

# ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

33.1

2022

*All'Insegna del Giglio*



ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI



CNR – DIPARTIMENTO SCIENZE UMANE E SOCIALI, PATRIMONIO CULTURALE

ISTITUTO DI SCIENZE DEL PATRIMONIO CULTURALE

Rivista annuale open access e peer reviewed  
fondata da Mauro Cristofani e Riccardo Francovich

Comitato Scientifico: Giovanni Azzena, John Boardman, Robin B. Boast, Francisco Burillo Mozota, Alessandra Caravale, Christopher Carr, Martin O.H. Carver, Francesco D'Andria, François Djindjian, James E. Doran, Virginie Fromageot-Laniepce, Salvatore Garraffo, Filippo Giudice, Antonio Gottarelli, Maria Pia Guermandi, Anne-Marie Guimier-Sorbets, Ian Hodder, F. Roy Hodson, Donna C. Kurtz, Adriano Maggiani, Daniele Manacorda, Costanza Miliani, Paola Moscati, Tito Orlandi, Clive R. Orton, Maria Cecilia Parra, Xavier Rodier, Francesco Roncalli, Grazia Semeraro, Paolo Sommella, Gianluca Tagliamonte, Marco Valenti

Direttore responsabile: Paola Moscati

Redazione: Claudio Barchesi, Francesca Buscemi, Letizia Ceccarelli, Sara Di Marcello, Alessandra Piergrossi, Irene Rossi

Policy and Guidelines: <http://www.archcalc.cnr.it/pages/guidelines.php>

Autorizzazione del presidente del Tribunale di Firenze n. 3894 del 6/11/1989

Indirizzo Redazione: Rivista «Archeologia e Calcolatori», CNR – ISPC, Area della Ricerca di Roma 1, Via Salaria Km 29,300, 00015 Monterotondo Stazione (RM)  
Tel. +39.06.90672670 – Fax +39.06.90672818  
E-mail: [redazioneac.ispc@ispc.cnr.it](mailto:redazioneac.ispc@ispc.cnr.it)  
<http://www.archcalc.cnr.it/>

Edizione e distribuzione: Edizioni ALL'INSEGNA DEL GIGLIO s.a.s.,  
Via Arrigo Boito 50-52, 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
Tel. +39.055.6142675  
E-mail: [redazione@insegnadelgiglio.it](mailto:redazione@insegnadelgiglio.it) – [ordini@insegnadelgiglio.it](mailto:ordini@insegnadelgiglio.it)  
<https://www.insegnadelgiglio.it/>

# ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

33.1

2022

*All'Insegna del Giglio*

Realizzazione grafica della sovracoperta di Marcello Bellisario  
Rivista «Archeologia e Calcolatori» (ISSN 1120-6861, e-ISSN 2385-1953)  
ISBN 978-88-9285-122-1, e-ISBN 978-88-9285-123-8  
© 2022 – All’Insegna del Giglio s.a.s. – [www.insegnadelgiglio.it](http://www.insegnadelgiglio.it)  
Sesto Fiorentino (FI), luglio 2022  
Stampa, MDF print

Abbonamento 2022: 2 volumi, 33.1 e 33.2, € 60,00.  
Spedizione: Italia, gratuita; estero, a carico del destinatario.  
<https://www.insegnadelgiglio.it/categoria-prodotto/abbonamenti/>

SISTEMI E TECNICHE  
DI DOCUMENTAZIONE, GESTIONE  
E VALORIZZAZIONE DELL'ARCHITETTURA STORICA.  
ALCUNE RECENTI ESPERIENZE

a cura di  
Andrea Arrighetti, Rossella Pansini



ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI  
33.1  
2022

*All'Insegna del Giglio*

*Nel frontespizio: particolare di rilievo  
e ricostruzione 3D del ninfeo di Sala, in Marocco.*

## INDICE

ANDREA ARRIGHETTI, ROSSELLA PANSINI, <i>Introduzione</i>	9
APPLICAZIONI DI RILIEVO DELL'ARCHITETTURA STORICA	
ALICE CAPOBIANCO, SARA GAGLIULO, <i>Applicazione del rilevamento geomatico alla Domus della Regina d'Inghilterra a Pompei (VII, 14, 5): risultati preliminari</i>	17
ANDREA FIORINI, <i>Scansioni dinamiche in archeologia dell'architettura: test e valutazioni metriche del sensore LiDAR di Apple</i>	35
MANUELA INCERTI, <i>Dal rilievo all'analisi di superfici complesse: il caso della pseudo-cupola di Galla Placidia</i>	55
CARLO INGLESE, SIMONE LUCCHETTI, <i>Il mausoleo di Cecilia Metella tra documentazione grafica analogica e digitale: un approccio metodologico multidisciplinare</i>	73
LA GESTIONE DEI DATI DI SCAVO E ARCHITETTONICI	
LUCA MANDOLESI, ROBERTO MONTAGNETTI, DAVID GERALD PICKEL, <i>Come nasce una base GIS per l'archeologia opensource, sviluppata da archeologi per gli archeologi: lo scavo di Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR)</i>	93
MARIA NOTARDONATO, <i>Il contributo dell'Università degli Studi del Molise allo studio delle tecniche murarie di età romana</i>	113
ELENA GIGLIARELLI, GIOVANNI CANGI, LUCIANO CESSARI, <i>Rilievo per la modellazione e la gestione informativa HBIM. Approccio multicomponente per l'analisi strutturale e il restauro di edifici storici</i>	135
RAISSA MAMMOLI, MARINA INÌ, RAMONA QUATTRINI, <i>Metodologie a supporto della ricerca storico-archivistica e per la trasparenza del modello HBIM del Lazzeretto di Ancona nel progetto di Luigi Vanvitelli</i>	157
IL RILIEVO TRA INTERPRETAZIONE E RICOSTRUZIONE	
DANIELE FERDANI, EMANUEL DEMETRESCU, GIANLUCA BOTTAZZI, PAOLA BIGI, <i>Il contributo dell'archeologia digitale allo studio e all'interpretazione dell'edilizia storica. Il caso di San Marino</i>	181

- ANDREA ARRIGHETTI, *Analisi e documentazione archeologica dell'edilizia storica in aree a rischio sismico: dall'atlante dei tipi costruttivi murari all'impiego delle moderne tecnologie di rilievo* 201
- FABRIZIO SOMMAINI, *Dallo studio alla ricostruzione: fonti e metodologie per la rappresentazione di un contesto perduto. Il caso dei granai e fienili al Complesso di Domiziano (Foro Romano-Palatino)* 219
- ROSSELLA PANSINI, *Rilievo, documentazione e ricostruzione di un centro monumentale con fotogrammetria e modellazione tridimensionali: il caso della città romana di Sala* 239

## LA COMUNICAZIONE DEL DATO ARCHEOLOGICO

- STEFANO BERTOCCI, *Strumenti per la comunicazione e la conservazione della documentazione del patrimonio archeologico: il Complesso di Villa Adriana (Tivoli, RM) e il sito archeologico di Masada (Israele)* 259
- PAOLO CLINI, RENATO ANGELONI, MIRCO D'ALESSIO, ROBERTO PERNA, DAVID SFORZINI, *La digitalizzazione per la documentazione, lo studio e la fruizione di un sito archeologico. La VR experience del teatro di Ricina* 279

## INTRODUZIONE

Un buon intervento di documentazione e registrazione è la base da cui partire per affrontare qualsiasi attività legata al patrimonio culturale, dai cantieri di restauro, ai progetti di ricerca archeologici e storico/artistici, alle attività di tutela, come ad esempio la prevenzione del rischio sismico o il monitoraggio dello stato di conservazione di siti archeologici complessi. Una buona documentazione permette, infatti, non solo di registrare le caratteristiche peculiari del manufatto, ma anche di progettare la sua valorizzazione. La nascita e lo sviluppo di nuove tecnologie e la possibilità di integrazione tra i metodi di rilievo hanno portato a rappresentazioni digitali di qualità sempre più elevata, che rispondono all'esigenza di conoscere in modo più approfondito il nostro patrimonio, conservarlo e promuoverlo.

L'avanzamento tecnologico ha messo a disposizione della comunità scientifica strumenti speditivi da cui si ottengono modelli tridimensionali caratterizzati da una elevata precisione, sia volumetrica, sia cromatica. In questo modo, il processo di documentazione della struttura materiale risulta molto più completo e risponde alle esigenze di un'ampia gamma di esperti (archeologi, architetti, restauratori, etc.). Sono questi gli elementi che stanno alla base di un intervento di documentazione archeologica di un manufatto, ossia di un'attenta osservazione dei processi di stratificazione dovuti ad azioni umane (costruzioni, demolizioni, rifacimenti, etc.) o naturali (terremoti, inondazioni, etc.) che hanno portato l'oggetto a trasformarsi nel corso del tempo.

### 1. RILIEVO E DOCUMENTAZIONE IN ARCHEOLOGIA

Il rilievo e la documentazione costituiscono attività fondamentali per la comprensione di un contesto. Rilevare e documentare significa, infatti, registrare tutte le informazioni che possiamo trarre dalle strutture e dalle tracce lasciate da chi quel contesto lo ha creato, costruito, vissuto e abbandonato. Ciò è vero sia nel caso dei contesti orizzontali, come gli scavi archeologici, sia di quelli verticali, come gli edifici. Per i contesti orizzontali la ricerca archeologica ha come principale strumento lo scavo stratigrafico, attività che prevede la rimozione di strati, e conseguentemente di informazioni, finalizzata a ricostruire l'evoluzione del contesto nella sua diacronia. In questo caso, la registrazione di tutte le caratteristiche dei manufatti, prima che questi subiscano una modifica da parte degli archeologi, assume un ruolo fondamentale nel garantire l'acquisizione di ogni tipo di dato utile sia nella fase della ricerca che nel processo interpretativo.

I contesti verticali sono, invece, documentati e restituiti in senso archeologico attraverso il rilievo, coadiuvato sempre più spesso da altri tipi di analisi

che ci permettono una comprensione più dettagliata della fabbrica delle architetture, come ad esempio le caratteristiche chimiche e fisiche dei leganti e dei materiali costruttivi. Nel caso degli edifici, un'eventuale perdita di informazioni può avvenire, in particolare, quando le strutture in elevato sono sottoposte ad attività di conservazione che, pur garantendone la stabilità e prestando la massima cura nella preservazione delle caratteristiche costruttive, devono, in alcuni casi, applicare tecniche che portano alla copertura o alla modifica di esse.

La documentazione di un contesto è uno strumento indispensabile a garantire la buona riuscita di un'indagine storico-archeologica e deve essere attentamente pianificata sulla base della situazione logistica, delle finalità dell'analisi e delle caratteristiche qualitative e quantitative dei dati con i quali ci si deve misurare. Risulta inoltre indispensabile che l'attività del rilievo sia realizzata mantenendo come capisaldi ideali quello della precisione e del dettaglio: ogni informazione, anche quella che potrebbe sembrare meno significativa, deve essere tenuta in considerazione e registrata, in modo da essere utilizzata nell'attività di interpretazione. Il rilievo stesso è considerato parte dell'attività interpretativa (MEDRI 2003) e in quanto tale dovrebbe essere sempre demandato a colui (o coloro) che si occupano contestualmente dell'analisi e dell'interpretazione, in modo da evitare pericolose cesure che potrebbero portare a una perdita di informazioni (MASCIONE 2006).

Le tecnologie oggi disponibili e utilizzate per il rilievo archeologico sono in grado di raccogliere e registrare grandi quantità di dati e offrono l'opportunità di lavorare su modelli perfettamente compatibili con l'oggetto reale. Senza escludere le altre operazioni di documentazione (come la schedatura o il rilievo di tipo più tradizionale) e la riflessione che si può maturare solo a diretto contatto con l'oggetto indagato durante le missioni sul campo, il fatto di poter lavorare su un modello digitale di un manufatto permette di approfondire l'interpretazione, e dunque la comprensione, del dato storico-archeologico. In alcuni casi, l'utilizzo delle nuove tecnologie nella ricerca archeologica ha portato a risolvere interrogativi rimasti aperti, in altri ha, invece, facilitato la raccolta e la gestione delle informazioni, in altri ancora ha permesso di individuare nuovi importanti elementi, che hanno offerto la possibilità di ampliare il campo della ricerca sui beni culturali, portando a porsi nuove domande e a proporre nuove interpretazioni.

Anche l'attività di rilievo ha, nel tempo, subito modifiche, che hanno seguito l'evoluzione tecnologica che caratterizza il nostro quotidiano in ogni suo aspetto. Dai metodi definibili come "più tradizionali" di rilievo diretto, consistenti soprattutto nell'acquisizione dei dati in modo manuale, si è passati all'utilizzo sempre più esteso degli strumenti tecnologici e informatici. Questi ultimi hanno permesso l'immagazzinamento di ingenti quantità di dati attraverso metodi più o meno automatizzati. Un esempio in questo senso risulta il rilievo topografico con stazione totale, che ai suoi primi esordi ha costituito

per gli archeologi una vera e propria “rivoluzione”, velocizzando e snellendo il processo di acquisizione sul campo e determinando il passaggio dell’attività di elaborazione su PC, mediante l’ausilio di specifici hardware e software. Questo sensibile miglioramento scaturito dall’evoluzione delle tecniche ha portato conseguentemente a riflettere sull’impiego di sistemi e procedure innovativi, che permettessero ai ricercatori di registrare sempre più informazioni in modo speditivo, garantendo, al contempo, un elevato grado di precisione e oggettività.

Negli ultimi anni si sono fatti strada metodi e tecniche basati su strumenti che permettono di coniugare rilievo e documentazione in modo sempre più efficace (PINTO PUERTO 2020). In questo panorama hanno sicuramente svolto un ruolo di primo piano i laser scanner e le tecniche basate sulla fotogrammetria e fotomodellazione, grazie ai quali possiamo registrare localizzazione, volume e colore di un manufatto in breve tempo e con estrema versatilità.

Al rilievo si è poi affiancata una serie di software indispensabili per l’elaborazione, la gestione e l’archiviazione del dato. Un esempio in questo senso viene offerto dal GIS e dalle sue più recenti applicazioni (DELL’UNTO, LANDESCI 2022), uno strumento in grado di registrare, analizzare e sistematizzare una enorme quantità di dati utilizzabili in fase di lavoro sul campo, e successivamente, nella progettazione e nelle fasi di valorizzazione e tutela. Negli ultimi anni, inoltre, si stanno diffondendo sempre più gli archivi digitali aperti, grazie ai quali è possibile mettere a confronto dati provenienti da contesti diversi; in tal senso ricoprono un ruolo di primo piano i webGIS collaborativi, realizzati sia per finalità di studio – come è il caso di ACoR - Atlas des Techniques de la Construction Romaine (<https://acor.huma-num.fr/>)<sup>1</sup> – sia per la tutela – per esempio il SITAR - Sistema informativo territoriale di Roma (<https://www.archeositarproject.it/>), la cui esperienza è in fase di replicazione anche a Siena con il progetto SITAS (<https://sitas.archeositarproject.it/>).

## 2. IL RILIEVO IN ARCHEOLOGIA DELL’ARCHITETTURA: LE MOTIVAZIONI ALLA BASE DI QUESTO VOLUME TEMATICO

La “descrizione” dello stato attuale di un monumento, ossia della sua struttura materiale, richiede un alto grado di oggettività in funzione degli interessi storici e scientifici dell’archeologia e del restauro in merito alla conservazione, alla tutela e alla valorizzazione dei Beni Culturali. Il dato geometrico e la documentazione fotografica delle superfici risultano strumenti molto utili per una registrazione efficace, chiara ed oggettiva di un contesto.

Gli edifici possono essere considerati tra i manufatti più complessi che l’uomo produca. Le architetture storiche racchiudono in sé una ricca

<sup>1</sup> Per la tipologia delle tecniche edilizie cfr. DESSALES 2020a, per la gestione dei dati tramite DBMS e la realizzazione della piattaforma webGIS cfr. TRICOCHÉ 2020.

complessità organizzativa, funzionale, costruttiva, simbolica, frutto di esperienze, conoscenze, trasmissioni empiriche e scientifiche ma comunque legate all'uomo e alle società. Gli edifici venivano progettati, costruiti, utilizzati e percepiti nella loro tridimensionalità ed è proprio in questi contesti che il rilievo 3D diviene uno strumento conoscitivo fondamentale a supporto dell'archeologia in ogni fase di lavoro. Combinato ad altre metodologie di rilievo, come il remote sensing, esso offre inoltre possibilità interpretative del tutto nuove, ampliando il potenziale di conoscenza dei contesti.

Ad oggi, molte sono le applicazioni del rilievo, e più in generale della documentazione in archeologia dell'architettura, rese possibili dalla grande espansione dei sistemi e delle tecnologie di rilievo e dall'uso sempre più semplice e veloce di tali strumenti. A questo fa seguito anche una grande espansione nella divulgazione del dato archeologico. In tal senso possiamo pensare, ad esempio, al fiorire di numerose riviste scientifiche e divulgative specializzate in queste tematiche e al vasto impatto che l'impiego del 3D ha verso il grande pubblico, quest'ultimo ormai abituato a sperimentare viaggi virtuali immersivi, ricostruzioni mediante modellazione digitale e più in generale fruizioni da remoto di beni archeologici e architettonici arricchiti di numerosi contenuti (TRIZIO *et al.* 2021).

In questo volume abbiamo voluto presentare, mediante contributi incentrati su tematiche diversificate riunite in quattro differenti sezioni, alcune recenti applicazioni del rilievo, della documentazione e della valorizzazione in archeologia dell'architettura. La finalità non è quella di creare un regesto sulle applicazioni tecnologiche che riguardano l'edilizia storica, quanto riflettere, mediante casi applicativi, su alcuni aspetti particolari e sperimentali nell'uso di tecnologie innovative o nell'applicazione di strumenti già conosciuti per rispondere a specifiche domande archeologiche.

Il volume prende corpo da un nucleo di sei articoli presentati il 5 giugno 2021 all'interno del III Seminario Interdisciplinare "Economie e Tecniche della Costruzione" organizzato dalle cattedre di Archeologia dell'Architettura e Archeologia del Mondo Classico all'interno del Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali dell'Università degli Studi di Siena. L'incontro, dal titolo "Rilievo, documentazione e valorizzazione dell'architettura storica", aveva previsto la presentazione di specifici interventi focalizzati sull'utilizzo delle moderne tecnologie di rilievo, documentazione e analisi in archeologia della costruzione. A questo primo nucleo è stata poi aggiunta un'altra serie di otto contributi, presentati alla rivista in modo autonomo dai singoli autori e incentrati su tematiche comuni a quelle trattate nel seminario senese, segno tangibile di un attuale rinnovato interesse del mondo accademico verso le applicazioni delle tecnologie per la conoscenza, la valorizzazione e la tutela delle architetture storiche. Si è scelto dunque, in accordo con gli organi direttivi della rivista, di creare un volume unico, diviso in quattro sezioni in base alle macro-tematiche affrontate, che raccogliesse tutti questi contributi.

La prima sezione riguarda esperienze e nuove applicazioni di rilievo dell'architettura storica. Negli articoli qui confluiti si riscontra un comune interesse nell'applicazione di metodologie di rilievo finalizzate alla documentazione e all'interpretazione dei dati e nel confronto tra questi metodi e quelli più tradizionali. Alice Capobianco e Sara Gagliolo illustrano la recente esperienza di combinazione di più procedure di rilievo geomatico presso la *Domus* della Regina d'Inghilterra a Pompei; Andrea Fiorini mostra potenzialità e limiti del sensore LiDAR disponibile nei più recenti dispositivi mobili di Apple; Manuela Incerti descrive il proprio percorso di rilievo e analisi della cupola del Mausoleo di Galla Placidia a Ravenna; Carlo Inglese e Simone Lucchetti illustrano gli approcci utilizzati per la documentazione grafica del Mausoleo di Cecilia Metella, mettendo a confronto metodi digitali e analogici.

La seconda sezione raccoglie contributi che descrivono approcci differenti di gestione delle informazioni provenienti dal rilievo, con contributi che propongono soluzioni che si differenziano in base alle necessità della ricerca e che comprendono il GIS, il webGIS e l'HBIM. Luca Mandolesi, Roberto Montagnetti e David G. Pickel illustrano la complessa gestione dei dati di un contesto in corso di indagine da oltre vent'anni, la Villa di Poggio Gramignano, tramite PyArchInit, uno strumento che permette di integrare al suo interno una notevole quantità di informazioni grafiche e schedografiche ricavabili dall'analisi di uno scavo archeologico o di un edificio; Maria Notardonato presenta la propria esperienza di registrazione e gestione dei dati sulle tecniche edilizie di alcuni siti archeologici in corso di analisi da parte dell'Università degli Studi del Molise tramite il nuovo database ACoR; Elena Gigliarelli, Giovanni Cangì e Luciano Cessari presentano un contributo teso a mostrare i risultati delle esperienze maturate in ambito HBIM nella gestione dei dati riguardanti due strutture monastiche a Drinos, in Albania; chiudono questa seconda sezione Raissa Mammoli, Marina Inì e Ramona Quattrini che illustrano il progetto di ricerca sul Lazzaretto di Ancona, che integra dati archivistici e architettonici e li gestisce tramite HBIM.

Nella terza sezione sono raccolte alcune recenti applicazioni di rilievo, interpretazione e ricostruzione dell'architettura storica. Daniele Ferdani, Emanuel Demetrescu, Gianluca Bottazzi e Paola Bigi presentano la loro esperienza di rilievo, interpretazione e restituzione tridimensionale del contesto di San Marino, mediante un approccio integrato che tiene in considerazione contesti di grande ampiezza e complessità; segue il contributo di Andrea Arrighetti focalizzato sull'applicazione del rilievo laser scanner e fotogrammetrico per l'elaborazione del dato archeosismologico in fase pre- e post-sisma e su come questo processo abbia apportato un sensibile miglioramento nella quantità e qualità dei dati elaborati e nelle successive interpretazioni; terzo contributo quello di Fabrizio Sommaini che illustra la propria esperienza di rilievo, documentazione e ricostruzione dei granai e fienili del complesso di Domiziano, sul Palatino, e di come gli approcci più recenti di ricostruzione tridimensionale

contribuiscono alla documentazione e alla valorizzazione di contesti perduti; chiude la terza sezione il contributo di Rossella Pansini che propone una riflessione sull'uso del rilievo e della ricostruzione 3D per la documentazione e l'analisi archeologica delle architetture del centro monumentale di *Sala* in Marocco.

L'ultima sezione del volume viene dedicata ai metodi digitali per la comunicazione dei dati archeologici e architettonici. Stefano Bertocci illustra l'approccio utilizzato nelle ricerche svolte dal Laboratorio di Rilievo del Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze a Masada e alla Villa Adriana di Tivoli, due ricerche finalizzate alla conoscenza e alla valorizzazione di siti archeologici con peculiarità e finalità diverse; Paolo Clini, Renato Angeloni, Mirco D'Alessio, Roberto Perna e David Sforzini descrivono l'esperienza di rilievo, analisi, ricostruzione e valorizzazione del teatro romano di *Ricina*, il cui culmine è costituito dalla realizzazione di un'applicazione di Realtà Virtuale immersiva.

Un volume dunque di carattere ampio e multidisciplinare, diviso in quattro sezioni che permettono una visione multi-scala, cronologicamente ampia ed eterogenea del rilievo, della gestione, della ricostruzione e della valorizzazione del patrimonio archeologico costruito.

ANDREA ARRIGHETTI

École normale supérieure - Université PSL  
AOROC, UMR 8546  
andrea.arrighetti@ens.psl.eu

ROSSELLA PANSINI

Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali  
Università degli Studi di Siena  
rossella.pansini@unisi.it

## BIBLIOGRAFIA

- DELL'UNTO N., LANDESCI G. 2022, *Archaeological 3D GIS*, London, Routledge (<https://doi.org/10.4324/9781003034131>).
- DESSALES H. (ed.) 2020a, *The Villa of Diomedes. The Making of a Roman Villa in Pompeii*, Collection du Centre Jean Bérard, Napoli-Paris, Centre Jean Bérard-Hermann Éditeurs.
- DESSALES H. 2020b, *Construction techniques for elevations: Methods and typology*, in DESSALES 2020a, 189-205.
- MASCIONE C. 2006, *Il rilievo strumentale in archeologia*, Roma, Carocci.
- MEDRI M. 2003, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Laterza.
- PINTO PUERTO F. (ed.) 2020, *Modelos digitales de información en la tutela sostenible del patrimonio cultural. Contribución al conocimiento e innovación social*, Seville, Editorial Universidad de Sevilla.
- TRICOCHÉ A. 2020, *Database Management System*, in DESSALES 2020a, 121-132.
- TRIZIO I., DEMETRESCU E., FERDANI D. (eds.) 2021, *Virtual reconstruction and restoration. Comparing methodologies, practices, and experiences*, «DISEGNARECON», 14, 27 (<http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/issue/view/30/showToc>).

APPLICAZIONI DI RILIEVO  
DELL'ARCHITETTURA STORICA



APPLICAZIONE DEL RILEVAMENTO GEOMATICO  
ALLA *DOMUS* DELLA REGINA D'INGHILTERRA A POMPEI  
(VII, 14, 5): RISULTATI PRELIMINARI

1. L'AREA DI STUDIO: L'*INSULA* VII, 14 DI POMPEI

L'Università degli Studi di Genova conduce all'interno del Parco Archeologico di Pompei un'attività di indagine archeologica (concessione DDG 553 34.31.07/246.7 del 26 gennaio 2016 e rinnovo 34.31.07/3.4.7/2018 del 9 aprile 2019), iniziata nel 2016 e tutt'ora in corso. La ricerca si concentra all'interno della *Regio* VII, *insula* 14 (Fig. 1), un'area di Pompei situata in una zona strategica e particolarmente importante della città: essa si affaccia a S su Via dell'Abbondanza, decumano massimo e arteria viaria principale del tessuto urbano, ed è localizzata a poca distanza dal Foro Civile, le Terme Stabiane, l'area dei teatri, il lupanare e il Foro Triangolare.

L'area di studio è stata portata alla luce tra il 1817 e il 1846, come emerge da alcune planimetrie storiche e dalla lettura del *Pompeianarum Antiquitatum Historia* (FIORELLI 1862) e, con l'eccezione di alcuni saggi effettuati tra il 2002 e il 2006 dall'Università di Napoli Suor Orsola Benincasa (DE SIMONE *et al.* 2008), è rimasta fino all'avvio delle ricerche dell'Università di Genova un'area sostanzialmente inedita, in cui poter svolgere attività di scavo e di analisi degli elevati e applicare tecniche di rilevamento dal punto di vista geomatrico, portando alla raccolta di nuovi dati e all'elaborazione di prodotti grafici inediti.

L'*insula* (Fig. 2) occupa un'area di 60×35 m ca. e ha una forma in pianta trapezoidale: essa è delimitata, oltre che dal decumano massimo a S, da arterie viarie di minore importanza lungo le quali si affacciano gli ingressi secondari dei vari corpi di fabbrica: Vico dello Scheletro a N, Vico del Lupanare a E e Vico della Maschera ad O. L'intero complesso architettonico è composto da venti civici, divisi tra dodici botteghe e tre abitazioni di grandi dimensioni, che occupano la maggior parte dell'area del quartiere: tutti gli ingressi principali si affacciano su Via dell'Abbondanza, con l'eccezione di quello della *Domus* 15 (l'abitazione più ad E), che aveva il suo ingresso principale in Vico del Lupanare e che risulta essere una casa-bottega, connessa con l'esercizio commerciale sito al civico 14.

L'area di Pompei all'interno della quale si trova l'*insula* VII, 14 risulta essere una delle più antiche della città, come si evince dal rinvenimento, presso il muro N delle abitazioni 9 e 15, di un imponente e spesso muro in blocchi di lava tenera, reimpiegato come parte della muratura di delimitazione settentrionale del quartiere: questa struttura muraria più antica sarebbe databile



intorno al VI secolo a.C., in base al materiale rinvenuto all'interno della fossa di fondazione (DE SIMONE *et al.* 2008), e potrebbe già fare riferimento al limite di una preesistente *insula*, il cui assetto planimetrico è attualmente ignoto. In generale, le ricerche condotte dall'Università di Genova hanno permesso di comprendere che la storia dell'*insula* VII, 14 si sia sviluppata da questa fase arcaica, su cui non si hanno informazioni rilevanti, fino all'eruzione del 79 d.C. (PALLECCHI 2018, 2020; PALLECCHI, SANTORO 2019), con una certa continuità.

L'attività di scavo si è concentrata all'interno delle botteghe, con l'obiettivo di comprenderne la funzione come esercizi commerciali, le fasi di vita, i cambiamenti diacronici e le variazioni nella destinazione d'uso. Contestualmente, si è sviluppata una attività di indagine stratigrafica degli elevati, che ha interessato sia le botteghe che le abitazioni, con lo scopo di corredare i dati di scavo con quelli delle strutture murarie. È proprio nell'ambito di quest'ultima ricerca che si è sviluppata l'attività di rilievo geomatico applicato alle evidenze architettoniche dell'*insula* VII, 14.

## 2. LA DOMUS DELLA REGINA D'INGHILTERRA

La campagna di rilievo geomatico ha interessato l'intera *insula* VII, 14, ma si è concentrata in particolare su una delle abitazioni, la più occidentale, sita al civico 5, nota come *Domus* della Regina d'Inghilterra: il 7 novembre 1838 la regina Adelaide di Sassonia-Meiningen, vedova di Guglielmo IV di Hannover, avrebbe visitato l'area di Pompei e, in suo onore, sarebbe stato effettuato uno scavo presso l'abitazione (FIORELLI 1862). Un'altra denominazione nota è quella di "Casa del Banchiere" o "Casa del Cambio" per la presenza di un affresco rappresentante un sacchetto di monete, un rotolo e una *tabula scriptoria*, attualmente dilavato ma noto da una incisione di Nicola La Volpe del 1839 (SAMPAOLO 1997).

La *domus* è di grandi dimensioni (656 m<sup>2</sup>) e occupa quasi la totalità del settore occidentale dell'intera *insula* (Fig. 3): si tratta di una casa ad atrio tuscanico, composta da ventisei ambienti, tra cui un'area produttiva presso l'angolo N-O (un'officina tintoria), in stretta connessione con l'abitazione. La *domus* è stata recentemente oggetto di una analisi stratigrafica degli elevati (CAPOBIANCO 2019), attualmente in corso di revisione per una futura pubblicazione. Nell'ambito di questa ricerca, sono state identificate diverse fasi di vita al di sopra delle strutture murarie, che vanno dal periodo sannitico (IV sec. a.C.) fino all'eruzione del 79 d.C.

