Rilievo della Chiesa di Santa Maria de' Tridetti (RC) con fotomodellazione integrata aerea (Drone) e terrestre, inquadramento topografico rigoroso e modellazione 3D

Franco Prampolini^[1], Gabriele Candela^[1], Antonio Gambino^[1], Roberta Filocamo^[2]

Abstract. Rilievo integrato con fotomodellazione SAPR e terrestre di Santa Maria Tridetti, nel Comune di Staiti (RC), finalizzato alla documentazione del bene ed ai lavori di tutela, consolidamento e ristrutturazione in progettazione da parte della Soprintendenza ABAP di Reggio C. e VV. Di particolare interesse i risultati in termini di precisione, accuratezza cromatica e completezza del modello finale 3D che consente la produzione illimitata di piante, prospetti e sezioni verticali di qualità sub-centimetrica.

Parole chiave: Photomodeling, SAPR, Architectural survey.

1 Introduzione

Questo lavoro riguarda il rilievo integrato con fotogrammetria aerea e terrestre della Chiesa di Santa Maria de' Tridetti, nel Comune di Staiti, in provincia di Reggio Calabria finalizzato alla documentazione del bene storico ed ai lavori di tutela, consolidamento e ristrutturazione in corso di progettazione da parte della Soprintendenza ABAP di Reggio Calabria e Vibo Valentia nell'ambito del più generale progetto di tutela e valorizzazione finanziato dal MiC.

La chiesa di Santa Maria de Tridetti (Figura 5) si trova nel comune di Staiti (RC). Si tratta di un importante monumento dal forte valore identitario, costituito dalla chiesa del vecchio monastero a tre navate senza transetto chiuse da tre absidi con grande cupola centrale che sormontava il presbiterio, di ambito culturale basiliano.

L'edificio conserva oggi la gran parte delle facciate e l'impianto absidale presbiteriale che ne consentono una complessiva leggibilità e percezione. È stato oggetto, a partire dagli anni '70, e alla fine degli anni '90, di lavori di consolidamento e restauro. Di particolare interesse sono la tessitura muraria policroma e la presenza di elementi architettonici peculiari del tempo, dai capitelli ionici rovesci a *kymaticon*, ai grandi archi a sesto acuto.

¹ Università Mediterranea di Reggio Calabria - Dipartimento PAU - SuMMA Lab. franco.prampolini@unirc.it - gabriele.candela@unirc.it - antonio.gambino@unirc.it

² Soprintendenza ABAP di Reggio C. e V.V., roberta.filocamo@beniculturali.it

2 Obiettivi

Considerata la particolare complessità della struttura oggetto del rilievo, pastiche di antico e moderno, anche in virtù degli interventi di restauro della fine degli anni '90 [Figura 2], e le specifiche problematiche di consolidamento di una struttura che ambisce, nelle intenzioni dell'Amministrazione del Comune di Staiti e nella comunità culturale, a valorizzarsi accreditandosi come contenitore per eventi culturali e grande attrattore territoriale attraverso un moderno processo di restauro conservativo, si è reso necessario attuare una campagna di rilevamento in grado di dare conto di tale complessità sia in termini di precisione che in grado di fornirne una documentazione completa sul piano qualitativo.

Da un lato, quindi, era necessario garantire la perfetta leggibilità della tessitura muraria, incluso lo spessore degli allettamenti di malta e la qualità *materica* dei paramenti edilizi.

Occorreva poi garantirne un'immediata leggibilità tridimensionale finalizzata alla progettazione degli interventi di riuso. I restauri degli anni '90, infatti, hanno svolto un importante lavoro di salvaguardia da un punto di vista statico, conservando i resti di un monumento che già Paolo Orsi, all'inizio del '900, descriveva come un'importante "rovina" da elevare al rango di monumento di importanza nazionale [1]. I rilievi del tempo, anche quelli degli anni '90 [2], pur eseguiti con notevole abilità tecnica e improntati correttamente sul piano disciplinare alla "comprensione" del monumento, non sono sufficientemente dettagliati e analitici per una corretta analisi progettuale secondo i più moderni standard, in particolare per quanto riguarda la verticalità delle strutture rimaste, spesso ridotte a "vele" estremamente snelle e precarie.

