Giulio Mirabella Roberti

Per una manutenzione mirata di sistemi complessi: uso di un modello spaziale come strumento operativo per la pubblica amministrazione

Parole chiave: manutenzione programmata, rilievo fotogrammetrico, modello 3D

Introduzione

La cinta muraria costruita dalla Serenissima Repubblica di Venezia nel XVI secolo caratterizza ancora oggi lo *skyline* della città di Bergamo (*Fig. 1*). Nata con finalità più politiche che militari, fu concepita come il baluardo più avanzato in terraferma dei territori veneziani verso il ducato di Milano, venendo ad assumere un ruolo strategico di primissimo piano nella difesa delle vie commerciali verso il Nord, quando ormai la potenza marittima della 'Serenissima' si stava avviando a un inevitabile declino, per la fine del monopolio esercitato fino a quel momento sul commercio del pepe e delle spezie, messo in crisi dalle nuove rotte navali verso le Americhe e verso le Indie con la circumnavigazione dell'Africa. Ciò portò a una maggiore attenzione per i commerci che avvenivano verso il centro Europa e a concepire il progetto della via Priula, una strada che avrebbe collegato, tramite la val Brembana e il passo di San Marco, la città di Bergamo a Morbegno in Valtellina e quindi al Cantone dei Grigioni, alleato della Serenissima e porta per i mercati dell'Europa Centrale, che fino ad allora era raggiungibile soltanto passando attraverso territori dominati dagli Spagnoli e soggetti a fortissimi dazi commerciali.
Sebbene già da tempo piattaforme e baluardi venissero parzialmente utilizzati come terreni coltivabili, la 'Fortezza Veneziana di Bergamo'[1] cessò definitivamente la sua funzione difensiva con l'arrivo dei

Fig. 1. Bergamo, veduta aerea della Città Alta (<www.unesco-venetianfortresses.com/parti-del-sito/bergamo/>).

1 Nel caso di Bergamo è più corretto parlare di 'Fortezza Veneziana' anziché 'Mura Venete', come spesso si dice (vedi infra), perché la cinta muraria venne realizzata incidendo profondamente il tessuto urbano esistente, con consistenti demolizioni, allo scopo di creare un presidio poco attaccabile, anziché difendere adeguatamente la città esistente con i suoi borghi, che rimasero difesi soltanto dalla vecchia cinta medioevale (Foppolo 1977).

Fig. 2. Il circuito delle mura veneziane nella pianta del Manzini (Manzini 1816) a confronto con lo stato attuale nell'ortofoto aerea del 2012 prodotta in scala 1:5000 (dal Geoportale Nazionale).

Francesi nel 1796, senza alcuna reazione da parte delle scarse truppe veneziane presenti. Nel XIX secolo infine la realizzazione del viale delle Mura, con la costruzione dei parapetti in pietra, trasformò definitivamente gli spazi militari di un tempo nella passeggiata cittadina, ridefinendo completamente lo spazio urbano[2].

L'importanza storica e culturale di quest'opera imponente e ben conservata (*Fig. 2*), da sempre considerata parte integrante dell'immagine della città, è stata sancita a luglio del 2017 dall'inserimento di Bergamo nella lista del patrimonio mondiale dell'umanità dell'UNESCO, con una candidatura transnazionale che comprendeva diverse città fortificate in Italia, Croazia e Montenegro nel sito "Opere di difesa veneziane tra il XVI ed il XVII secolo: *Stato da tera* – *Stato da Mar* Occidentale".

Il Comune di Bergamo, in sinergia con l'Università degli Studi, Orobica Ambiente e Italia Nostra, ha avviato – contestualmente al riconoscimento delle 'Mura Venete' come sito UNESCO – un piano per la manutenzione programmata delle Mura allo scopo di contrastare i processi di degrado in atto. Una serie di azioni finalizzate alla "manutenzione sostenibile e concepite come un processo di cura quotidiana dei diversi elementi architettonici che costituiscono il 'paesaggio di pietra' delle Mura Venete"[3]. Gli interventi di conservazione sono stati preceduti da una fase di analisi, che sarà ripetuta periodicamente, comprendente ispezioni dirette in loco e sistematiche indagini conoscitive (con monitoraggio ciclico del degrado materico per mezzo del rilevamento 3D con fotogrammetria aerea tramite droni).