Gli obiettivi dell'analisi archeologica e architettonica sono quelli di comprendere le fasi di vita della casa, i cambiamenti diacronici nella planimetria e nell'organizzazione degli spazi, la destinazione d'uso dell'intero complesso architettonico e dei diversi vani, eventuali relazioni pregresse con



Fig. 3 – Foto da drone della Domus della Regina d'Inghilterra (foto S. Gagliolo).

edifici adiacenti. Altri scopi sono relativi alla comprensione dei piani superiori, di quanti fossero e su quale area fossero sviluppati, nonché delle coperture.

### 3. ACQUISIZIONE DELLA PLANIMETRIA E DEI PROSPETTI

Nel corso delle attività di scavo, prima della campagna di rilevamento geomatico, il rilievo degli strati e delle strutture murarie è stato effettuato mediante l'uso della stazione totale o parzialmente per rilievo diretto con triangolazione, sovrapponendo i dati raccolti alla planimetria dell'*insula* VII, 14 in formato DWG, fornita dalla direzione del Parco Archeologico di Pompei e rielaborata mediante un software CAD. Come punti di ancoraggio e orientamento per la stazione totale è stata usata principalmente la rete di stazioni topografiche del Parco Archeologico di Pompei, monumentata mediante caposaldi posti lungo tutto il circuito urbano (MORICHI, PAONE, SAMPAOLO 2018), quattro dei quali sono situati presso gli angoli dell'*insula*. Questo ha consentito di realizzare un rilievo in pianta basandosi su punti già georiferiti e con quota assoluta nota.

La planimetria descritta è stata la base per la rielaborazione dei dati del lavoro sul campo, sia per quanto riguarda lo scavo che per quanto riguarda

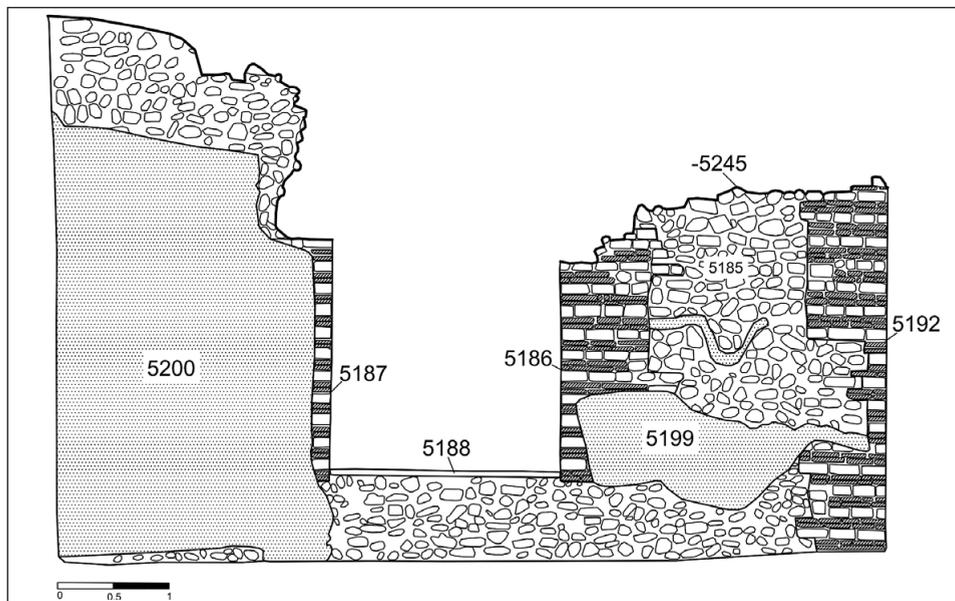


Fig. 4 – Esempio di prospetto di una parete della *Domus* della Regina d'Inghilterra digitalizzato mediante un software CAD (rielaborazione A. Capobianco).

la parte di archeologia degli elevati. Contestualmente all'analisi stratigrafica muraria della parte occidentale dell'*insula* (e della *Domus* 5 nello specifico) è stato effettuato un rilievo diretto dei prospetti visibili, integrato con la digitalizzazione di foto ortorettificate (fornite dalla direzione del Parco Archeologico di Pompei e provenienti dal Piano della Conoscenza).

Ad ogni prospetto corrispondono una o più foto ortorettificate, che sono state digitalizzate mediante un software CAD (Fig. 4), portando alla creazione di un database dei rilievi delle strutture murarie, diviso per ambienti: ogni parete digitalizzata presenta all'interno la divisione stratigrafica, con l'indicazione delle diverse USM, US e USR. Tale lavoro è tutt'ora in corso, con lo scopo di creare una banca dati con i prospetti murari dell'intera *insula*.

A.C.

#### 4. LA CAMPAGNA DI RILEVAMENTO GEOMATICO INTEGRATO

La campagna di rilevamento, realizzata grazie alla collaborazione con il Laboratorio di Geomatica, è stata eseguita nel periodo tra il 22 e il 24 settembre 2020 all'interno del Parco Archeologico di Pompei, avvalendosi delle seguenti tecniche: fotogrammetria terrestre e da UAV, laser scanner, stazione totale e GNSS (CAPOBIANCO *et al.* 2021). Un sopralluogo preliminare è stato

effettuato il 18 luglio 2020, con la finalità di visionare l'area di indagine e definire gli obiettivi con tutto il gruppo di ricerca al completo, quindi con il coinvolgimento di esperti in archeologia, geomatica e ingegneria strutturale.

Per quanto concerne la strumentazione impiegata, la fotogrammetria da UAV è stata acquisita mediante il drone DJI Mavic 2 PRO, con una fotocamera integrata modello Hasselblad L1D-20c: la sua focale è di 10 mm, mentre il sensore di 20 MP è un CMOS da 1". Quattro set di dati sono stati acquisiti: due con geometria di presa nadirale a diverse altezze di volo dal livello suolo, rispettivamente di 40 m e 15 m, e due con geometria di presa obliqua con inclinazione di 45°, creando percorsi concentrici con la camera direzionata sia verso l'interno che verso l'esterno del perimetro del sito, ad un'altezza di 15 m. La dimensione del contenuto del pixel a terra è di 4 mm a 15 m, adeguato ad ottenere un quadro affidabile dell'intero sito, mentre, per una panoramica più generale dell'area complessiva, è di 10 mm a 40 m. In totale, nel corso della campagna di rilevamento, sono state scattate 1400 fotografie. I Ground Control Points (GCPs) e i Check Points (CPs), per un totale di 21 punti, sono stati monumentati mediante supporti flessibili in PVC colorati con triangoli gialli e neri alternati a formare un motivo a croce: si tratta di punti pre-segnalizzati, le cui coordinate sono note grazie all'impiego di una tecnica di supporto.

Nel primo caso i GCPs sono utilizzati come vincoli nell'approccio ai minimi quadrati previsto per la procedura fotogrammetrica dell'aero-triangolazione, permettendo di assegnare il corretto sistema di riferimento e la scala al modello tridimensionale risultante, mentre nel secondo caso (CPs) sono utilizzati soltanto per effettuare una verifica finale della qualità del rilievo. Lo strumento impiegato per il rilievo delle loro coordinate è stato la stazione totale Leica TCR703, posizionata in 13 diversi punti stazione.

Il laser scanner terrestre è stato introdotto per un'acquisizione più dettagliata della specifica area di interesse, ovvero la *Domus* della Regina d'Inghilterra. Un totale di 26 stanze è stato rilevato mediante altrettante scansioni con lo strumento Z+F 5006h, impostando una risoluzione "superhigh", corrispondente a 20.000 punti su 360°. Tenendo conto di una distanza dalle pareti di circa 5 m, la spaziatura dei punti risultante è di massimo 1,6 mm (Fig. 5). Ogni scansione, come accennato in precedenza, si concentra su un singolo ambiente, che tipicamente è chiuso su tre lati, pertanto, per evitare un aumento eccessivo delle scansioni occorrenti, è stata ignorata la loro reciproca sovrapposizione, privilegiando l'allineamento mediante co-registrazione con la nuvola fotogrammetrica da UAV (Fig. 6).

Il GNSS è stato impiegato in modalità Network Real Time Kinematic, in connessione con il Servizio di posizionamento della Regione Campania, con lo scopo di rilevare, tra gli altri, i punti utilizzati come GCPs, laddove non vi erano ostacoli alla visibilità dei satelliti. L'uso di un paio di punti facilmente identificabili per ogni scansione, monumentati mediante chiodi e

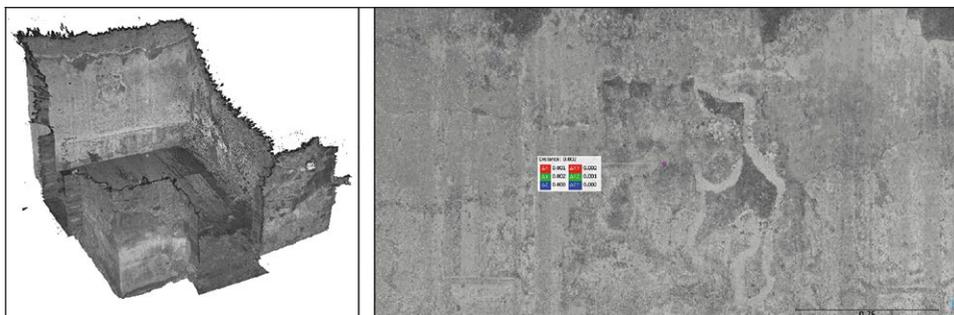


Fig. 5 – Nuvola di punti ad altissima risoluzione ottenuta mediante laser scanner e dettaglio con indicazione della spaziatura dei punti in metri.

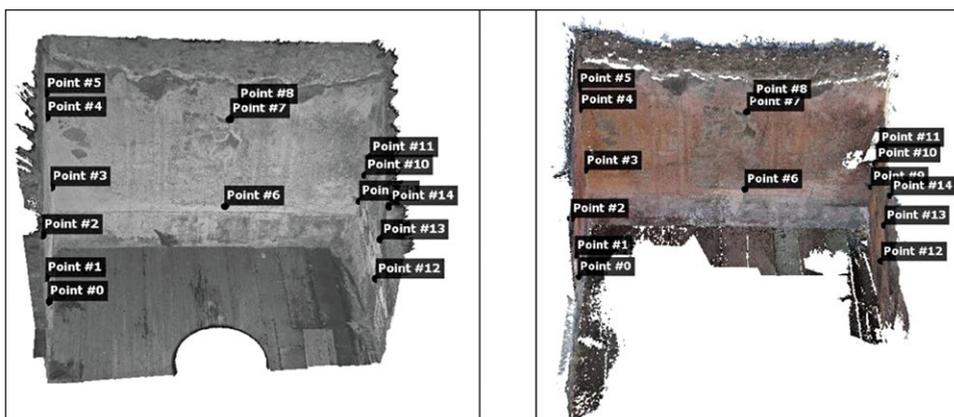


Fig. 6 – Accostamento della nuvola da laser scanner e di quella fotogrammetrica del medesimo ambiente, con l'indicazione dei Ground Control Points (elaborazione E. Berrino).

acquisiti ancora con tecnica GNSS, è stato ulteriormente adottato per favorire la registrazione delle nuvole provenienti dal laser scanner anche in un sistema di riferimento globale, ottenendo un approssimativo posizionamento e orientamento reciproco delle stesse.

Il rilievo fotogrammetrico da terra, acquisito con la fotocamera Canon Eos 40D, dotata di una focale di 17 mm, è stato pianificato per mantenere una distanza massima dalle pareti di 5 m, con il conseguente ottenimento della dimensione del contenuto del pixel di 1,7 mm. Tuttavia, *in loco* la distanza effettiva è stata di circa 2 m, con una dimensione del contenuto del pixel di 0,7 mm. In totale sono state scattate 7000 fotografie.

## 5. POST-PROCESSING DEI DATI FOTOGRAMMETRICI

Le operazioni di post-processing fotogrammetrico si sono svolte in parte con il software commerciale Agisoft Metashape, dedicato all'elaborazione delle immagini da UAV, e in parte con il software open source MicMac, impiegato per gestire quelle terrestri (GAGLIOLO *et al.* 2018a, 2018b). Si evidenziano i pro delle due soluzioni adottate: il primo programma è di semplice utilizzo grazie ad un'interfaccia grafica chiara di supporto all'utente; inoltre, vi sono opzioni dedicate all'ottimizzazione del processamento in caso di rilievo da UAV, che prevede percorsi piuttosto regolari e sequenziali con scatti continui ad intervalli di tempo cadenzati. Il secondo pacchetto, invece, è meno intuitivo perché principalmente sviluppato per l'utilizzo da linea di comando nell'ambiente di lavoro di Linux: tuttavia, è caratterizzato da un approccio rapido e rigoroso e offre una maggiore possibilità di personalizzare i parametri di processamento da parte di un utente con esperienza medio-alta.

Il workflow dell'elaborazione fotogrammetrica in entrambi i casi richiede le fasi di selezione automatizzata dei punti di legame tra le immagini (tiepoints), l'aero-triangolazione mediante approccio ai minimi quadrati, la ricostruzione della nuvola di punti densa (Fig. 7). L'opportunità di customizzazione dei parametri è stata maggiormente sfruttata per quanto concerne MicMac per indicare al software quale criterio era stato precedentemente impiegato durante l'acquisizione dei dati, con particolare riguardo all'ordine di sequenza di scatto, in modo tale da agevolare l'elaborazione limitando manualmente il numero di



Fig. 7 – Particolare della nuvola fotogrammetrica, rappresentante l'angolo N-E dell'abitazione (elaborazione E. Berrino).



Fig. 8 – Nuvola fotogrammetrica ottenuta dalle immagini nadirali, e pertanto carente nell'elevato, da integrare mediante fotogrammetria terrestre e/o laser scanner per una visione d'insieme completa (elaborazione E. Berrino).

fotogrammi da comparare per la ricerca e il matching dei punti di legame. Alla luce del numero elevatissimo di fotogrammi acquisiti, tale ottimizzazione si è rivelata molto preziosa per abbattere drasticamente i tempi di processamento, mantenendo un risultato ottimo dal punto di vista della qualità metrica.

Per un'ulteriore facilitazione del processamento, è stato stabilito di suddividere le 7000 foto complessive del rilievo da terra in porzioni da 500 immagini, avendo cura di sovrapporne 100 con la sequenza precedente e altrettante con la successiva. Questa accortezza è stata applicata per non avere buchi nel modello 3D finale e, inoltre, per facilitare la reciproca registrazione delle nuvole di punti risultanti dalle singole porzioni (Fig. 8). Tale co-registrazione è stata ulteriormente agevolata dalla presenza del modello 3D complessivo dell'intera area già ottenuto dalle immagini da UAV mediante Agisoft Metashape e dalle singole porzioni autoconsistenti rilevate con il laser scanner: le immagini da UAV, infatti, vanno ad inquadrare i target debitamente predisposti per l'assegnazione del sistema di riferimento appropriato, sia a livello locale, per quanto concerne il rilievo di supporto con stazione totale, sia a livello globale, per quanto riguarda la tecnica GNSS. Tali punti non risultano visibili, invece, nelle immagini terrestri, che inquadrano esclusivamente le pareti della Casa

della Regina d'Inghilterra, su cui, per ovvi motivi legati alla conservazione e preservazione del sito, non era possibile affiggere nulla. Per le ragioni appena evidenziate, le singole porzioni di nuvola ottenute dai gruppi di 500 foto non risultano correttamente scalate e geo-riferite prima della co-registrazione con la nuvola globale da UAV o con quella locale corrispondente da laser scanner.

Come strada alternativa, si è tentato anche di stralciare alcuni punti naturali dalle altre nuvole ottenute da sorgente diversa, con particolare riferimento a quella proveniente dal laser scanner, avente la risoluzione più elevata tra i dati a disposizione. Le coordinate di tali punti sono state inserite nella procedura fotogrammetrica del software MicMac come GCPs, per imporre la sovrapposizione del modello fotogrammetrico delle pareti dell'ambiente in analisi con la corrispondente nuvola laser scanner, che intrinsecamente risulta già perlomeno correttamente scalata.

L'integrazione di tutti i dataset, da laser scanner, da fotogrammetria terrestre e da UAV, ha l'obiettivo di garantire un livello di dettaglio sempre crescente per le porzioni di maggiore interesse, oltre al reciproco controllo e supporto precedentemente illustrato che ogni tecnica può offrire per sopperire alle necessità finali della campagna contribuendo in maniera quanto più ottimizzata.

Uno degli esiti finali del processamento dei dati ottenuti nella campagna di rilevamento è indirizzato all'ottenimento di ortofoto, finalizzato sia allo studio dell'antico assetto degli ambienti, sia all'analisi della stabilità delle strutture che si ergono sul sito in esame. Un approccio iniziale alla produzione delle ortofoto propedeutiche agli scopi elencati, le quali consistono in mappe metricamente affidabili ottenute mediante proiezione ortogonale a partire dalle fotografie dell'oggetto, è stato portato avanti dall'Ing. Eugenio Berrino (BERRINO *et. al.* 2021) durante la stesura della sua tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Ambientale. Applicando il tool MAGO precedentemente descritto, sono state prodotte, alcune ortofoto di pareti adiacenti, tra loro accostate nella rappresentazione finale, come se la sequenza dei muri attigui fosse stata srotolata *ad hoc* per consentirne una visione d'insieme.

S.G.

## 6. FINALITÀ, OBIETTIVI E RISULTATI DEL RILEVAMENTO GEOMATICO

L'applicazione delle metodologie geomatiche ai contesti del patrimonio culturale è una pratica sempre più frequente e in costante crescita (FIORINI 2013; HERNÁNDEZ CORDERO 2017; SILANI 2021): l'area di Pompei, per l'eccezionale stato di conservazione, è stata più volte oggetto di analisi di questo tipo, soprattutto negli ultimi anni (MONEGO *et al.* 2019; FRANCOLINI, GIRELLI, BITELLI 2020; VERDE 2020).

Il fine primario della campagna di rilevamento che si è svolta a Pompei nel settembre del 2020 è stato quello di incrementare la conoscenza del

complesso architettonico oggetto di studio, in questo caso l'*insula* VII, 14 e, nello specifico, la *Domus* della Regina d'Inghilterra, mediante un approccio interdisciplinare, di tipo archeologico e ingegneristico: è nata così la collaborazione tra il Laboratorio di Metodologie della Ricerca Archeologica (nelle persone della Prof.ssa Silvia Pallecchi e della Dott.ssa Alice Capobianco) e il Laboratorio di Geomatica (nelle persone del Prof. Domenico Sguerso e della Dott.ssa Sara Gagliolo), entrambi afferenti all'Università di Genova.

L'*insula* VII, 14 si presenta come un'area di studio ideale dove poter applicare il rilevamento geomatico mediante stazione totale, laser scanner, GNSS, fotogrammetria da terra e UAV, tenendo conto dello stato di conservazione ottimale delle murature, che si erigono fino ad un'altezza di 5 m ca. (le strutture murarie che conservano una estensione in elevato maggiore si trovano all'interno della Casa della Regina d'Inghilterra).

Uno degli obiettivi ultimi di questo lavoro è stato quello di ottenere un modello fotogrammetrico tridimensionale, il più accurato e dettagliato possibile, che fosse facilmente fruibile anche da parte degli archeologi e che potesse rappresentare uno strumento concreto di supporto all'analisi dell'area di indagine, anche nelle fasi di post-scavo e in quei momenti dell'anno in cui non è possibile recarsi sul sito per accertamenti. Il modello tridimensionale svolge, dunque, la duplice funzione di monitoraggio dello stato di conservazione, qualora esso venga periodicamente riacquisito (GILENTO 2012), e di supporto nello studio del complesso architettonico.

Il modello tridimensionale costituisce, infatti, uno strumento di documentazione grafica molto preciso e dettagliato dell'area di indagine, da cui è possibile attingere quelle informazioni che spesso non sono identificabili sul campo, a causa dell'altezza o dell'inaccessibilità di alcune aree: lo stato di conservazione delle strutture murarie e dei rivestimenti, che possono presentare criticità non evidenti mediante la visione autoptica (e che andrebbero ulteriormente verificate da analisi di tipo strutturale), può essere monitorato e osservato in modo puntuale, portando alla proposta di eventuali interventi di adeguamento e restauro. Ad esempio, mediante la visione della nuvola di punti tridimensionale è stato notato uno spanciamento verso l'esterno della parte superiore della muratura N del civico 3, che non sembra, per il momento, presentare criticità che necessitino di un intervento immediato.

Il modello fotogrammetrico, inoltre, essendo preciso e dettagliato dal punto di vista metrico, può consentire l'ottenimento di misurazioni molto accurate, che possono essere confrontate con quelle prese sul campo o mediante altri strumenti, con una visione d'insieme che spesso è difficile da ottenere mediante la semplice osservazione di ortofoto, planimetrie e rilievo diretto.

Uno degli obiettivi, dal punto di vista archeologico, è quello di poter ottenere informazioni riguardanti le variazioni di quota dei piani e di tutti gli elementi strutturali, gli spessori e gli assetti delle strutture murarie, in modo

da poter formulare ipotesi riguardanti i diversi piani di calpestio all'interno di corpi di fabbrica anche distanti tra loro e gli eventuali andamenti dei piani superiori, in base all'osservazione di indicatori come i fori per le travi dei soppalchi in legno o la presenza di residui di pavimentazione. A questo proposito, una delle domande relative alle ipotesi ricostruttive della geometria dell'*insula* riguarda proprio i piani superiori, se siano presenti e quanti siano: le buche per l'incasso delle travi in legno del soppalco, i residui di pavimentazione e i tubi fittili per il passaggio degli scarichi delle latrine (che attestano la presenza di un bagno al piano superiore) sono indicatori abbastanza affidabili a riguardo, ma le ipotesi formulate possono essere smentite o confermate solo mediante uno studio di tipo strutturale, che può essere svolto partendo da un'analisi sul campo, corredata eventualmente da osservazioni basate sul rilievo tridimensionale, metricamente accurato e graficamente dettagliato.

Nonostante il lavoro di analisi architettonica sia ancora in corso, da una prima osservazione preliminare d'insieme dei piani di calpestio nel modello fotogrammetrico, è già stato possibile osservare come quelli delle botteghe differiscano notevolmente tra di loro, con una diminuzione delle quote verso S, legata probabilmente ad una variazione altimetrica del terreno geologico. Inoltre, la Casa della Regina d'Inghilterra si presenta ad una quota di 1,80 m più in alto rispetto a quella di tutti i corpi di fabbrica adiacenti. Per quanto riguarda i piani superiori, è stato notato come, anche all'interno del medesimo edificio, essi possano differire di altezza, in certi casi con una variazione minima identificabile solo mediante un'analisi metrica: ad esempio, all'interno dell'abitazione più orientale (*Domus VII*, 14, 15), i fori delle travature del piano superiore e i residui di pavimentazione all'interno di due ambienti adiacenti nel settore N-E (vani 5 e 16) sono posti a quote diverse, con uno scarto di pochi cm.

La visione d'insieme fornita dal modello tridimensionale può, inoltre, consentire l'osservazione di porzioni di strutture murarie e rivestimenti o di interi ambienti altrimenti non visibili, con un certo grado di dettaglio, portando all'individuazione di elementi strutturali o all'ottenimento di informazioni riguardanti le tecniche costruttive e l'architettura dell'edificio, altrimenti non identificabili o strettamente parziali. Ad esempio, l'ambiente 21 della Casa della Regina d'Inghilterra non è attualmente agibile, poiché chiuso da tutti i lati: l'unica porta di accesso, che comunicava con la bottega sita al Civico 1, è stata chiusa nel 1948 nel corso di lavori di restauro in seguito ai bombardamenti (GDS 1948), rendendo impossibile studiare l'ambiente mediante analisi autoptica: tale vano (per quanto ricostruito solo mediante la fotogrammetria UAV, per l'impossibilità di portare la strumentazione all'interno e di scattare le foto da terra) può essere ora analizzato, misurato e osservato in modo più accurato mediante il modello fotogrammetrico. È stato, inoltre, possibile confermare l'identificazione di aperture tamponate all'interno dell'*insula*, osservate durante l'analisi stratigrafica degli elevati, con una visione ottimale

anche delle eventuali porte e finestre chiuse presso i piani superiori, con il fine di contribuire alla conoscenza dell'evoluzione diacronica del quartiere.

La documentazione prodotta ha il fine di essere uno strumento di studio di alta qualità che, oltre agli obiettivi di tutela già ricordati, può essere utilizzato per incrementare la conoscenza dell'area oggetto di studio, portando ad una eventuale valorizzazione del complesso architettonico, che può essere così compreso al meglio nella sua visione tridimensionale, sia da un pubblico competente che generalista. Da questo punto di vista, il prodotto tridimensionale fotogrammetrico può costituire la base, metricamente affidabile, per la costruzione di un modello ricostruttivo, in cui le murature conservate siano completate immaginandone la prosecuzione in elevato e in pianta, e in cui gli elementi secondari non conservatisi (scale, soppalchi, porte) siano inseriti all'interno del complesso architettonico, ricostruendone la posizione e l'andamento; in quest'ottica, sono ipotizzati anche i piani superiori, in base agli indicatori già sottolineati in precedenza.

Infine, un altro prodotto di interesse ottenibile dalla filiera di post-elaborazione fotogrammetrica è l'ortofoto; a differenza di quelle precedentemente citate per il database dei prospetti digitalizzati, in questo caso la produzione di tali foto ortorettificate è stata ottenuta mediante un tool implementato in seno al Laboratorio di Geomatica dell'Università di Genova, denominato MAGO (Mesh Adattiva per la Generazione di Ortofoto; GAGLIULO 2019; GAGLIULO *et al.* 2019), che le ha accostate tra di loro in maniera automatizzata, in continuità tra pareti adiacenti. Pertanto, esse risultano poste sul medesimo piano bidimensionale, in modo da ottenere una visione "srotolata" d'insieme dell'intero ambiente: questa continuità tra le pareti può aiutare nell'analisi stratigrafica e nello studio delle tecniche costruttive dell'area oggetto di studio, permettendo di mettere in luce e di osservare l'intero andamento delle murature all'interno di una singola foto senza interruzioni.

## 7. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

In seguito alla campagna di rilevamento e alla fase di post-processing dei dati, si è riusciti ad ottenere un prodotto grafico metricamente molto accurato, mediante la realizzazione di un modello fotogrammetrico tridimensionale (Fig. 9) e di ortofoto d'insieme degli ambienti (Fig. 10). Entrambi gli strumenti sono facilmente fruibili sia dalla équipe degli ingegneri che da quella degli archeologi e saranno utilizzati nella prosecuzione delle indagini dell'*insula* VII, 14, come base per future analisi dal punto di vista architettonico delle strutture murarie: queste ultime sono tutt'ora in corso e, pertanto, i risultati presentati in questa sede sono da considerarsi preliminari.

L'alto livello di dettaglio e di risoluzione dell'elaborato grafico consente di poter osservare l'*insula* in ogni sua parte (compresi gli ambienti non accessibili),



Fig. 9 – Modello fotogrammetrico tridimensionale dell'insula VII, 14 (elaborazione E. Berrino).

mentre l'accuratezza dal punto di vista metrico permette di poterne misurare ogni elemento. Inoltre, è possibile formulare osservazioni riguardanti i diversi piani di calpestio e le variazioni di quota, grazie ad una visione d'insieme.

Il modello digitale dell'area oggetto di studio avrà anche una funzione di tutela, consentendo di monitorare eventuali fenomeni di degrado (in parte già visibile, per quanto riguarda gli spancamenti di alcune strutture, anche se non ancora critico, poiché le murature sono state negli ultimi anni consolidate nell'ambito del Grande Progetto Pompei) e conservare le informazioni relative al complesso architettonico in caso di evento catastrofico.

Il modello fotogrammetrico sarà la base per la successiva realizzazione di un modello tridimensionale ricostruttivo, che si fonderà sulle ipotesi riguardanti la planimetria dell'intero complesso e l'estensione dei piani superiori, nonché sulla conformazione delle coperture. Tali ricostruzioni, che si baseranno principalmente sugli indicatori descritti nei paragrafi precedenti, saranno accompagnate da una analisi ingegneristica di tipo strutturale, che confermerà o smentirà tali ipotesi, individuando, per esempio, se dal punto di vista statico un determinato muro possa effettivamente sorreggere uno o più piani superiori. La realizzazione di un modello ricostruttivo tridimensionale sarà inoltre utilizzata per valorizzare un'area di Pompei ancora poco nota a causa dell'assenza di edifici di rilievo e della chiusura ai non addetti ai lavori delle abitazioni, contribuendo a far conoscere la storia di questo quartiere ad un pubblico più ampio.

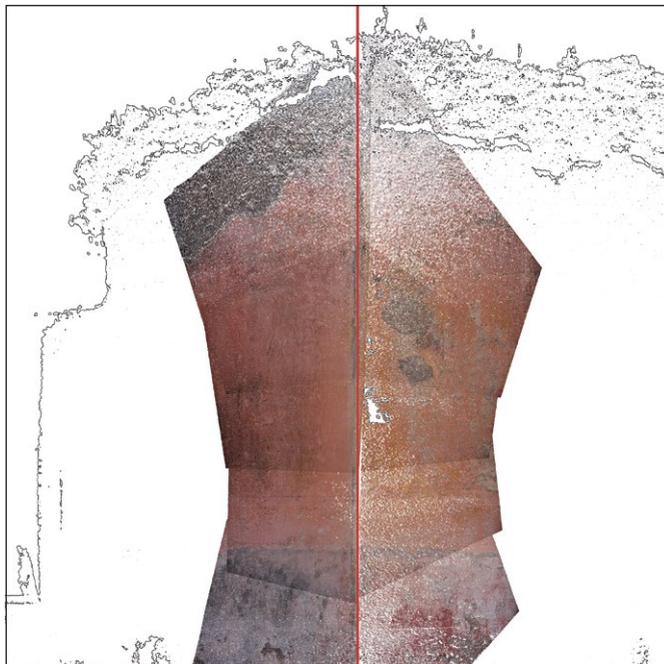


Fig. 10 – Ortofoto accostate di pareti adiacenti ottenute mediante il tool MAGO (elaborazione E. Berrino).

In conclusione, la collaborazione tra gli archeologi e i geomatici ha consentito di incrementare le conoscenze relative all'*insula* 14 della *Regio* VII, con un approccio multidisciplinare che porterà all'accostamento dei dati ottenuti dallo scavo e dall'analisi stratigrafica muraria a quelli ottenuti dal rilevamento di tipo geomatico, con il fine di analizzare e studiare in modo sempre più preciso e valorizzare l'area oggetto di studio.