Il rilievo, infine, doveva includere anche le aree di pertinenza esterne che comprendevano alcuni ruderi dei quali si prevede il recupero e la rifunzionalizzazione, anche in questo caso con una precisione sufficiente per i futuri interventi progettuali.

3 Il rilievo

Il rilievo è stato impostato con una metodologia integrata componendo l'impiego di droni, rilievo GPS terrestre di precisione, topografia classica rigorosa (total station), e fotogrammetria terrestre a grandissima scala. L'effettiva integrazione è stata garantita mediante l'impiego della pre-segnalizzazione realizzata con supporti orientabili perfettamente visibili sia nelle prese aeree che in quelle terrestri.

3.1 Rilievo con SAPR

Il rilievo delle parti non acquisibili con sistemi terrestri è stato eseguito con un SAPR DJI Mavic 2 pro le cui caratteristiche, in sintesi sono le seguenti: peso 907 g, Dimensioni 322×242×84 mm, Accuratezza del Sistema di hovering (con sistema GPS e vision

system), Vert: ± 0.1 m – Hor.: ± 0.3 m, sensore 1" CMOS da 20 milioni di pixel, campo di visione 77°, Formato equivalente 35 mm: 28 mm, Apertura f/2.8–f/11, ISO intervallo,100-3200, Risoluzione immagine 5472×3648 ;

I dati georeferenziati acquisiti dal drone sono stati inseriti nel modello fotogrammetrico il cui sistema di riferimento di base è quello rilevato con stazione totale e GPS.

Sono state eseguite due tipologie di missioni di volo (*Tab. 1*): di tipo pianificato per l'acquisizione dell'area nella sua interezza, e per la costruzione di una base di appoggio per il resto del rilievo e di tipo manuale per inquadrare prospetti e dettagli delle facciate.

missione	Tipologia	H volo	Tempo di acquisizione	N. di immagini
1	Circolare	30 m	17 m 58 sec	334
2	Manuale	11 m	3 min 54 sec	231
3	Manuale	15 m	11m 06 sec	227

Tab. 1 - Dettaglio missioni eseguite

In particolare, per il volo pianificato è stata inquadrata l'area con missione circolare attorno al bene architettonico da rilevare, come da **Fig. 1**.



Fig. 1a e b - Missione n.1, rilievo eseguito in modalità pianificata e, a destra, la posizione delle immagini acquisite con le missioni in volo manuale

Le missioni eseguite in modalità manuale, principalmente focalizzate sulla parte superiore ed aperta della chiesa, sono state appunto utilizzate per acquisire dettagli e particolari della costruzione a distanza ravvicinata (4-5 m), altrimenti difficilmente rilevabili per la ricostruzione fotogrammetrica.

L'utilizzo del SAPR ha consentito la ricostruzione fotogrammetrica completa del bene architettonico, ad integrazione del rilievo delle coordinate acquisite con le consolidate metodologie geomatiche e con i rilievi fotogrammetrici eseguiti dal piano campagna con macchina fotografica digitale.

3.2 Appoggio a terra

In considerazione della particolare metodologia impiegata è stato necessario predisporre un sistema di presegnalizzazione in grado di favorire il concatenamento delle varie fasi e massimizzare la precisione in sede di restituzione finale. Sono stati impiegati, a questo scopo, dei supporti speciali orientabili Leica (figura 2b) sui quali sono stati applicati dei marker standard in codifica a 12 bit, identificabili in modo semiautomatico dai principali software di fotomodellazione. La dimensione dei marker è stata predefinita in modo da risultare coerente alle varie scale di ripresa, molto diverse in rapporto alla risoluzione e focale delle camere impiegate e alla distanza di presa variabile per il drone, in particolare durante le missioni in modalità manuale. Si è in ogni caso garantita la reperibilità dei punti di appoggio a terra sui fotogrammi di norma non inferiore ai 10 pixel in modo da consentire, anche in caso di non perfetta riconoscibilità del marker stesso, una stima della sua posizione sufficientemente attendibile.