Opportunità e ostacoli per una manutenzione programmata

Il contesto ambientale condiziona fortemente lo stato di conservazione dei manufatti, in particolare dei paramenti murari, favorendo la crescita di vegetazione spontanea sulle strutture murarie e sui terreni al piede e in sommità. Le radici provocano danni al paramento murario, inserendosi negli interstizi e provocando l'allargamento delle fessure fino a causare la sconnessione e l'espulsione delle pietre del paramento. Anche la vegetazione arborea cresciuta sul bordo degli spalti nelle proprietà private scalza la parte sommitale fino al ribaltamento delle pietre a toro che formano il cordone. Se da una parte la rimozione della vegetazione spontanea si presenta come un intervento ricorrente, che può essere adeguatamente programmato e tenuto sotto controllo con una cadenza adeguata, dall'altra la riparazione puntuale delle lacune e delle sconnessioni causate dalla vegetazione arborea richiede interventi tempestivi da attuare con il necessario rispetto della materia storica ma con opportuna efficacia.

La necessità di interventi più organici di manutenzione, o meglio di conservazione programmata (secondo la definizione di G. Urbani[4]) si fa sempre più evidente e sta diventando un'esigenza sentita

2 Campus *et al.* 2017.

3 Dal progetto presentato per il Bando 2015 Fondazione Cariplo 'Buone prassi di conservazione del patrimonio', v. *Infra*.

4 Urbani 2000.

anche dalla pubblica amministrazione, in contrasto con la prassi sinora seguita di interventi sporadici dettati dall'emergenza o legati a occasionali disponibilità di fondi[5].
Questo tipo di approccio, che privilegia l'esecuzione di un insieme di operazioni minimali e ripetitive, comprendenti interventi preventivi e di monitoraggio, oltre a essere meno invasivo rispetto agli interventi occasionali finalizzati a ripristinare una supposta condizione iniziale del bene architettonico, sul lungo periodo presenta indubbi vantaggi economici, aspetto particolarmente rilevante per le amministrazioni pubbliche che devono gestire una mole enorme di beni (Della Torre 2010).
L'efficienza economica della conservazione programmata diviene dunque la più forte motivazione ad applicare finalmente i principi espressi a gran voce da John Ruskin quasi due secoli orsono ne *Le sette lampade dell'architettura*: "Prendetevi cura solerte dei vostri monumenti, e non avrete alcun bisogno di restaurarli. […] E tutto questo, fatelo amorevolmente, con reverenza e continuità, e più di una generazione potrà ancora nascere e morire all'ombra di quell'edificio"[6].
Nel passato, la periodica azione di rimozione della vegetazione ha interessato principalmente le parti più 'visibili' del perimetro delle mura, ovvero quelle affacciate verso la città bassa sul fronte meridionale; al contrario, alcune parti meno accessibili, soprattutto nella parte che costituiva il cosiddetto 'Forte di San Marco' verso il colle di San Vigilio, risentono di lunghi periodi di abbandono in cui la vegetazione è cresciuta indisturbata, causando non pochi danni al paramento murario e alla porzione sommitale del muro stesso. Paradossalmente l'Amministrazione Comunale si è resa disponibile a prendere in carico la manutenzione di tutto il perimetro, ma non a subentrare al Demanio Statale nella proprietà, evitando così di assumere l'obbligo della manutenzione, nonché la responsabilità civile e penale per i possibili danni a persone o cose dovuti all'assenza di azioni preventive di conservazione.
Nel caso di Bergamo infatti uno dei problemi maggiori da superare è legato alla definizione delle competenze connesse al complesso regime di proprietà dei manufatti che formano il sistema delle Mura: l'originale funzione militare ha infatti lasciato in eredità ai Demani degli Stati che si sono succeduti sul territorio (Repubblica Cisalpina, Regno Lombardo-Veneto, Regno d'Italia, Repubblica Italiana) la proprietà giuridica delle Mura stesse. Per la precisione, tale proprietà riguarda solamente i manufatti in muratura di pietra delle Mura vere e proprie, mentre gli spalti sulla sommità dei baluardi e delle cortine furono alienati già nella prima metà dell'Ottocento, così come i terreni sottostanti comprendenti i fossati, le lunette e le controscarpe del complesso sistema difensivo, presto assorbiti da coltivazioni e giardini privati. Una parte degli spalti, diventata proprietà comunale nel 1825 per volere del podestà di allora, il conte Rocco Cedrelli, fu adibita tra il 1829 ed il 1841 alla realizzazione di una panoramica passeggiata urbana e del viale delle mura, tra Porta S. Giacomo e porta S. Alessandro, concluso poi con la sistemazione del piazzale di Colle Aperto[7]. Anche le quattro[8] principali Porte urbane divennero proprietà comunale, mentre altri spazi considerati meno significativi furono acquistati da privati. Come già detto, le mura stesse e gli spazi sotterranei (come le cannoniere e i cunicoli di accesso) rimasero in gran parte di proprietà demaniale, con un effetto soprattutto di 'tutela

