

## “MURA BASTIA”. DATI ARCHEOLOGICI, INFORMATIZZAZIONE E RILIEVI 3D LASER SCANNING DEL CASTELLO DEGLI ONIGO (PEDEROBBA, TREVISO)

### 1. ARCHEOLOGIA, RILIEVI E CONTINUITÀ PROGETTUALE

Le indagini archeologiche, avviate oramai da diverso tempo presso il sito “Mura Bastia” (Fig. 1), sotto la direzione scientifica del prof. Guido Rosada (Topografia antica, Dipartimento di Archeologia, Università di Padova) sono continuate nel 2008, avvalendosi, come l’anno precedente, della proficua collaborazione del Laboratorio di Rilevamento e Geomatica (Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento, Università di Padova), diretto dal prof. Vladimiro Achilli. Lo scopo, infatti, era di completare da un lato il progetto di anastilosi virtuale della torre di Onigo, dall’altro di proseguire, mediante tecnologia laser scanning (Leica HDS2500), nell’acquisizione delle restanti murature pertinenti all’insediamento fortificato, così da ottenere un modello tridimensionale reale dell’intero sito (FRASSINE *et al.* 2008).

Proprio in relazione a tale finalità, le prime due settimane della campagna 2008 sono state dedicate alla rimozione delle essenze infestanti (edera), ricorrendo in diversi casi solamente all’eliminazione del fogliame e degli apparati vegetali secchi, per non compromettere l’integrità delle strutture, stabili grazie alla presenza della vegetazione. Questa operazione ha permesso, al contempo, non solo di attuare una nuova documentazione fotografica dei prospetti murari, ma anche di effettuare diverse sequenze fotografiche digitali zenitali ad alta risoluzione delle creste murarie (ad eccezione di quelle pericolanti), con l’intento di comporre un rilievo digitale dettagliato dell’intera struttura castellare (Fig. 2).

La necessità quindi di realizzare una nuova e più accurata planimetria del sito ha comportato lo scotico di una porzione areale pertinente alla cinta esterna sud-occidentale, di cui non era nota l’esistenza. Tale intervento ha dunque consentito di identificare l’andamento e la morfologia della struttura muraria (Unità Stratigrafica Muraria - USM 3007): conservata per un’altezza di circa un paio di metri, essa si presenta con una decisa inclinazione verso occidente rispetto alla verticale originaria e appare in buona parte spogliata sulla facciata meridionale, analogamente a quanto si registra per il contiguo muro d’ingresso (USM 3008) (Fig. 3, Fig. 12).

Tutte le murature esposte sono state suddivise, in base alle loro caratteristiche morfologiche, in numerose porzioni planari documentate attraverso la tecnica del fotopiano (cfr. *infra* § 2). Questi dati, una volta rielaborati all’interno di uno specifico software fotogrammetrico (E-FOTO), sono stati

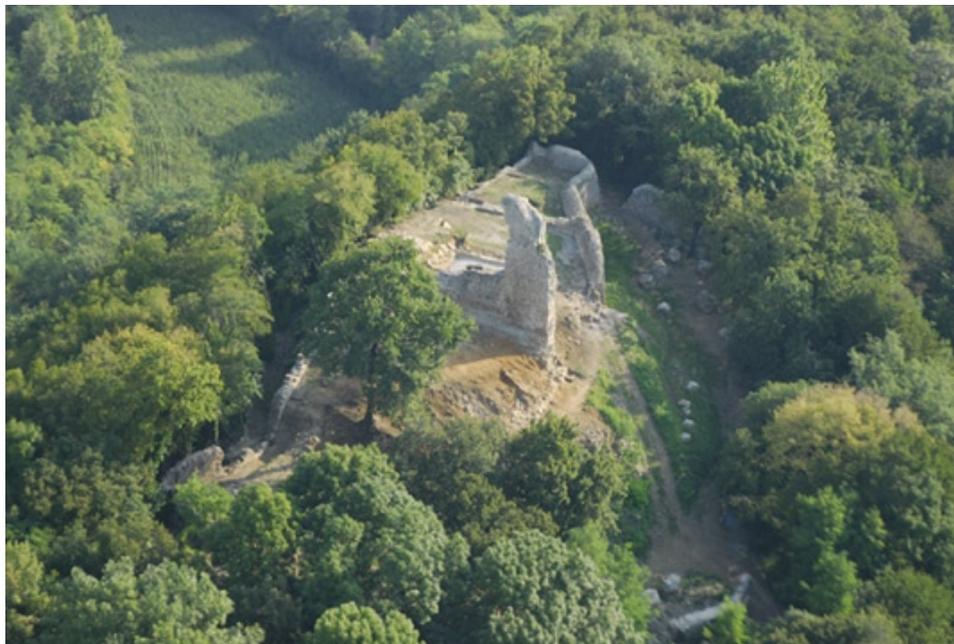


Fig. 1 – Onigo, “Mura Bastia”. Il sito fortificato in due riprese aeree del 29 agosto 2008 (foto M. Frassine).