A.C.

ALICE CAPOBIANCO

Laboratorio di Metodologie della Ricerca Archeologica  
Dipartimento di Antichità, Filosofia e Storia (DAFiSt)  
Università degli Studi di Genova  
alice.capobianco@edu.unige.it

SARA GAGLILO

Laboratorio di Geodesia, Geomatica e GIS  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA)  
Università degli Studi di Genova  
sara.gagliolo@edu.unige.it

### Ringraziamenti

Si ringraziano la Prof.ssa Silvia Pallecchi e il Prof. Domenico Sguerso, per la direzione delle attività sul campo e per la supervisione in ogni fase del lavoro; la direzione del Parco Archeologico di Pompei, per le autorizzazioni e il supporto logistico; il Prof. Stefano Podestà e i suoi collaboratori, per il supporto riguardo all'analisi strutturale degli edifici; il Dott. Eugenio Berrino, per la rielaborazione dei dati e la ricostruzione del modello fotogrammetrico e per la condivisione del suo lavoro; il Ce.Dro dell'Università di Genova, Scuola Droni Genova ed Eurodone Flight Systems per la collaborazione.

### BIBLIOGRAFIA

- BERRINO E., GAGLILO S., FERRANDO I., FEDERICI B., SGUERSO D. 2021, *Elaborazione di rilievi fotogrammetrici e strumenti per la realizzazione di ortofoto ad elevata definizione dello sviluppo di strutture verticali: prime applicazioni al Parco Archeologico di Pompei*, abstract al FOSS4G-IT 2021, evento online dal 19 al 21 settembre 2021.
- CAPOBIANCO A. 2019, *Pompei. Regio VII, Insula 14. Analisi stratigrafica degli elevati del settore occidentale*, Tesi di Laurea Magistrale, Università di Genova.
- CAPOBIANCO A., GAGLILO S., PALLECCHI S., SGUERSO D. 2021, *Analysis of historical evolution and present state of conservation of Regio VII, Insula 14 in Pompeii*, in *Proceedings of the Joint International Event 9<sup>th</sup> Arqueológica 2.0 & 3<sup>rd</sup> Geores (Valencia 2021)*, Valencia, Editorial Universitat Politècnica de València, 501-503.
- DE SIMONE A., LUBRANO M., CANNELLA R., CAPRIO L., CARANNANTE S., GRAZIOSO M.R., DE LUCA M., FRANCIOSI V. 2008, *Pompei, Regio VII, Insula 14*, in P.G. GUZZO, M.P. GUIDOBALDI (eds.), *Nuove ricerche archeologiche nell'area vesuviana. Scavi 2003-2006. Atti del Convegno internazionale (Roma 2007)*, Roma, L'Erma di Bretschneider, 283-292.
- FIORELLI G. 1862, *Pompeianarum Antiquitatum Historia*, II, Napoli.
- FIORINI A. 2013, *Nuove possibilità della fotogrammetria. La documentazione archeologica del nuraghe di Tanca Manna (Nuoro)*, «Archeologia e Calcolatori», 14, 341-354 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18_Fiorini.pdf)).
- FRANCOLINI C., GIRELLI V.A., BITELLI G. 2020, *3D image-based surveying of the safe of the Obellio Firmo domus in Pompeii*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 43, 1389-1394 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1389-2020>).
- GAGLILO S. 2019, *Ortofoto ad alta risoluzione per individuazione di lesioni strutturali con "MAGO" (High resolution orthophotos for the recognition of structural lesions with "MAGO")*, honoured with the "Premio Giovani Autori" (Young Authors Prize) during the 64° Convegno SIFET, «Bollettino SIFET», 1, 1-7 (<https://www.sifet.org/bollettino/index.php/bollettinosifet/article/view/2142/4270>).
- GAGLILO S., AUSONIO E., FEDERICI B., FERRANDO I., PASSONI D., SGUERSO D. 2018a, *3D cultural heritage documentation: A comparison between different photogrammetric software and their products*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42.2, 347-354 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-347-2018>).
- GAGLILO S., FAGANDINI R., PASSONI D., FEDERICI B., FERRANDO I., PAGLIARI D., PINTO L., SGUERSO D. 2018b, *Parameter optimization for creating reliable photogrammetric models in emergency scenario*, «Applied Geomatics», 10, 4, 501-514 (<https://doi.org/10.1007/s12518-018-0224-4>).
- GAGLILO S., FEDERICI B., FERRANDO I., SGUERSO D. 2019, *MAGO: A new approach for orthophotos production based on adaptive mesh reconstruction*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42.2, 533-538 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-533-2019>).

- GDS 1948, *Giornale degli Scavi di Pompei*, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei.
- GILENTO P. 2012, *Fotogrammetria, nuvole di punti e rischio sismico. Applicazioni e riflessioni su una metodologia di rilievo*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0, Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 297-309 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/18\\_Gilento.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/18_Gilento.pdf)).
- HERNÁNDEZ CORDERO M. 2017, *Geomatics approach to surveys for Late Antiquity buildings. The Episcopal Palace in Side, Turkey*, in S. GARAGNANI, A. GAUCCI (eds.), *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the KAINUA 2017 International Conference (Bologna, 18-21 April 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.2, 457-467 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.37>).
- MONEGO M., MENIN A., FABRIS M., ACHILLI V. 2019, *3D survey of Sarno Baths (Pompeii) by integrated geomatic methodologies*, «Journal of Cultural Heritage», 40, 240-246 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.013>).
- MORICHI R., PAONE R., SAMPAOLO F. 2018, *Pompei. Nuova cartografia informatizzata georiferita*, Roma, Arbor Sapientiae Editore.
- PALLECCHI S. 2018, *Pompei: indagini archeologiche nelle botteghe della Regio VII. Campagna 2016 (VII, 14,1-3)*, «The Journal of Fasti Online, FOLD&R», 417 (<http://www.fastionline.org/docs/FOLDER-it-2018-417.pdf>).
- PALLECCHI S. 2020, *L'area della bottega VII 14. 3 a Pompei: storie di trasformazioni e progressive edificazioni di un piccolo spazio affacciato su Via dell'Abbondanza, fine del II sec. a.C.-I sec. d.C.*, «Rivista di Studi Pompeiani», 31, 47-56.
- PALLECCHI S., SANTORO E. 2019, *Pompei: indagini archeologiche nelle botteghe della Regio VII Campagne 2017-2018 (VII, 14, 1-7)*, «The Journal of Fasti Online, FOLD&R», 456 (<http://www.fastionline.org/docs/FOLDER-it-2019-456.pdf>).
- SAMPAOLO V. 1997, *VII, 14, 5*, in *Pompei, Pitture e Mosaici*, Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, 663-683.
- SILANI M. 2021, *Reconstructing the funerary landscape: Natural environment and topography of the necropolis*, in V. BALDONI (ed.), *From Pottery to Context. Archaeology and Virtual Modelling*, «Archeologia e Calcolatori», 32.2, 45-51 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.05>).
- VERDE D. 2020, *Vaulted structures in the Archaeological Park of Pompeii: 3D survey and monitoring*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 44, 303-309 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-303-2020>).

## ABSTRACT

This work arises from the collaboration between the Laboratory of Archaeological Research Methodologies and the Laboratory of Geomatics of the University of Genoa, based on a multidisciplinary approach, combining archaeological and engineering skills. Since 2016, the team of archaeologists from the University of Genoa has been working inside the Pompeii Archaeological Park in the shops of *insula* 14 of *Regio* VII, an important area within the urban context as it overlooks *Via dell'Abbondanza*, the most important road, and it is located in a central position, in proximity to the main public areas, such as the Forum. From the beginning of the project to the present day, the archaeology team has analysed the *tabernae* from a stratigraphic point of view. So, simultaneously with the excavation activity, a stratigraphic analysis of the walls and coatings was carried out, involving both the commercial establishments being excavated and the three large houses of the *insula*, mainly focusing on the most western one, named 'Casa della Regina d'Inghilterra'. In September 2020, a survey campaign was carried out by geomatics engineers aiming to applying innovative survey methodologies to the architectural complex of the entire *insula* and, specifically, to the 'Casa della Regina

d'Inghilterra'. In particular, the survey data were collected by total station, GNSS, laser scanner, combined with terrestrial and UAV photogrammetry. This paper presents the preliminary results obtained from the geomatic survey campaign, leading to the creation of an accurate photogrammetric model which can be used as a basis for a reconstructive model, whose hypotheses will be confirmed or denied by a future structural analysis.

## SCANSIONI DINAMICHE IN ARCHEOLOGIA DELL'ARCHITETTURA: TEST E VALUTAZIONI METRICHE DEL SENSORE LIDAR DI APPLE

### 1. INTRODUZIONE

Gli strumenti e i metodi per il rilievo archeologico rientrano da sempre nei temi di ricerca di chi scrive (CATTANI, FIORINI, RONDELLI 2004; FIORINI 2004, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2018; BOGDANI *et al.* 2007; FIORINI, ARCHETTI 2011; FIORINI, URCIA, ARCHETTI 2011). Di recente, al centro del nostro interesse ci sono gli scanner portatili per il rilevamento dinamico terrestre, da ora in poi indicati nel testo con l'acronimo MLS (Mobile Laser Scanner), ma recentemente definiti anche HMLS (Hand-held Mobile Laser Scanner). Diversamente da quanto succede con i laser scanner statici, il rilievo degli oggetti presenti nello spazio avviene attraverso una ripresa dinamica, dunque, il termine "mobile" nel nome MLS allude alla modalità di utilizzo del dispositivo (JAMES, QUINTON 2014).

Gli MLS stanno cambiando il modo in cui vengono condotti i rilevamenti in molti domini applicativi: ambiente costruito e urbano, beni culturali e archeologia, ambiente sotterraneo, monitoraggio ambientale e altro ancora. L'interesse è dovuto alle loro caratteristiche principali: facilità d'uso, affidabilità, efficienza, costi relativamente contenuti e ridotto sforzo umano. Per acquisire i dati, gli MLS usano un sensore professionale di tipo LiDAR (Light Detection And Ranging, ossia rilevamento e valutazione della distanza tramite la luce: GOMARASCA 2004, 287, 593; YOUNG 2011, 3; DI STEFANO *et al.* 2021, 2389)<sup>1</sup>.

### 2. IL SENSORE LIDAR DI APPLE

L'evoluzione tecnologica ha consentito l'immissione sul mercato di sensori economici e miniaturizzati (fino a dimensioni sub-centimetriche), come quello che Apple ha installato nei suoi tablet e smartphone a partire dal 2020<sup>2</sup>. Questo sensore è stato introdotto sul mercato principalmente per applicazioni di realtà aumentata: una tecnica che impiega i dati sulla profondità della scena

<sup>1</sup> Il sensore trasmette impulsi di onde elettromagnetiche alla velocità costante di 299.792.458 m/s (velocità della luce) e li riceve una volta che sono riflessi da un ostacolo. Il tempo che trascorre tra l'emissione e la registrazione dell'impulso di ritorno (tempo di volo) viene "cronometrato" e si ricava da questo valore la distanza del punto riflettente (GOMARASCA 2004, 287, 593; YOUNG 2011, 3; AMALDI 2014, 1429-1434).

<sup>2</sup> <https://www.apple.com/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>.

per inserire nell'inquadratura testi e oggetti tridimensionali (BARCELÓ 2001, 233-242). Tuttavia, numerose utility (app) lo usano per rilevare distanze e generare planimetrie in modalità semi-automatica. Si tratta, pertanto, di un sensore che può essere impiegato come strumento di misura pur non essendo stato concepito a tale scopo (MURTIYOSO *et al.* 2021, 600; SPREAFICO *et al.* 2021b, 63). Questo sensore, del quale Apple non ha fornito le specifiche tecniche, dovrebbe usare onde elettromagnetiche di lunghezza pari a  $0,8 \mu\text{m}^3$ , dunque onde non visibili dall'uomo (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021, 2; SPREAFICO *et al.* 2021a, 421). Funziona in ambienti chiusi come all'aperto e riesce a effettuare la misura fino a 4,9 m di distanza (SPREAFICO *et al.* 2021b, 65). La fotocamera svolge un ruolo fondamentale: fornisce i dati per la colorazione dei punti e contribuisce alla formazione della nuvola stessa (MURTIYOSO *et al.* 2021, 602-603; SPREAFICO *et al.* 2021a, 422). Infatti, se si oscura l'obiettivo mentre si esegue una scansione, si ottiene una nuvola completamente nera e piuttosto lacunosa.

La possibilità di eseguire un rilievo 3D con uno strumento leggero e portatile, in grado di fornire risultati in tempo reale e dal costo relativamente basso (rispetto agli scanner professionali), ha suscitato non poca curiosità tra gli addetti ai lavori. Lo si deduce dalle diverse pubblicazioni scientifiche che valutano le prestazioni del sensore e le modalità d'uso in differenti ambiti applicativi (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021; MURTIYOSO *et al.* 2021; SPREAFICO *et al.* 2021a, 2021b). I test pubblicati fino ad ora hanno evidenziato errori centimetrici nella posizione dei punti della nuvola rispetto ai punti di riferimento misurati con strumenti topografici di precisione elevata. Ad esempio, scansionando a una distanza variabile tra 1 e 3 m un fronte architettonico caratterizzato da una geometria diversificata (dunque non assimilabile a un piano), la posizione di alcuni punti della nuvola (12%) si discosta dal dataset di riferimento fino a 5-10 cm, ma in buona parte (60%) l'errore non supera i 2 cm (SPREAFICO *et al.* 2021b, 68-69). Nel complesso, le conclusioni a cui giungono gli autori (ingegneri, architetti e geologi) sono sostanzialmente positive anche se esistono alcune perplessità:

1) il sensore ha una precisione accettabile per l'elaborazione di rilievi architettonici in scala 1:200 (o con denominatore più grande); dunque, se l'obiettivo è quello di ricavare dalle nuvole un "disegno CAD" da stampare con questo "rapporto di riduzione", allora il sensore di Apple sembra essere uno strumento molto interessante, considerando anche il basso costo rispetto ad altri sistemi di scansione, la portabilità, la velocità e la facilità d'uso (SPREAFICO *et al.* 2021b, 69);

<sup>3</sup> <https://www.forbes.com/sites/sabbirrangwala/2020/11/12/the-iphone-12lidar-at-your-fingertips/>.

2) è uno strumento utile anche per la ricerca geo-scientifica, ma la sua “portata” (non superiore a 4,9 m) ne riduce il campo delle applicazioni (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021, 6);

3) oltre a questo limite, un'altra criticità del sensore è la risoluzione non sufficiente alla restituzione dei dettagli formali più minuti di una superficie (il problema è stato riscontrato in seguito al rilievo di una statua e di alcuni graffiti presenti nelle pareti di un edificio storico).

Nonostante questi limiti, e sebbene la qualità metrica abbia ancora molto margine di miglioramento, la presenza di questo sensore in uno smartphone (o tablet) viene considerata un altro passo importante verso la “democratizzazione” dei dati 3D: un processo iniziato con l'immissione sul mercato di scanner molto più economici e di software per la fotogrammetria digitale “user-friendly” (MURTIYOSO *et al.* 2021, 602-603).

### 3. CASI DI STUDIO E METODO DELLA RICERCA

La domanda a questo punto è obbligata: per quali attività di documentazione archeologica è adatto questo sensore? Ovviamente la scelta dello strumento dipende dallo scopo della misurazione. Non sempre le misure richiedono una precisione elevata: a seconda dei casi ci si può accontentare di misure approssimative, ma sufficienti allo scopo. In archeologia esistono indagini che richiedono una precisione al millimetro (la mensiocronologia dei laterizi, solo per fare un esempio), ma in genere una precisione centimetrica è compatibile con il livello di qualità richiesto per la maggior parte delle attività di documentazione.

Ad ogni modo, per evitare generalizzazioni, si è deciso di restringere il campo applicativo a un settore specifico dell'archeologia, cioè l'archeologia dell'architettura (PARENTI 2000; BOATO 2008; BROGIOLO, CAGNANA 2012), e di rimandare a lavori futuri una sperimentazione più allargata che comprenda in particolare lo scavo archeologico. Come noto, la documentazione archeologica degli elevati richiede le ortofoto dei prospetti da cui ricavare il disegno degli elementi costruttivi (laterizi e litici) e delle unità stratigrafiche. Altrettanto necessari sono i tradizionali elaborati grafici: piante, prospetti e sezioni. Questi disegni, oltre a fornire dati utili per un'analisi formale e dimensionale del costruito (studio delle tipologie di impianto, dei criteri compositivi e delle unità di misure antiche), vengono utilizzati per costruire tavole fondamentali per la comunicazione dei risultati: l'individuazione grafica delle diverse fasi edilizie e le ricostruzioni dei passati assetti architettonici (MEDRI 2003).

Il dispositivo utilizzato è un iPhone 13 Pro Max: un modello immesso sul mercato nel settembre del 2021 (Fig. 1). I dati sono stati acquisiti tramite l'applicazione gratuita Scaniverse (versione 1.6.1) che trasforma i punti della

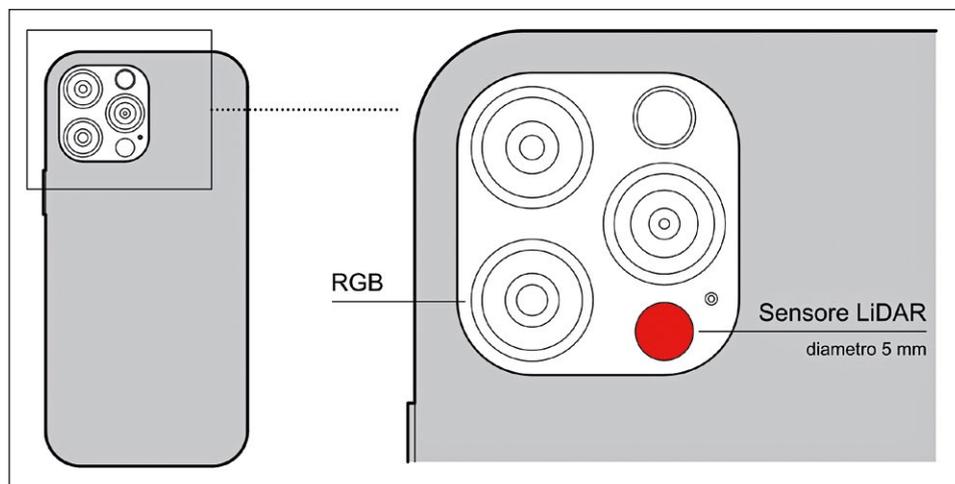


Fig. 1 – Un dettaglio dello strumento impiegato in questo studio (iPhone 13 Pro Max).

nuvola in una superficie mesh a rete di poligoni (triangolari). La fotocamera dello smartphone viene utilizzata dall'app per generare la texture e conferire al modello un aspetto fotorealistico. La mesh può essere misurata, tagliata (generando all'istante una pianta) e salvata su cloud (OneDrive, Sketchfab, etc.) in formato 3D (come OBJ e FBX) garantendo piena compatibilità con la maggior parte dei software di modellazione<sup>4</sup>. Il modello è un prodotto metrico, ovvero misurabile in ogni direzione, pertanto già utilizzabile in ambito tecnico per ricavare piante e sezioni. Non solo: la vista ortografica della mesh texturizzata può essere salvata in formato raster e usata per il disegno CAD di unità stratigrafiche e materiali costruttivi.

Per valutare le proprietà metrologiche del sensore (portata, risoluzione e precisione) si sono svolti 6 diversi test di misurazione: cambiano le condizioni operative durante l'uso dello strumento, la morfologia dell'oggetto e lo scopo della misurazione.

Il primo caso di studio è stato affrontato al fine di valutare la precisione dello strumento. Come termine di confronto si sono usate misure topografiche di alta precisione (ottenute tramite laser scanner a luce strutturata). Oggetto del test è un capitello alto circa 33 cm, con un diametro alla base di circa 23 cm. In meno di 15 secondi è stata eseguita la scansione LiDAR di una parte della sua superficie. L'acquisizione dei dati è avvenuta a una distanza

<sup>4</sup> In costante crescita è il numero delle applicazioni dedicate al rilievo tramite sensore LiDAR. Tra le più note, oltre a Scaniverse, si ricordano Polycam, 3d Scanner App<sup>TM</sup> e Sitiescape.

di circa 40 cm, cercando di muovere lo strumento lentamente e a velocità costante. La stessa porzione è stata poi rilevata con uno scanner manuale ad alta precisione: lo Spider a luce strutturata, prodotto da Artec 3D<sup>5</sup>. Tramite algoritmo ICP (Interactive Closest Point), si sono sovrapposti i due modelli e confrontati mediante analisi Cloud-to-Mesh (una funzionalità del software CloudCompare). Questo strumento (da ora in poi indicato nel testo con l'acronimo C2M) misura il grado di somiglianza formale dei modelli e genera una mappa a falsi colori che evidenzia le zone meno corrispondenti.

Il secondo caso di studio riguarda opere murarie costruttivamente omogenee, selezionate in alcuni edifici storici di Ravenna (le chiese di San Giovanni Evangelista e Santa Giustina). Lo scopo è quello di stabilire se la vista ortografica del modello LiDAR è adatta, in termini di risoluzione della texture, al disegno archeologico dei materiali costruttivi<sup>6</sup>. Inoltre, si vuole quantificare lo scostamento delle dimensioni fornite dal modello rispetto ai valori di riferimento. Per questo motivo all'interno del campione di muratura (2x2 m) si sono applicati alcuni target (sfere di diametro pari a 3 mm) e la loro reciproca distanza è stata misurata con una riga millimetrata di metallo e assunta come dataset di riferimento rispetto al quale valutare la precisione del modello. La parete è stata scansionata "a mano libera", dall'alto verso il basso, mantenendo la stessa distanza (poco meno di 1 m) e soprattutto cercando di non passare più volte sulla stessa porzione. Evitando ridondanze si minimizza la formazione di un doppio strato della nuvola (MURTIYOSO *et al.* 2021, 603). Ulteriori test sono stati condotti a 2,5 e 4 m di distanza dalla parete. Il software CloudCompare è stato usato per misurare sul modello le distanze tra i target e generare la vista ortografica del campione murario.

Il terzo caso di studio è una parete pluristratificata. A Urbino, in via Raffaello, si trova Casa Santi, detta anche Casa natale di Raffaello: un complesso architettonico in laterizi d'uso primario, composto da corpi di fabbrica contigui, che dal XV secolo fu abitato dalla famiglia Santi e dove nacque il celebre pittore (MAZZINI 1982, 431-435). Nel fronte stradale, al civico 57, si apre l'ingresso principale: un portale in pietra ad architrave, sormontato da un fregio e una cornice aggettante. A sinistra dell'ingresso, al numero civico 55, è presente una grande apertura ad arco ribassato, oggi tamponata da un muro in laterizi. Per la natura pluristratificata del paramento e la perfetta leggibilità dei suoi caratteri costruttivi, Casa Santi può essere considerata

<sup>5</sup> La lunghezza più piccola che lo scanner può apprezzare è 0,1 mm (risoluzione), mentre la differenza tra il valore della lunghezza misurata dallo strumento e quello della lunghezza reale può essere veramente minima: fino a 0,05 mm (precisione).

<sup>6</sup> La risoluzione di una immagine metrica, come quella che si ottiene da una scansione LiDAR o un rilievo fotogrammetrico, è la frazione di lunghezza che può essere misurata dal singolo pixel. Per questo motivo il valore di risoluzione è detto "pixel size" oppure GSD acronimo di Ground Sampling Distance (GOMARASCA 2004, 218).

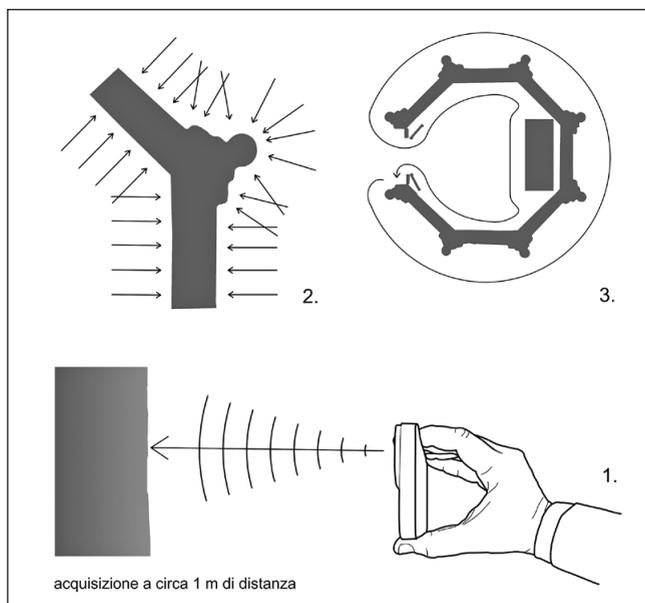


Fig. 2 – Schema che illustra alcuni aspetti del rilievo planimetrico tramite sensore LiDAR: 1) la distanza dall'oggetto; 2) l'orientamento dell'asse ottico rispetto alla superficie; 3) il percorso scelto per scansionare la struttura.

un manufatto ad alto potenziale archeologico. Il rilievo è stato condotto da terra, senza strumenti ausiliari, sollevando il dispositivo a un'altezza di circa 2 m. La distanza di presa è stata scelta considerando due fattori: la distanza massima di acquisizione (4,9 m) e la necessità di leggere chiaramente sul modello i perimetri di USM. Pertanto la scansione è avvenuta senza inclinare eccessivamente l'asse ottico, a una distanza dalla parete di 4 m, rilevandola fino a un'altezza di circa 5 m. In meno di un minuto è stata acquisita la nuvola e calcolato il modello texturizzato. La vista ortografica della parete è stata elaborata con il software CloudCompare e il disegno delle unità stratigrafiche realizzato con AutoCAD.

Il quarto test di misurazione ha prodotto la planimetria di un edificio. A Rimini, in piazza Tre Martiri, si trova il Tempietto di Sant'Antonio: un edificio a pianta ottagonale, costruito nella prima metà del XVI secolo e ristrutturato dopo il terremoto del 1672 (GUERRA 2010, 34-35). L'assenza di ostacoli e la possibilità di entrare all'interno della chiesa hanno permesso di eseguire una sola scansione dinamica per documentare l'intera pianta. Durante il percorso, il sensore è stato tenuto a un'altezza di circa 1 m da terra e a una distanza analoga dalla parete, cercando di orientare il suo asse ottico

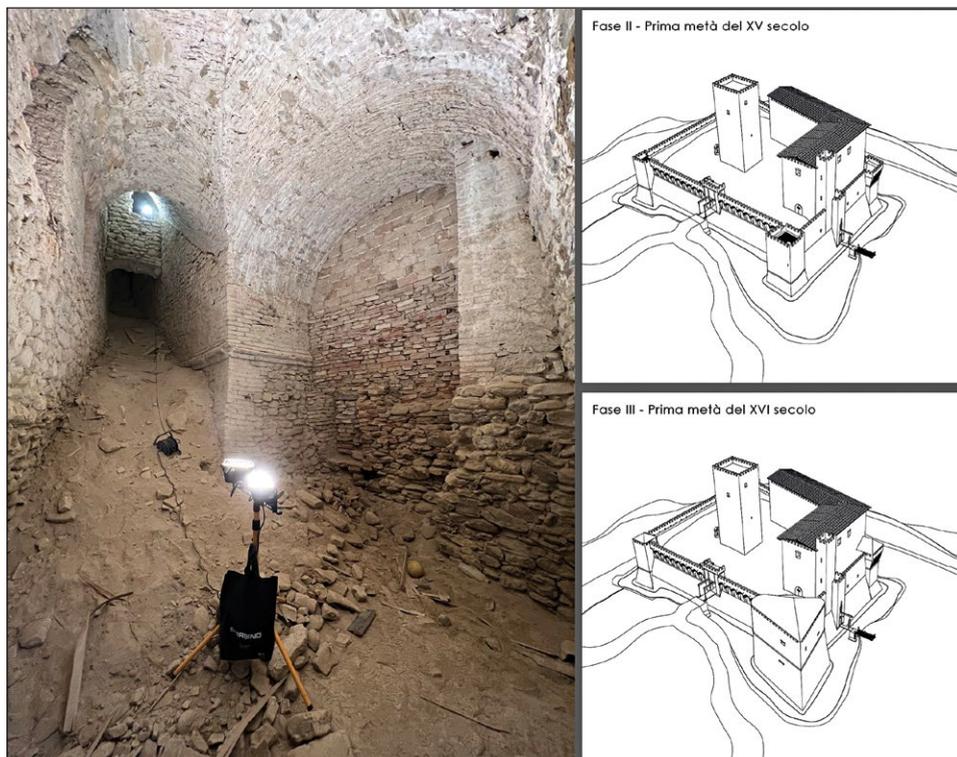


Fig. 3 – Castello di Sorrivoli, provincia di Forlì-Cesena. Al centro della foto si può notare lo spigolo della torre quattrocentesca. Nella prima metà del XVI secolo, quando viene addossato alla torre un bastione, si forma tra i due edifici un vano stretto e allungato. Questo ambiente è stato rilevato tramite sensore LiDAR.

in modo da formare sempre un angolo di  $90^\circ$  con la superficie architettonica (Fig. 2). Per l'acquisizione dei dati si sono impiegati meno di 2 minuti, mentre l'elaborazione del modello 3D ha richiesto all'app circa 10 secondi. Una scansione supplementare ha permesso di rilevare la pavimentazione e alcune parti delle finestre che erano state trascurate durante il primo rilievo. Il modello è stato sezionato con CloudCompare e il disegno della pianta completato in AutoCAD.

Con il quinto caso di studio si è rilevato l'ambiente interno di un edificio storico. A Urbania, in via Roma, si trova l'Oratorio della Madonna del Carmine: un edificio a pianta rettangolare, costruito nel XV secolo (LEONARDI 2005, 133-137). I muri perimetrali delimitano un'aula di modeste dimensioni: lunghezza 5,4 m, larghezza 3,5 m, altezza 4,8 m. Attraverso più scansioni dinamiche eseguite a una distanza variabile tra 1-3 m, si sono rilevate le pareti,

il pavimento, il soffitto e l'altare. Al termine di ogni sessione è stata elaborata la mesh per verificare la completezza del dato e stabilire l'area di ripresa successiva. Per quanto riguarda le condizioni ambientali, la scarsa illuminazione non ha impedito al sensore una corretta registrazione dei dati, anche nelle zone più buie. Le diverse mesh sono state registrate in CloudCompare sfruttando una serie di punti omologhi (macchie, dettagli pittorici, venature naturali dei materiali edilizi, etc.).