5 Già la Carta di Atene del 1931 sottolineava la necessità prediligere le operazioni di manutenzione agli interventi di restauro, così come le Istruzioni per il restauro dei monumenti, emanate in Italia dal Ministero per la Pubblica Istruzione nel 1938, affermavano l'esigenza di prevenire, con un'attenta manutenzione, ogni causa di deperimento dei monumenti. Cesare Brandi, fondatore dell'Istituto Centrale per il Restauro, introdusse il concetto di 'restauro preventivo', inteso come un complesso di azioni che consente di evitare o ritardare gli interventi d'urgenza sulle opere d'arte. La Carta di Venezia del 1964 ribadì la necessità di adottare la manutenzione come prassi. Pochi anni dopo, Giovanni Urbani, muovendo dal pensiero di Cesare Brandi, elaborò il concetto di 'conservazione programmata', basata sul controllo sistematico delle condizioni ambientali in cui è posta l'opera, al fine di rallentare i processi di deterioramento e intervenire per tempo con gli opportuni trattamenti manutentivi. L'obiettivo della conservazione programmata è dunque quello di arginare le emergenze attraverso la prevenzione. Questo tipo di approccio vede finalmente l'esordio nel Piano pilota per la conservazione dei beni culturali in Umbria (Urbani 1976) e viene successivamente sviluppato nel progetto della Carta del Rischio del patrimonio Culturale sviluppato dall'Istituto Centrale per il Restauro (www.cartadelrischio.it).

6 Ruskin 1849, trad. it., p. 228.

7 Cappellini 1977.

8 Porta Sant'Agostino, verso Venezia; Porta San Giacomo, verso la Pianura; porta Sant'Alessandro, verso Milano; porta San Lorenzo, verso le valli. La quinta porta, di minori dimensioni, detta 'del soccorso', dava accesso al cosiddetto 'Forte di San Marco', nella parte nord-occidentale del perimetro delle mura, ed è attualmente di proprietà privata.

passiva', legata alla mancanza di interessi verso una rendita diretta degli immobili o dei terreni, ma con scarsissime risorse investite per la manutenzione di un manufatto così esteso.
Se da un lato l'obbligo di provvedere alla conservazione di un bene monumentale vincolato ricade sulla proprietà (art. 30 CBCP[9]), nel caso del Demanio statale questi obblighi di fatto sono sentiti come poco cogenti: ragione per cui il Comune di Bergamo è stato forzatamente indotto a occuparsi della manutenzione, anche per la forte pressione da parte della cittadinanza che ha sempre sentito le Mura come patrimonio collettivo, attivando di volta in volta convenzioni specifiche con il Demanio e i soggetti privati coinvolti, come anche con associazioni di cittadini che a titolo volontario prestano la loro opera per i lavori di manutenzione ordinari.
In particolare, in data 20/03/2015 è stata firmata tra Comune e Demanio (maggiore proprietario delle Mura Venete) con l'associazione *Orobicambiente Onlus* una convenzione per l'esecuzione periodica di opere di rimozione della vegetazione infestante, che tra l'altro ha conferito titolo al Comune a partecipare a bandi per la manutenzione e valorizzazione del bene monumentale, come appunto quello indetto dalla Fondazione Cariplo 'Buone prassi di conservazione del patrimonio' nella sezione Arte e Cultura 2015, che erogò un finanziamento di circa 300.000 € per la realizzazione di un progetto comprendente sia operazioni di manutenzione urgenti sia la predisposizione di un programma di controllo e manutenzione periodica da ripetersi nel tempo.