La possibilità di ruotare spazialmente i segnali, poi, ha consentito di mantenere inalterata la qualità della determinazione della loro posizione assoluta anche variandone l'orientamento nelle diverse fasi del rilievo: orizzontali per i voli e il rilevamento terrestre GPS, opportunamente direzionati per le misure con la stazione totale e nelle principali direzioni delle prese terrestri. In questo modo la stima della posizione dei segnali nelle foto in cui non risultano perfettamente riconoscibili risulta molto più efficace, consentendo l'impiego di molte più immagini nella compensazione e generando una ridondanza di osservazioni che irrobustisce fortemente il sistema.





Fig. 2a e 2b – Una fase del volo manuale del drone con, in primo piano, uno dei marker orientabili. A destra particolare.

L'inquadramento topografico è stato realizzato, in prima istanza, facendo partecipare le coordinate di posizione delle camere così come è stata registrata direttamente dal GPS del drone. La precisione assolta e relativa di tali osservazioni in questa fase è ovviamente molto bassa, non disponendo di un sistema RTK on board, ma lavorando opportunamente sui valori di precisione "a priori" di tali incognite e forzando la componente geometrica della parte fotogrammetrica del sistema è possibile ottenere buoni valori di precisione già in questa fase. Una prima elaborazione a questo livello, quindi, consente di disporre di coordinate approssimate della posizione della camere di presa utile per il prosieguo delle operazioni e la loro posizione assoluta può essere, come

vedremo, successivamente rettificata e ottimizzata on relazione con le misure dell'appoggio topografica a terra, garantendo una precisione complessivamente più che sufficiente per le restituzioni a scala inferiore dell'intera area di interesse.

Una seconda fase è stata realizzata impiegando una stazione totale TOPCON GTS-4 per la misura diretta della posizione relativa dei marker utilizzati per la presegnalizzazione e posizionati sui supporti orientabili. La collimazione, grazie alla possibilità di orientamento dei segnali stessi, è risultata ottimale e tutti i marker sono sati battuti da un'unica stazione. L'incertezza di posizione relativa dei segnali stessi, anche rispetto alla determinazione dell'orizzontalità (euclidea) del sistema e, quindi, delle quote relative dei punti, è stimabile nell'e.q.m. standard dello strumento (±2 mm + 2 ppm).

Gli stessi punti, poi, sono stati ribattuti con un equipaggiamento GNSS terrestre S990A della Stonex, in modalità Static-RTK, in grado di garantire una precisione subcentimetrica in questa modalità (± 8 mm + 1 ppm) anche in presenza di un segnale debole o intermittente.

Le coordinate locali della stazione topografica sono quindi state sostituite da quelle GPS e, quindi, è stata operata una rototraslazione rigida dei due sistemi con tecniche di best-fit e massimizzando il peso delle coordinate topografiche dirette relativamente a quelle ottenute in RTK, in particolare per quanto riguarda l'orizzontamento e i differenziali di quota, fattore fondamentale per le successive analisi strutturali dell'edificio.

In questo modo la rete di appoggio costituita dai marker può usufruire di una precisione relativa molto elevata anche all'interno di un inquadramento generale che mantiene la precisione assoluta, un poco inferiore, della determinazione dei valori della base GPS, mantenendo una precisione dei punti di controllo a terra (GCP) coerente con i valori richiesti in relazione alle finalità del rilievo stesso.

Allo stesso modo sono stati battuti in RTK anche alcuni punti di controllo in posizioni opportune per l'inquadramento generale del rilievo, operazione facilitata dalla disponibilità della pre-elaborazione dei voli operata con soltanto le posizioni di camera. È stata quindi effettuata un'ulteriore operazione di rototraslazione affine con pesi differenziati per le diverse osservazioni che ha riunificato i due sistemi GPS (locale e on board) migliorando complessivamente la precisione della restituzione delle missioni SAPR per le scale 1:500 e 1:100. D'altro canto, in questo caso, l'accuratezza assoluta dell'operazione di georeferenziazione non costituiva un fattore critico.