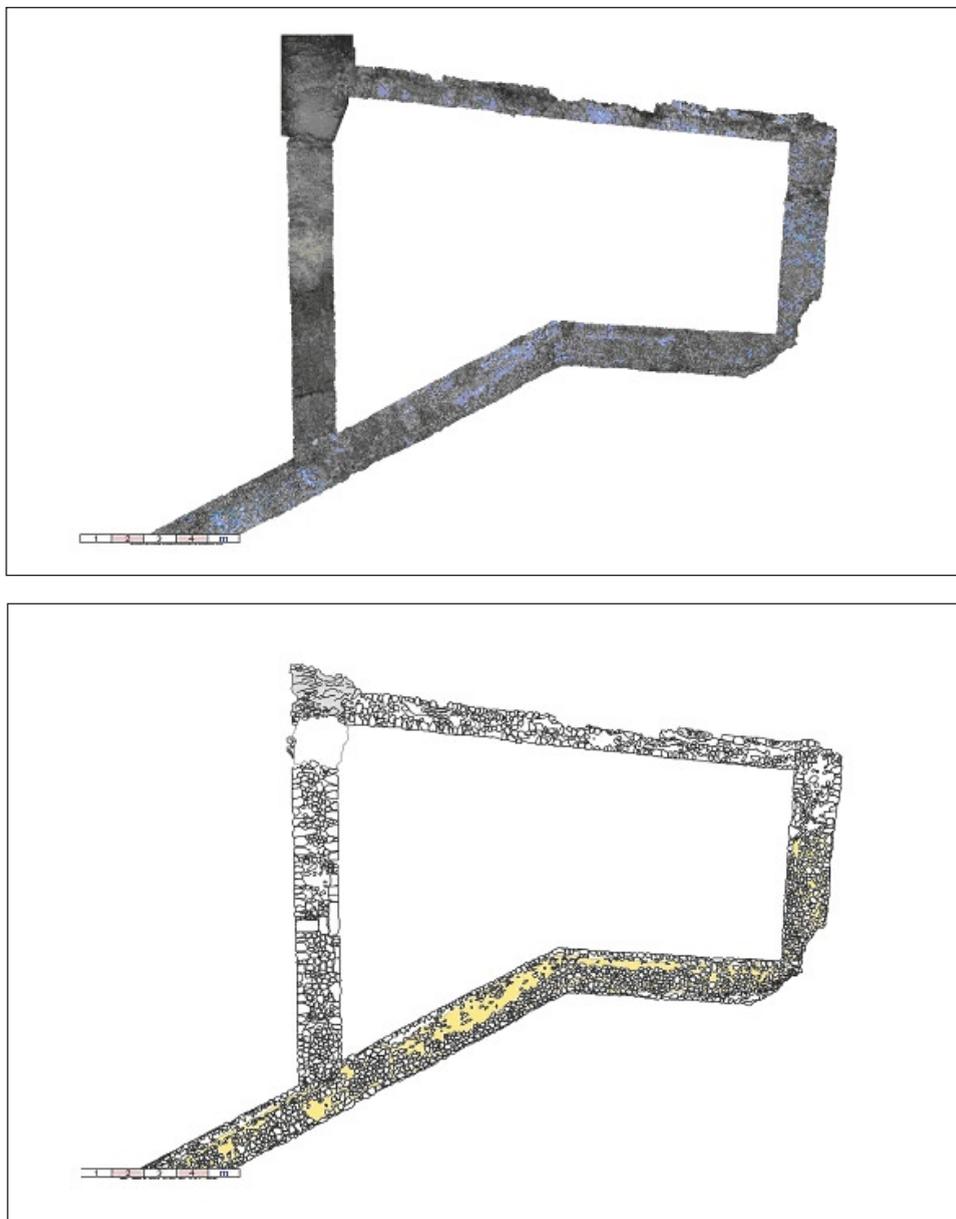


Fig. 2 – Particolare dell'area del dongione: fotopiani delle murature e corrispettiva restituzione grafica vettoriale (elaborazione M. Frassine, A. Bezzi).



Fig. 3 – Riprese fotografiche della cinta esterna sud-occidentale del castello di Onigo a fine campagna 2008 (foto M. Frassine).

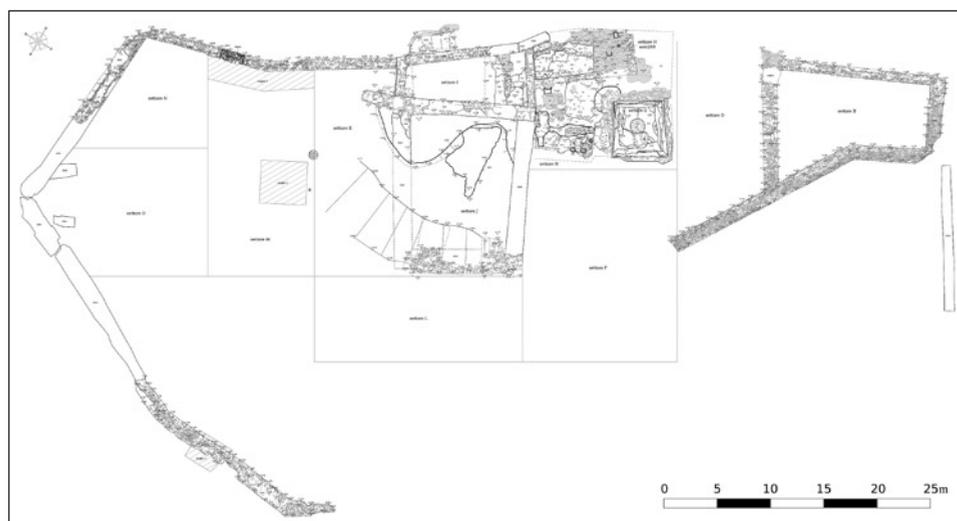


Fig. 4 – Planimetria generale dell'insediamento fortificato (elaborazione M. Frassine, A. Bezzi).

trasformati in immagini metricamente corrette e georeferenziate. In seguito al passaggio da una grafica di tipo raster (fotografia) ad un supporto vettoriale, attraverso un programma GIS (OPENJUMP), all'interno del quale ogni singolo elemento è stato disegnato manualmente, si è ottenuto un tradizionale rilievo archeologico e quindi una nuova e puntuale planimetria del sito (Fig. 4).

Questa tecnica è stata impiegata anche per la documentazione di scavo, con l'intento di realizzare un articolato GIS (OPENJUMP, gvSIG) ove far confluire sia i nuovi dati archeologici, sia quelli pertinenti alle campagne pregresse. Le prime applicazioni hanno dunque interessato l'area del dongione, e segnatamente la zona immediatamente a nord della cisterna, dove era stato possibile individuare una struttura rettangolare (Settore H, ambiente 200), in origine sviluppata probabilmente in addosso alla cinta settentrionale della fortificazione (FRASSINE 2007). L'analisi stratigrafica qui condotta su una serie di apporti che hanno livellato l'intero ambiente, colmando il dislivello tra la roccia in posto emergente a settentrione e il muro USM 200 a meridione, ha messo in luce il substrato roccioso, già ripulito quasi totalmente in antico dall'argilla pura arancione-rossastra, tipica della conformazione geologica del sito. L'assenza del paleosuolo potrebbe essere posta in relazione con cinque tagli nel *bedrock*, quattro di forma quadrangolare destinati all'alloggiamento di travi verticali e uno circolare per palo, riconducibili, forse, data la loro posizione topografica, alla creazione di un'impalcatura lignea funzionale alla costruzione della cinta muraria (Fig. 5). L'esame condotto sui reperti mobili, per quanto scarsi, riconduce senza dubbio all'ambito medievale. Le varie indicazioni cronologiche sembrano, dunque, convalidare quanto già suggerito dalle indagini condotte nel corso delle campagne di scavo precedenti (MARCHIORI 2003; ERCOLINO 2004), consentendo di circoscrivere al XIV secolo d.C. il periodo di vita della struttura (FRASSINE *et al.* 2008, 300; FRASSINE 2009).

Immediatamente ad occidente dell'ambiente appena descritto, si sviluppa un'altra area sub-trapezoidale delimitata a meridione dal perimetrale nord della torre (USM 1001), a settentrione dalla cinta esterna del castello (USM 2002), ad oriente dall'USM 100 e ad occidente dall'USM 2001. Questo settore (I), indagato attualmente solo nella porzione più orientale, ha evidenziato, al di sotto di alcuni strati moderni relativi al completo abbandono dell'area, la sopravvivenza di una struttura, riconducibile al periodo bellico (novembre 1917-ottobre 1918). Tale postazione militare, orientata in direzione del fiume Piave, si presenta come l'insieme ideale di due opere murarie a secco, separate da un punto di passaggio (Fig. 6). La porzione settentrionale è caratterizzata da una forma quadrangolare (104×124 cm circa) sviluppata in addosso all'USM 2000, mentre l'altra, immediatamente a meridione, si presenta come un muro allungato in senso nord-sud, leggermente curvo, con filari pseudo-lineari realizzati con pietre di reimpiego provenienti dal castello. Questa struttura



Fig. 5 – Settore H ambiente 200: fotopiano relativo alle fasi di frequentazione precedenti alla costruzione dell'edificio (elaborazione M. Frassine).



Fig. 6 – Il settore I a fine campagna 2008, documentato attraverso la tecnica del fotopiano (elaborazione M. Frassine).

appare completamente indipendente dal perimetrale nord della torre (USM 1001), dato che tra questi elementi non esiste un contatto fisico diretto: questo secondo varco serviva forse ad agevolare i collegamenti tra quest'area e l'interno della torre, che presentava, proprio nel perimetrale settentrionale, un'ampia apertura artificiale, ancora visibile nelle fotografie precedenti al crollo del 1989. Sembrano convalidare al momento tale lettura anche alcuni piani di calpestio legati alla frequentazione dell'area e alcune sistemazioni intenzionali localizzate soprattutto in corrispondenza dell'apertura artificiale, realizzata nell'USM 1001 (Fig. 7).