Il sesto e ultimo caso di studio si inserisce in un progetto di archeologia dell'architettura che ha come obiettivo la determinazione della storia costruttiva del castello di Sorrivoli (FIORINI 2011, 2019). Nelle precedenti campagne di documentazione non fu possibile produrre – con gli strumenti a disposizione (fotogrammetria e stazione totale) – la consueta documentazione grafica (piante, sezioni e prospetti) di alcuni ambienti del complesso architettonico, a causa delle loro piccole dimensioni: in particolare un lungo vano, largo appena 60 cm, posto tra un bastione moderno e una torre tardomedievale (Fig. 3). Al termine di questo corridoio si trova un ambiente a pianta semicircolare (1,8×1,07 m), alto appena 1,4 m e coperto da una semicupola.

Oltre al limitato spazio di operatività, questo contesto porta una seconda criticità: la scarsa illuminazione. Pertanto, si sono impiegati tre faretto da cantiere e una piccola lampada, fissata direttamente allo smartphone grazie a una staffa di metallo (Neewer Rig Video). Le comode impugnature di questo supporto hanno permesso una movimentazione più fluida del sensore: un aspetto su cui si ritornerà. L'ambiente è stato rilevato in meno di 2 minuti, eseguendo una scansione dinamica generale e alcune riprese supplementari per colmare le lacune individuate all'istante nel modello.

#### 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

##### 4.1 *Caso di studio n. 1 (capitello)*

Il primo test ha riguardato il rilievo di un capitello, ovvero di un oggetto caratterizzato da una geometria diversificata, non assimilabile a un piano e il cui andamento nello spazio è fortemente tridimensionale. Lo scanner a luce strutturata ha generato una “replica” digitale, priva di difetti autoptici e ricca di dettagli. Gli elementi decorativi della superficie, le parti incavate e quelle sporgenti (a volte di pochi millimetri) sono fedelmente riprodotte (Fig. 4). Nel modello LiDAR questi dettagli si perdono totalmente e appare ben restituito solo l'andamento curvilineo generale del fusto. Ciò significa che la distanza tra i punti della nuvola è troppo ampia per riuscire a catturare i dettagli più minuti (secondo alcuni test di misurazione effettuati a 1 m di distanza dall'oggetto, la distanza osservata tra due punti della nuvola è di circa 1 cm: SPREAFICO *et al.* 2021b, 65). L'analisi comparativa (C2M) ha poi evidenziato che alcuni punti della superficie del modello LiDAR si



Fig. 4 – Comparazione dei modelli ottenuti con i diversi sistemi di scansione: 1) a luce strutturata; 2) LiDAR (di Apple).

discostano dal modello di riferimento fino a 1,3 cm<sup>7</sup>. Queste deformazioni e semplificazioni lo rendono sicuramente inadatto per impieghi nel settore museale e del restauro. Si pensi, ad esempio, al monitoraggio del degrado o alla produzione di repliche fisiche (stampa 3D) da esporre temporaneamente al posto dell'originale. Per lo stesso motivo (il basso grado di aderenza alla realtà della mesh), il suo impiego anche solo per una schedatura dei caratteri (formali e dimensionali) del manufatto deve avvenire con grande cautela.

#### 4.2 Caso di studio n. 2 (campione di muratura omogenea)

Il rilievo, eseguito a poco meno di 1 m di distanza dalla superficie, ha fornito un modello texturizzato. La sua vista ortografica è un'immagine (in formato .jpg) nitida e metricamente idonea a una documentazione archeologica degli elementi costruttivi (osservazione, schedatura e disegno al CAD). La risoluzione è pari a 0,6 mm e fornisce misure con uno errore fino a 6 mm rispetto ai valori di riferimento (errore medio 2 mm) (Fig. 5)<sup>8</sup>.

Riguardo alla fase di acquisizione dei dati è importante sottolineare alcuni aspetti. Diversamente da quanto accade per la fotogrammetria, non

<sup>7</sup> Sono 8 le osservazioni che rientrano nella classe di valore 0,012-0,013 m, mentre la classe più popolata (122 osservazioni) comprende errori più contenuti, intorno ai 2 mm (da 0,0015 a 0,0021 m).

<sup>8</sup> Ripetendo il test a 2,5 m la texture è meno dettagliata: i bordi degli elementi costruttivi appaiono poco nitidi e i target applicati sulla parete (sfere di diametro pari a 3 mm) non sono facilmente identificabili. In questo caso le misure eseguite sul modello LiDAR si discostano dai valori di riferimento fino a 1,5 cm (media 8 mm).

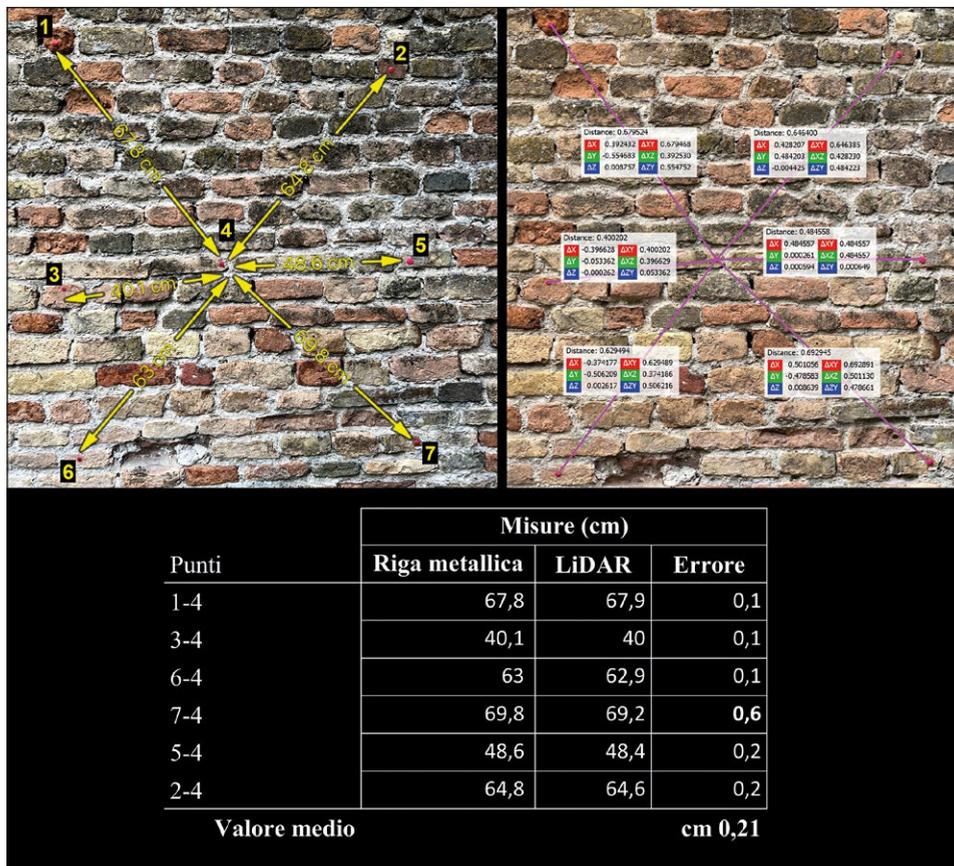


Fig. 5 – Comparazione dei dati metrici acquisiti con strumenti differenti: a sinistra, le distanze misurate con una riga millimetrata di metallo; a destra, le distanze estratte dal modello 3D prodotto dal sensore LiDAR (chiesa di San Giovanni Evangelista, Ravenna).

occorre appoggiare sulla superficie riferimenti metrici o rilevare punti di appoggio: i dati acquisti sono già in scala 1:1. Grazie a questa caratteristica è possibile ridurre il numero di strumenti ausiliari da portare sul campo (righe, stazioni totali, etc.). Ma non è tutto. La scansione dinamica è una tecnica di immediata applicabilità: ben più complesso è il settaggio di una fotocamera digitale o uno scanner 3D.

Esistono però due criticità: 1) il mancato rilevamento delle zone in ombra o di colore molto scuro (con la conseguente formazione di lacune nella nuvola di punti), problema riscontrato sul paramento adiacente a quello rilevato. Qui i mattoni presentano una colorazione omogenea e scura (Munsell 2.5Y 4/1 dark

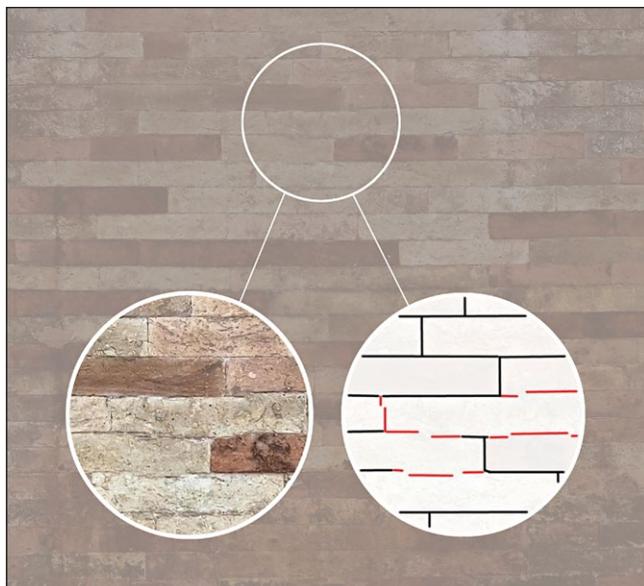


Fig. 6 – Rilievo LiDAR di una muratura in laterizi d'uso primario (chiesa di Santa Giustina, Ravenna). Nel cerchio: i problemi riscontrati in alcune zone della texture del modello 3D.

gray); 2) il disallineamento millimetrico (per la verità non frequente) di alcuni bordi dei mattoni (Fig. 6). Il primo problema è facilmente risolvibile dell'utente illuminando adeguatamente la superficie. Alla risoluzione del secondo problema stanno invece lavorando gli stessi ingegneri informatici che producono l'app testata. Secondo Keith Ito (fondatrice di Scaniverse), il disallineamento sarebbe legato a una imprecisa valutazione dell'orientamento spaziale del sensore durante la ripresa da viste differenti della stessa area (K. ITO 2021, lettera personale dell'autore). A causa di questo problema il LiDAR di Apple non è adatto ad una indagine mensiocronologica dei laterizi, in quanto gli artefatti presenti qua e là nell'immagine non consentono di identificare con sufficiente precisione l'inizio e la fine del fianco o della testa di un mattone e pertanto non permettono la misura al millimetro della sua dimensione<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Misurando al millimetro le dimensioni di un certo numero di mattoni di un'opera muraria costruttivamente omogenea (USM) è possibile identificare la misura cui la fabbrica tendeva (valore medio) ed escludere le misure casuali, non volute, dovute a vari fattori (naturali e antropici): piccole differenze nelle dimensioni delle cassette causate da errori nel corso della loro preparazione o di consumazione da lavoro; diminuzioni di volume durante l'essiccamento e poi in cottura (MANNONI 2000, 216-217). Per una introduzione alla tecnica di analisi mensiocronologica dei laterizi cfr. MANNONI, MILANESE 1988; BOATO 2008, 139-146.

### 4.3 Caso di studio n. 3 (parete pluristratificata)

Come noto, alla base di un intervento di archeologia dell'architettura vi è un rilievo delle superfici che consenta di documentare le unità stratigrafiche murarie. Il test condotto a Urbino dimostra che il sensore può essere adatto a tale scopo. In effetti, la vista ortografica della parete ha una risoluzione

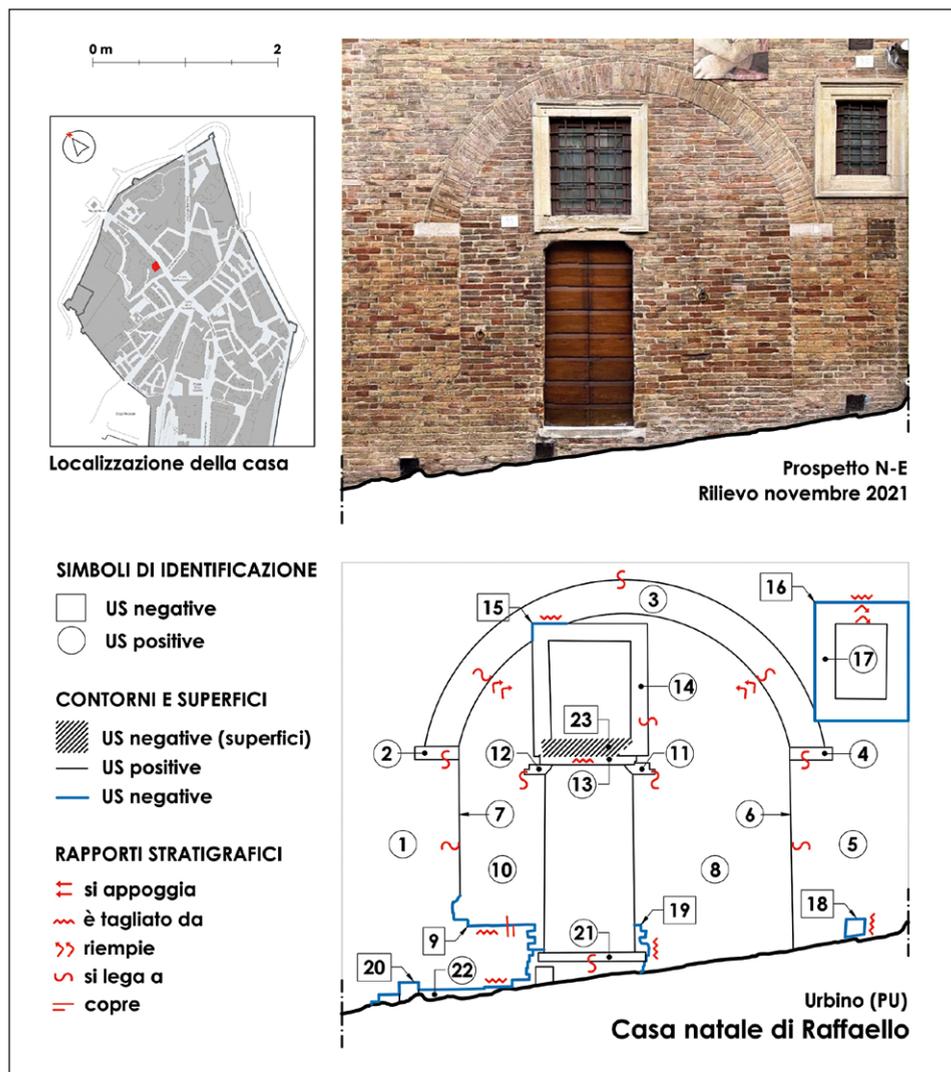


Fig. 7 – Casa natale di Raffaello, Urbino. Analisi stratigrafica di una porzione del fronte stradale. L'immagine è ottenuta tramite scansione dinamica LiDAR.

sufficiente per il disegno al CAD delle USM (grandezza del pixel pari a 3 mm ca.) (Fig. 7).

La “storia costruttiva” di questa porzione dell'edificio è chiara: in origine l'apertura era chiusa solo per due terzi o tre quarti della larghezza da un basso muro, rimanendo il resto libero per il passaggio all'interno dell'ambiente. Queste evidenze sono attribuibili al tipo architettonico della bottega medievale, dotata di banco e porticina di accesso: una soluzione che riprende, come noto, tipi edilizi dell'età classica (ADAM 1988, 346-347). In conclusione, il LiDAR, se posto a circa 4 m dalla parete, fornisce immagini nitide e con una risoluzione sufficientemente allo studio della stratificazione edilizia, ma presenta dei limiti non trascurabili in termini di estensione del rilevato (a quella distanza è possibile documentare correttamente una parete non più alta di 5 m). In futuro, si dovranno identificare gli strumenti ausiliari e le procedure necessarie per superare questo limite (ad es. “selfie stick” o aste telescopiche).

#### 4.4 Caso di studio n. 4 (muri perimetrali di una chiesa)

Il risultato di questo test è un modello parziale dei muri perimetrali del Tempietto di Sant'Antonio, rilevati fino a un'altezza di circa 1,2 m (Fig. 8).

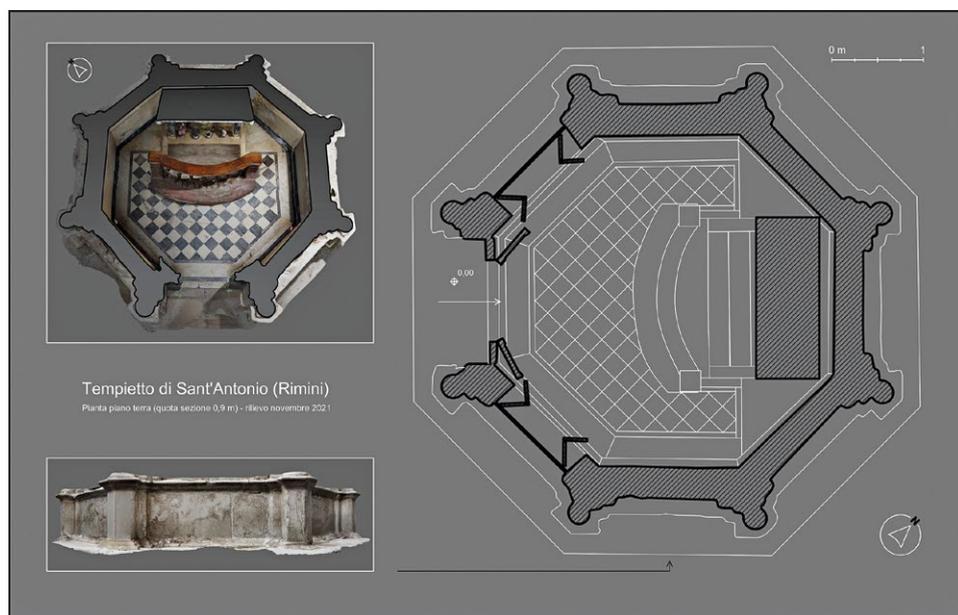


Fig. 8 – Tempietto di Sant'Antonio, Rimini. Pianta e modello dell'edificio rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

L'edificio ha una struttura geometrica diversificata, simile per complessità a quella del capitello (caso di studio n. 1). Pertanto, visto che il rilievo è avvenuto a una distanza simile, è ragionevole ipotizzare che la mesh abbia errori non troppo differenti: dunque tra 1 e 2 cm. Questi valori sarebbero inaccettabili se lo scopo del rilievo fosse la replica digitale di un piccolo manufatto, mentre si possono accogliere nel caso di una pianta di un edificio. Il disegno planimetrico (ricavato da una mesh con errori di quell'ordine) è sufficientemente preciso per la maggior parte delle applicazioni in campo archeologico: lo studio tipologico-formale dell'impianto, la restituzione grafica dei perimetri di USM, la mappatura delle tecniche costruttive e delle fasi edilizie.

#### 4.5 Caso di studio n. 5 (aula affrescata di una chiesa)

Il sensore LiDAR ha restituito una copia digitale dell'intero ambiente, compreso il soffitto e le pareti affrescate, da cui è possibile ricavare informazioni metriche e disegni tecnici (piante, sezioni e prospetti) (Fig. 9). Anche il risultato estetico è pienamente soddisfacente, tuttavia occorre rilevare le seguenti criticità. La superficie del modello non è continua, ma è il risultato di numerose mesh giustapposte tramite punti comuni. Nelle zone di sovrapposizione si distinguono errori di allineamento fino a 5-10 cm: un risultato analogo a quello riscontrato da altri ricercatori rilevando oggetti simili a una distanza di 1-3 m (SPREAFICO *et al.* 2021b, 68-69). Inoltre, nelle singole mesh si riscontrano due tipi di problemi: 1) deformazioni geometriche (sporadiche e localizzate) dovute agli sdoppiamenti della nuvola (causati da involontari passaggi multipli del sensore sulla stessa porzione di parete); 2) errori di allineamento della texture (un problema riscontrato anche nel caso di studio n. 2).

Riguardo alla fase di acquisizione dei dati, è importante sottolineare i seguenti aspetti. Rilevare questo ambiente con la fotogrammetria sarebbe stato certamente più complesso perché avrebbe richiesto un operatore con una buona esperienza di acquisizione e processamento dei dati, nonché la disponibilità di molti strumenti: una fotocamera reflex; lampade led a batteria; un treppiede (non potendo scattare "a mano libera" a causa della scarsa illuminazione); uno strumento di misura per raccogliere distanze utili alla messa in scala del modello; un numero elevato di foto (viste le dimensioni dell'ambiente non sarebbe stato possibile allontanarsi dalle pareti per aumentare il campo di ripresa); un computer in grado di processare il set (corposo) di dati. Questa strategia sarebbe giustificata in casi particolari, come ad esempio la progettazione di un intervento di restauro delle pareti affrescate.

#### 4.6 Caso di studio n. 6 (ambiente pluristratificato di un castello)

Gli scanner statici, le stazioni totali o la fotogrammetria necessitano di una certa distanza dall'oggetto per poter eseguire la misura. Pertanto, sono strumenti che possono essere inadeguati quando gli spazi sono molto piccoli

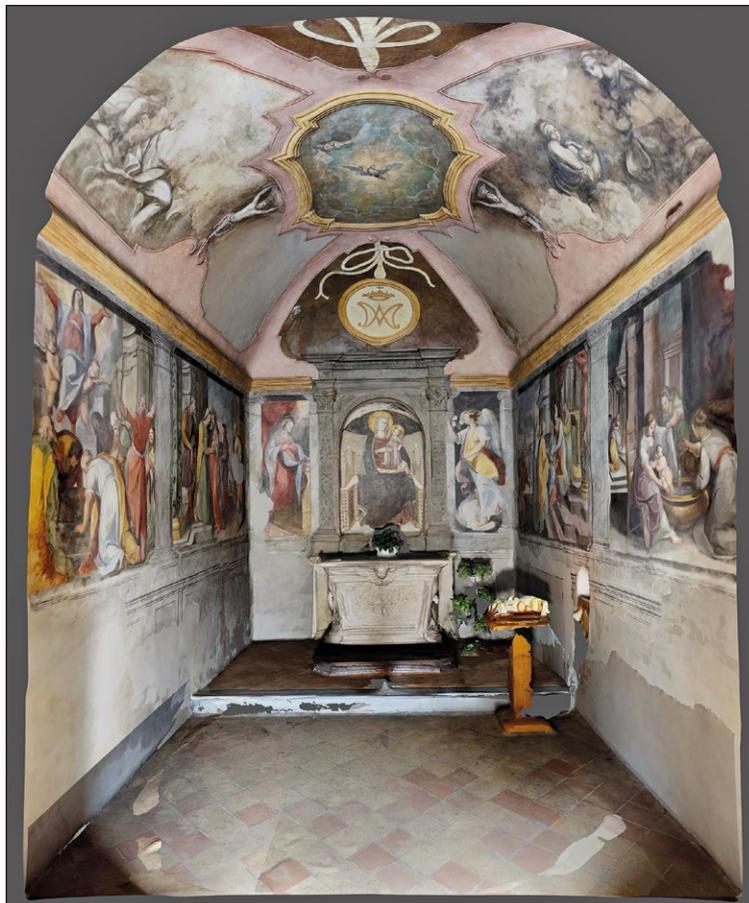


Fig. 9 – Oratorio della Madonna del Carmine, Urbania. Modello dell'edificio rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

e scarsamente illuminati (cunicoli, grotte, intercapedini, etc.). L'ambiente rilevato nel castello di Sorrivoli è largo appena 60 cm. Se si fosse utilizzata la fotogrammetria per ottenere un modello 3D, il numero di scatti necessario per coprire l'intera superficie sarebbe stato elevatissimo, con l'impossibilità di eseguire prese ad asse inclinato (e convergente) necessarie – a integrazione delle prese ad asse ortogonale – per ottenere una modellazione più accurata delle superfici. La scansione dinamica è invece una tecnica adatta al rilevamento di spazi ristretti. Il risultato di questo test è una replica 3D dell'ambiente, con resa fotorealistica delle superfici, composta da circa 130.000 poligoni, che occupa su hard disk un peso di circa 30 MB. Il modello ha permesso di

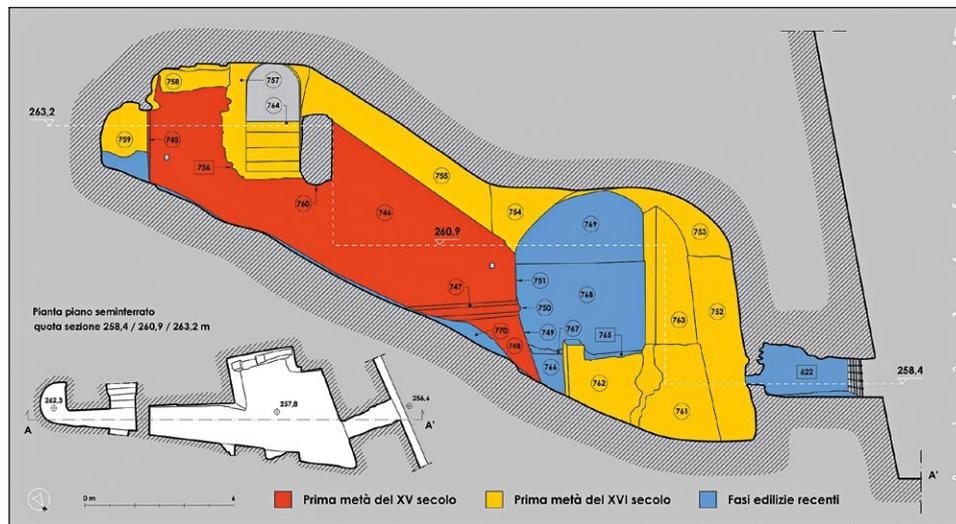


Fig. 10 – Castello di Sorrivoli, provincia di Forlì-Cesena. Analisi stratigrafica del vano rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

ricavare, oltre alla planimetria delle strutture, una documentazione accurata della stratificazione muraria (Fig. 10).

## 5. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Sebbene la qualità geometrica dei tradizionali strumenti di scansione rimanga innegabilmente migliore, il sensore LiDAR di Apple può essere efficace per quelle applicazioni che ammettono una precisione inferiore. Alla luce dei test effettuati, è possibile affermare che il sensore riporta errori centimetrici (e in alcuni casi sub-centimetrici), e pertanto può essere impiegato in campo archeologico, considerando anche il costo inferiore e la facilità d'uso rispetto agli scanner professionali. Se nel futuro si continuerà a investire in questa tecnologia – producendo sensori più performanti (in grado di campionare lo spazio in modo più uniforme, misurare a una distanza maggiore e restituire una texture priva di difetti) – allora potrebbe diventare uno strumento di uso comune. Allo stato attuale del suo sviluppo, il sensore LiDAR di Apple non è adatto per la modellazione di piccoli oggetti, mentre è utile per ottenere all'istante planimetrie funzionali agli scopi più frequenti in archeologia: lo studio tipologico-formale dell'impianto, la restituzione grafica dei perimetri di USM, la mappatura delle tecniche costruttive e delle fasi edilizie. Soprattutto può lavorare in condizioni operative estreme, dove lo spazio è limitato e la luce è scarsa (ipogei, corridoi, etc.). Inoltre, è uno strumento ideale per la documentazione archeologica di

campioni di muratura (2x2 m) ed elementi architettonici (finestre e apparati decorativi). Infine, può fornire viste ortografiche di facciate da utilizzare come base di riferimento per mappare le unità stratigrafiche murarie.

Alcuni consigli per il corretto uso dello strumento:

1 – Pianificazione del percorso. Stabilire come muoversi intorno all'oggetto o dentro l'ambiente da scansionare verificando che il percorso sia libero da ostacoli.

2 – Distanza di presa. Per le superfici planari, come ad esempio i paramenti murari, si raccomanda una distanza di presa non superiore a 1 m (errore previsto: inferiore a 1 cm). In questo modo l'immagine sarà nitida e permetterà il disegno dei materiali costruttivi. Non superare i 4 m di distanza per i rilevamenti stratigrafici di pareti, pena l'impossibilità di distinguere chiaramente i limiti delle USM. Nel caso di superfici complesse, come ad esempio i muri perimetrali di un edificio, se l'obiettivo è ottenere la pianta si consiglia una distanza non superiore a 1 m (errore previsto: inferiore a 2 cm). Il rilievo di un ambiente complesso, compreso il suo soffitto, richiederà necessariamente una distanza maggiore, variabile (1-3 m) e prossima al limite di portata dello strumento (4,9 m). In questo caso l'errore atteso può arrivare fino a 5-10 cm, pertanto, la qualità dell'informazione metrica potrebbe non essere sufficiente per scopi del ricercatore.

3 – Movimentazione del sensore. Non passare più volte sulla stessa porzione dell'oggetto, così da evitare "sdoppiamenti" della nuvola. La fluidità del movimento può minimizzare la formazione di artefatti nella texture, pertanto è consigliabile l'impiego di un "ring" o un gimbal.

Questa ricerca ha messo in luce i limiti e l'utilità del sensore in archeologia dell'architettura. I prossimi passi saranno rivolti, oltre alla ricerca di metodi per superare i problemi riscontrati, alla sperimentazione dello strumento in diversi contesti di scavo e ricognizione territoriale.

ANDREA FIORINI

Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DiSCi) - Sezione di Archeologia  
Alma Mater Studiorum - Università degli Studi di Bologna  
andrea.fiorini6@unibo.it

### *Ringraziamenti*

Questo articolo è il risultato di un proficuo scambio di opinioni con diversi docenti e ricercatori. In particolare, al Prof. Maurizio Cattani (Università di Bologna) si esprime sincera gratitudine per aver incoraggiato e seguito lo sviluppo di questa ricerca. Inoltre, si ringraziano il Prof. Antonio Curci (Università di Bologna) per aver partecipato alla discussione dei risultati, la Dott.ssa Federica Collina (FrameLAB, Università di Bologna) per il corso introduttivo sull'uso dello scanner a luce strutturata (Artec Spider) e il Dott. Stefano Bordoni (training fellow per il Centre for Data, Culture and Society dell'Università di Edimburgo) per la ricerca di informazioni sul funzionamento dell'applicazione Scaniverse.