3.3 Appoggio a terra

Il software di restituzione fotogrammetrica e fotomodellazione impiegato in un primo momento è stato *MetaShape* (Agisoft, Vers. 1.5) che implementa interessanti algoritmi di valutazione statistica interattiva nella fase critica di ottimizzazione dell'orientamento relativo delle camere (allineamento) e dei valori di "riproiezione" in fase di generazione della nuvola densa. Nella fase conclusiva è stato sostituito con *Reality Capture* (Epic, Vers. 1.1.1) che ha dimostrato di essere più performante in termini di tempi di elaborazione e, soprattutto, nella delicata fase di produzione delle ortoproiezioni e nell'automatizzazione della realizzazione interattiva delle sezioni prospettiche.

È stato possibile, in questo modo, realizzare un modello unico tridimensionale dell'intero monumento pienamente soddisfacente sia in termini di precisione assoluta, sia per quanto concerne l'accuratezza cromatica delle texture.



Fig. 3 – Modello completo. Si noti la posizione dei punti di controllo.

Nel modello finale integrato, realizzato componendo i voli a quota media del drone, i voli a guida manuale e le prese terrestri, presenta invece residui medi inferiori al centimetro.

Tabella 2. - RMS punti di controllo (GCP).

Etichetta	errore X est mm	errore Y nord mm	errore Z Q. mm	Totale	Immagine (pix)
point 1	-0.806879	3.72961	-4.415	5.83552	0.703 (118)
point 2	-10.9685	-8.56688	-5.76174	15.0631	1.302 (90)
point 3	0.735268	2.87242	2.78518	4.068	1.320 (86)
point 4	4.97151	0.404198	-2.03949	5.38876	0.746 (25)
point 5	2.25188	-4.2056	9.26326	10.4195	0.731 (65)
point 6	11.5183	2.21173	-0.591336	11.7436	1.121 (126)
point 7	-8.70767	3.9526	0.50068	9.57587	1.376 (94)
Totale	7.1692	4.37391	4.64474	9.59698	1.111

X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine. Tra parentesi numero delle proiezioni per singolo GCP

4 Risultati

Il modello finale rappresenta un'ottima sintesi tra le ragioni del rilievo geometrico e quelle della rappresentazione. La restituzione degli elaborati di base è stata effettuata con una logica multiscalare direttamente dal software di fotomodellazione, che ha consentito di realizzare un modello unico dell'intero complesso monumentale e fornisce una serie di tools di esportazione particolarmente potenti che vanno, come detto, dall'ortoproiezione su piani comunque inclinati, alla generazioni semiautomatica di sezioni prospettiche passando dalla grande scala delle planimetrie generali a quella di dettaglio dei prospetti e delle sezioni. Sono stati prodotti:

- 1. Planimetria generale dell'area di interesse in scala 1:500.
- 2. Planimetria generale del manufatto e delle pertinenze in scala 1:100.
- 3. Piante, Prospetti e Sezioni in scala 1:25.
- 4. Modelli in formato Wavefront 3D Object File ".OBJ".

Di particolare interesse, come accennato più sopra, si è dimostrato il grado di accuratezza cromatica raggiunto dall'operazione finale di *texturing*, ottenuto grazie ad una cospicua attività preliminare di post processo delle immagini e alle potenzialità di equalizzazione dei software di restituzione.

Il "colore" era considerato un fattore critico, in quanto avrebbe potuto influire pesantemente sulle possibili letture tematiche delle tessiture murarie in sede interpretativa, con particolare riferimento all'immediata riconoscibilità degli interventi di copertura "mimetica" dei restauri effettuati negli anni '90, assieme alla non meno importante valutazione dimensionale dei diversi allettamenti di malta delle murature stesse, sia in modo comparativo che in valore assoluto.

Il modello finale è composto da una nuvola di circa 77,3 milioni di punti e una mesh interpolata di 154,0 milioni di triangoli, ricavati dalla restituzione e successiva fotomodellazione di 671 immagini, includendo sia le immagini terrestri che quelle da drone, elaborate contestualmente anche grazie alla sostanziale similitudine delle due fotocamere: Hasselblad L1D-20 Mpix, 28.0 mm f/2.8 sul Mavic, Canon EOS 200DEF-S10-18mm f/4.5-5.6, 26 Mpix, per le prese terrestri.