La rimozione all'interno della torre (Settore J) del deposito relativo al crollo del 1989 aveva mostrato una sostanziale mancanza di stratificazione antica, permettendo di individuare al contempo un ampio taglio nella zona nord-orientale (FRASSINE 2008). L'indagine condotta nel corso della campagna 2008 ha effettivamente consentito di iniziare a scavare i primi riempimenti, confermando, attraverso i vari reperti mobili (tra cui si ricordano diversi contenitori metallici per cibi in scatola, alcune bottiglie, qualche recipiente vitreo per inchiostro e alcuni bossoli di proiettili), la natura bellica dell'intervento (cfr. anche FRASSINE 2009).

Diversa appare, invece, la situazione al limite sud del settore J, dove un tempo insisteva il perimetrale meridionale della torre (USM 1003). Qui, infatti, il deposito archeologico, sviluppato su un fronte di circa 12 m e per una fascia di almeno 2 m in forte pendenza, appare connotato da diverse unità stratigrafiche, attribuibili ai momenti di vita, abbandono e crollo della struttura abitativa. L'analisi stratigrafica, compiuta finora solo attraverso la realizzazione di un sondaggio-trincea, ha consentito di identificare un apporto macerioso omogeneo, caratterizzato da coppi e scaglie bianche del Monfenera, sviluppato a copertura di un ulteriore strato, che ha restituito una notevole quantità di reperti collocabili, sulla base di una prima analisi, al XIII secolo. Sono dunque questi gli unici elementi superstiti della stratificazione antica, presenti in origine all'interno della torre, prima del cedimento del perimetrale meridionale. Questa muratura, individuata già parzialmente l'anno precedente (FRASSINE 2008), è stata intercettata ed esposta, nel 2008, a seguito dell'asportazione delle unità stratigrafiche appena ricordate.

La situazione presentava due diversi accumuli di pietre: uno, legato da malta, giacente a ridosso del taglio di fondazione, sarebbe riconducibile alle fondazioni originarie; l'altro sarebbe ascrivibile, per la sua stessa disposizione, al crollo del perimetrale sud (Fig. 8). Allo stato attuale delle conoscenze, sembra dunque ipotizzabile l'esistenza di due diverse modalità costruttive, strettamente connesse all'andamento geomorfologico della dorsale. Laddove il paleosuolo era particolarmente cospicuo, si è proceduto a tagliare il substrato sterile argilloso, per poi costruire un paramento a vista di conci in arenaria variamente sbozzati, all'interno del quale venne in seguito riversato



Fig. 7 – Particolare del settore I: a destra la postazione militare e di fronte il taglio realizzato nel perimetrale nord della torre (foto M. Frassine).



Fig. 8 – Settore J, area sud: esempio di integrazione tra documentazione tradizionale (campagna 2007) e un fotopiano digitale realizzato durante la campagna 2008 (elaborazione M. Frassine).

un nucleo di pietre, forse di scarto, di media e piccola pezzatura; laddove, invece, la roccia in posto era affiorante si è ricorso ad una semplice pulitura superficiale dalle argille.

M.F.

## 2. DALLA DOCUMENTAZIONE CARTACEA AL DIGITALE: INFORMATIZZAZIONE DELLO SCAVO DI “MURA BASTIA”.

### 2.1 *Antefatti*

Durante la campagna di scavo 2002-2003 è stato effettuato per il sito di “Mura Bastia” un primo tentativo di integrazione tra la documentazione archeologica tradizionale (disegno manuale) e le nuove tecnologie. Il lavoro congiunto di archeologi e topografi informatici è stato suddiviso in tre distinte fasi a cui rispondevano tre diversi metodi operativi (GROSSI *et al.* 2004). Una prima fase ha visto la realizzazione di una nuova griglia di picchetti di riferimento, posizionata utilizzando una stazione totale Geodimeter 500. A questo reticolo facevano riferimento i disegni delle singole unità stratigrafiche, effettuati durante tutta la campagna di scavo attraverso i metodi di documentazione tradizionale (fase due). Infine, come ultima operazione, è stato rilevato il posizionamento geodetico del sito attraverso la misurazione, in coordinate assolute, di due punti fissi utilizzando i ricevitori GPS Leica SR299 e Novatel DL4.

I dati così ottenuti sono serviti, durante il lavoro di post-scavo, per realizzare un progetto all'interno di un software CAD. Il reticolo di riferimento e i punti misurati attraverso la stazione totale, importati direttamente nel programma, hanno formato la base per il posizionamento degli altri elementi. I disegni manuali sono stati in un primo momento acquisiti tramite scanner e successivamente vettorializzati manualmente. Attraverso i picchetti della griglia di riferimento si è proceduto poi ad inserire i nuovi elaborati all'interno della planimetria generale dello scavo. Un ultimo passaggio è stato compiuto con la sovrapposizione della pianta palinsestica sulla Cartografia Tecnica Regionale, utilizzando come target di unione i punti fissi misurati sul campo sia in coordinate assolute, attraverso i ricevitori GPS, sia nel sistema locale, mediante la stazione totale.

### 2.2 *La campagna 2007: dal CAD al GIS*

Durante la fase di organizzazione della campagna di scavo 2007 si è deciso di impostare un programma di lavoro, inteso a sostituire gradualmente la documentazione di tipo tradizionale a favore dei nuovi metodi informatizzati. Sebbene nel passaggio non sussistessero particolari difficoltà, bisognava comunque tener presente sin da subito l'importanza di mantenere un collega-

mento diretto con i rilievi cartacei prodotti in più di dieci anni di attività di scavo. Per questo motivo si è preferito evitare di utilizzare per le misurazioni un sistema di coordinate assoluto che, se da un lato avrebbe consentito di inserire il sito all'interno del suo contesto territoriale, permettendo quindi analisi spaziali di tipo *extra-site*, dall'altro avrebbe complicato notevolmente il lavoro di vettorializzazione e ricollocamento delle vecchie planimetrie cartacee. Si è dunque optato per l'impostazione sul campo, con l'ausilio di una stazione totale (Trimble 3600), di un sistema di coordinate relativo, che fosse ancorato al reticolo di riferimento e alla quota di cantiere, lasciando ad un momento successivo la migrazione verso un posizionamento geodetico. Il nuovo piano cartesiano è stato ideato prendendo come punto origine (500E, 500N) il picchetto "0N", localizzato a ridosso del perimetrale orientale della torre, e come asse delle ordinate l'allineamento dato dai picchetti "0N" e "6N", disassato rispetto al nord reale di circa 30 gradi.

Un'altra novità, introdotta con la campagna 2007, è stata l'adozione di una piattaforma GIS rispetto al software di tipo CAD utilizzato negli anni 2002-2003. Un'applicazione GIS, infatti, essendo per sua natura un sistema territoriale, consente una migliore gestione dei dati spaziali, lasciando il progetto sempre aperto ad ulteriori integrazioni con dati nuovi o pregressi (Fig. 8). Inoltre, il GIS supporta in maniera nativa il formato raster georeferenziato, dato questo non trascurabile in quanto l'immagine costituisce l'elemento fondamentale del rilievo digitale bidimensionale effettuato con la tecnica del fotopiano. Un altro aspetto favorevole consiste nella possibilità di implementare tale piattaforma con le potenzialità di analisi offerte dal campo dei database e di conseguenza di ampliare notevolmente l'efficacia delle interrogazioni spaziali e delle ricerche incrociate. Non meno rilevante per la scelta operata è stato, infine, l'ampio spettro di applicativi GIS riscontrabili all'interno del gruppo del software libero.

