, in Atti della Conferenza nazionale SIFET, 2005.