Gli ortofotopiani sono stati estratti ad altissima risoluzione. Si tratta di file in formato TIFF di circa 25.000 x 15.000 punti, corrispondenti ad un valore di densità di circa 635 DPI alla scala nominale di stampa (1:25), con una dimensione del pixel al vero di 1 millimetro, valore che consente, una perfetta leggibilità di tutte le componenti architettoniche, degli ornati, ecc. Consentono inoltre un esplorazione interattiva del modello numerico perfettamente leggibile fino alla scala 1:1 e oltre, con la possibilità di effettuare misure dirette 2D/3D direttamente sul modello stesso.

Altrettanto importante si è rivelata la possibilità di poter realizzare sezioni verticali, con precisione millimetrica, in qualunque posizione del monumento anche con riferimento alla verticale assoluta, un fattore fondamentale, ad esempio, per le analisi strutturali in corso a corredo del progetto di restauro attivato dalla Soprintendenza ABAP di Reggio Calabria e Vibo Valentia nell'ambito dell'intervento di tutela del bene in atto finanziato dal MiC.

Infine è interessante notare come l'applicazione estesa delle procedure fotogrammetriche anche nella fase della gestione del modello, possa risultare dirimente per mettere in luce anche quelle difformità stilistico/dimensionali, non necessariamente di minima entità, che spesso sono trascurate nelle restituzioni tradizionali, anche a volte nelle semplici "trascrizioni" di rilievi numerici. Si insinuano a volte, infatti, alcuni "preconcetti architettonici" che vanno nella direzione della simmetria, della linearità e dell'ortogonalità e che possono indurre, quasi involontariamente, ad errori

Sovrapponendo gli attuali fotopiani e i rilievi del '90 (per altro realmente apprezzabili per rigore metodologico e qualità grafica delle restituzioni) se, da un lato, si riesce a raggiungere una sostanziale "somiglianza" dei due elaborati, l'analisi locale dei singoli particolari costruttivi mette in luce difformità anche dell'ordine di dieci ~ 15 cm, incompatibili alle scale richieste per la progettazione degli interventi di restauro. Ma ancora più evidente è il mancato riporto in pianta di evidenti deformazioni della struttura muraria, come ad esempio, nell'angolo sud-est della navata destra.





Fig. 4 – Raffronto con i rilievi degli anni '90 (Cfr. [2]).

5 Conclusioni

L'applicazione delle tecniche di fotomodellazione ha raggiunto oggi un altissimo livello di operatività, componendo rapidità, economicità e qualità di risultati. Integrando a queste le metodiche operative rigorose della topografia classica è possibile raggiungere risultati sorprendenti quanto a precisione geometrica e accuratezza cromatica. Credo che ciò renda sempre più urgente un azione corale affinchè queste metodiche divengano parte integrante delle idee stesse di conservazione, tutela e valorizzazione del patrimonio architettonico e, più in generale, culturale.

Sono passati oltre 40 anni dalla pubblicazione da parte un pugno di docenti illuminati (Cunietti, Di Thiene, Masiero, Monti e Torsello) di *Misura e Conservazione: Tecniche di Rilevamento* e da quando, assieme ad un gruppo di "giovani di via Panisperna" (*si parva licet ...*) tra i quali figuravano chi scrive e tanti altri (Giorgio Bezoari, Alberto Giussani, un già non più giovanissimo Attilio Selvini, Camillo Trevisan, Raffaele Guida, Laura Baratin, Franco Guzzetti, Renata Codello, ...), un gruppo dicevo da cui prese vita quel sodalizio informale, ma solidissimo, dal quale nacque di fatto la fotogrammetria dell'architettura in Italia non solo come disciplina, ma come pratica operativa codificata e applicata su larga scala. Per un decennio sono stati esplorati i confini della materia attraverso la realizzazione di decine di rilievi a grande e grandissima scala, ma, soprattutto, si è cercato di codificare

Per la prima volta si associavano topografia, conservazione e restauro, progetto architettonico, disegno e ricerca filosofica, come fondamento della pratica del rilievo, preconizzava un futuro nel quale l'applicazione delle tecniche rigorose della cartografia classica al rilievo dell'architettura avrebbe garantito innumerevoli vantaggi operativi in termini di precisione e accuratezza, indefinita disponibilità nel tempo di archivi metrici del patrimonio culturale, coerenza nella necessaria multiscalarità degli approcci, efficacia nelle politiche di tutela e messa in sicurezza del patrimonio stesso, ecc.