### 2.3 Lo strumento informatico libero

Tutto il procedimento informatico, applicato durante le campagne di scavo 2007-2008 e nel successivo periodo di rielaborazione, ha visto l'utilizzo esclusivo di software FLOSS (*Free/Libre Open Source Software*)<sup>1</sup>. Sia nella più semplice fase di acquisizione e archiviazione dei dati digitali, sia nelle più complesse operazioni di elaborazione, interpretazione e gestione delle informazioni sono stati impiegati gli applicativi liberi inseriti all'interno del sistema operativo ArcheOS<sup>2</sup>. Acronimo di *Archaeological Operating System*, è una distribuzione GNU/Linux pensata per risolvere i problemi della ricerca

<sup>1</sup> Per una maggiore documentazione sulla definizione di FLOSS cfr. [http://it.wikipedia.org/wiki/Software\\_Free/Libero/Open-Source](http://it.wikipedia.org/wiki/Software_Free/Libero/Open-Source).

<sup>2</sup> <http://www.arc-team.com/archeos/>.

archeologica in tutte le sue fasi: dalle ricognizioni preliminari fino alla pubblicazione dei dati, passando per la gestione dello scavo, la classificazione e lo studio dei reperti, la ricostruzione virtuale, etc. (BEZZI *et al.* 2005a-b; BARTON *et al.* 2006; BEZZI *et al.* 2006b). La scelta di ricorrere al software libero rispetto a prodotti proprietari è stata dettata da necessità pratiche, molte delle quali trovano origine nelle quattro libertà fondamentali garantite dalla licenza GPL (*General Public License*)<sup>3</sup>:

- “libertà” di eseguire il programma per qualsiasi scopo (libertà 0);
- “libertà” di studiare il programma e modificarlo (libertà 1);
- “libertà” di copiare il programma in modo da aiutare il prossimo (libertà 2);
- “libertà” di migliorare il programma e di distribuire pubblicamente i miglioramenti, in modo tale che tutta la comunità ne tragga beneficio (libertà 3).

Soprattutto la condivisione del software è un fattore essenziale per uno scavo universitario, in quanto permette di fornire allo studente non solo le conoscenze, ma anche lo strumento per metterle in pratica. Si poteva, inoltre, ricorrere ad un supporto tecnico esteso, quale è una comunità internazionale di utenti/sviluppatori<sup>4</sup>, oltre ad avvalersi di formati digitali “aperti”, facilmente interscambiabili e accessibili nel lungo periodo (per esempio ODF, GML, SVG, etc.). Infine, non meno trascurabile appare il fattore economico, che ha permesso di reinvestire nello scavo diverse somme di denaro, che sarebbero state altrimenti spese per l’acquisto delle licenze d’uso di programmi proprietari.

#### 2.4 *La metodologia di rilievo*

L’elemento base della documentazione applicata nel sito di “Mura Bastia” è il rilievo digitale bidimensionale effettuato con la tecnica del fotopiano. Il metodo operativo prevede un’organizzazione del lavoro distinta in due fasi principali: le misurazioni sul campo e il *post-processing* informatico. Nella prima fase l’oggetto della documentazione (lo strato o la struttura muraria) viene diviso idealmente in differenti piani altimetrici a seconda della morfologia della sua interfaccia superiore. Più la superficie è irregolare, più è complesso e laborioso il procedimento di rilievo. Per ogni piano vengono posizionate almeno quattro marche di raddrizzamento, successivamente misurate con la stazione totale, e infine viene scattata una fotografia zenitale. La verticalità del punto di ripresa rispetto all’oggetto e la divisione in aree altimetriche permettono di ridurre al minimo gli errori prospettici e le distorsioni.

<sup>3</sup> La versione completa della GPL è consultabile sul sito <http://www.gnu.org/licenses/licenses.html>.

<sup>4</sup> A questo proposito vanno citati alcuni progetti: GFOSS (<http://www.gfoss.it/drupal/>), IOSA (<http://www.iosa.it/>) e DAD Project (<http://wiki.uibk.ac.at/confluence/display/excavationtutor/Home>).



Fig. 9 – Fotopiano realizzato con il metodo “Aramus”: risultato finale (a sinistra) ed evidenziazione delle singole fotografie (a destra) (elaborazione A. Bezzi).

La seconda fase, svolta all'interno di stazioni informatiche, consiste nella rielaborazione dei dati grezzi ottenuti sul campo. Il procedimento impiegato per la creazione di fotopiani è il cosiddetto “metodo Aramus” (BEZZI *et al.* 2006a)<sup>5</sup>, che permette di realizzare un fotomosaico dall'unione delle singole riprese fotografiche (Fig. 9). In sostanza, tale metodo consente di distorcere, scalare e ruotare una fotografia originale sopra un'immagine di base georeferenziata (modello) sulla quale sono riportate le marche di raddrizzamento, attraverso una serie di passaggi qui brevemente riassunti (Fig. 10). Le coordinate scaricate dalla stazione totale vengono importate all'interno del programma GIS GRASS come livello vettoriale. Una volta impostate l'area di visualizzazione del monitor sul nuovo layer, nonché la risoluzione della regione del progetto (dimensione del pixel in metri), si procede prima ad una conversione del file vettoriale in raster e poi all'esportazione di questo in formato TIFF, con riferimento geografico TFW. Il file prodotto è un'immagine bianca con indicati in rosso i pixel associati alle coordinate della marca di rettifica, che però risulta di difficile lettura. Per ovviare a questo problema e agevolare, quindi, la fase di comparazione tra l'immagine originale e quella di base, è necessario esportare dal monitor di

<sup>5</sup> Il metodo Aramus è stato ideato da Arc-Team s.n.c. per lo scavo scuola dell'Università di Innsbruck (Institut für Alte Geschichte und Altorientalistik) ad Aramus, Armenia. L'intero procedimento è oggetto di un tutorial del DAD Project, accessibile al sito <http://wiki.uibk.ac.at/confluence/display/excavationtutor/Home/>.