Gli strumenti operativi

Il coordinamento degli interventi, che vanno dalla manutenzione dei parapetti lungo i percorsi pedonali (principalmente quelli adiacenti al viale delle Mura) alla sostituzione delle copertine in pietra deteriorate e alla rimozione della vegetazione infestante (*Figg. 3-4a*), ha evidenziato l'esigenza di uno strumento operativo più agile e dettagliato, che consentisse sia di tenere sotto controllo la situazione attuale, riportando lo stato di fatto prima e dopo gli interventi eseguiti, sia di individuare in modo puntuale le eventuali riparazioni necessarie per evitare ulteriori danni e le modalità operative da seguire volta per volta. Lo strumento operativo doveva possedere le flessibilità d'uso di un *data base* geografico-territoriale (SIT, Sistema Informativo Territoriale, o GIS, *Geographic Information System*) insieme alla precisione di dettaglio di un rilievo geometrico-materico; e doveva allo stesso tempo consentire una realizzazione sufficientemente speditiva per poter essere ripetuto nel tempo, acquisendo così una dimensione diacronica.

Fig. 3. Lavori di manutenzione delle mura: sulla sinistra i rocciatori impegnati nella rimozione della vegetazione infestante sul bastione di San Lorenzo (foto *Orobicambiente*).

Per queste ragioni la scelta è caduta in primo luogo su un rilievo aerofotogrammetrico mediante 'droni', o più precisamente Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), che grazie all'uso di software sempre più evoluti consentono la restituzione di modelli tridimensionali con 'textures', ovvero con la proiezione sulle superfici ottenute delle immagini fotografiche acquisite, aumentando il dettaglio e la rappresentatività del modello.

9 L'obbligo di garantire la conservazione dei beni tutelati rientra fra i principi fondativi del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio e viene ripreso nell'art. 30 (Obblighi conservativi): tale obbligo ricade sulla proprietà, indipendentemente dalla natura del soggetto e si riferisce a tutte le parti del bene. Oltre ai soggetti pubblici (Stato, Regione ed altri enti pubblici, territoriali e non territoriali), anche i privati sono dunque tenuti ad assicurare quella "coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro" attraverso cui si attua la conservazione del patrimonio, realizzando gli interventi di prevenzione, manutenzione e restauro preventivamente autorizzati dagli organismi di tutela.

Fig. 4. Una volontaria rocciatore al lavoro (a) e il drone utilizzato per le riprese fotografiche (b) (foto *Orobicambiente*).

Unire la precisione metrica ottenibile con rilievi diretti, possibilmente georeferenziati, con la rapidità di esecuzione e la ricchezza di dettaglio ottenibile con la fotografia è un obiettivo perseguibile con gli strumenti attualmente disponibili, peraltro in continua evoluzione: basti pensare che la realizzazione di una rete topografica di supporto ha richiesto poche giornate di lavoro grazie all'uso di stazioni GPS doppia frequenza, in modalità RTK (Real Time Kinetic), collegate alla rete di supporto regionale di Piemonte e Lombardia (SPINGNSS), usando la correzione differenziale VRS-Nearest-DGPS. Sono stati così rilevati 75 punti topografici, con un errore quadratico medio (SQM) inferiore ai 3 cm planimetrici e a 4 cm altimetrici, fissati al suolo con chiodi topografici e scelti sulla sommità e al piede delle mura in modo da coprire con almeno 5 punti, consentendo le opportune sovrapposizioni, ognuna delle diverse porzioni del circuito che si prevedeva di rilevare con una singola sessione di volo[10].