Oggi la compresenza di tante tecniche e metodiche operative differenti (dalla computer vision all'I.A.) rende i confini disciplinari molto più fluidi, difficili da interpretare in modo univoco e rimangono persino dibattiti su "che cosa sia la fotomodellazione" [4]. Google ha quasi avverato il sogno di Albrecht Meydenbauer, costruire una banca dati fotogrammetrica completa del mondo, anche se ancora la scala propria dell'architettura e dell'archeologia è appena sfiorata. Il Koniglich Preussische Messbildanstalt, fondato dal grande architetto e fotogrammetra tedesco nel 1885, si fermò ad alcune decine di migliaia di lastre fotografiche dei principali monumenti tedeschi, ma molte di queste risultarono fondamentali per la grande opera di ricostruzione del dopoguerra in Germania ... così come lo sono oggi i rilievi fotogrammetrici di Notre-Dame, realizzati già a partire dagli anni '70 da Jean-Paul Saint Aubin, e Livio De Luca, che aveva lavorato 20 anni orsono a Santa Maria de' Tridetti, si trova oggi a guidare l'equipe impegnata, di nuovo, nella ricostruzione proprio grazie a quell'accumulazione provvidenziale di informazioni estese sul monumento.

Le disgrazie non avvisano prima di arrivare. E, ancora di più, l'attuale condizione pandemica ci porta a comprendere quanto possa essere importante la disponibilità di modelli ad alta risoluzione per la condivisione delle informazioni, in modo da estendere nel tempo e nello spazio la possibilità di studiare, condividere, comunicare il nostro patrimonio.

Le attività di sperimentazione sono importanti, ma ancora più importante è che queste metodiche divengano – finalmente – una pratica comune e condivisa per la valorizzazione del patrimonio culturale, sancita anche normativamente, in modo da evitare, in futuro, che anche importanti interventi di restauro possano aver luogo senza aver garantito, quanto meno, la conservazione della memoria attraverso il rilievo scientifico.

Questo lavoro costituisce una buona prassi e la collaborazione strutturata tra Soprintendenze e Università può far riprendere correttamente una strada già tracciata da oltre 40 anni.



Figg. 5-9 – Vista dall'alto del complesso basilicale, Pianta (livello coperture), Facciata principale (Sud-est), Sezione prospettica, prospetto absidale.

6 Riferimenti bibliografici

- 1. Orsi, P. Le Chiese basiliane della Calabria, Meridiana Libri, Catanzaro, 1997.
- Mediati, D. (ed.): Santa Maria de' Tridetti: un restauro di Antonio Quistelli, Rubettino, Soveria Mannelli, 2003. Di particolare interesse i contributi di A. Quistelli, F. Borrelli, D. Mediati, R.G. Brandolino e Livio De Luca.
- 3. Prampolini F., Oteri A.M., Caporale S., Mazzeo S., Muscherà F., From virtual to material restoration. A proposal for the reassembly of the altar of the Holy Heart of Mary in the Cathedral of Santa Maria Assunta in Gerace (Reggio Calabria, Italy), in: GEOMATICS & RESTORATION Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, 22–24 May 2017, Florence, Italy, I.S.P.R.S., Volume XLII-5/W1, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-305-2017, (2017).
- Paris, L.: Fotogrammetria e/o fotomodellazione, in: Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione. Vol. II, a cura di Andrea Casale. Edizioni Kappa Roma, 2012
- Barrile, V., Fotia, A., Candela, G., Bernardo, E.: Geomatics Techniques for Cultural Heritage Dissemination in Augmented Reality: Bronzi di Riace Case Study, Heritage, 2019, 2, 2243–2254; doi:10.3390/heritage2030136.
- 6. Torsello, B.P., Di Thiene, C., Masiero, R, Monti, C., Cunietti, M.: *Misura e Conservazione: Tecniche di Rilevamento*, CLUVA, Venezia (1979).
- 7. De Luca, L., La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie, Dario Flaccovio, 2011.

#AsitaAcademy2021