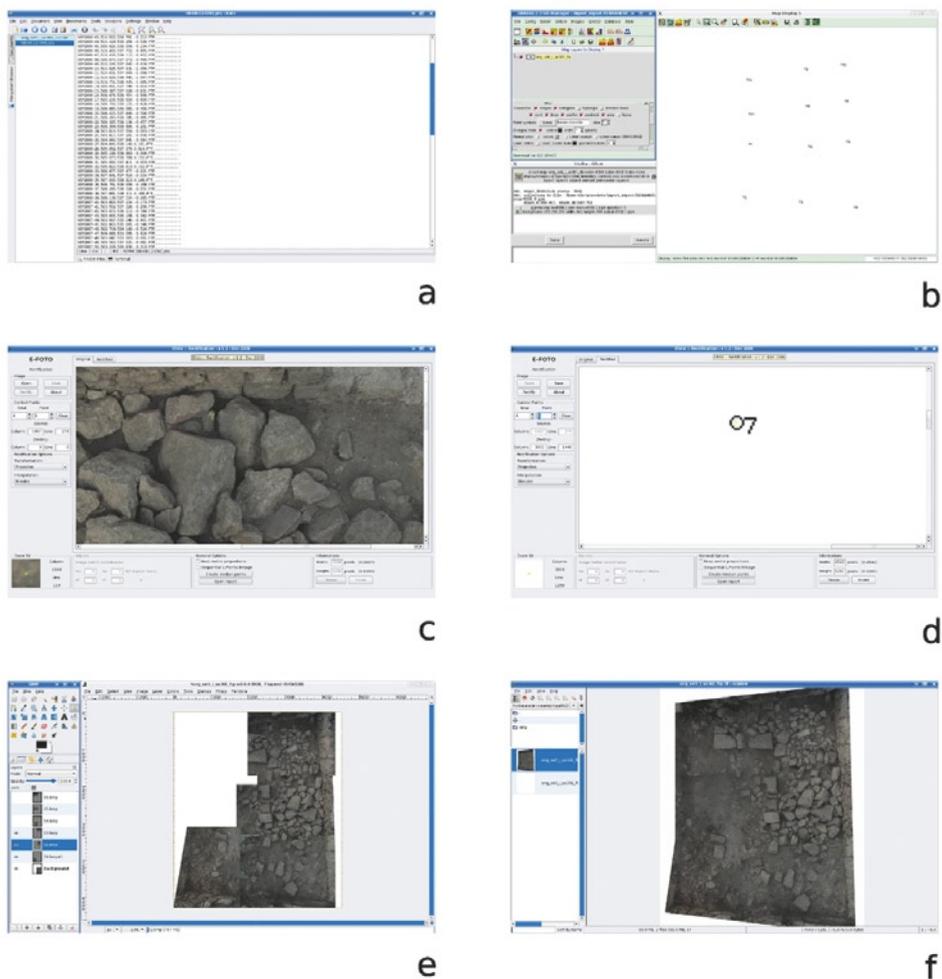


Fig. 10 – Esempificazione di alcuni passaggi per il raddrizzamento delle immagini: a) elaborazione delle coordinate in un editor di testo; b) visualizzazione delle marche di rettifica all’interno di GRASS; c-d) comparazione tra la fotografia originale e il modello in E-FOTO; e) unione delle immagini e calibrazione dei colori in GIMP; f) il fotomosaico finale (elaborazione A. Bezzi).

GRASS la visualizzazione del livello vettoriale con l’indicazione del suo valore numerico (nome della marca). La nuova immagine deve essere unita e scalata sul primo elaborato all’interno del software di grafica raster GIMP. Ottenuto questo modello, il passaggio successivo avviene all’interno del modulo RECTIFICATION della suite di fotogrammetria E-FOTO. L’uso di questo

modulo è abbastanza semplice e intuitivo: una volta caricati la fotografia originale e il modello, è sufficiente indicare al software, nello stesso ordine, la posizione delle marche di raddrizzamento in entrambe le immagini, prima di procedere alla rettifica e al salvataggio. L'immagine originale viene così scalata e posizionata sul modello precedentemente ottenuto, che mantiene inalterate le sue dimensioni e la sua georeferenziazione. Il punto di forza di questo procedimento consiste nel poter riunire tutti i file raster esportati da E-FOTO caricandoli come livelli all'interno di GIMP, dove peraltro sarà possibile effettuare anche accorgimenti "estetici" come la calibrazione dei colori e la sfumatura delle sovrapposizioni.

Tutti i fotomosaici vengono successivamente vettorializzati manualmente con OPENJUMP, un software territoriale con ottimi strumenti di disegno (Fig. 2). Le immagini georeferenziate e i livelli vettoriali confluiscono, infine, all'interno di gvSIG, strumento con il quale si sta realizzando il GIS di scavo.

A.B.

### 3. IL RILIEVO 3D COMPLETO E TEXTURIZZATO DELLE MURA DEL CASTELLO DI ONIGO OTTENUTO MEDIANTE METODOLOGIA LASER SCANNING TERRESTRE

#### 3.1 *Acquisizione di tutti gli alzati conservati*

Il rilievo 3D completo delle mura del castello è stato effettuato nella campagna di misure realizzata nel 2008, utilizzando il laser scanner a tempo di volo (TOF - Time Of Flight) HDS2500, che presenta una precisione di 4/6 mm sul singolo punto per distanze laser scanner – oggetto da 1,5 a 50 m. In continuità con le acquisizioni realizzate nel 2007, durante le quali sono stati rilevati gli alzati della torre, la cisterna e 10 blocchi del crollo avvenuto nel 1989 (FRASSINE *et al.* 2008), nel 2008 sono state effettuate scansioni laser di tutte le murature interne ed esterne del castello e di due crolli della torre con passo medio di campionamento di 1 cm. Naturalmente, per la generazione del modello 3D è necessario che le differenti scansioni vengano allineate nello stesso sistema di riferimento dei dati acquisiti nella campagna precedente: per questo motivo è stata progettata, materializzata e misurata una rete topografica di inquadramento, ampliando la rete definita e rilevata nel 2007.

Da tre vertici di coordinate note della rete, che complessivamente era costituita da sette punti, sono stati scelti altri otto riferimenti, intervisibili con i vertici noti, in modo da agganciare il nuovo rilievo con quello effettuato l'anno passato. In questo modo, i vertici noti, in sede di elaborazione dati, verranno considerati infinitamente fissi e saranno utilizzati per calcolare le coordinate dei nuovi punti a partire da quelli noti. I nuovi punti della rete di inquadramento sono stati scelti in modo da essere intervisibili a due a due

e, per ogni braccio, con almeno un vertice della rete del 2007. Inoltre, questi punti sono stati posizionati in zone accessibili, internamente ed esternamente al castello in quanto serviranno per il rilievo dei target laser scanning. Infatti, prima dell'acquisizione delle nuvole di punti, sulle murature degli alzati sono stati posti segnali retro-riflettenti che lo strumento può riconoscere in modo semi-automatico: operativamente, vengono effettuate le singole scansioni generali sull'area da rilevare e, dopo aver generato la nuvola di punti, i target vengono identificati manualmente sulla visualizzazione 3D. In questo modo il laser scanner effettua scansioni di dettaglio in corrispondenza dell'area selezionata, individuando le coordinate del centro dei target laser scanning come baricentro delle nuvole di punti acquisite con altissima risoluzione. Questi riferimenti risultano necessari per l'allineamento delle scansioni che non presentano sovrapposizioni reciproche oppure che sono molto scarse. Sebbene il numero minimo di segnali necessario per effettuare la co-registrazione deve essere di tre, in realtà sono stati posizionati sempre almeno cinque target nella finestra visibile con una singola acquisizione. Tale scelta è stata attuata non solo per prevenire eventuali problemi legati al mancato rilievo di qualche segnale che avrebbe potuto compromettere l'intero lavoro, ma anche per incrementare la precisione della roto-traslazione delle nuvole di punti nella fase di allineamento. Inoltre, i target sono stati collocati in modo da coprire uniformemente l'area di scansione, evitando allineamenti e favorendo il posizionamento su piani diversi. Alcune scansioni sono state realizzate senza predisporre i target laser scanning a causa dell'inaccessibilità del sito: in queste situazioni sono state previste ampie sovrapposizioni delle nuvole di punti (40÷50%), dovendo poi realizzare il loro allineamento solo nella zona in comune tra scansioni adiacenti.

Oltre alle murature presenti, sono state acquisite anche le superfici di due crolli della torre che non erano stati adeguatamente rilevati nella campagna del 2007, ma che erano stati identificati e posizionati in 2D nell'analisi basata sul confronto con fotopiani ottenuti da immagini antecedenti il crollo (FRASSINE *et al.* 2008, 301-309). Il rilievo è stato effettuato con passo di campionamento medio di 0,5 cm a causa della complessità morfologica dei blocchi e senza utilizzare target laser scanning. Analogamente alla campagna 2007, per ridurre il numero complessivo di scansioni, è stata acquisita l'intera area nella quale erano posizionati i crolli, anziché operare masso per masso.