Per le acquisizioni aeree la facilità d'uso e di pilotaggio hanno fatto optare per un drone quadricottero compatto (DJI Phantom IV)[11] dotato di fotocamera per le riprese incorporata e montata su *gimbal* con campo di azione tra −90° e +30°, che permette riprese zenitali e inclinate sull'orizzontale, ed è adatto a rilevare le superfici quasi verticali delle mura (*Fig. 4b*). Sebbene fosse stato previsto che le operazioni di rilievo seguissero in ordine cronologico le fasi di pulizia delle mura dalla vegetazione, la presenza diffusa di vegetazione residua ma anche di vegetazione ad alto fusto cresciuta addossata alle mura ha richiesto una particolare perizia nell'aggirare questi ostacoli, cercando allo stesso tempo di eseguire riprese utili sulla maggior parte possibile del paramento murario.

La fotocamera del Phantom IV ha un sensore CMOS 1/2,3" e 12 MPixel, con lente di apertura 94° (equivalente a una focale da 20 mm nel formato 35 mm)[12]. Per una precisione al suolo di 1cm/pixel, la massima distanza di acquisizione risulta essere di 22,85 m: con questa risoluzione è possibile ottenere una rappresentazione sufficientemente dettagliata per una scala 1:200, scendendo a 1:100 o 1:50 in casi particolari. Ciò ha permesso di ottenere una mappatura generale del complesso più facilmente gestibile, consentendo allo stesso tempo di individuare con accuratezza le porzioni del manufatto che richiedono un'analisi più dettagliata, per particolari condizioni di degrado o eventuali dissesti in atto.

La costruzione dei modelli è avvenuta settore per settore utilizzando il software 3D Zephir Aerial©, grazie al quale è possibile realizzare il flusso di lavoro che dalle immagini originali conduce al modello tridimensionale con *texture* della superficie delle mura[13].

Il modello tridimensionale complessivo è il prodotto della composizione di tratti singoli di minore estensione. Ciò si è reso necessario in considerazione dei tempi e delle risorse hardware richieste in fase di elaborazione: in tal modo, ciascun singolo tratto è risultato gestibile dal punto di vista computazionale, sebbene per ottenere il livello di dettaglio definito sia comunque necessario effettuare una notevole quantità di elaborazioni. I singoli tratti hanno uno sviluppo in lunghezza generalmente inferiore ai 250 m e vengono definiti dalla posizione di almeno cinque vertici topografici a coordinate

10 I rilievi sono stati eseguiti dal topografo dott. Giuseppe Canavesi della Canavesi s.r.l. di Bergamo.

11 Il drone è stato reso disponibile dalla società EcoGeo s.r.l. (diretta dal dott. Diego Marsetti), insieme al tecnico (Elio Canini) che ha condotto il pilotaggio remoto, attraverso la convenzione con Orobicambiente Onlus.

12 Più precisamente, il sensore CMOS ha la dimensione maggiore di 6,17 mm nel rapporto 4/3, con distanza focale di 3,53 mm.

13 Azzola *et al.* 2019.

spaziali note disposti al loro interno: questa caratteristica fornisce un'adeguata ridondanza utile per il corretto posizionamento spaziale del modello.
I dati EXIF delle immagini costituiscono il punto di partenza per un orientamento preliminare delle camere (*structure from motion*) che si basa sul riconoscimento automatico di caratteristiche significative presenti in ciascuna immagine, ottenendo così una 'nuvola sparsa' di punti. Nonostante la scelta di impostazioni che privilegiassero la qualità e la precisione a discapito del tempo di elaborazione, l'errore medio che caratterizza i punti di controllo del modello in questa fase raggiunge qualche decina di cm.
Tuttavia tale procedura si rivela utile nella fase successiva: infatti, la definizione di una nuvola di punti sparsa velocizza l'individuazione manuale dei *target* (punti di controllo) nelle singole immagini. Dopo aver assegnato le coordinate spaziali dei vertici topografici, si allinea il modello con i vincoli 3D individuando i punti affidabili, ovvero esenti da errori accidentali. La procedura produce una nuova nuvola di punti sparsa caratterizzata da errori molto più contenuti, nell'ordine di alcuni millimetri. Tipicamente la procedura continua con l'elaborazione e il raffinamento manuale della 'nuvola densa', con la creazione delle superfici a rete di triangoli (*mesh*) e con la proiezione sulle superfici dei fotogrammi più efficaci per ricostruire l'immagine dell'oggetto rilevato (*textured mesh*). Infine, le *textured mesh* sono esportate con un formato di scambio per essere importate nel modello complessivo dell'intero circuito della Mura (*Fig. 5*).
Dai modelli relativi ai singoli tratti è possibile anche estrarre delle proiezioni ortografiche su piani verticali, paralleli all'andamento planimetrico prevalente del tratto di mura, nella scala prefissata. Le 'ortofoto' così prodotte, insieme ad estratti prospettici del modello realizzato, saranno messe a disposizione dell'Ufficio Tecnico del Comune di Bergamo per essere utilizzate come base per la mappatura dello stato di conservazione della cerchia delle 'Mura Venete', corredate da una schedatura dei casi di degrado riscontrati e dalla casistica degli interventi di manutenzione previsti.