BIBLIOGRAFIA

- ADAM J.P. 1988, *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*, Milano, Longanesi.
- AMALDI U. 2014, *Dalla mela di Newton al bosone di Higgs*, 5, *Induzione e onde elettromagnetiche. Relatività e quanti*, Bologna, Zanichelli.
- BARCELÓ J.A. 2001, *Virtual reality for archaeological explanation. Beyond "picturesque" reconstruction*, «Archeologia e Calcolatori», 12, 221-244 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF12/12Barcelo.pdf>).
- BOATO A. 2008, *L'archeologia in architettura. Misurazioni, stratigrafie, datazioni, restauro*, Venezia, Marsilio.
- BOGDANI J., FIORINI A., SILANI M., ZANFINI M. 2007, *Esperienze di stereofotogrammetria archeologica*, «Ocnus», 15, 27-44.
- BROGIOLO G.P., CAGNANA A. 2012, *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- CATTANI M., FIORINI A., RONDELLI B. 2004, *Computer applications for a reconstruction of archaeological stratigraphy as a predictive model in urban and territorial contexts*, in K.F. AUSSERER, W. BÖRNER, M. GORIANY, L. KARLHUBER-VÖCKL (eds.), *Enter the Past: The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage. CAA 03 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 31<sup>st</sup> Conference (Wien 2003)*, Oxford, BAR International Series 1227, Archaeopress, 299-303 (<http://dx.doi.org/10.15496/publikation-3548>).
- DI STEFANO F., CHIAPPINI S., GORREJA A., BALESTRA M., PIERDICCA R. 2021, *Mobile 3D scan LiDAR: A literature review*, «Geomatics, Natural Hazards and Risk», 12.1, 2387-2429 (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2021.1964617>).
- FIORINI A. 2004, *Il trattamento informatico del dato tridimensionale in archeologia: dallo scanner 3D alla modellazione vettoriale*, in M. CATTANI, A. FIORINI, N. VIGGIANI (eds.), *Nuove frontiere dell'archeologia: il trattamento del dato tridimensionale. Atti del Seminario (Ravenna 2004)*, Ravenna, Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Archeologia (CD-ROM).
- FIORINI A. 2008, *Esperienze di fotomodellazione e stereofotogrammetria archeologica*, in VOLPE, DE FELICE, SIBILANO 2008, 175-186.
- FIORINI A. 2009, *Rilievo archeologico mediante dispositivo scanner laser 3D. Verso una registrazione tridimensionale delle evidenze stratigrafiche: l'edificio 2 – magazzino – nel sito archeologico di Classe*, in D. BARTOLUCCI, *Principi di laser scanning 3D. Hardware, metodologie applicative, esempi*, Palermo, Flaccovio, 100-105.
- FIORINI A. 2010, *La documentazione tridimensionale dello scavo archeologico nell'abitato dell'Età del Bronzo di Mursia, Pantelleria (TP)*, «IpoTESI di Preistoria», 3,2, 1-14 (<https://doi.org/10.6092/issn.1974-7985/2135>).
- FIORINI A. (ed.) 2011, *Il castello di Sorrivoli (Roncofreddo, Forlì-Cesena). Storia e archeologia dell'architettura*, Bologna, Ante Quem.
- FIORINI A. 2012, *Tablet PC, fotogrammetria e PDF 3D: strumenti per documentare l'archeologia*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0. Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 213-227 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/13\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/13_Fiorini.pdf)).
- FIORINI A. 2013, *Nuove possibilità della fotogrammetria. La documentazione archeologica del nuraghe di Tanca Manna (Nuoro)*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'Archeologia 3.0. Atti del Workshop (Bologna 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 341-354 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18_Fiorini.pdf)).
- FIORINI A. 2018, *Il metodo fotografico RTI (Reflectance Transformation Imaging) per la documentazione delle superfici archeologiche. L'applicazione ai materiali di età protostorica*, «Archeologia e Calcolatori», 29, 241-258 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.20>).

- FIORINI A. 2019, *I castelli della Romagna. Indagini di Archeologia dell'architettura*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- FIORINI A., ARCHETTI V. 2011, *Fotomodellazione e stereofotogrammetria per la creazione di modelli stratigrafici in archeologia dell'architettura*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 199-216 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF22/AC\\_22\\_Fiorini\\_Archetti.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF22/AC_22_Fiorini_Archetti.pdf)).
- FIORINI A., URCIA A., ARCHETTI V. 2011, *The digital 3D survey as standard documentation of the archaeological stratigraphy*, in M. DELLEPIANE, F. NICCOLUCCI, S. PENA SERNA, H. RUSHMEIER, L. VAN GOOL (eds.), VAST 2011. *The 12<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (Prato 2011)*, Goslar (Germany), Eurographics Association, 145-152 (<http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST11/145-152>).
- GOMARASCA M.A. 2004, *Elementi di geomatica*, Firenze, AIT.
- GUERRA L. 2010, *Sant'Antonio a Rimini: le chiese*, in S. DE CAROLIS, L. GUERRA, R. MENGHI, *Sant'Antonio «da Rimini detto». Il Santo di Padova a Rimini: fede, miracoli e devozione*, Rimini, Guaraldi, 33-46.
- JAMES M.R., QUINTON J.N. 2014, *Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: The hand-held mobile laser scanner (HMLS)*, «Earth Surface Processes and Landforms», 39,1, 138-142 (<https://doi.org/10.1002/esp.3489>).
- LEONARDI C. 2005, *Guida per le chiese di Urbania e Museo arcidiocesano*, Urbania, Fondazione Istituito Culturale e Sociale Arcidiocesano.
- LUETZENBURG G., KROON A., BJÖRK A.A. 2021, *Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences*, «Scientific Reports», 11,1, 15.11.2021 (<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>).
- MANNONI T. 2000, *I problemi dei laterizi altomedievali*, in S. GELICHI, P. NOVARA (eds.), *I laterizi nell'Alto Medioevo italiano*, Ravenna, Società di Studi ravennati, 213-221.
- MANNONI T., MILANESE M. 1988, *Mensiocronologia*, in R. FRANCOVICH, R. PARENTI (eds.), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze, All'insegna del Giglio, 383-402.
- MARONI E. 2011, *Fasi edilizie*, in FIORINI 2011, 29-37.
- MAZZINI F. 1982, *I mattoni e le pietre di Urbino*, Urbino, Argalia.
- MEDRI M. 2003, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Laterza.
- MURTIYOSO A., GRUSSENMEYER P., LANDES T., MACHER H. 2021, *First assessments into the use of commercial-grade solid state lidar for low cost heritage documentation*, in N. PAPANODITIS, C. MALLET, F. LAFARGE, M.Y. YANG, A. YILMAZ, J.D. WEGNER, F. REMONDINO, T. FUSE, I. TOSCHI (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B2-2021, 599-604 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-599-2021>).
- PARENTI R. 2000, s.v. *Architettura, archeologia della*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di archeologia. Temi, concetti e metodi*, Roma-Bari, Laterza, 39-43.
- SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F., TEPPATI LOSÈ L. 2021a, *Apple iPad Pro: test e valutazioni metriche sul sensore LiDAR integrato*, in #AsitaAccademy2021 (evento online, 1-2-9-16-23 luglio 2021), 421-424 (<http://atti.asita.it/ASITA2021/Pdf/067.pdf>).
- SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F., TEPPATI LOSÈ L. 2021b, *The iPad Pro built-in LiDAR sensor: 3D rapid mapping tests and quality assessment*, in N. PAPANODITIS, C. MALLET, F. LAFARGE, M.Y. YANG, S. HINZ, R.Q. FEITOSA, M. WEINMANN, B. JUTZI (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B1-2021, 63-69 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>).
- VOLPE G., DE FELICE G., SIBILANO M.G. (eds.) 2008, *L'informatica e il metodo della stratigrafia. Atti del Workshop (Foggia 2008)*, Bari, Edipuglia.
- YOUNG J. 2011, *LiDAR For Dummies*, Hoboken, Wiley Publishing.

ABSTRACT

Cutting-edge mobile phones and tablets marketed by Apple, equipped with a LiDAR sensor, are able to measure the three-dimensional position of objects and reconstruct their surface. At present, specific publications illustrating the potential of this sensor in the field of archaeology are not known. The first part of the article explains its functioning; the second deals with its limitations; the third describes its use in an architectural survey of two buildings; the fourth proves its usefulness in the architectural field, particularly in the study of archaeological standing buildings (archaeology of architecture). In light of the tests performed, it can be stated that the LiDAR offers centimetre-level accuracy and is therefore of great interest in the field of archaeology, also considering its relatively low cost, its ease of manoeuvring and fast acquisition of data, compared to other scanning systems. The LiDAR may become a common tool in the field of archaeology in the future if investments in this technology continue, producing sensors capable of measuring more accurately (the current maximum coverage is 5 m) and software (apps) that can produce flawless textures and more uniform sampling of space. In its current state of development, the sensor is not suitable for precise modelling of small-size objects, while it is useful for the archaeological documentation of masonry, architectural elements and walls. In addition, it is the ideal tool for obtaining floor maps and three-dimensional models of small-sized environments.

## DAL RILIEVO ALL'ANALISI DI SUPERFICI COMPLESSE: IL CASO DELLA PSEUDO-CUPOLA DI GALLA PLACIDIA

### 1. INTRODUZIONE

Le vicende del piccolo edificio in laterizi sono legate al nome dell'imperatrice romana Galla Placidia (390 circa-Roma 450), figlia di Teodosio I. Eretto probabilmente tra il 432 e il 450, originariamente era uno dei due sacelli posti alle estremità del narcece della basilica di Santa Croce (417-425 ca.) (DAVID 2013), uno tra i complessi sacri più antichi di Ravenna, probabile testimonianza della fervente devozione dell'Augusta Imperatrice per la reliquia della Vera Croce, che secondo la tradizione fu ritrovata dalla madre dell'imperatore Costantino I, Flavia Giulia Elena. Il Mausoleo si presenta oggi come un piccolo edificio isolato a croce latina con i bracci coperti da volte a botte, mentre all'incrocio di questi è una pseudo-cupola. La decorazione musiva che ricopre la maggior parte delle superfici interne lo rende uno dei più celebri monumenti ancora esistenti tra quelli edificati nella fase di declino dell'Impero Romano d'Occidente.

Su questa architettura si è concentrata l'attenzione di molti studiosi che, a partire dall'inizio del XX secolo, ne hanno indagato aspetti storici, artistici, iconografici, ma anche tecnologici e conservativi (per la vasta bibliografia si rimanda a: RICCI 1914; BOVINI 1950; IANNUCCI 1995, 1996; RIZZARDI, ANGIOLINI MARTINELLI 1996; RIZZARDI 2005; SWIFT, ALWIS 2010; RANALDI 2011; PENNI 2021). Recentemente il nostro gruppo di ricerca ha formulato nuove ipotesi su aspetti mensori, archeoastronomici, iconografici, sull'impiego della geometria piana e proiettiva in alcuni saggi tra cui INCERTI *et al.* 2018. Sintetizzando alcune delle conclusioni proposte si rileva che: l'edificio appare coerente con la misura del piede romano; è stata misurata la rotazione relativa tra i due bracci della croce ipotizzandone una motivazione archeoastronomica; alcune aperture potrebbero aver creato effetti solari ierofanici; è stata individuata la regola geometrica utilizzata per l'esecuzione del cielo stellato della pseudo-cupola e immaginata una macchina di cantiere utile allo scopo.

Il rilievo avanzato tridimensionale, morfologico e materico, ci ha consentito di realizzare analisi in passato impossibili da eseguire con le metodologie tradizionali. Anche se ad occhio nudo i ricorsi delle stelle descrivono delle circonferenze regolari apparentemente giacenti su piani paralleli, nella realtà il loro andamento segue un motivo "festonato" risultato di un'operazione di proiezione sulla superficie della copertura da un punto collocato centralmente, circa all'altezza della base delle finestre. La geometria che sottende questo tracciamento si fonda su una serie di coni il cui angolo al vertice aumenta

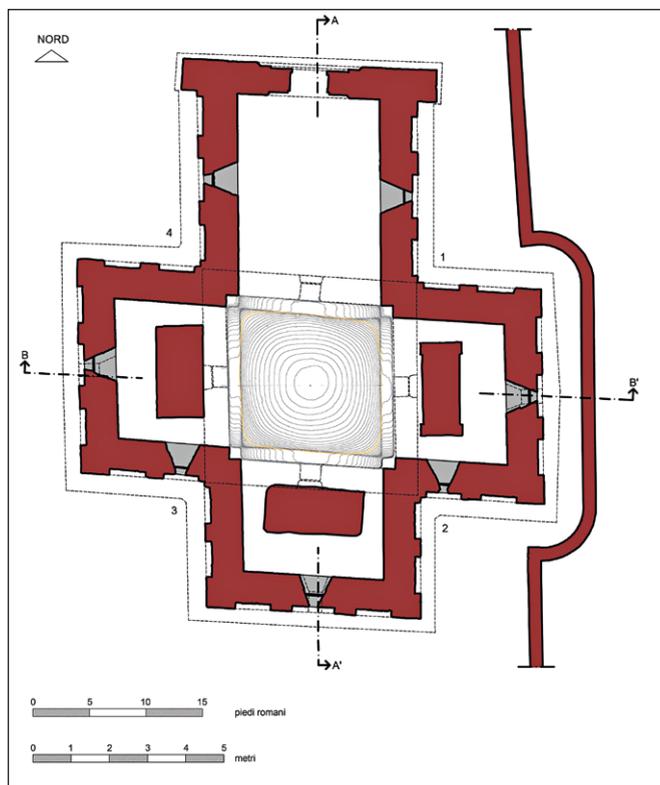


Fig. 1 – Pianta del Mausoleo alla quota +1,20, in grigio la proiezione virtuale delle curve di livello pseudo-cupola (l'elaborato è stato prodotto a partire dalla restituzione di G. Lavoratti).

progressivamente e la cui possibilità di materializzazione è data dalla conoscenza del principio di funzionamento dello strumento astronomico chiamato “Triquetro” e della *Tavola delle corde* di Tolomeo.

Il rilievo laser scanner (Faro Focus X 330) e la fotogrammetria digitale, grazie al dato metrico congiunto a quello materico della decorazione musiva, consentono di proseguire oltre nella ricerca: possiamo infatti continuare ad interrogare geometricamente il modello mesh ottenuto dalla triangolazione della nuvola di punti, utilizzando il metodo del reverse modeling (MIGLIARI 2004) al fine di comprendere e ricostruire il modello virtuale della superficie. Con il presente contributo si propone una inedita lettura della morfologia della copertura del vano centrale, ancora non completamente risolta negli studi precedenti.

Apparentemente irregolare, questa superficie è impostata su un parallelogramma e non è riconducibile ad operazioni di rivoluzione di una curva, ad una volta a crociera o a padiglione. La sezione della mesh di rilievo con un fascio di piani orizzontali con passo di 10 cm ha restituito un insieme di linee curve, tutte differenti tra loro (Fig. 1), che intuivamo comunque connesse da una regola inconsueta, non ancora messa a fuoco. Una prima analisi ha consentito di verificare che si tratta di iperboli, curve di complesso tracciamento, soprattutto nell'ambito di un cantiere edilizio.

## 2. GLI ELEMENTI NOTEVOLI DELLA PSEUDO-CUPOLA

La superficie della pseudo-cupola è delimitata dai quattro piani degli arconi del vano centrale e la sua base è assimilabile ad un parallelogramma regolare con lati opposti di circa 12,5 e 12,1 piedi romani (3,70 m e 3,59 m). Anche le dimensioni degli angoli opposti sono necessariamente simili a coppie: gli angoli 1 e 3 misurano circa  $95^\circ$ , mentre 2 e 4 circa  $85^\circ$ .

Per quanto concerne i profili delle sezioni in asse (Fig. 2) è possibile rilevare che questi hanno un andamento singolare: alla quota di +7,30 m (chiave degli archi superiori) inizia infatti un tratto quasi verticale che rapidamente

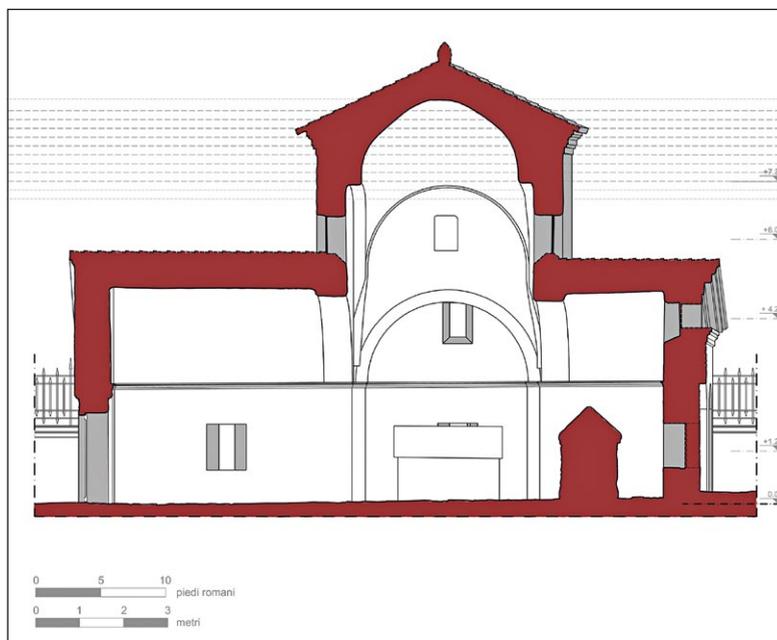


Fig. 2 – Sezione longitudinale (l'elaborato è stato prodotto a partire dalla restituzione di G. Lavoratti).

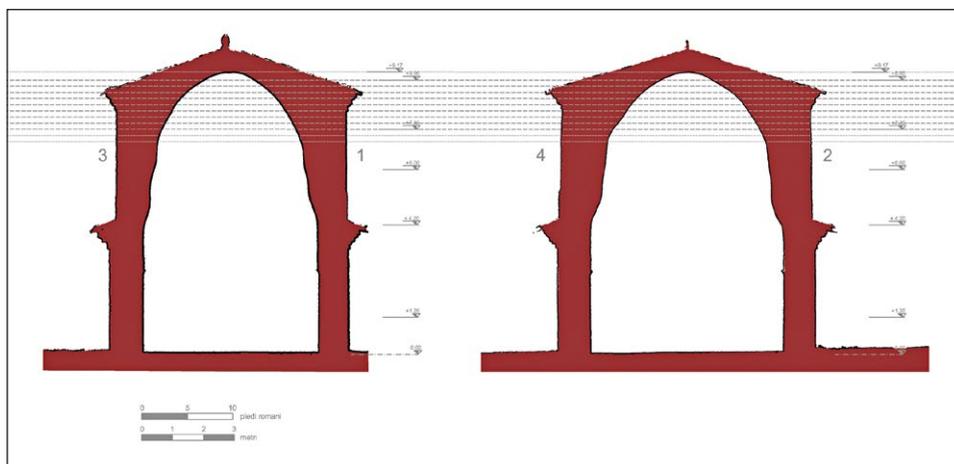


Fig. 3 – Slice della nuvola di punti eseguita sulle diagonali del vano.

si curva poi verso l'interno. I profili delle sezioni diagonali al di sopra della medesima quota (Fig. 3) sono invece più regolari e suscettibili di una analisi geometrica; la parte sottostante a +7,30 m, infine, è costituita dal complesso raccordo tra i piani degli archi della pseudo-cupola e i piani dei sottostanti pilastri, come si deduce dalla Fig. 1. Dall'osservazione delle sezioni si ricava infine che anche la sommità della superficie di copertura presenta un'ulteriore variazione dell'andamento, con una chiara discontinuità alla quota di +8,90 m circa.

Dalle fotografie delle fasi di distacco dei mosaici scattate durante i restauri del 1978 e conservate nell'Archivio Fotografico della Soprintendenza ai Monumenti di Ravenna, desumiamo che la muratura sia stata messa in opera secondo un andamento orizzontale con inclinazione della giacitura progressivamente crescente. Dall'arcone di imposta, realizzato con mattoni disposti radialmente di coltello, contiamo circa 35 ricorsi sino all'area della chiave della copertura in cui gli elementi sono di dimensioni più piccole e disposti in modo più caotico. Durante la posa fu necessario relazionare la lunghezza dei profili delle sezioni trasversali e longitudinali (pari a 2,85 m circa) con quella delle diagonali (pari a 3,02 m e 3,08 circa): una differenza di circa 20 cm di lunghezza che, in qualche modo, sarà stata ripartita per mantenere l'orizzontalità dei filari. L'estradosso, come è noto, non è rilevabile dal momento che, già con i lavori di restauro del 1898-99, fu messo in luce come nella parte superiore siano presenti, sopra uno strato di riempimento, delle anfore di terracotta allineate nella direzione della pendenza delle falde, con funzione di alleggerimento e di appoggio per il manto di copertura (RICCI 1914).

### 3. FORMA DELLE CURVE DI LIVELLO, CONOSCENZE SCIENTIFICHE E TECNICHE DI TRACCIAMENTO

L'intersezione della superficie della mesh con un fascio di piani orizzontali ci restituisce un insieme di curve di livello (Figg. 1-3) che sono state analizzate con il software GeoGebra nella sua modalità classica (<https://www.geogebra.org/>). In questo ambiente (Fig. 4) è stato possibile dedurre alcune particolarità utili per proseguire nelle ipotesi ricostruttive. Si tratta di iperboli il cui centro sembra localizzarsi in un'area limitata esterna alla copertura (anche se molto prossima); inoltre, per le prime 4-5 curve, il limite non è sugli assi trasversale e longitudinale, ma è anticipato, poiché la porzione della superficie sovrastante gli archi di imposta si approssima ad un piano. L'analisi dei quattro settori ha evidenziato condizioni analoghe sugli angoli opposti, in particolare, una minore distanza del centro delle coniche dai vertici del parallelogramma 1 e 3 rispetto a 2 e 4.

L'iperbole è una curva aperta composta da due rami che si ottiene sezionando un cono con un piano parallelo all'asse oppure quando l'angolo tra il piano e l'asse è inferiore a quello fra l'asse e la generatrice. Tra le prime teorie documentate sulle coniche e l'edificazione del piccolo Mausoleo di Galla Placidia trascorsero circa otto-nove secoli e almeno sei importanti figure della

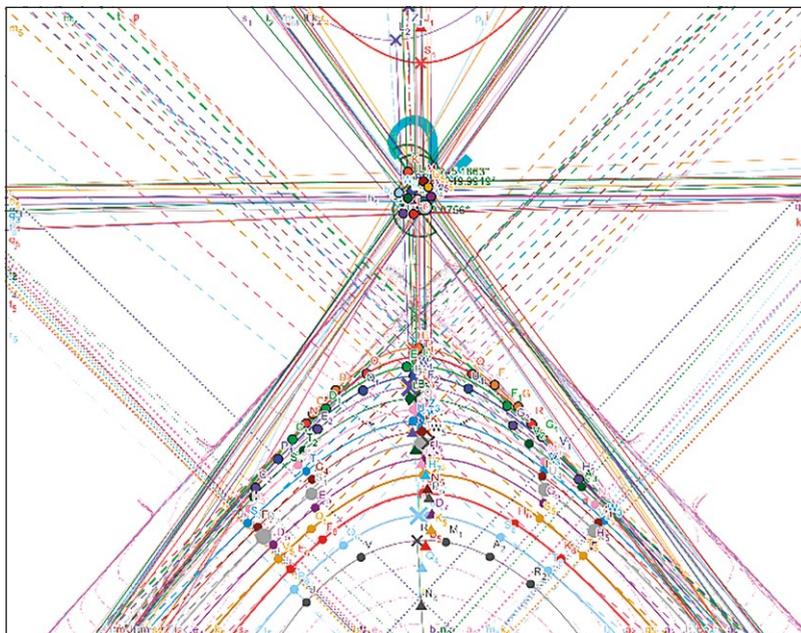


Fig. 4 – Settore 2: dettaglio dell'analisi grafica con GeoGebra.

storia della matematica e della geometria resero la loro trattazione sempre più sofisticata e complessa: Eudosso di Cnido (vissuto tra 408 e il 355 a.C.), Menecmo (discepolo di Eudosso e fratello di Dinostrato, vissuto tra il 380 e il 320 a.C.), Euclide (Alessandria, vissuto tra il 320 e il 270 a.C.), Archimede (Siracusa, vissuto tra il 287 e il 212 a.C.), Apollonio di Perga (vissuto tra il 262 e il 190 a.C.), Claudio Tolomeo (vissuto tra il 100 ca. e il 170 ca. d.C.). Posteriori sono invece Antemio di Tralle (vissuto tra il 474 al 534), Isidoro da Mileto (vissuto tra il 442 e il 537), Eutocio di Acalona (vissuto tra il 442 e il 537) e, molto più tardi, gli arabi tra cui Al-Sijzî (945-1020). Un sintetico approfondimento storico (che non è possibile riportare per ragioni editoriali) ha consentito di ragionare sui metodi attraverso cui le iperboli potevano essere tracciate all'epoca in esame, con il fine di valutare quale tra questi poteva essere realisticamente utilizzato in un ambito complesso e scomodo come quello di un cantiere edilizio, non proprio assimilabile ad un foglio da disegno. In estrema sintesi è possibile riferirsi a due tipologie: per punti e per costruzione continua (RAYNAUD 2007).

Il primo sistema comporta l'identificazione rigorosa di alcuni punti, mediante metodi gnomonici o inviluppo di tangenti che, in seguito, vengono uniti a mano o con un elemento lineare flessibile. Al secondo sistema appartengono invece i metodi che realizzano il tracciamento continuo mediante l'uso di punti notevoli attraverso dispositivi che operano (grazie ad un movimento) nel piano, attraverso righe, fili e punti notevoli (fuochi), oppure nello spazio. La laboriosità e complessità della costruzione geometrica nel piano in un cantiere edilizio porta ad escludere questa prima ipotesi e approfondire invece la seconda.

Il meccanismo che, operando nello spazio, rende possibile il disegno delle coniche prese il nome di "compasso perfetto" solo in età medioevale. La sua storia è legata in particolare alle figure di tre prestigiosi matematici arabi della fine del X secolo che «inventarono dei nuovi strumenti per il tracciato continuo delle curve coniche ed elaborarono i mezzi teorici indispensabili per spiegare e controllare il loro funzionamento. Ibn Sahl, al-Qūhī e al-Sijzī hanno scritto ciascuno su uno o sull'altro strumento per tracciare queste curve» (RASHED 2003, 9). I fondamenti teorici necessari alla sua formulazione (RASHED 2005, 629-974) sono tuttavia da individuare nell'ultimo gruppo di proposizioni del libro I delle *Coniche* (52-58) di Apollonio così come dimostrato da Rashed nel suo poderoso commentario (APOLLONIUS DE PERGE 2008, 194-216, 535-549).

Questi brevi cenni, certamente non esaustivi, sono comunque necessari per introdurre alcune riflessioni sulle pratiche operative. Nel particolare caso del cantiere di Galla Placidia le iperboli variano al crescere della quota del piano di sezione (coerente con la giacitura dei mattoni) e sono diverse tra di loro sui quattro angoli. L'unica ipotesi percorribile in ambito edilizio ci pare possa essere una macchina basata sul principio del "compasso perfetto" che, come è stato ricordato, anche se codificato nel X secolo, trova i suoi

fondamenti teorici nell'ultimo gruppo di proposizioni del Libro I delle *Coniche* di Apollonio. È molto interessante quanto scrive a questo proposito Abū Sahl Wayjan ibn Rustam al-Qūhī said (922 ca.-1000 ca.), uno dei codificatori di questo strumento, che, nell'apertura della sua opera, non esclude che sia già esistito in precedenza, magari con nome e finalità diverse da quelle da lui sviluppate nel corso della sua trattazione (RASHED 2005, 726).

I compassi perfetti di matrice araba sono strumenti raffinati e si fondano su un principio molto semplice che occorre ricondurre alla definizione del cono data da Apollonio: fissati un punto P e una circonferenza, il cono viene generato dalla rotazione di una retta che, vincolata in P, ruota seguendo la traiettoria circolare. Se immaginiamo di poter gestire la lunghezza del segmento (che noi chiamiamo generatrice) attraverso un sistema telescopico, allora è possibile definire facilmente l'intersezione di tale linea con un qualsiasi piano. Questo strumento è in grado di governare qualsiasi configurazione geometrica: coni retti e obliqui, piani comunque inclinati rispetto alle generatrici e all'asse. È dunque cioè possibile disegnare con una linea continua, mediante una semplice rotazione, ellissi, parabole, iperboli oltre che, ovviamente, cerchi. Tra queste, come è stato già ricordato, la curva aperta dell'iperbole si ottiene sezionando un cono sia con un piano parallelo all'asse, sia quando l'angolo tra il piano e l'asse è inferiore a quello fra l'asse e la generatrice.

#### 4. IL MODELLO DIGITALE COME STRUMENTO DI VALIDAZIONE DI UNA IPOTESI: UN PROCESSO ITERATIVO

Nello svolgimento di questa ricerca, che ha visto mettere in opera numerosi tentativi con diversi modelli digitali, si è consolidata l'idea che per il tracciamento possa essere stata utilizzata una macchina i cui movimenti fossero pochi e semplici. Indubbiamente la condizione più agevole per gli operatori è quella data da spostamenti sull'asse z, in altre parole da traslazioni verticali dell'intero sistema. La forma più elementare di questo meccanismo può essere ricondotta ad un cono retto con asse orizzontale, sezionato con un piano parallelo all'asse (Fig. 5). Questo tipo di configurazione è abbastanza agevole da ricreare nello spazio perché gli estremi dell'asse del cono retto sono alla medesima quota (quindi si spostano simultaneamente della stessa quantità), mentre il piano di sezione è orizzontale e, dunque, parallelo all'asse. La forma delle iperboli create (in questa configurazione, come è stato ricordato, si generano solo iperboli) varia in relazione a due fattori: la distanza tra asse e piano secante e l'ampiezza dell'angolo al vertice.

Il processo di verifica dell'ipotesi si è svolto secondo la sequenza di seguito illustrata.