Considerando entrambe le campagne, sono state acquisite complessivamente 131 scansioni e rilevati 92 target. L'acquisizione delle caratteristiche radiometriche è stata effettuata con la camera digitale metrica Canon EOS 1 DS Mark II che fornisce immagini con risoluzione di 16,7 Megapixel: le riprese sono state realizzate sia dai punti di stazionamento del laser scanner, che da altre posizioni per ridurre le zone d'ombra e gli elementi in sotto-squadro.

### 3.2 Estrazione del modello complessivo

La rete topografica di inquadramento, rilevata con misure sovrabbondanti, è stata compensata nel sistema di riferimento della rete calcolata nel 2007. Fissando tre vertici di quest'ultima, le coordinate dei nuovi punti sono state determinate secondo lo schema a rete vincolata; in questo modo è stato possibile ottenere le coordinate dei nuovi vertici con errori massimi di  $4\pm 5$  mm, che risultano sufficientemente contenuti per l'estrazione di un modello 3D completo, metricamente corretto, accurato e ad alta risoluzione, di tutti gli elementi rilevati mediante il laser a scansione. Le coordinate dei target sono quindi state ottenute rispetto alla rete topografica locale complessivamente costituita da 15 vertici.

Le nuvole di punti sono state allineate mediante il software Cyclone v. 5.3, utilizzando due differenti procedure: le acquisizioni provviste di target laser scanning georiferiti sono state roto-traslate nel sistema di riferimento dei segnali (e quindi della rete topografica di inquadramento) imponendo i valori delle coordinate rispettive (modalità *survey registration*); invece, le scansioni senza target sono state allineate tra loro e con quelle contenenti i segnali, per mezzo delle ampie sovrapposizioni tra acquisizioni successive (modalità *cloud registration*). Operativamente, nella prima fase le due generiche scansioni sono state avvicinate su punti naturali omologhi comuni, ben visibili e riconosciuti sulle nuvole di punti: successivamente è stato applicato l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) per realizzare un allineamento più preciso (BESL, MCKAY 1992; CHEN, MEDIONI 1992; RUSINKIEWICZ, LEVOY 2001). La co-registrazione di tutte le nuvole di punti degli alzati conservati, relativi sia alla campagna del 2007 sia a quella del 2008, ha permesso di generare il modello 3D finale per nuvola di punti con errore massimo di 6 mm e risoluzione non superiore ad 1 cm (Fig. 11).

Nel caso invece dei due blocchi di crollo, l'allineamento delle nuvole di punti è stato effettuato solo in modalità *cloud registration* per l'assenza di target laser scanning georiferiti. I modelli 3D finali dei due blocchi sono stati generati con errore massimo di 5 mm.

### 3.3 Texture mapping dei modelli generati

L'informazione radiometrica, correttamente texturizzata sui rispettivi modelli tridimensionali, fornisce prodotti fotorealistici e immediatamente utilizzabili, che risultano molto utili soprattutto per rilievi ad alta risoluzione e analisi globali. Il texture mapping dei modelli per nuvola di punti con immagini digitali ad alta risoluzione è stato realizzato con il software Reconstructor 2. Sono stati identificati e misurati punti omologhi, facilmente riconosciuti tra modello 3D visualizzato in base ai valori di riflettanza e le immagini digitali. In questo modo, sia per le murature che per i paramenti murari dei blocchi

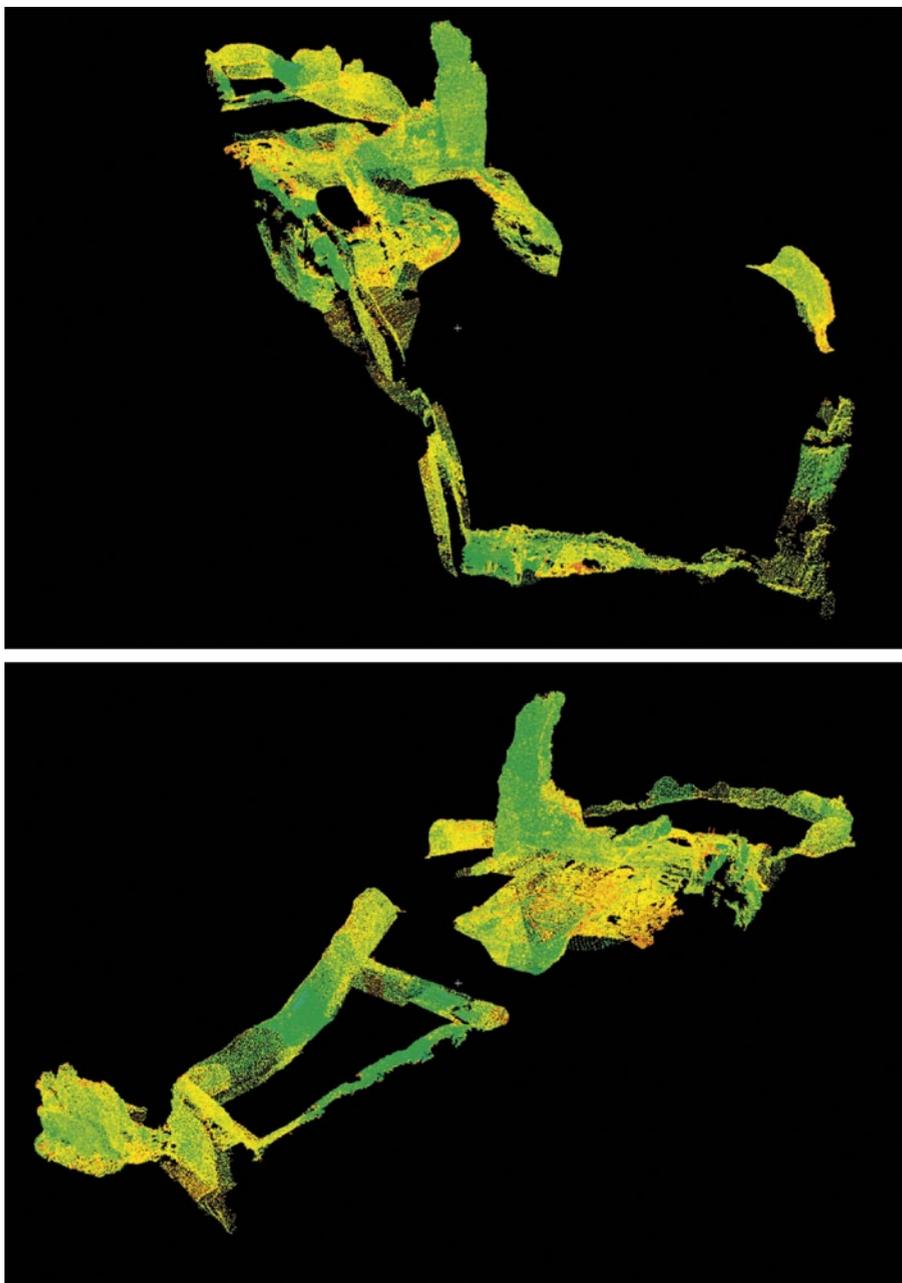


Fig. 11 – Modello finale 3D del castello di Onigo ottenuto dall'allineamento di tutte le nuvole di punti.