Conclusioni e prospettive di lavoro

Il lavoro realizzato ha permesso di mettere a disposizione della Pubblica Amministrazione una importante risorsa in termini di conoscenza di un manufatto molto esteso e molto amato, ma poco conosciuto in dettaglio. L'affiancamento dell'Università al lavoro dei volontari ha garantito un adeguato rigore scientifico al procedimento seguito, pur contenendo in modo sostanziale i costi dell'operazione.
La ripetizione del rilievo fotogrammetrico a scadenze prefissate, da inserire possibilmente nel programma di manutenzione, può consentire un confronto nel tempo della evoluzione dei degradi, ad esempio della velocità di ricrescita della vegetazione infestante, e stabilire quindi una graduatoria di priorità di intervento: tutto questo richiede però di automatizzare e semplificare le procedure di elaborazione delle immagini acquisite, che rimangono molto laboriose e richiedono ancora tempi di calcolo molto lunghi.
Sarà inoltre possibile integrare il modello geometrico con informazioni puntuali di altra natura, come gli eventuali interventi di riparazione eseguiti, la individuazione di interventi pregressi e della loro cronologia, la qualità dei materiali impiegati e la loro possibile provenienza, e così via; infine, dove necessario, si potrà incrementare il livello di dettaglio del modello utilizzando strumenti più accurati, come riprese fotografiche ravvicinate da terra o rilievi tramite laser-scanner.

Giulio Mirabella Roberti, Università degli Studi di Bergamo, giulio.mirabella@unibg.it