– Sono state selezionate alcune sezioni orizzontali della pseudo-cupola ottenute mediante un fascio di piani con passo di 20 cm. Le curve, per una migliore

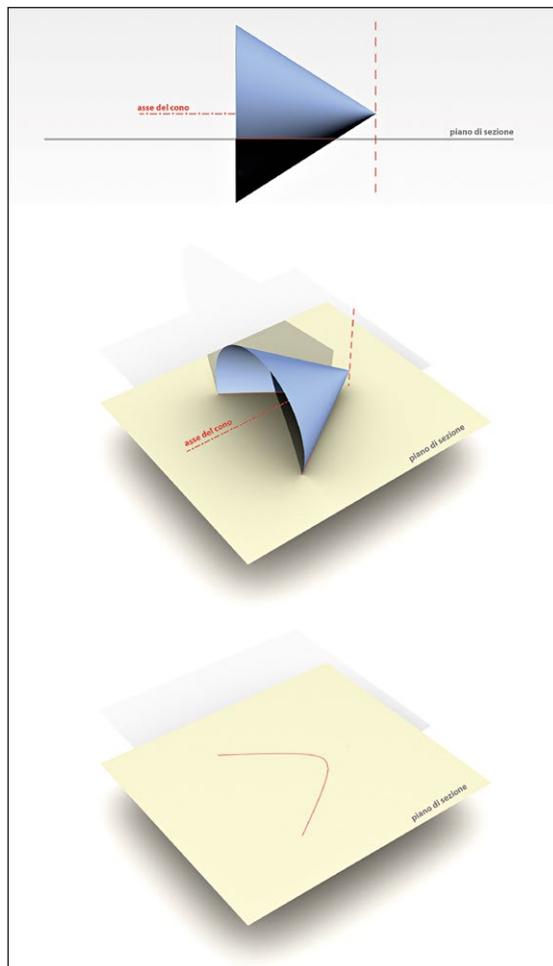


Fig. 5 – Genesi geometrica delle iperboli con asse del cono parallelo al piano di sezione.

leggibilità, sono state differenziate mediante colori: giallo (il primo livello al di sopra degli arconi, +7,30), verde (+7,50), viola chiaro (+7,70), rosa (+7,90), vinaccia (+8,10), viola scuro (+8,30), rosso (+8,50), grigio (+8,70), nero (+8,90) (Fig. 6).

– La copertura, come è stato ricordato, è suddivisibile in quattro zone simili, ma non sovrapponibili; è dunque necessario trovare la regola generatrice di 36 iperboli che si ottengono considerando, per ciascuno dei 4 angoli, le 9 sezioni orizzontali prescelte.

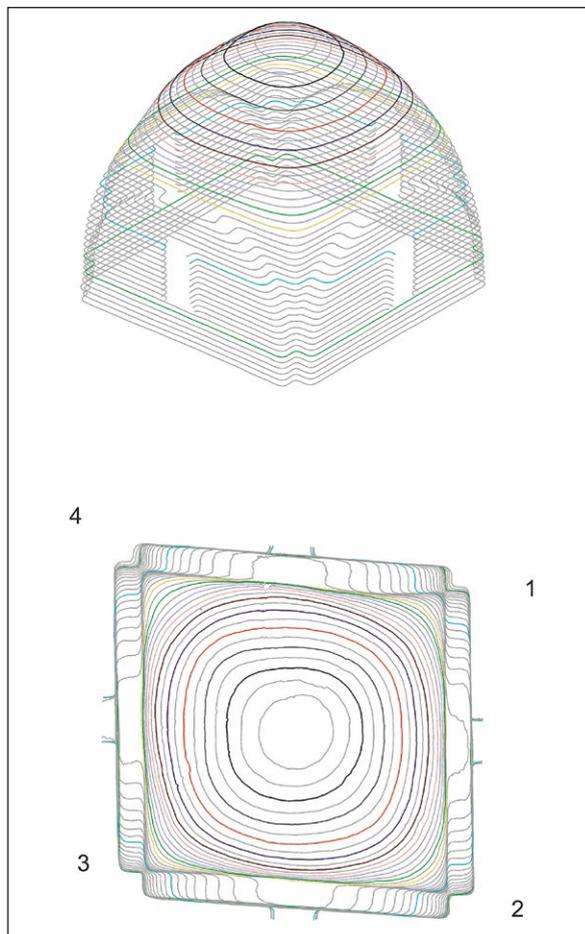


Fig. 6 – Le curve colorate al di sopra degli arconi sono quelle selezionate per l'analisi.

– L'analisi grafica svolta con GeoGebra ha consentito di individuare le aree in cui sono concentrati i centri delle iperboli (Fig. 4): ipotizzato che i coni abbiano l'asse orizzontale, questi coincidono con la proiezione del vertice che, dunque, deve muoversi su una retta verticale esterna alla pseudo-cupola. Il posizionamento di tali rette verticali all'esterno dei quattro angoli del vano costituisce il primo vincolo imposto alla “macchina”, che, così configurata, può facilmente traslare verso l'alto per step successivi.

– Sono stati fatti molti tentativi variando l'angolo del cono e l'altezza del suo vertice sino a quando non è stata trovata la curva che soddisfacesse il criterio di

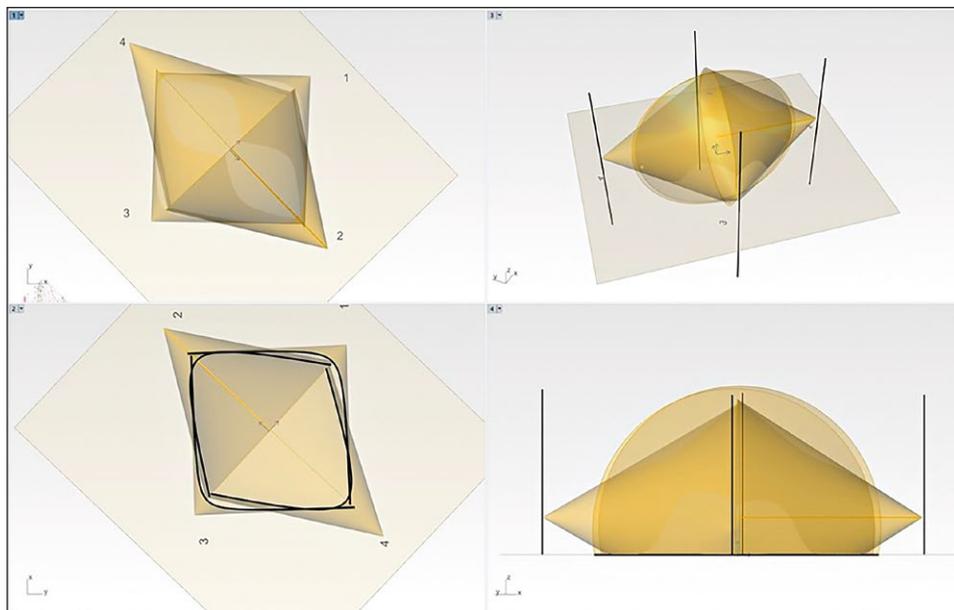


Fig. 7 – Vista dei quattro coni generatori delle iperboli di colore giallo (quota 0,00).

una buona corrispondenza tra lo stato di fatto e la geometria teorica (con una differenza nei punti di massimo scostamento medio inferiore a 1,5 cm) (Fig. 7).

Questi primi risultati sono stati confortati dalla presenza ricorrente di una serie di misure intere e di alcuni rapporti numerici. In sintesi sussistono le seguenti condizioni:

- La distanza del vertice dei coni dal centro della pseudo-cupola è un multiplo dell'unità di misura: 12 piedi romani sulla diagonale 2-4 e 9 piedi sulla diagonale 1-3. La distanza tra i vertici dei coni opposti è dunque rispettivamente di 24 piedi (7,09 m) e 18 piedi (5,32 m).
- I valori degli angoli al vertice dei coni crescono sino alla quota di +1,00 per poi decrescere progressivamente.
- Gli angoli al vertice delle coppie opposte risultano generalmente congruenti: per esempio la coppia 1-3 alla quota 0,00 (riferita al piano orizzontale tangente agli arconi) presenta lo stesso valore di  $90^\circ$ .
- Osservato che i valori della coppia 1-3 sono sostanzialmente spesso identici, mentre la coppia 2-4 presenta un maggior numero di variazioni, è possibile ipotizzare che questa condizione sia compatibile con il processo di posa dei mattoni: nell'ultimo angolo che chiude il giro si devono concentrare necessariamente le compensazioni dovute alle possibili tolleranze esecutive.

## 5. DALLA GEOMETRIA ALLA MACCHINA DI CANTIERE

Il dispositivo potenzialmente impiegabile sfrutta le medesime proprietà di quello già illustrato in INCERTI, GIANNETTI 2020. Il principio è quello del *Triquetro* (TOLOMEIO, *Almagesto*, V, 12), uno strumento astronomico composto da due aste principali di uguale lunghezza incernierate ad una estremità: la prima (a) è fissata in posizione verticale, mentre la seconda (b) è libera di ruotare. L'angolo compreso tra questi due elementi è determinabile grazie alla lunghezza di un terzo regolo graduato (c), imperniato all'estremità inferiore dell'asta verticale. L'uso della Tavola delle corde (TOLOMEIO, *Almagesto*, I, 11) in associazione a questo strumento, grazie alla relazione tra l'angolo al centro di una circonferenza e la relativa corda sottesa, consente di misurare gli angoli con grande accuratezza, attraverso semplici triangoli isosceli.

È perciò possibile ipotizzare l'esistenza di un'apparecchiatura analoga alla precedente ma ruotata di  $90^\circ$  (Fig. 8), ancora composta da tre aste, replicata per ciascuno dei quattro angoli della copertura. In questo contesto il regolo che non ruota (a) coincide con l'asse orizzontale del cono, le cui due estremità sono ancorate a due pali verticali: il primo è posto al centro della cupola (p, in comune ai quattro settori), mentre il secondo è posizionato sulla diagonale del parallelogramma, esternamente al vano (elemento che possiamo indicare con v1, v2, v3, v4 in relazione ai quattro angoli). Il secondo regolo (b) è incernierato al primo in corrispondenza dell'ancoraggio esterno ed è libero di ruotare per descrivere la superficie di un cono. Un terzo regolo graduato (c), imperniato sull'asta orizzontale consente, grazie alla sua misura, di impostare il valore dell'angolo al vertice del cono. Come nel caso della realizzazione del cielo stellato, anche in questa circostanza è da evidenziare il fatto che le lunghezze degli assi dei coni (e dunque dei regoli) siano agevolmente correlabili alla base 6 su cui è impostata la *Tavola delle corde* di Tolomeo.

Scelto l'angolo al vertice del cono, il tracciamento dell'iperbole corrispondente ad ogni giacitura può dunque essere facilmente concretizzato grazie alla rotazione di b intorno alla sua cerniera. Il sistema telescopico (già ipotizzato in merito alle tecniche esecutive del cielo stellato), peculiare del compasso perfetto, consente cioè di disegnare la conica sul piano orizzontale di posa (quest'ultimo materializzabile anche attraverso un semplice triangolo rettangolo realizzato con una corda). Il rapporto che relaziona l'incremento relativo tra la Z del piano secante e quella del vertice del cono permette di dedurre che alla traslazione verticale del piano di posa pari a  $2x$  corrisponde una traslazione dell'asse pari circa a  $3x$ , sempre con una approssimazione della misura intorno ai 3-4 cm.

Per verificare la coerenza tra il modello teorico e quello reale sono state raccordate in una unica polilinea chiusa le 4 iperboli ottenute dalla sezione dei coni con il relativo piano secante (36 coni, 4 per ciascuno dei 9 piani

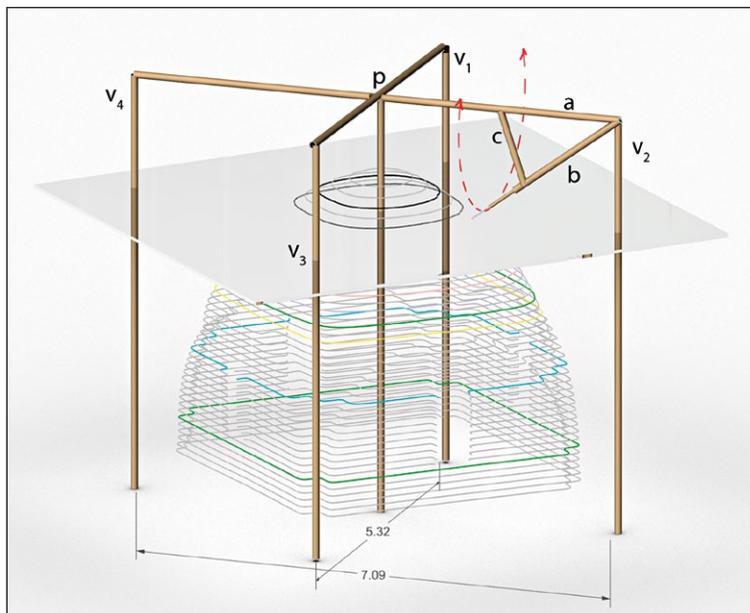


Fig. 8 – Schema della macchina di cantiere per uno dei quattro settori.

orizzontali). La superficie teorica è stata costruita a partire da un segmento ortogonale a due polilinee chiuse contigue, preso sulla diagonale. L'analisi delle superfici attraverso la deviazione dell'insieme di punti tra la superficie teorica e la mesh di rilievo restituisce un valore della deviazione standard di 0,007 m. La Fig. 9 riporta in colore blu le porzioni con una differenza inferiore ai 15 mm, mentre il giallo identifica le zone, molto circoscritte, con una discrepanza massima di 30 mm.

## 6. UN *UNICUM* OPPURE IL TESTIMONE DI UNA TIPOLOGIA?

L'applicazione di questo processo allo studio di analoghe pseudo-cupole coeve non è immediato per la difficoltà di trovare esempi affini. A quale tipologia architettonica possiamo riferire questa particolare superficie? Sovente si è scritto di «volta su pennacchi privi di elementi di discontinuità», espressione utilizzata in particolare modo in ambito anglosassone, che può tuttavia creare una certa confusione, visto che tale forma è generalmente riconducibile alla volta a vela, cioè ad una superficie ottenuta da una porzione di sfera (LANCASTER 2015, 71-74). Dall'osservazione degli esempi generalmente menzionati è possibile evidenziare che l'apparecchiatura dei conci nelle porzioni d'angolo (che si struttureranno poi nei pennacchi) in alcuni casi può discostarsi dal restante

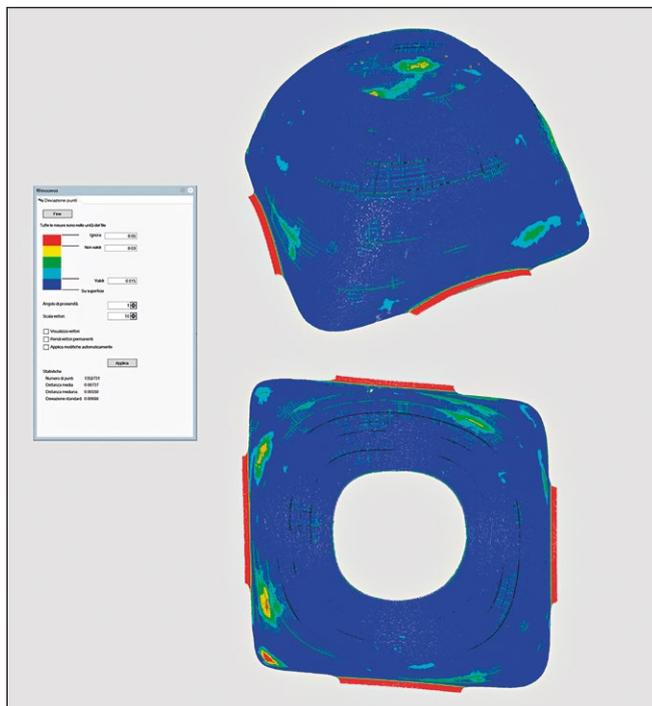


Fig. 9 – Deviazione dell'insieme di punti tra la superficie teorica e la mesh di rilievo.

andamento orizzontale dei ricorsi (CHOISY 1883, 87-91), evocando così un cambiamento dell'andamento della superficie. Tale dato visivo tuttavia deve essere verificato con i metodi della geometria sulla base di un rilievo tridimensionale.

Tra le testimonianze antiche più note troviamo quella della volta in pietra delle Terme occidentali di Gerasa (Giordania), definita come “cupola su pennacchi” probabilmente solo a causa di una variazione nella dimensione (ma non nell'andamento) dei conci lapidei. A differenza di Gerasa, nella nostra pseudo-cupola le curve orizzontali delle zone angolari sono raccordate con il piano degli arconi e non presentano discontinuità (cioè spigoli vivi). Più vicine, da un punto di vista generativo, sembrano le volte squinch, la cui apparecchiatura muraria tuttavia non è coerente con il nostro caso studio (LANCASTER 2015; ATTICO *et al.* 2019) visto che, come è stato ricordato, nelle foto di archivio l'andamento dei ricorsi sembra essere orizzontale.

La letteratura ha segnalato delle analogie tra il Mausoleo di Galla Placidia e alcuni edifici sacri a pianta cruciforme, di dimensioni contenute, in cui sono tuttavia presenti (nel caso siano sopravvissute) volte a crociera o a vela.

In merito a questo aspetto sono state evidenziate le assonanze con l'*Apostoleion* di Costantinopoli, con la *Basilica Apostolorum* e con San Smpliciano a Milano. La tipologia è quella dei sacelli cruciformi, diffusi tra il V e il VI secolo, da mettere in relazione con la tradizione funeraria dell'Asia Minore, della Cappadocia, Licia, Calicia, Grecia e Armenia. Tuttavia, molto spesso, le architetture citate sono absidate, al contrario di Galla Placidia. Menzionati infine sono i numerosi sacelli a pianta a croce greca lungo la costa adriatica (fine V-inizio IV sec.) (LO PRETE 1964; RIZZARDI 1996).

Senza alcun dubbio questa tipologia di pseudo-cupola persiste nella tradizione costruttiva pugliese di età medioevale, come si riscontra nella soluzione in pietra di San Vito a Corato (Bari, XI-XII sec.) e in diversi altri edifici già ampiamente documentati (DE CADILHAC *et al.* 2008; PERFIDO 2008; ROSSI 2008). La conferma che la morfologia della pseudo-cupola di Galla Placidia non sia un *unicum* ci può venire dalla chiesa di Santa Maria di Casaranello (anticamente nota come Madonna della Croce), costantemente messa in rapporto con il nostro edificio ravennate in ragione del ciclo musivo che decora la campata centrale del suo transetto: un cielo stellato al cui centro è una grande croce. Tale elemento architettonico, che è parte di un edificio non ancora completamente risolto dal punto di vista dell'impianto e delle relative fasi costruttive (STEFÀNO 2018; DANIELI, DE MARCO 2020), viene fatto risalire alla prima fase del V secolo proprio in regione dei mosaici (CECHELLI TRINCI 1974), anche se nuovi studi ne posticipano la datazione alla fine del V-inizio VI (FALLA CASTELFRANCHI 2005). Non abbiamo testimonianze sull'andamento dell'apparecchiatura di questa pseudo-cupola, ma dalle corrispondenze intercorse per i restauri del 1913-14 apprendiamo che la sua struttura è in conci di tufo (STEFÀNO 2018, 610).

La superficie è stata rilevata mediante fotogrammetria digitale (50 fotografie) e analizzata con la medesima metodologia precedentemente proposta: le curve generate dalla sezione con dei piani orizzontali sono, ancora una volta, riconducibili a porzioni di iperboli raccordate tra loro. I rapporti dimensionali tra coni e piani secanti sono però diversi dal caso di Galla Placidia. La Fig. 10 mostra inoltre come l'andamento geometrico delle fasce in cui è ripartito il motivo del cielo stellato abbia indubbiamente un andamento "festonato", il cui tracciamento è fattibile attraverso la medesima procedura teorizzata per il cielo stellato di Galla Placidia. In entrambi i casi le dimensioni del vano centrale sono davvero molto contenute: Casaranello presenta lati di lunghezza compresa tra i 306 e i 330 cm, mentre Galla Placidia tra i 359 e i 370 cm.

## 7. CONCLUSIONI

Il processo di reverse modeling applicato alla pseudo-cupola di Galla Placidia ha consentito di evidenziare la presenza di sezioni orizzontali riconducibili a delle porzioni di iperboli. La ricerca ha individuato, sulla base di alcune ipotesi

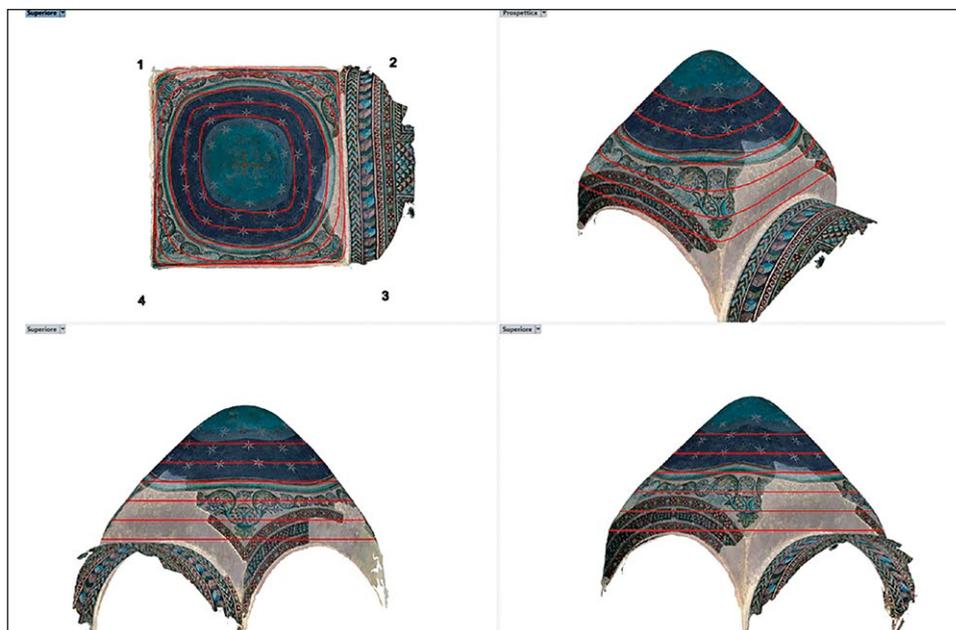


Fig. 10 – Viste ortogonali e prospettica della pseudo-cupola di Santa Maria di Casaranello. In rosso le sezioni della mesh con dei piani orizzontali. Modello elaborato mediante fotogrammetria digitale.

geometriche, una possibile tecnica di tracciamento basata sulla conoscenza della *Tavola delle corde* di Tolomeo e sulla realizzazione di una macchina di cantiere in grado di restituire nello spazio la superficie di un cono. Il principio di funzionamento è quello “compasso perfetto”, strumento sistematizzato molti secoli dopo l'edificazione del Mausoleo, che trova tuttavia le sue origini nell'ultimo gruppo di proposizioni del libro I delle *Coniche* (52-58) di Apollonio.

Nella fase di esecuzione, le maestranze costruirono dei coni il cui angolo al vertice è sempre minore del valore dell'angolo corrispondente del poligono di base (in questo modo gli asintoti delle iperboli non sono mai coincidenti con i lati del vano). La scelta invece del rapporto tra l'incremento delle quote verticali del vertice del cono e quello del relativo piano di posa è largamente riconducibile al valore di 2:3. Nella fase di esecuzione le variabili da tenere sotto controllo furono dunque: quota del vertice dei coni, angolo al vertice dei coni, quota del piano secante (coincidente con il piano di posa le cui variazioni sono date anche dall'inclinazione della giacitura dei mattoni).

Occorre infine ricordare che una porzione del profilo delle sezioni diagonali è, almeno in parte, ben approssimabile ad un arco di circonferenza (condizione geometrica certamente molto utile durante la fase esecutiva). Un

sistema concettualmente piuttosto complesso che diviene tuttavia facilmente realizzabile qualora siano conosciute, grazie alla trasmissione del sapere materiale, alcune proporzioni numeriche utili per relazionare i rapporti tra gli angoli al vertice di un cono e le sue relative coordinate spaziali. La superficie di Galla Placidia infine potrebbe non essere un *unicum* nel periodo come ci attestano i primi esiti dell'analisi sulla pseudo-cupola di Casaranello.

Mentre esistono studi su geometria e sviluppo di volte ellittiche e paraboliche (HUERTA 2008; ROSSI, FIORILLO 2020), questa particolare tipologia di pseudo-volta non pare trattata nella letteratura specialistica, passata e recente, su cupole e sistemi voltati (CHOISY 1883; SMITH 1950; BESEVAL 1984; ARCE 2006; HUERTA 2009; LANCASTER 2015). Da questi iniziali risultati nasce la domanda sulle origini di un tale modello costruttivo: se sia cioè da attribuire ad un ambito romano, bizantino, mediorientale, copto o altro.

Non è difficile infine comprendere come la possibilità di leggere e interrogare queste morfologie si sia potuta concretizzare solo in questi tempi, grazie a strumenti e tecniche avanzati di rilievo e di grafica digitale, strumenti e ambiti dell'informatica archeologica (MOSCATI 2019), che ci consentono non solo l'elaborazione dei dati, ma anche di concepire nuove metodologie per porre inediti quesiti.

MANUELA INCERTI

Dipartimento di Architettura  
Università degli Studi di Ferrara  
icm@unife.it

### *Crediti e ringraziamenti*

Rilievi e restituzioni grafiche sono a cura dell'autrice, a meno di quando non espressamente dichiarato. Si ringrazia la Curia Arcivescovile di Ravenna per i permessi accordati. La campagna fotografica per la fotogrammetria digitale di Santa Maria di Casaranello è stata realizzata da Alessandro De Marco e Giorgia Martiriggiano. Si ringrazia Alessandro De Marco e l'Associazione Archeo-Casarano per il supporto nella ricerca.

### BIBLIOGRAFIA

- APOLLONIUS DE PERGE 2008, *Apollonius de Perge, coniques: texte grec et arabe*, R. Rashed (ed.) Berlin, De Gruyter (Scientia graeco-arabica).
- ARCE I. 2006, *Umayyad arches, vaults & domes: Merging and re-creation. Contributions to Early Islamic construction history*, in *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Congress on Construction History*, (Cambridge 2006), Ascot, Construction History Society, 195-220 (<https://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-1-195-220-arce.pdf>).
- ATTICO D., TURRINA A., BANFI, F., GRIMOLDI A, LANDI A.G., CONDOLEO P., BRUMANA R. 2019, *The HBIM analysis of the geometry to understand the constructive technique: The use of the trompe volume in a brick vault*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11, 107-114 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-107-2019>).

- BESENVAL R. 1984, *Technologie de la voûte dans l'Orient ancien*, Paris, Editions Recherche sur les civilisations.
- BOVINI G. 1950, *Il cosiddetto mausoleo di Galla Placidia in Ravennae*, Città del Vaticano, Società Amici [delle] Catacombe presso Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana.
- CECCHELLI TRINCI M. 1974, *I mosaici di Santa Maria della Croce a Casaranello*, «*Vetera Christianorum*», 11, 1, 167-186.
- CHOISY A. 1883, *L'art de bâtir chez les Byzantins*, Paris, Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques.
- DANIELI F., DE MARCO A. 2020, *Nuove ipotesi su Casaranello: l'edificio, il mosaico, gli affreschi*, Roma, Edizioni Universitarie Romane.
- DAVID M. (ed.) 2013, *La Basilica di Santa Croce: nuovi contributi per Ravenna tardoantica*, Ravenna, Edizioni del Girasole.
- DE CADILHAC R., GUARNIERI A., ROSSI G. 2008, *Strutture voltate*, in R. DE CADILHAC (ed.), *L'arte della costruzione in pietra. Chiese di Puglia con cupole in asse dal secolo XI al XVI*, Roma, Gangemi, 131-168.
- FALLA CASTELFRANCHI M. 2005, *I mosaici della chiesa di Santa Maria della Croce a Casaranello rivisitati*, in C. ANGELELLI (ed.), *Atti del X Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico*, Roma, Edizioni Scripta Manent, 13-24.
- HUERTA S. 2008, *Oval domes: History, geometry and mechanics*, «*Nexus Network Journal*», 9, 2, 211-248 (<https://doi.org/10.1007/s00004-007-0040-3>).
- HUERTA S. 2009, *The geometry and construction of Byzantine vaults: The fundamental contribution of Auguste Choisy*, in J. GIRÓN, S. HUERTA (eds.), *Auguste Choisy (1841-1909): L'architecture et l'art de bâtir. Textos sobre Teoría e Historia de las Construcciones*, 1, Madrid, Instituto Juan de Herrera, 289-305.
- IANNUCCI A.M. 1995, *Per una storiografia dei restauri ravennati: il mausoleo di Galla Placidia*, *Corso di cultura sull'arte ravennate e bizantina*, 41, Ravenna, Edizioni del Girasole, 63-76.
- IANNUCCI A.M. 1996, *Il mausoleo ritrovato: dagli adattamenti settecenteschi ai progetti e restauri tra Ottocento e Novecento*, in C. RIZZARDI (ed.), *Il Mausoleo di Galla Placidia a Ravenna*, Modena, Franco Cosimo Panini, 171-206.
- INCERTI M., D'AMICO S., GIANNETTI S., LAVORATTI G., VELO U. 2018, *Le digital humanities per lo studio e la comunicazione di beni culturali architettonici. Il caso dei mausolei di Teodorico e Galla Placidia in Ravenna*, «*Archeologia e Calcolatori*», 29, 1, 297-316 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.23>).
- INCERTI M., GIANNETTI S. 2020, *La cupola di Galla Placidia e il suo cielo stellato: geometrie, modelli e tracciamenti. The dome of Galla Placidia and its starred sky: Geometries, models and tracings*, «*Disegnare, Idee, Immagini*», 60, 38-49.
- LANCASTER L.C. 2015, *Innovative Vaulting in the Architecture of the Roman Empire: 1<sup>st</sup> to 4<sup>th</sup> centuries CE*, Cambridge, University Press.
- LO PRETE L. 1964, *Valore e significato dell'architettura nella cappella di S. Andrea a Ravenna*, «*Felix Ravenna*», 3, 38, 5-96.
- MIGLIARI R. (ed.) 2004, *Disegno come modello, riflessioni sul disegno nell'era informatica*, Roma, Aracne.
- MOSCATI P. 2019, *Informatica archeologica e archeologia digitale. Le risposte dalla rete*, in P. MOSCATI (ed.), *30 anni di Archeologia e Calcolatori. Tra memoria e progettualità*, «*Archeologia e Calcolatori*», 30, 21-38 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.03>).
- PENNI E. 2021, *San Lorenzo o re Davide? La liturgia funeraria antica nei mosaici del mausoleo di Galla Placidia*, Ravenna, Edizioni del Girasole.
- PERFIDO P. 2008, *Sistemi di raccordo negli edifici a cupola in Puglia. Il passaggio dal quadrato al cerchio*, in M. GIOVANNINI, G. GINEX (eds.), *Spazi e culture del Mediterraneo - 2, Mediterraneo Commercio Città Culto Presidio Texture Trasporti Economia*, Roma, Kappa, 311-321.