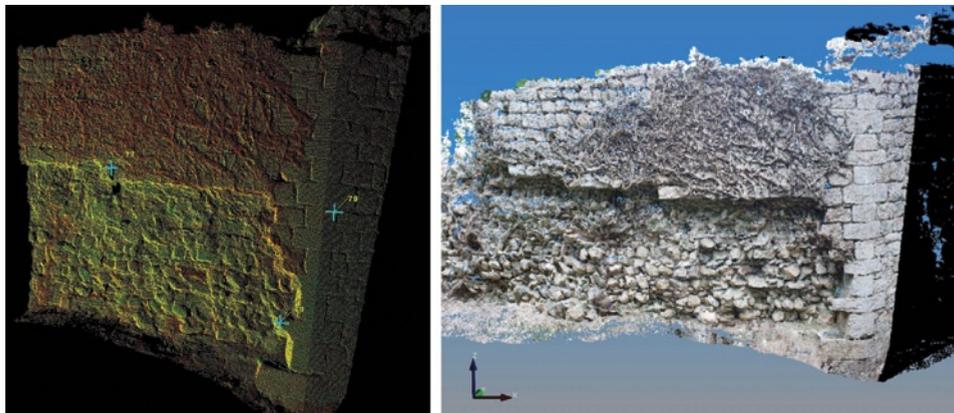


Fig. 12 – Scansioni relative alla muratura in prossimità dell'ingresso al castello: a) per nuvola di punti e b) dopo la texturizzazione del modello 3D.

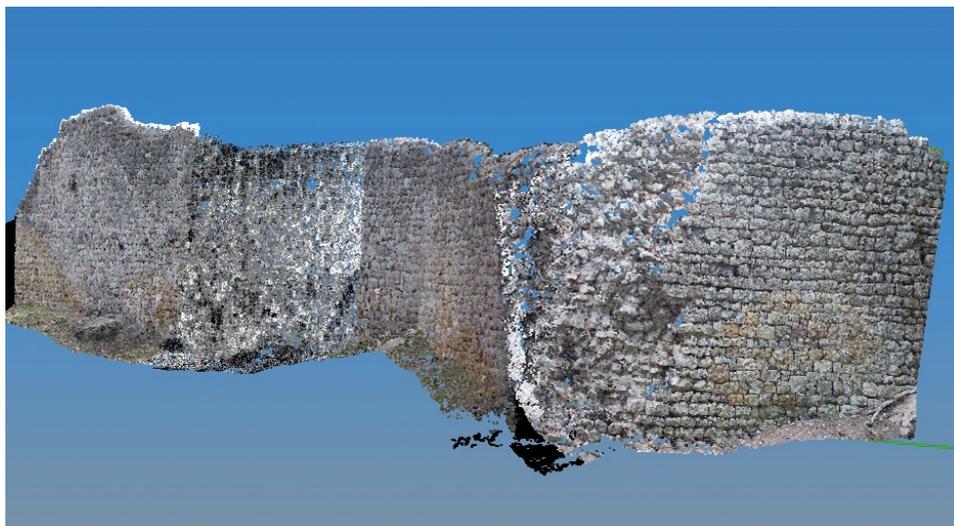


Fig. 13 – Visualizzazione tridimensionale della porzione muraria relativa alla cinta meridionale del dongione: si notino le parti rappresentate per nuvola di punti e quelle texturizzate.

acquisiti, ad ogni punto del modello è stata associata l'informazione di colore che deriva dai pixel delle immagini digitali (Figg. 12-13).

Il modello texturizzato ottenuto permette una chiara lettura della tessitura dei paramenti, metricamente corretta e utile per analisi comparative e studi di stratigrafia muraria; inoltre, consente di progettare restauri con-



Fig. 14 – Rappresentazione esemplificativa del grado di dettaglio della texturizzazione che consente un'agevole lettura della tessitura muraria.

servativi mirati, anche per quelle strutture difficilmente rilevabili con metodi diretti (Fig. 14).

### 3.4 *Anastilosi virtuale della torre*

In continuità con quanto realizzato precedentemente, i modelli dei due crolli rilevati nella campagna del 2008 sono stati roto-traslati nella posizione fornita dal raddrizzamento delle immagini disponibili prima del crollo del 1989 (FRASSINE *et al.* 2008, 307-309). Non avendo altre informazioni, per la collocazione virtuale dei blocchi è stata mantenuta l'ipotesi di verticalità della torre rispetto al piano del prospetto individuato dal fotopiano. È stato quindi possibile posizionare virtualmente in 3D cinque blocchi di crollo con la relativa texture, ossia tutti quelli individuati dallo studio compiuto sulle murature (Fig. 15).

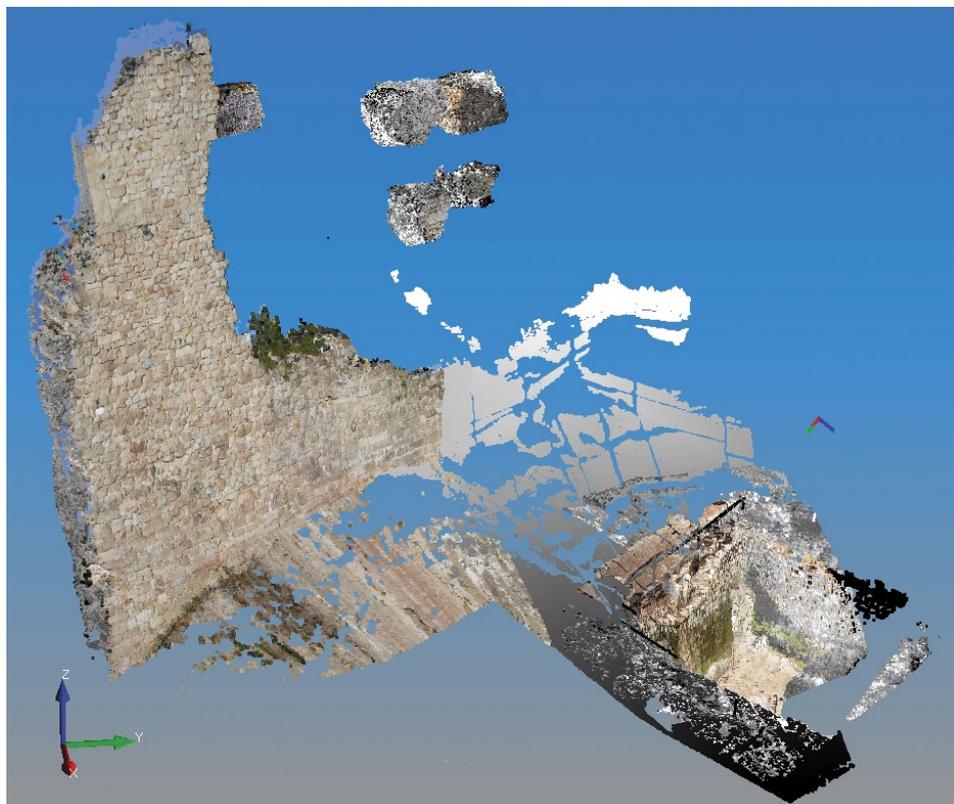


Fig. 15 – Anastilosi parziale texturizzata della torre con l'esatta collocazione virtuale dei cinque blocchi di crollo.