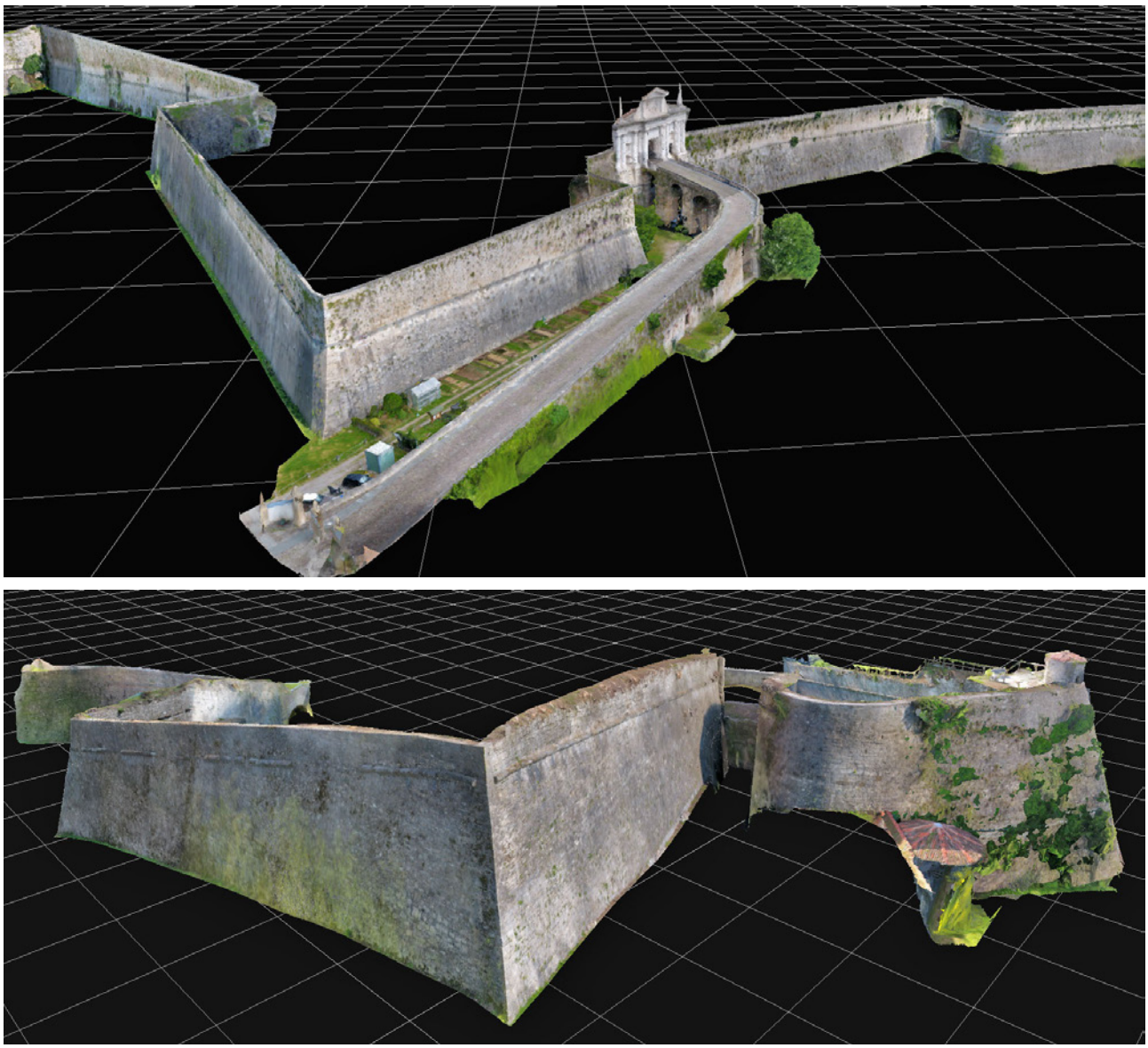

Fig. 5. Restituzione tridimensionale del modello fotogrammetrico delle mura: vista prospettica del bastione e del viadotto di porta San Giacomo (a) e del bastione Pallavicino (b). ©DISA-UniBG.

Referenze bibliografiche

3D Flow 2013
3D Flow (a cura di), *3DFlow 3DF Zephir. Manuale utente versione 4.0*, 3D Flow, 2013

AAT 1977
Azienda Autonoma di Turismo (a cura di), *Le Mura di Bergamo*, Bergamo 1977

ASLAB 1990
Ateneo di Scienze, Lettere ed Arti di Bergamo (a cura di), *1588-1988. Le mura di Bergamo*, in *Atti dell'Ateneo di Scienze, Lettere ed Arti di Bergamo*, XLIX, Edizioni dell'Ateneo, Bergamo 1990

Azzola *et al.* 2019
P. Azzola, A. Cardaci, G. Mirabella Roberti, V.M. Nannei, *UAV photogrammetry for cultural heritage preservation: modeling and mapping Venetian Walls of Bergamo*, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2-W9, 2019, pp. 45-50 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-45-2019>

Barazzetti *et al.* 2014
L. Barazzetti, R. Brumana, D. Oreni, M. Previtali, F. Roncoroni, *True orthophoto generation from UAV images: implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach*, in *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5, 2014, pp. 57-63 <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-57-2014>

Campus *et al.* 2017
G. Campus, I.F. Castelli, V.M. Nannei, G. Mirabella Roberti, *Attraverso il parapetto: le Mura Venete di Bergamo da architettura militare a spazio urbano condiviso*, in D.R. Fiorino (a cura di), *Military Landscapes. A future for military heritage*, atti del convegno (La Maddalena, 21-24 giugno 2017), Skira, Milano 2017