- RANALDI A. 2011, *Dalla realtà sensibile all'astrazione. La volta stellata del mausoleo di Galla Placidia*, in L. KNIFFITZ (ed.), *Architettura e mosaico. Atti della Giornata di Studi (Ravenna 2010)*, Ravenna, MAR - Museo d'Arte Ravenna, 20-42.
- RASHED R. 2003, *Al-Qūbī et Al-Sijzī: Sur le compas parfait et le tracé continu des sections coniques*, «Arabic Sciences and Philosophy», 13, 1.
- RASHED R. 2005, *Geometry and Dioptrics in Classical Islam*, London, Al-Furqaan Islamic Heritage Foundation.
- RAYNAUD D. 2007, *Le tracé continu des sections coniques à la Renaissance: Applications optico-perspectives, héritage de la tradition mathématique arabe*, «Arabic Sciences and Philosophy», 17, 299-345 (<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00376560>).
- RICCI C. 1914, *Il mausoleo di Galla Placidia in Ravenna*, Roma, Calzone.
- RIZZARDI C. 1996, *L'architettura del Mausoleo tra Oriente e Occidente: cosmopolitismo e autonomia*, in C. RIZZARDI, P. ANGIOLINI MARTINELLI (eds.), *Il mausoleo di Galla Placidia a Ravenna*, Modena, Franco Cosimo Panini, 129-146.
- RIZZARDI C. 2005, *Il cielo stellato del mausoleo di Galla Placidia*, in S. PASI, A. MANDOLESI (eds.), *Studi in memoria di Patrizia Angiolini Martinelli*, Bologna, Ante Quem, 277-288.
- RIZZARDI C., ANGIOLINI MARTINELLI P. 1996, *Il mausoleo di Galla Placidia a Ravenna*, Modena, Franco Cosimo Panini.
- ROSSI C., FIORILLO F. 2020, *The vaults of Umm al-Dabadib: Geometric study*, «Nexus Network Journal», 22, 4, 1-18 (<https://doi.org/10.1007/S00004-020-00532-X>).
- ROSSI G. 2008, *Geometria delle cupole in Puglia. Confronti tra architettura religiosa medioevale e le costruzioni rurali in pietra a secco*, in M. GIOVANNINI, G. GINEX (eds.), *Spazi e culture del Mediterraneo - 2, Mediterraneo Commercio Città Culto Presidio Texture Trasporti Economia*, Roma, Kappa, 323-341.
- SMITH E.B. 1950, *The Dome. A Study in the History of Ideas*, Princeton, Princeton University Press.
- STEFÀNO L. 2018, *S. Maria della Croce (Casaranello). Oltre un secolo di studi su un monumento paleocristiano del Salento*, Lecce, Edizioni Grifo.
- SWIFT E., ALWIS A. 2010, *The role of Late Antique art in Early Christian worship: A reconsideration of the iconography of the 'starry sky' in the 'Mausoleum' of Galla Placidia*, «Papers of the British School at Rome», 78, 193-217.

## ABSTRACT

Previous studies conducted on the Mausoleum of Galla Placidia (between AD 432 and AD 450) have allowed us to identify the geometric rule used for the creation of its starry sky and to propose the initial considerations about the morphology of its pseudo-dome. At first sight, the turns of the stars describe regular circumferences that seem to lie on a plane, in reality their trend is a space curve resulting from a projection on the surface of the ceiling from a point centrally located, approximately at the height of the base of the windows. The geometry underlying this tracing is based on a series of cones whose angle at the vertex increases progressively, and whose materialization is possible thanks to the knowledge of the operating principle of the astronomical instrument called Triquetra and Ptolemy's table of chords. Apparently irregular, the ceiling is set on a parallelogram and is not traceable to operations of revolution of a curve, a cross vault or a pavilion vault. The section of the mesh with a set of horizontal planes with a distance of 10 cm has generated a set of curves, all different from each other, which we perceive connected by an unusual rule, not yet investigated. An initial analysis allowed to verify that we are dealing with hyperbolas. The present work proposes to continue the investigation of these curves and to hypothesize a construction technique that can be adopted in the context of a building site.

## IL MAUSOLEO DI CECILIA METELLA TRA DOCUMENTAZIONE GRAFICA ANALOGICA E DIGITALE: UN APPROCCIO METODOLOGICO MULTIDISCIPLINARE

### 1. INTRODUZIONE

Sebbene il monumento sepolcrale posto al III miglio dell'Appia Antica sia probabilmente il più famoso e caratteristico luogo della *regina viarum* nei pressi dell'Urbe, il cui profilo si erge maestoso sulla campagna romana e ne permette la visione anche da notevole distanza, ancora oggi la conoscenza del Mausoleo – almeno dal punto di vista dell'acquisizione digitale e dell'analisi della documentazione grafica – appare lacunosa e dunque meritevole di approfondimento (Fig. 1).

La tomba, la cui forma è affine al Mausoleo di Munazio Planco, venne realizzata in età augustea (PARIS, RAUSA 2004, 9) su un alto podio a base quadrata (ca. 30 m per lato, ovvero 100 piedi romani) in *opus caementicium*, in origine rivestito di lastre di travertino, di cui oggi ne restano alternativamente le tracce degli ortostati e le teste dei diatoni ancora inglobate nel nucleo cementizio. Sul podio si innalza un corpo centrale cilindrico rivestito in lastre di travertino lavorate a bugnato liscio e terminato con un fregio scolpito con bucrani uniti da festoni nel marmo pentelico, interrotto alla mezzzeria del lato perpendicolare alla strada con l'iscrizione dedicatoria sormontata da trofei militari. La sommità del monumento, oggi deformata da una merlatura medievale, doveva concludersi con una copertura conica, il cui eco doveva ancora essere udibile nel Medioevo poiché in questo periodo ci si riferiva al sepolcro come al *monumentum peczutum* (UGHELLI 1644, I, 266).

Il grandioso monumento è dedicato a Cecilia Metella, nobile donna romana della cui vita si conosce soltanto ciò che è desumibile dal breve testo scolpito nell'epigrafe posta in cima al monumento. Appartenente alla *gens Caecilia*, potente famiglia di origine plebea della tarda repubblica romana, Cecilia era la figlia di Metello Cretico (MÜNZER 1897) e moglie di un Crasso. Il padre, console nel 69 a.C., conquistando l'isola di Creta e rendendola provincia romana, ottenne l'*agnomen* di *Creticus*. Per quanto riguarda l'identità del *Crassus*, nonostante per lungo tempo Marco Licinio Crasso triumviro sia stato identificato come il candidato ideale a ricoprire il ruolo di marito della dedicataria del monumento, già HÜLSEN (1896) sosteneva che il marito fosse il figlio di lui, omonimo e primogenito, sulla scia di quanto sostenuto in precedenza da DRUMANN (1844, 55).

Come era già noto ai topografi ottocenteschi (NIBBY 1839, 550-556; 1848, 384-386), la più antica testimonianza documentaria del Mausoleo



Fig. 1 – Immagine del Mausoleo di Cecilia Metella dal lato E del Palazzo Caetani (fotografia dell’Autore).

consiste in una menzione contenuta in un documento del monastero di Subiaco dell’850 (GALLETTI 1776, 186), in cui il monumento di Cecilia Metella viene identificato come «monumentum quod vocatur ta canetri capita positum foris porta Apia milliare ab urbe Roma plus minus II iuris sancte romane ecclesie», il cui toponimo viene spiegato dal Tomassetti interpretando *cata-creti(ci)-capita* come una deformazione del nome *Cretici* (TOMASSETTI 1885; PARIS, RAUSA 2004, 10) presente nell’iscrizione che recita CAECILIAE Q[UINTI] CRETICI F[ILIAE] METELLAE CRASSI (CIL, VI, 1274, 31584; ILS, 881). Il monumento deve, almeno in parte, la sua sopravvivenza al fatto di essere stato inglobato, tra la fine del XIII e l’inizio del XIV secolo, nel *castrum Caetani* per volontà del cardinale Francesco, coadiuvato dallo zio pontefice Bonifacio VIII, in un programma politico volto alla creazione di un feudo di famiglia. Nel 1588, nell’ambito delle operazioni di rinnovamento di Roma, papa Sisto V promosse una serie di demolizioni ai danni delle antichità della città, tra cui il Settizonio (che venne effettivamente demolito), l’arco di Giano al Foro Boario e la sepoltura di Cecilia Metella, «opera unica e sola della repubblica» (LANCIANI 1913, 129), la quale venne però salvata grazie all’intervento del Popolo Romano in Campidoglio.

Nonostante l'Appia Antica in generale e il Mausoleo di Cecilia Metella in particolare siano stati l'oggetto di numerosi studi, condotti in modo eterogeneo e discontinuo a partire dal XVI secolo, dai primi decenni dell'Ottocento diversi studiosi – primi tra tutti A. Nibby, L. Canina e G. Tomassetti – iniziarono a condurre delle indagini più sistematiche, strutturate secondo ambiti che spaziavano da tematiche inerenti ai personaggi legati alla dedicataria fino agli aspetti architettonici del singolo monumento. L'unico studio monografico inerente al sepolcro di Cecilia Metella, risalente ormai a vent'anni fa (GERDING 2002), nonostante il rigore scientifico, la completezza e l'alto valore contenutistico soffre della mancanza del supporto di un adeguato rilievo digitale realizzato con metodologie integrate.

Il presente studio si prefigge l'obiettivo di aggiornare lo stato dell'arte mediante l'ausilio delle più recenti tecnologie in ambito di acquisizione digitale, secondo diverse linee di ricerca complementari: 1) l'analisi diacronica del monumento, tenendo conto dei dati bibliografici comparati con le verifiche *in situ*; 2) la ricostruzione architettonica del monumento nella sua fase originale; 3) la redazione di modelli virtuali per la divulgazione e la disseminazione scientifica. In questa sede si presentano i dati dedotti dalla prima campagna di acquisizione massiva, finalizzati alle analisi comparative del monumento, con la documentazione grafica e iconografica maggiormente significativa.

S.L.

## 2. METODOLOGIE DI RILEVAMENTO

La campagna di rilievo condotta sul Mausoleo di Cecilia Metella si è resa necessaria al fine di colmare alcune lacune nella conoscenza delle diverse fasi costruttive dell'impianto, divenendo tra l'altro l'occasione di testare, ancora una volta, la validità delle metodologie integrate, ormai consolidate in ambito scientifico di tipo specialistico, su di un manufatto complesso e stratificato caratterizzato dalla compresenza di una materica volumetria dell'architettura e le tracce, a volte appena percettibili, dell'archeologia (BIANCHINI 2016). Con queste premesse sono state affrontate la programmazione e l'attuazione di un rigoroso rilievo integrato, inteso come utilizzo sincronico e coordinato di singole metodologie, il cui risultato è stato condiviso da diverse competenze disciplinari per il raggiungimento della conoscenza dell'oggetto studiato (DOCCI 2005). Si è proceduto, quindi, attraverso operazioni di acquisizione massiva sia con scanner laser 3D che con processi fotogrammetrici Structure from Motion (SfM) da terra e da Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR). La documentazione mediante sistemi di acquisizione massivi ha avuto come obiettivo la ricucitura di tale spazio per offrire l'opportunità, in ambiente digitale, di ritrovare quelle connessioni sia dell'impianto architettonico che di quello decorativo.



Fig. 2 – Nuvola di punti con valori di riflettanza.

Il modello numerico a nuvole di punti, risultato di queste operazioni, è stato elaborato per la realizzazione di modelli interpretativi, geometrici e architettonici in cui alla rigorosità degli aspetti geometrico-formali del rilievo scanner laser si somma la qualità del dato RGB proprio delle acquisizioni da fotografie digitali, divenendo un elemento fondamentale per le successive ipotesi interpretative. Proprio la fase di interpretazione dei modelli è resa possibile grazie all'oggettività e commensurabilità del dato di partenza nonché dei parametri di incertezza ad esso connessi, dato privo della inevitabile valutazione soggettiva a cui viene sottoposto un processo interpretativo di tipo tradizionale.

### *2.1 Acquisizione ed elaborazione dei dati mediante laser scanner*

Come è noto l'impiego di sistemi di acquisizione massiva basati su LiDAR (Light Detection and Rending) permette di rilevare le caratteristiche geometrico-morfologiche dell'oggetto di studio nella sua tridimensionalità. Queste informazioni sono contenute nella nuvola di punti e sono il primo prodotto ottenuto proprio dalla fase di acquisizione dati (CENTOFANTI, BRUSAPORCI, LUCCHESI 2014). La nuvola di punti derivante dall'acquisizione massiva, definita Modello numerico, si riferisce ad una terna di assi cartesiani in cui ogni sua unità minima, il punto, è collocata tridimensionalmente. In



Fig. 3 – Nuvola di punti con valori RGB del complesso monumentale di Cecilia Metella e del *castrum Caetani*.

aggiunta ai tre indicatori di posizione, le scansioni realizzate restituiscono, per ogni punto, un'altra terna di valori esplicativi del dato cromatico RGB e associano ad ogni punto un ulteriore valore: la riflettanza (Fig. 2). La lettura di quest'ultima in particolare, sebbene non sia direttamente identificabile una corrispondenza biunivoca tra il valore di intensità e il fenomeno che esso rappresenta, può essere presa in considerazione in associazione con altri dati derivati da diverse tipologie di analisi. In aggiunta, le nuvole di punti provenienti da acquisizione laser scanner contengono informazioni legate alla topologia dell'oggetto e relative al rapporto interno/esterno espresse mediante il valore della normale al punto (GAIANI, BENEDETTI, APOLLONIO 2011).

Per il Mausoleo di Cecilia Metella sono state realizzate con laser scanner Faro Focus 3D M70 93 scansioni – assicurando un Overlap pari al 39%; un Balance del 28% e un 98% di punti < 6 mm – dislocate all'interno e all'esterno della tomba circolare, sulla via Appia, ai vari livelli raggiungibili. Naturalmente le operazioni di acquisizione hanno interessato anche tutta la struttura del *castrum Caetani* al fine di avere un modello generale dell'intero complesso (Fig. 3).

La nuvola di punti complessiva, ottenuta dopo i processi di registrazione e verifica, è stata impiegata come una sorta di base dati di riferimento; il modello digitale navigabile, infatti, diviene strumento di indagine sia per

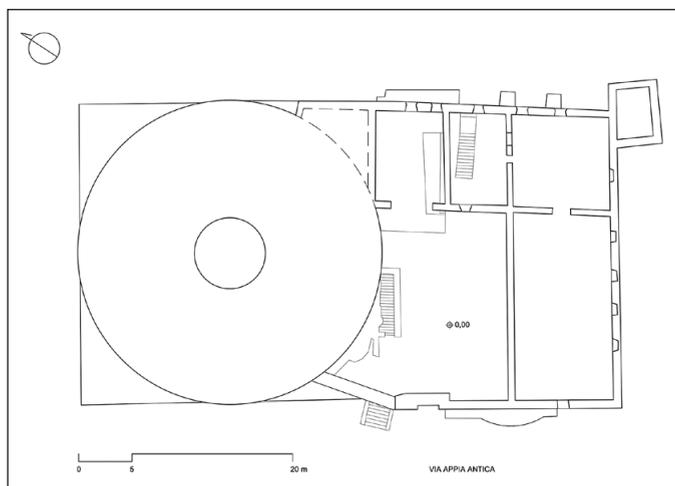


Fig. 4 – Pianta geometrica in scala 1:200, a quota +3,75 m, del complesso monumentale di Cecilia Metella e del *castrum Caetani*.

gli elementi strutturali, morfologici generali che per gli elementi di dettaglio del complesso architettonico. Questo approccio permette di sistematizzare gli apporti di tipo specialistico forniti in ogni ambito di indagine connesso al manufatto per definire un sistema informativo ampio e complesso (IPPOLITO *et al.* 2016).

La fase successiva di elaborazione riguarda la realizzazione di modelli 2D, geometrici e architettonici, dal modello tridimensionale, quali rappresentazioni ortografiche su piani orizzontali o verticali (piante, sezioni, prospetti). I modelli geometrici, in particolare, sono caratterizzati da una semplificazione delle geometrie principali del manufatto e da una caratterizzazione convenzionale basata su simboli o schematizzazioni, ad una scala di riferimento compresa tra 1:200 e 1:100; i modelli architettonici, invece, vengono realizzati con un approfondimento della rappresentazione e della tematizzazione utilizzando una scala del modello compresa tra 1:50 e 1:1. È ormai un procedimento consolidato nella rappresentazione integrata associare ai modelli geometrici le elaborazioni derivanti direttamente dai processi di fotomodellazione, attraverso l'impiego di ortofoto, che rappresentano in maniera molto più coerente e oggettiva le superfici da trattare. Se da una parte, infatti, la nuvola di punti tridimensionale svolge l'importante compito di connettere tra loro dati e informazioni di natura eterogenea per fornire l'immagine generale del manufatto, dall'altra, la sintesi grafica, demandata a piante, prospetti e sezioni, consente di schematizzare le informazioni raccolte per darne letture tematiche focalizzate sulla comunicazione di aspetti specifici dell'oggetto (Fig. 4).

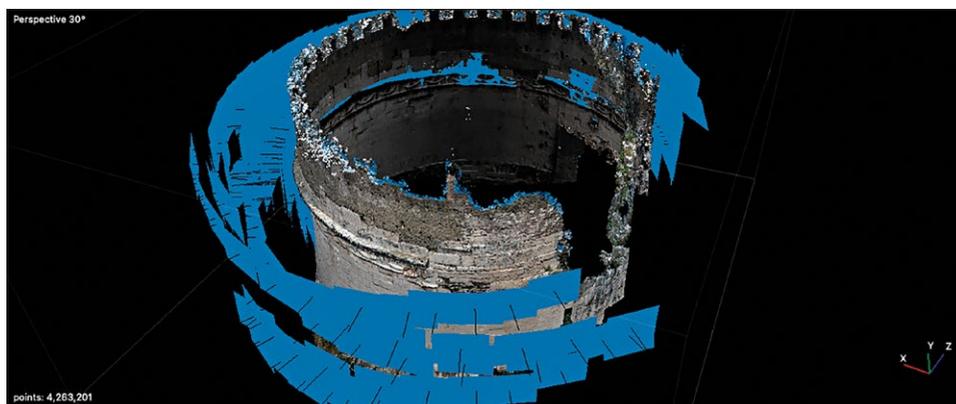


Fig. 5 – Elaborazione in SfM del Mausoleo.

## *2.2 Acquisizione ed elaborazione dei dati mediante processi fotogrammetrici*

Per risolvere le inevitabili problematiche legate all'incompletezza del dato, dovute allo sviluppo verticale della tomba di Cecilia Metella, che si manifestano con forte rumorosità nelle zone superiori al cornicione circolare aggettante, ma anche nelle zone posteriori rispetto alla via Appia, difficilmente raggiungibili da terra, si è deciso di attuare un rilievo tramite sistemi di acquisizione per SfM. In tale contesto si è stabilito di impiegare processi di SfM tramite l'utilizzo di SAPR<sup>1</sup>, anche per risolvere il problema legato alla staticità del set di acquisizione imposta dal laser scanner: la fotocamera del drone, utilizzata come strumento di acquisizione dati, permette infatti una notevole versatilità nell'organizzazione della campagna di rilievo (REMONDINO 2003). La possibilità di variare agevolmente quota e posizione, la facilità d'uso e la versatilità del mezzo rendono il rilievo da drone il giusto compromesso tra economia, precisione e densità dei punti per la generazione di modelli digitali 3D finalizzati alla documentazione, ma anche alla fruizione virtuale (PECCI *et al.* 2015). Le immagini fotografiche così acquisite sono state elaborate attraverso un software di computazione fotogrammetrica (Agisoft Metashape) che permette di orientare e di unire blocchi di foto attraverso il riconoscimento di punti omologhi dei fotogrammi, con una percentuale di sovrapposizione (overlapping), generalmente non inferiore al 60%.

<sup>1</sup> È stato impiegato un drone DJI (modello Mavic Air 2), quadricottero dal peso di 570 g, dotato di sensore GPS-GLONASS per determinare la posizione e l'assetto in volo. Sul velivolo è montata una fotocamera di serie dotata di sensore di 1/2,3" CMOS, da 48 Megapixel effettivi; obiettivo 35 mm, equivalente a 24 mm, con apertura focale di 2.8 che consente di ottenere foto della dimensione di 4000x3000 (4:3) e video 4k 60 e Full HD.



Fig. 6 – Ortoimmagine di dettaglio del fregio del Mausoleo.

Per l'intero Mausoleo sono stati acquisiti circa 900 scatti, distribuiti uniformemente lungo il tamburo circolare, procedendo dalla via Appia sino ai fronti interni, soffermandosi sui dettagli decorativi e sulle proiezioni orizzontali sommitali del cilindro cavo (Fig. 5). La procedura di generazione del modello 3D, a partire dall'acquisizione del materiale fotografico, è stata condotta in maniera semi-automatica; le fotografie, infatti, sono state elaborate per ottenere dati colore, integrati successivamente con i dati metrici acquisiti tramite laser scanner (LAMBERS *et al.* 2007). Per l'orientamento dei fotogrammi sono stati fatti collimare manualmente alcuni punti noti della struttura cilindrica con le coordinate ottenute a partire dalla nuvola di punti generata dal rilievo laser scanner.

Dopo le preliminari procedure di editing per l'eliminazione del dato superfluo e del rumore, la nuvola di punti densa ottenuta viene caratterizzata da un'immagine più definita dell'oggetto che, attraverso operazioni di meshing, restituisce immagini realistiche, fino al risultato finale del modello composto da facce poligonali, raffinato e topologicamente corretto. Il modello numerico trasformato in modello di superfici è poi texturizzato per raggiungere un'accuratezza anche dal punto di vista del dato colore. La costruzione dei modelli digitali 2D e 3D, come visto, è basata su un sistema complesso di integrazione di tecniche fotogrammetriche multimmagine, in quota e da terra, con laser scanning. Per l'orientamento dei fotogrammi, infatti, alcuni punti noti del Mausoleo sono stati fatti collimare manualmente con le coordinate ottenute dalla nuvola di punti generata a partire dal rilievo laser scanner. I dati ottenuti dall'elaborazione sono stati poi utilizzati per la creazione di ortofoto di precisione per lo studio delle apparecchiature murarie e per i particolari

decorativi (Fig. 6). Le ortofoto vanno intese come un sistema di riferimento piano, generate mediante proiezioni ortogonali dell'oggetto studiato su un piano, sulle quali compiere operazioni di misurazione e restituzione in scala.

C.I.

### 3. ANALISI COMPARATA DELLA DOCUMENTAZIONE GRAFICA E ICONOGRAFICA

La prosperità delle testimonianze grafiche aventi come soggetto il Mausoleo di Cecilia Metella, equiparabili con pochi altri monumenti presenti lungo l'Appia Antica come il cd. Ninfeo di Egeria o la chiesa di Sant'Urbano, si devono principalmente a tre fattori: le dimensioni monumentali del sepolcro, che ne hanno sicuramente scoraggiato la distruzione nel corso dei secoli; l'ottimo stato di conservazione, che ne ha permesso un'agevole lettura e riproduzione grafica da parte degli artisti; la posizione strategica, poiché essendo collocato sulla strada che portava a Roma costituiva un'inevitabile tappa fissa per i viaggiatori che si fossero incamminati verso la città eterna.

Da un punto di vista metodologico è possibile suddividere e classificare queste testimonianze grafiche secondo alcune macrocategorie, sulla base dell'annuncio esposto già da PARIS e RAUSA (2004, 16-17) che vede una divisione formata da: 1) disegni di fantasia; 2) disegni architettonici e di ricostruzione; 3) vedute. A queste tre categorie si ritiene utile aggiungerne una quarta che riguarda gli elaborati propriamente di "rilievo", ovvero elaborati grafici ben distinti e distinguibili da quelli che potrebbero essere genericamente classificati come "disegni architettonici".

Tenendo presente il clima concitato che durante il Rinascimento doveva investire qualunque manufatto che riconducesse al mondo antico, non è raro assistere all'uso della fantasia più sfrenata pur di riuscire a colmare le lacune inerenti all'antichità classica. In letteratura basti pensare alla disinvoltura con cui venne ricondotta la Tomba di Cecilia Metella ad una menzione di Cicerone (CIC., *Tusc.*, I, 13) inerente ad un sepolcro dei Metelli, quando in realtà quest'ultimo è riferibile ad una tomba della *gens Caecilia* (PAPI 1999), poiché non va tralasciato il dettaglio che nel momento in cui Cecilia sposò Crasso entrò a far parte della *gens Licinia*. Da un punto di vista artistico è sintomatico il modo in cui tali premesse culturali possano aver influenzato tanto l'incisione di Andrea Mantegna per una scena, mai realizzata, per il ciclo pittorico dei cd. Trionfi di Cesare (MARTINDALE 1980, figg. 60, 65), quanto i disegni di Giovan Battista Montano, al quale si deve peraltro il merito di essere stato il primo a tentare di rappresentare in dettaglio i caratteri del fregio figurato del Mausoleo (Fig. 7).

L'architetto milanese rappresenta il complesso architettonico distaccandosi quasi del tutto dalla realtà archeologica per inoltrarsi in una rappresentazione fantasiosa del Mausoleo con una personale ricostruzione immaginaria, in cui colloca alcune statue monumentali sull'alto podio e ricostruisce la copertura

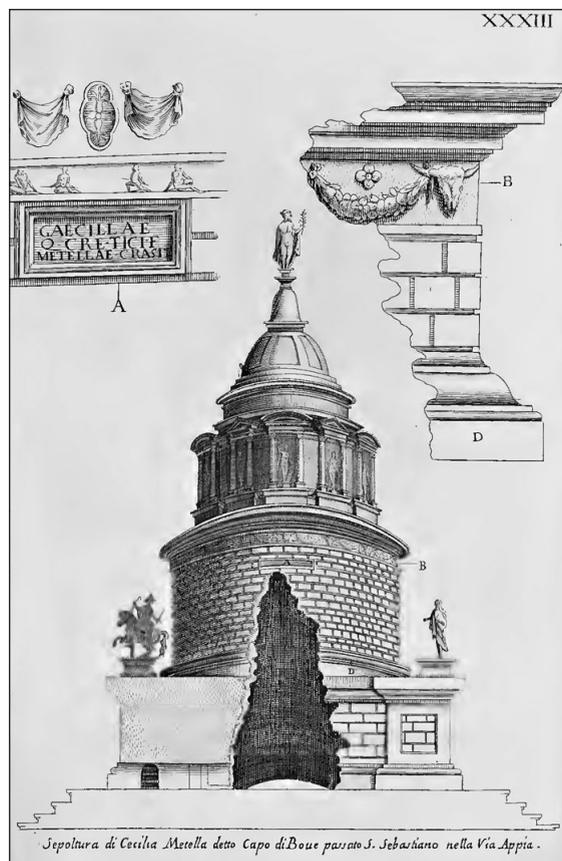


Fig. 7 – Ipotesi ricostruttiva del monumento a cura di Giovanni Battista Montano (MONTANO 1691).

sotto forma di cupola sormontata da una grandiosa Minerva portatrice di ulivo, la quale si imposta su un tamburo impaginato secondo un lessico riconducibile ai motivi decorativi interni del Pantheon, ovvero tramite l'alternanza di edicole con timpani triangolari-semicircolari che ospitano delle statue (MONTANO 1691, fig. 33). Nel Rinascimento il processo del rilievo, diversamente dall'epoca attuale, viene utilizzato dagli architetti come mezzo per «conoscere le regole sottese alla costruzione dell'edificio antico, regole delle quali, pur mantenendo un alto grado di libertà tecnico-costruttiva, usufruivano per risolvere i problemi edilizi del tempo» (DOCCI, MAESTRI 1993, 63).

Pertanto, a partire dal XV secolo si assiste alla realizzazione di opere architettoniche moderne progettate e concepite grazie al rilievo degli edifici

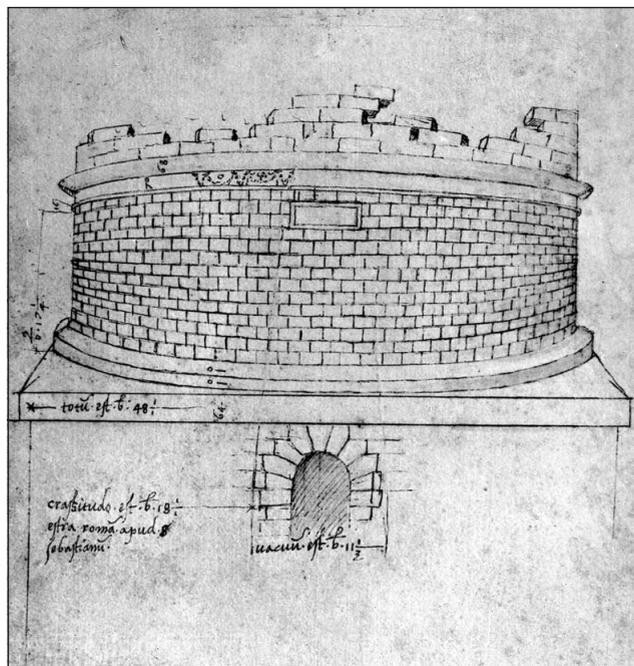


Fig. 8 – Bernardo Della Volpaia (attr.), rappresentazione del monumento in vista pseudo prospettica contenuta nel Codex Coner, 1513-1515 (photo © Sir John Soane's Museum, London; <http://collections.soane.org/prints/item-print?id=THES83868>; novembre 2021).

antichi, poiché presi come modelli stilistici da cui attingere sia per soluzioni statico-costruttive che artistico-formali, contestualmente allo studio e all'interpretazione del testo vitruviano. Sono noti, infatti, gli studi sui monumenti antichi di artisti come Piero della Francesca, Francesco di Giorgio Martini o Domenico Corradi detto il Ghirlandaio, in prima istanza condotti in maniera quasi empirica, con rilievi acquisiti spesso a vista (BELLOSI *et al.* 2000, 468) e riportati su carta mediante schemi lineari e spesso privi di quote, per poi evolversi negli anni seguenti in modo da definire modalità operative decisamente più organiche. Nella seconda metà del XVI secolo viene realizzato il primo rilievo noto del Mausoleo di Cecilia Metella, ad opera di Giovanni Colonna da Tivoli e pubblicato nel *Cod. Vat. Lat. 7721*, 78v. Il disegno, realizzato su un foglio precedentemente impiegato per riportare informazioni grafiche inerenti a un edificio a pianta circolare in pianta e sezione, raffigura l'eidotipo quotato e glossato del profilo del Mausoleo da cielo a terra, un ingrandimento del profilo delle modanature del fregio, uno schizzo di un bucranio con festone e la panoplia composta da due scudi, un elmo con pennacchi ed una clamide romana.