### 3.5 Conclusioni

L'integrazione delle metodologie di rilievo 3D, e in particolare del laser scanning terrestre, con le tecniche topografiche classiche, ha permesso l'estrazione di un modello accurato e ad alta risoluzione di tutto il castello di Onigo. La topografia classica risulta, infatti, indispensabile per la realizzazione di reti di inquadramento, necessarie per la misura di tutti i target laser scanning in uno stesso sistema di riferimento. In questo modo è dunque possibile allineare le singole scansioni laser utilizzando le coordinate dei target georiferiti come punti fissi senza la necessità di sovrapposizioni reciproche tra nuvole di punti adiacenti, se non per garantire la continuità di rilievo e di rappresentazione. Il modello estratto è stato quindi texturizzato con immagini digitali metriche ad alta risoluzione ottenendo un prodotto non solo metricamente corretto, ma anche fotorealistico con una chiara lettura della tessitura muraria.

Il rilievo dei blocchi, già posizionati in 2D sulla base di immagini storiche rettificate antecedenti al crollo del 1989, è stato completato nella campagna del 2008. I modelli dei due massi rimanenti sono stati roto-traslati nel sistema di riferimento della torre ottenendo l'anastilosi parziale del paramento est mediante il posizionamento virtuale 3D di cinque crolli texturizzati. La metodologia descritta risulta quindi particolarmente utile per la ricostruzione virtuale di strutture ridotte in frammenti, quando sono disponibili due fattori essenziali: il rilievo 3D dei singoli elementi, insieme alle informazioni inerenti la forma originaria dell'oggetto prima della distruzione.

M.F., V.A., D.B.

MATTEO FRASSINE  
Dipartimento di Archeologia  
Università di Padova

ALESSANDRO BEZZI  
Arc-Team s.n.c

MASSIMO FABRIS, VLADIMIRO ACHILLI, DENIS BRAGAGNOLO  
Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento  
Laboratorio di Rilevamento e Geomatica  
Università di Padova

### *Ringraziamenti*

Gli autori desiderano ringraziare coloro che hanno consentito lo svolgersi delle attività di ricerca in tutti questi anni: la Regione Veneto, il Comune di Pederobba e la fondazione Opere Pie. Un sentito ringraziamento per la sponsorizzazione fornita deve essere rivolto alla ditta locale “Asolo Costruzioni e Restauri”, nonché al signor Renzo Sartor, titolare dell’“Autofficina concessionaria automobili Sartor” di Onigo di Pederobba, che ha gentilmente messo a disposizione un piccolo ultraleggero (P92-S Echo), grazie al quale è stato possibile eseguire un lungo sorvolo del sito fortificato, ottenendo una nuova documentazione fotografica aerea dell’area di scavo. Infine, gli autori ringraziano l’ing. Andrea Menin e la dott.ssa Ginevra Boatto del Laboratorio di Rilevamento e Geomatica dell’Università di Padova per il contributo fornito nell’elaborazione dei dati.

### BIBLIOGRAFIA

- BAGNARA R., MACCHI JANICA G. (eds.) 2006, *Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologici. Atti del I Workshop (Grosseto 2006)*, Firenze, Centro Editoriale Toscano.
- BARTON M., BEZZI A., BEZZI L., FRANCISCI D., GIETL R., NETELER M. 2006, GRASS, *un potente GIS per archeologi*, in BAGNARA, MACCHI JANICA 2006, 95-101.
- BESL P.J., MCKAY N.D. 1992, *A method for registration of 3-D shapes*, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 2, 239-256.
- BEZZI A., BEZZI L., FRANCISCI D., GIETL R. 2005a, *L'utilizzo di GRASS in archeologia*, «Geomatic Workbooks», 5, 2005.
- BEZZI A., BEZZI L., FRANCISCI D., GIETL R. 2005b, *ArcheOS 1.0 Akhenaton, the first GNU/Linux live distribution for archaeologists*, in W. BOERNER, S. UHLIRZ (eds.), *Archäologie und Computer 2005. Workshop 10*, Kulturelles Erbe und neue Technologien, Wien, CD-Rom.

- BEZZI A., BEZZI L., GIETL R. 2006a, *Aramus 2006: an international archaeological expedition completely supported by Free and Open Source Software*, in W. BOERNER, S. UHLIRZ (eds.), *Archäologie und Computer 2006, Workshop 11, Kulturelles Erbe und neue Technologien*, Wien, CD-Rom.
- BEZZI A., BEZZI L., FRANCISCI D., GIETL R. 2006b, *ArcheOS 1.1.6. Akhenaton: la nuova release della prima distribuzione GNU/Linux per archeologi*, in BAGNARA, MACCHI JÀNICA 2006, 7-16.
- CHEN Y., MEDIONI G. 1992, *Object modelling by registration of multiple range images*, «Image and Vision Computing», 10, 3, 145-155.
- ERCOLINO R. 2004, *Settore H*, in G. ROSADA (ed.), *Pederobba - Onigo (Treviso): Mura della Bastia. Scavo delle strutture e del deposito medievale: campagna 2003*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 20, 49-54.
- FRASSINE M. 2007, *Settore H ambiente 200*, in G. ROSADA (ed.), *Onigo (Treviso): Mura della Bastia. Campagna 2006*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 23, 60-62.
- FRASSINE M. 2008, *Una campagna di passaggio, una svolta per il sito 'Mura Bastia'*, in M. FRASSINE, G. ROSADA (eds.), *Onigo (Treviso): Campagna 2007. Scavo archeologico e rilievo 3D laser scanning di "Mura Bastia"*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 24, 51-54.
- FRASSINE M. 2009, *Scavi, rilievi e restauri nel castello degli Onigo*, in M. FRASSINE, G. ROSADA (eds.), *Onigo, "Mura Bastia": campagna 2008*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 25, in corso di stampa.
- FRASSINE M., ROSADA G., FABRIS M., ACHILLI V., BRAGAGNOLO D., BEZZI A. 2008, *"Mura della Bastia" - Onigo di Pederobba (Treviso). Ricerche archeologiche, rilievo 3D laser scanning e anastilosi virtuale in un castello medievale del Pedemonte trevigiano*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 293-321.
- GROSSI P., PIROTTI F., PONTIN M. 2004, *Rilievo, posizionamento geodetico, elaborazione grafica nelle campagne 2002-2003*, in G. ROSADA (ed.), *Pederobba - Onigo (Treviso): Mura della Bastia. Scavo delle strutture e del deposito medievale: campagna 2003*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 20, 47-49.
- MARCHIORI A. 2003, *Settore H*, in A. MARCHIORI (ed.), *Onigo (Treviso) 2002: ripresa degli scavi del castello in località "Mura della Bastia"*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 19, 77-82.
- RUSINKIEWICZ S., LEVOY M. 2001, *Efficient variants of the ICP algorithm*, in *Proceedings of the Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling (Quebec City 2001)*, 145-152.

## ABSTRACT

This paper concerns computer applications for the management of archaeological data through GIS software, as related to the 2008 excavation campaign at "Mura Bastia", Onigo (Treviso), Italy. The approach allows for the correlation of data previously acquired with those collected more recently using newer technologies. The shift from the traditional way of drawing archaeological records to the new digital technique began during the excavation of 2007. All of the walls and the layers were documented using a total station and a digital camera (photomosaic method). The elaboration of raw data was obtained using Free and Open Source Software only (GRASS, E-FOTO, GIMP, OPENJUMP, gvSIG). All of the new information levels (bi-dimensional raster and vector layers) were connected with the digitized plan of the old excavation into a GIS project that became the final product of the whole work. 3D terrestrial laser scanning surveys, integrated with classical topography and digital photogrammetry methodologies, allowed us to extract an accurate and photorealistic digital model of the Onigo castle. Moreover, a partial 3D virtual anastylosis of the tower was completed thanks to the reallocation of two missing elements in their correct position.