Cappellini 1977
P. Cappellini, *Le mura dopo il dominio veneto*, in Azienda Autonoma di Turismo, *Le mura di Bergamo*, AAT, Bergamo 1977

CBCP 2004
Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42

CGB 1980
Collegio dei Geometri di Bergamo (a cura di), *Rilievi e disegni delle Mura venete*, Tipografia Bergamasca, Bergamo 1980

Della Torre 2003
S. Della Torre (a cura di). *La conservazione programmata del patrimonio storico architettonico. Linee guida per il piano di manutenzione e il consuntivo*, Edizioni Angelo Guerini e Associati, Milano 2003

Della Torre 2010
S. Della Torre, *Conservazione programmata: i risvolti economici di un cambio di paradigma*, in «Il capitale culturale», 2010, 1, pp. 47-55

Fassi *et al.* 2013
F. Fassi, L. Fregonese, S. Ackermann, V. De Troia, *Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas*, in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W1, 2013, pp. 73-80 <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-73-2013>

Foppolo 1977
V. Foppolo, *La costruzione delle mura venete*, in Azienda Autonoma di Turismo, *Le mura di Bergamo*, AAT, Bergamo 1977

Linder 2003
F. Linder, *Digital photogrammetry: theory and applications*, Springer, Berlin Heidelberg New York 2003

Manzini 1816
G. Manzini, *Pianta della Città di Bergamo e dei Borghi esterni*, Bergamo 1816

Ruskin 1849
J. Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture*, Smith, Elder & Co., Londra 1849; trad. it., *Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano 1982

Shan, Toth 2010
J. Shan, C.K. Toth, *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*, CRC press, 2010

Urbani 2000
G. Urbani, *Intorno al restauro*, Skira, Milano 2000

Towards a planned maintenance of complex systems: a spatial model as operational tool for the public administration

Keywords: planned maintenance, photogrammetric survey, 3D model

Planned maintenance is becoming more and more the way to face the problem of avoiding random or casual repair interventions, which often become emergency measures due to an increasing and progressive decay that menaces to endanger definitely the integrity of an artefact. Programming maintenance interventions on a many years scale become mandatory when the heritage to preserve shows features of huge material and geographical extent, as in the case of particular monumental sites. The examined case refers to the wall circle of Bergamo, but the argument can be also discussed in reference to some historical country houses or else to urban or landscape sites.
From this point of view, the preliminary knowledge phase plays a fundamental role in order to develop suitable and effective intervention strategies, focusing on one side on the detection of recurring problems, on the other on finding the critical zones where particular care must be applied, establishing also a priority ranking for employing the allowable (and often limited) economic resources. Very effective appears the use of aerial photogrammetric survey by UAV, thanks to the powerful software instruments that nowadays can be used, allowing nearly short-distance shooting that can lead to build detailed digital models of the surfaces of observed artifacts and the examination of their conservation conditions.
A recent example of the application of this technique to a particularly interesting object is the survey campaign developed in the framework of the maintenance project on 'Venetian Walls' of Bergamo. It is also a good example of collaboration among Public Administrations (the Municipality of Bergamo and the University) and private associations, like 'Orobicambiente' and 'Italia Nostra', involved in the conservation and protection of the heritage and the landscape. In July 2017, the 'Venetian Walls' were registered in the UNESCO World Heritage List as part of the serial multinational site *Venetian Works of Defense between 16th and 17th Centuries: 'Stato da tera' – Western 'Stato da Mar'*. In the meantime, the Municipality of Bergamo began a project for setting up a maintenance program for the Walls in order to fight and contain the deterioration processes, with the scientific support of the University of Bergamo and the economical contribution of 'Fondazione CARIPLO'. A series of actions aimed to the "sustainable maintenance, conceived as a daily treatment process of different architectural elements that compose the stone landscape of the Venetian Walls". Conservation interventions are anticipated by an analytical phase that will be repeated recursively, including direct in situ inspections and systematic explorative investigations (with the cyclic monitoring of the material deterioration by means of 3D aero-photogrammetric survey using drones).