Un disegno a metà strada, per la nostra classificazione, tra un disegno propriamente di rilievo ed uno architettonico è quello attribuito a Bernardo Della Volpaia, contenuto nel *Codex Coner* e datato tra il 1513 e il 1515, in cui il Mausoleo viene riprodotto con una vista pseudo-prospettica, le cui proporzioni sono vicine a quelle reali, corredata da quote e notazioni. Il fregio e l'epigrafe vengono lasciati in bianco, ad eccezione di una piccola porzione subito in alto a sinistra della lastra, che dovrebbe includere il testo, che contiene l'appunto di tre bucrani e due festoni (Fig. 8).

Entrando nel merito dei disegni architettonici e di ricostruzione, la più antica testimonianza grafica riguardante il Mausoleo di Cecilia Metella ci è nota grazie al disegno 33r contenuto nel *Codex Escorialensis*, attribuito un tempo a Domenico Ghirlandaio (e alla sua bottega) e datato al 1491 (HÜLSEN 1910), mentre recenti studi ne assegnano la paternità a Filippo Lippi (NESSELRATH 1996; SCALZO 2020). L'autore descrive graficamente il prospetto S-O, ovvero il lato principale prospettante sulla via Appia, presentando una ricostruzione incompleta del Mausoleo, come se avesse l'intenzione di far coesistere elementi verosimili con elementi di fantasia. Una prima osservazione di natura tecnica può essere avanzata nei confronti dei rapporti proporzionali in quanto appare evidente l'incongruenza del corpo cilindrico con il suo corrispettivo reale, poiché messo in opera con un rapporto di circa 1 a 2 e  $\frac{1}{2}$ , ma riprodotto graficamente con grande snellezza mediante un rapporto di circa 1:  $\frac{3}{4}$ .

Il rivestimento marmoreo trattato a bugnato, nella realtà liscio e tagliato uniformemente in conci quadrati, viene disegnato secondo uno schema alternato di bugne quadrate e rettangolari, la cui doppia linea perimetrale vuole dichiararne l'effetto a tre dimensioni. Il fregio, ritmato da bucrani collegati mediante festoni, viene completato semplicemente per simmetria, come anche la cornice contenente elementi decorativi militari estremamente schematizzati; infatti, si percepisce appena la presenza della clamide con l'elmo che troneggia su una figura umana giacente, alla sinistra della quale si accenna ad un'altra figura dalle forme umane, ma meno definita.

Nella seconda metà del XVI secolo Pirro Ligorio realizza una serie di disegni, tra cui quelli raccolti nel Libro XLIX dell'*Antichità* il cui contenuto è quasi esclusivamente dedicato ai monumenti sulla via Appia, con l'obiettivo di realizzare un testo enciclopedico, come si evince dal metodo applicativo con cui l'autore organizza i dati in suo possesso sui costumi funerari romani (RAUSA, MADONNA 1997). Il disegno contenuto nel foglio 67 rappresenta una veduta ricostruttiva del monumento in cui il basamento viene munito di un bugnato rustico, il trofeo di armi viene completato per simmetria, ma riprodotto in dimensione fuori scala poiché occupa circa un terzo dell'altezza del tamburo circolare e viene inoltre rappresentata una copertura a cupola formata da anelli concentrici e impostata su una cornice modanata. Nell'insieme

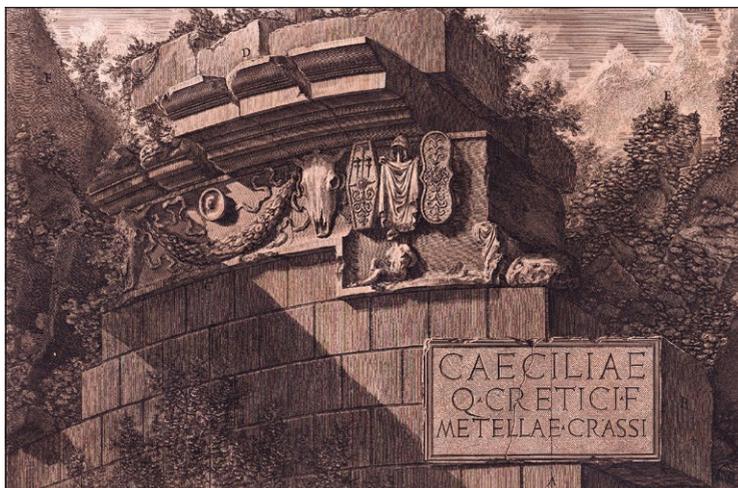


Fig. 9 – Rappresentazione di dettaglio del fregio di Cecilia Metella a cura di Piranesi (PIRANESI 1756).

Ligorio forza la proiezione ortogonale con l'obiettivo di posizionare le insegne militari e l'epigrafe in mezzzeria facendo assumere al monumento proporzioni decisamente slanciate, ma più credibili rispetto al *Codex Escurialensis*.

Nel 1756 Giambattista Piranesi pubblica «in Roma nella stamperia di Angelo Rotilj, nel Palazzo de' Massimi» la sua raccolta di antichità romane, tra cui figura la Tomba di Cecilia Metella (PIRANESI 1756). Nelle tavole edite include una pianta, un prospetto, una sezione trasversale, una serie di dettagli costruttivi e decorativi, una veduta di insieme e si spinge ad ipotizzare il «Modo col quale furono alzati i grossi Travertini, e gli altri Marmi nel fabbricare il gran Sepolcro di Cecilia Metella, oggi detto Capo di Bove» e formula riflessioni «Sopra lo Stromento detto Ulivella, trovato da Brunellesco, et usato oggigiorno, il quale comunemente credesi che sia quello, che ci viene accennato da Vitruvio sotto il nome di Forfice, o Tanaglia». Nella tavola L della sua opera il maestro veneto rappresenta, con dovizia di dettaglio, il fregio e le armi del monumento che così descrive: «[...] Architrave fregiato di marmo, in cui sonovi scolpiti in basso rilievo de' Teschi di bove, che sostengono de' Festoni composti di varie frondi, e frutti con delle Patere negli Spazi Sopra de' Festoni medesimi disposte. Vedesi ancora un Trofeo innalzato con sotto uno schiavo, legato ad un tronco, e poco distante l'avanzo di una Figura rappresentante forse una Vittoria. Notasi in questo Architrave, che l'Orlo inferiore verso il mezzo licenziosamente discende fino alla linea del primo Corso di Travertini. La qual licenza contraria alle buone regole da moderni più accreditati Architetti è stata imitata, come fosse una grazia

dell'Architettura, e come tale oggi giorno ciecamente si usa non solo nelle private Fabbriche, ma ancora nei più sontuosi pubblici Edifizj».

Nonostante la chiara fama dell'autore già all'epoca della pubblicazione e la qualità indiscussa delle rappresentazioni pubblicate, riconducibili sia a disegni architettonici, sia a vedute evocative – quasi romantiche – del monumento, le normali difficoltà logistiche riscontrabili durante il confronto con un manufatto di grandi dimensioni hanno determinato che l'autore pubblicasse delle rappresentazioni del fregio inesatte da un punto di vista formale (Fig. 9). Per quasi un secolo e mezzo si trasmisero dunque solamente copie ed elaborazioni basate sull'opera piranesiana, tant'è che i disegni del Mausoleo di Cecilia vennero riprodotti fedelmente da Jean-Arnould Lèveil (GAILHABAUD 1852) e da Luigi Canina (CANINA 1842), i quali riportarono nelle loro pubblicazioni tutte le imprecisioni del disegno originale. Nel 1549 Antoine Lafréry pubblicò un'illustrazione del Mausoleo intitolata *Ad Metellae echo Creticus hic natam Crassus humasse iugalem fertur et hinc questus congeminare locum*, incisa da Hendrick van Schoel e raccolta circa trent'anni dopo in un *corpus* dedicato alle magnificenze di Roma (LAFRÉRY 1574). Anche in questo caso l'autore si adoperava per integrare l'immagine e completa graficamente sia la parte antica sia la sopraelevazione medievale, postulando che nella prima metà del XVI secolo quelle parti fossero ancora nella posizione rappresentata.

S.L.

#### 4. PRIMI RISULTATI E OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Dal punto di vista degli studi storici è di notevole interesse il rapporto grafico e dimensionale tra gli elaborati desunti dalle fonti archivistiche e quelli ricavati dalle elaborazioni digitali (Fig. 10). Per quanto riguarda la precisione delle acquisizioni, nonostante le difficoltà logistiche legate alla natura eterogenea del sito di studio, l'utilizzo integrato di tecnologie laser scanner e fotogrammetria aerea, coadiuvata da una puntuale ricerca storica, ha condotto a risultati che, seppur ancora in fase di completamento, sono di elevata rigosità scientifica.

Una delle analisi più immediate condotte, anche se ancora parzialmente, sui modelli digitali è la comparazione sulla rappresentazione dei paramenti murari, per i quali i modelli 2D da ortofoto rappresentano una oggettiva cristallizzazione dello stato di fatto, non solo dal punto di vista costruttivo e geometrico-proporzionale, ma anche dal punto di vista dello stato manutentivo e del degrado per eventuali futuri interventi di consolidamento. Dalla documentazione storica risulta infatti evidente come il tema della muratura sia stato trattato nel tempo in maniera eterogenea, ma prevalentemente con uno sguardo meno critico – almeno dal punto di vista della “pelle” architettonica – rispetto alla sensibilità moderna.

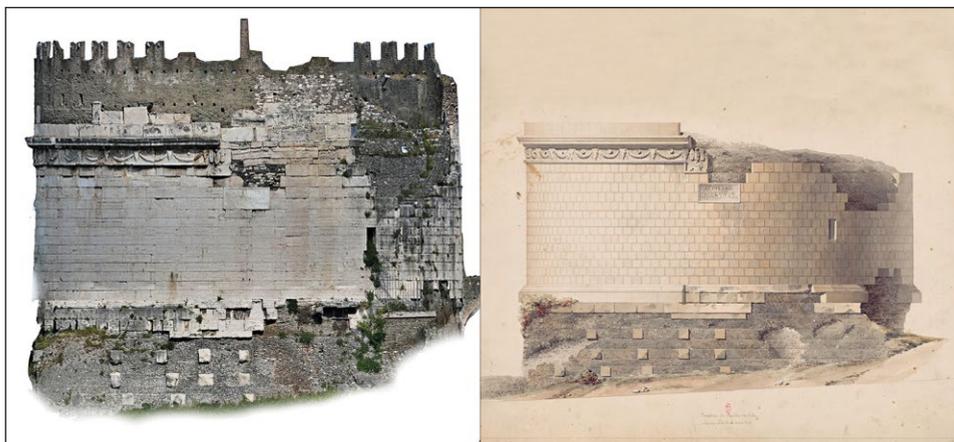


Fig. 10 – Analisi comparativa. Ortoimmagine desunta da processi fotogrammetrici (a sinistra). Tavola di Henri Labrouste, 1848 (a destra).

Bernardo della Volpaia sintetizza nelle sue linee essenziali i filari lapidei del Mausoleo con lo scopo di rappresentare un modello a metà strada tra un eidotipo e un modello di studio; Piranesi realizza delle rappresentazioni più orientate al mondo della pittura, utilizzando la vegetazione e il “degrado” come elementi romantici per arricchire e abbellire il disegno. Labrouste invece disegna una versione del Mausoleo spogliata dalle superfetazioni di epoche successive, senza proporre contestualmente un completamento ideale, ma “restaurando” pittoricamente le sole parti ancora in opera e fissando su carta un tamburo circolare lapideo i cui conci sembrano appena stati messi in opera.

Dall’analisi comparata tra le fonti storiche prese in considerazione e le prime elaborazioni ricavate dai dati di rilievo è possibile dunque sottolineare la sostanziale differenza tra il dato oggettivo e le rielaborazioni soggettive e storicizzate che sono giunte fino a noi. Le nuove frontiere in ambito tecnologico e il loro utilizzo integrato nel campo dei beni culturali permettono agli studiosi di avere a disposizione strumenti sempre più dettagliati e completi. Queste applicazioni multidisciplinari consentono di acquisire, in modo speditivo e conciso, la realtà fisica e spaziale di contesti archeologici anche molto complessi e stratificati come quello del Mausoleo di Cecilia Metella. I primi modelli ottenuti nello studio presentato permettono infatti di conferire un avanzato grado di oggettività alla rappresentazione rispetto a tutti gli elaborati classici relativi all’iconografia storica, che per loro natura non possono fornire. Ciò è di particolare rilevanza considerando che, come è noto, spesso le rappresentazioni del passato si basavano su elaborazioni prodotte su appunti presi da terzi, su “rilievi” condotti senza un metodo scientifico,

spesso basati sulle capacità grafico-pittoriche degli estensori e, ciò che li rende del tutto inattendibili, con la trasmissione di descrizioni. In questo contesto risulta chiara la possibilità, poi divenuta prassi almeno fino al XIX secolo, di perpetuare errori e imprecisioni nella rappresentazione.

Come si è già sottolineato, nell'intraprendere un percorso di conoscenza volto alla comprensione di un manufatto architettonico non esiste un metodo univoco e pertanto l'orientamento intellettuale che offra come risultato un grado elevato di coerenza e un'elevata rigorosità del dato finale si deve fondare su un approccio integrato e multidisciplinare. Ne risulta dunque che per validare una metodologia di ricerca sia necessario partire dai caposaldi della letteratura specialistica relativa e validare di volta in volta l'approccio e gli strumenti utilizzati, in funzione dell'oggetto e delle finalità dello studio. Un manufatto come quello di Cecilia Metella è senza dubbio un caso atipico se rapportato alla grande maggioranza dei contesti archeologici di cui, purtroppo, se ne conservano minime tracce in alzato e pertanto la lettura "architettonica", spesso, è inficiata da considerazioni soggettive.

C.I., S.L.

CARLO INGLESE, SIMONE LUCCHETTI

Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Sapienza Università di Roma  
carlo.inglese@uniroma1.it, simone.lucchetti@uniroma1.it

### *Ringraziamenti*

La ricerca sul Mausoleo di Cecilia Metella si svolge nell'ambito della tesi di Dottorato del dott. arch. Simone Lucchetti, il cui approfondimento è stato condotto collateralmente rispetto alla tematica principale incentrata sul *castrum Caetani*. Si ringrazia il prof. Alessandro Viscogliosi per aver promosso e indirizzato questo studio. Un doveroso ringraziamento va all'arch. Simone Quilici, direttore del Parco Archeologico dell'Appia Antica, che ha favorito lo studio e l'accesso al monumento. Si ringrazia inoltre tutto il personale del Parco per la collaborazione, specialmente il dott. Stefano Roascio e l'arch. Aura Picchione per aver agevolato le fasi di acquisizione. Ringraziamo in particolar modo Roberto Greco, per la disponibilità a farci accedere nella sua proprietà, per l'aiuto offerto e per l'interesse dimostrato nei confronti della ricerca. Si ringraziano inoltre l'arch. Giulia Catalani, l'arch. Antonio Mirandola e l'arch. Roberto Barni per il prezioso aiuto nella fase di acquisizione ed elaborazione dei dati.

### BIBLIOGRAFIA

- BELLOSI L., ROSSI A., PREVITALI G. (eds.) 2000, *G. Vasari, Le vite de' più eccellenti architetti, pittori, et scultori italiani, da Cimabue insino a' tempi nostri*, II voll., Torino, Einaudi.
- BERNARDINI F., RUSHMEIER H. 2002, *The 3D Model Acquisition Pipeline*, «Computer Graphics Forum», 21, 2, 149-172 (<https://doi.org/10.1111/1467-8659.00574>).
- BIANCHINI C. 2016, *Beyond communication: 3D heuristic models in architectural research. Al di là della comunicazione: modelli 3D euristici nello studio dell'architettura*, in M. BINI,

- S. BERTOCCI (eds.), *Le ragioni del disegno. The Reasons of Drawing. Atti del XXXVIII Convegno internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione - XIII Congresso della Unione Italiana del Disegno (Firenze 2016)*, Roma, Gangemi Editore, 115-130.
- CANINA L. 1842, *L'architettura antica, descritta e dimostrata coi monumenti*, IX, Roma (<https://doi.org/10.3931/e-rara-56794>).
- CENTOFANTI M., BRUSAPORCI S., LUCCHESI V. 2014, *Architectural heritage and 3D models*, in P. DI GIAMBERARDINO, D. IACOVIELLO, J.R. NATAL, R.S. TAVARES (eds.), *Computational Modeling of Objects Presented in Images*, Geneva, Springer, 31-49 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-04039-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04039-4_2)).
- DOCCI M. 2005, *Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente*, Roma, Gangemi Editore.
- DOCCI M., MAESTRI D. 1993, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Roma, Editori Laterza.
- DRUMANN W. 1844, *Geschichte Roms in seinem Übergang von der republikanischen zur monarchischen Verfassung oder Pompeius, Caesar, Cicero und ihre Zeitgenossen, nach Geschlechtern und mit genealogischen Tabellen*, II, Königsberg (<https://openlibrary.org/books/OL24592401M>).
- GAIANI M., BENEDETTI B., APOLLONIO F. 2011, *Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici*, «SCIRES-IT Scientific REsearch and Information Technology. Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione», 1, 2, 33-70.
- GAILHABAUD J. 1852, *Denkmäler der Baukunst*, I, Hamburg-Leipzig (<https://doi.org/10.11588/diglit.3500>).
- GAIANI M., BENEDETTI B., APOLLONIO F. 2011, *I. Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici*, «SCIRES-IT Scientific REsearch and Information Technology. Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione», 1, 2, 33-70.
- GALLETTI P. 1776, *Del Primicero della Santa Sede Apostolica e di altri uffiziali maggiori del Sacro Palagio Lateranense*, Roma ([https://archive.org/details/bub\\_gb\\_fU6SF24FjGUC](https://archive.org/details/bub_gb_fU6SF24FjGUC)).
- GERDING H. 2002, *The Tomb of Caecilia Metella. Tumulus, Tropaeum and Thymele*, Lund, Reproenheten, SLU Alnarp.
- HÜLSEN C. 1896, *Caecilia Metella*, «Neue Heidelberger Jahrbücher», 6, 50-58 (<https://doi.org/10.11588/diglit.29036.7>).
- HÜLSEN C. 1910, *Il libro di Giuliano da Sangallo. Codice Barberiniano Latino 4424*, II voll., Torino-Lipsia.
- IPPOLITO A., INGLESE C., ATTENNI M., RUSSO S. 2016, *Rilievo, misura e qualità. Questioni sul metodo*, in S. PARRINELLO, D. BESANA (eds.), REUSO 2016. *Contributi per la documentazione, conservazione e recupero del patrimonio architettonico e della tutela paesaggistica*, Firenze, Edifir, 32-41.
- LAFRÉRY A. 1574, *Speculum Romanae Magnificentiae*, Roma.
- LANCIANI R.A. 1913, *Storia degli scavi di Roma e notizie intorno le collezioni romane di antichità*, IV, Roma.
- LAMBERS K., EISENBEISS H., SAUERBIER M., KUPFERSCHMIDT D., GAISECKER T., SOTOODEH S., HANUSCH T. 2007, *Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchago Alto, Palpa, Peru*, «Journal of Archaeological Science», 34, 10, 1702-1712.
- MARTINDALE A. 1980, *Andrea Mantegna. I trionfi di Cesare nella collezione della regina d'Inghilterra ad Hampton Court*, Milano, Rusconi Immagini.
- MONTANO G.B. 1691, *Li cinque libri di architettura*, III.
- MÜNZER F. 1897, *Caecilii 87*, in *Realencyclopädie der Classischen Altertumswissenschaft*, III, 1, 1210-1212.
- NESSERLATH A. 1996, *Il "Codice Escorialense"*, in W. PRINZ, M. SEIDEL (eds.), *Domenico Ghirlandaio 1449-1494, Atti del Convegno Internazionale (Firenze 1994)*, Firenze, Centro Di, 175-198.

- NIBBY A. 1839, *Roma nell'anno MDCCCXXXVII*, Roma.
- NIBBY A. 1848, *Analisi storico-topografico-antiquaria della carta de' dintorni di Roma*, Roma.
- PAPI E. 1999, s.v. *Sepulcrum: A. Atilius Calatinus*, in *Lexicon Topographicum Urbis Romae*, IV, Roma, Quasar, 276.
- PARIS R., RAUSA F. 2004, s.v. *Caeciliae Metellae sepulcrum*, in *Lexicon Topographicum Urbis Romae - Suburbium*, II, Roma, Quasar, 9-19.
- PECCI A., SCAVONE M., MASINI N., SILEO M., DANTONIO A., MARZO C. 2015, *Tecnologie innovative per i Beni Culturali: i droni*, in *Atti del Congresso Internazionale sobre Documentación, Conservación y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico. La Experiencia del ReUSO (Valencia 2015)*, València, Editorial Universitat Politècnica de València, 586-593.
- PIRANESI G.B. 1756, *Le antichità romane opera di Giambatista Piranesi architetto veneziano, divisa in quattro tomi*, a cura di A. ROTILI, J. BARBAULT, G. ROSSI, III, Roma (<http://arachne.uni-koeln.de/books/Piranesi1756Vol3>).
- RAUSA F., MADONNA M.L. 1997, *Pirro Ligorio: tombe e mausolei dei romani*, Studi ligoriani 1. Roma, Edizioni Quasar.
- REMONDINO F. 2003, *From point cloud to surface: The modeling and visualization problem*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV-5/W10. *International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models (Tarasp-Vulpera, Switzerland 2003)*, 1-11 (<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004655782>).
- SCALZO M. 2020, *Giuliano e Francesco da Sangallo e la Pianta della Santa Sofia di Costantinopoli nel Codice Latino Barberiniano Vaticano*, «Firenze Architettura», 24, 72-77 (<https://doi.org/10.13128/FiA-11900>).
- TOMASSETTI G. 1885, *Della campagna romana nel Medioevo. Illustrazione delle vie Appia, Ardeatina, Aurelia, Cassia, Claudia, Flaminia*, Roma, Reale Società Romana di Storia patria.
- UGHELLI F. 1644, *Italia Sacra*, I, Roma.

## ABSTRACT

The paper presents the first results of the Cecilia Metella Project, at the 'Parco dell'Appia Antica'. The prominent monument is dedicated to the noble Roman woman, whose life can only be deduced from what can be read from the epigraph carved in marble. Although the monument is probably the most famous and characteristic one of the *regina viarum* near the city, even today the knowledge of the mausoleum – at least from the point of view of digital acquisition and analysis of the graphic documentation – appears incomplete and therefore deserves to be deepening. The new technological frontiers and their integrated use in the field of cultural heritage allow scholars to have more accurate and complete tools at their disposal. These multidisciplinary applications make it possible to acquire, in a rapid and quick way, the physical and spatial dimension of very complex and stratified archaeological contexts such as the mausoleum of Cecilia Metella. In this context, the richness of the graphic evidence of the mausoleum allowed for in-depth comparative analyses regarding the iconographical documentation and its relationship with the physical monument acquired with modern survey techniques. This study therefore aims to update the state of the art of the tomb and to define a methodological protocol for the acquisition and critical analysis of the monument.

LA GESTIONE DEI DATI  
DI SCAVO E ARCHITETTONICI



## COME NASCE UNA BASE GIS PER L'ARCHEOLOGIA OPENSOURCE, SVILUPPATA DA ARCHEOLOGI PER GLI ARCHEOLOGI: LO SCAVO DI POGGIO GRAMIGNANO, LUGNANO IN TEVERINA (TR)

### 1. BREVE STORIA DI PYARCHINIT DALLA NASCITA AD OGGI

Il progetto pyArchInit nasce nel 2005 a partire dalla tesi di laurea di Luca Mandolesi (MANDOLESI 2005) che affrontava, nell'ambito del progetto Carta Archeologica della Toscana (PELLICANÒ, SASSOLI 2001, 21), la costruzione di un database alfanumerico realizzato con Filemaker Pro (software proprietario della Claris per la realizzazione di database relazionali, <https://www.claris.com/it/filemaker/pro/>). Le sostanziali novità del metodo adottato in tale sede erano due: un approccio all'analisi dell'oggetto di schedatura "reperto" unico, non più suddiviso a priori in entità separate a seconda delle discipline già esistenti e tradotto in singole schede per tipo di reperto/epoca; una costruzione di script dedicati all'estrazione di statistiche e di dati di tipo trasversale. Tale lavoro presentava tre criticità: l'uso di software proprietario con licenze a pagamento, l'impossibilità di avere un collegamento in tempo reale con la base cartografica (GIS) e la totale impossibilità di riutilizzare lo scripting creato in un ambiente esterno al progetto.

Da queste premesse si iniziò a cercare la soluzione migliore per tradurre il prodotto in open source: la scelta cadde sul linguaggio di programmazione Python (<https://www.python.org/>), il geodatabase PostgreSQL (<https://www.postgresql.org/>) con l'estensione PostGIS, al quale si affiancò successivamente il database SQLITE con estensione Spatialite (<https://www.gaia-gis.it/>) e infine come software GIS fu scelto il progetto Quantum GIS, oggi QGIS (<https://www.QGIS.org/it/site/>), che in una seconda fase permise di integrare plugin scritti in Python. Il plugin nacque inizialmente come semplice scheda US (Unità Stratigrafica) e relativo geodatabase che, oltre a permettere di schedare e disegnare le US in pianta con relative quote, dava la possibilità di inserire ripartizioni spaziali, linee di riferimento, sezioni, sondaggi e altri dati utili alla costruzione di piante di fase, strutture, planimetrie generali<sup>1</sup>.

La prima versione stabile uscì nel 2009 e fu presentata all'ArcheoFOSS di quell'anno a Roma (MANDOLESI 2009a): nonostante fosse la prima piattaforma GIS open source che permetteva una interazione diretta tra Scheda US, GIS e Matrix, il plugin non riscosse un alto successo di download dal repository ufficiale di QGIS. Alcuni motivi furono la richiesta di una formazione di livello

<sup>1</sup> Il plugin è in costante evoluzione e per una descrizione dettagliata e aggiornata si rimanda alla documentazione ufficiale su <https://pyArchInit.org/>.

medio/alto nell'uso dei GIS e una buona base informatica per installazione e utilizzo, unitamente ad una preferenza da parte dei Dipartimenti nell'uso di soluzioni proprietarie sviluppate internamente.

Un miglioramento nella diffusione del plugin avvenne con l'apertura di pyArchInit al web tramite un repository Github dedicato (<https://github.com/pyarchinit/pyarchinit>), la nascita di una versione più semplice da installare, la pubblicazione di video su vari canali social (Facebook e Youtube prevalentemente). Seguì la nascita di una community e di un gruppo di sviluppo e una maggiore diffusione del plugin all'interno di lezioni legate all'informatica applicata all'archeologia in vari atenei italiani.

La maggior parte delle persone furono coinvolte come un "open team", dove ognuno dava il proprio contributo nella misura e modalità che preferiva. Alcune tesi di laurea portarono alla costruzione di nuove schede o all'espansione di schede già esistenti: Simona Gugnali creò il nuovo sistema di archeologia funeraria, Enzo Cocca un sistema per la gestione dell'archeozoologia e della statistica applicata ai dati, Manuela Battaglia sfruttò la scheda reperti per la schedatura della necropoli di Malignano (Sovicille, Siena) e per lo scavo dell'Università di Pavia presso Verucchio (RN), Michele Zappitelli offrì i dati per la scheda di Unità Topografica (UT).

Nel 2013 Enzo Cocca entrò a far parte del gruppo come sviluppatore stabile del progetto, che permise di accelerare il processo di ampliamento del codice. Nacquero o vennero migliorate tutte le schede per gestire reperti, periodi, fasi, strutture, topografia, oltre a creare le sezioni con routine dedicate a: statistica, sistema di disegno automatizzato delle piante di fase, strutture, di gestione della dimensione temporale, uno script esclusivo di pyArchInit. Nel 2014 nacque il media manager, una banca dati multimediale in grado di taggare le foto ed esportarle secondo categorie prestabilite. Intervenero successivamente nel processo di sviluppo di pyArchInit Roberto Montagnetti e Paolo Rosati, che organizzarono un primo convegno dedicato al progetto Una\_Quantum presso Tivoli (RM): da quell'evento ricco di spunti risultò chiaro che il plugin necessitava di una community solida, informale, dove ognuno poteva portare la propria esperienza fuori da vincoli accademici o lavorativi. Si decise di fondare l'associazione culturale Una\_Quantum Inc., che dal 2015 ad oggi ha promosso corsi di formazione, iniziative, eventi, che nel tempo sono andati a finanziare lo sviluppo del plugin. Prima fra tutte le modifiche finanziate dall'Una\_Quantum Inc. è stata la costruzione del sistema di traduzione del plugin in 3 lingue (inglese, tedesco, spagnolo) oltre all'italiano.

Altra fonte di sviluppo e finanziamento è arrivata da aziende private interessate al progetto: prima tra tutte l'azienda adArte Srl (di cui sono soci gli scriventi Mandolesi e Montagnetti) che finanzia costantemente lo sviluppo e il debug, mantenendo allineato il plugin con le ultime release di QGIS, dei

moduli Python e con le norme dettate nel caso italiano dal MIC (Ministero della Cultura) e dalle SABAP (Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio) competenti.

Una grossa problematica per il mantenimento del plugin si ebbe nel 2017/2018 con l'arrivo di Python 3.x che presentava incompatibilità con le versioni di pyArchInit realizzate in Python 2.x. Il finanziamento decisivo fu ottenuto tramite Fabio Faggella e Cooperativa Archeologia, che si interessò al plugin per integrarlo con l'applicazione per l'archeologia Archeo 3 (<https://www.archeo3.it/>): il finanziamento permise di portare pyArchInit da Python 2.X a Python 3, mantenendo la compatibilità con le nuove versioni di QGIS<sup>2</sup>.

### *1.1 Su cosa si basa pyArchInit*

PyArchInit attualmente è un sistema di gestione centralizzata di tutti i contesti archeologici, si basa sulle norme ICCD per la compilazione delle schede per la gestione di Carte Archeologiche, la documentazione di scavi archeologici e ricognizioni, sfruttando le caratteristiche del DBMS sviluppate per la Carta Archeologica della Toscana dal LIAAM del Dipartimento di archeologia e storia delle arti dell'Università di Siena (FRONZA, NARDINI, VALENTI 2009) e dal MODI ([http://www.iccd.beniculturali.it/it/ricercanormative/105/modi-modulo-informativo-4\\_00](http://www.iccd.beniculturali.it/it/ricercanormative/105/modi-modulo-informativo-4_00)) soprattutto per quanto riguarda il sistema di periodizzazione e categorizzazione delle strutture.

### *1.2 Come è strutturato nel suo complesso ad oggi lo sviluppo di pyArchInit*

Attualmente abbiamo deciso di fissare delle pietre miliari nello sviluppo del plugin per poter avere dei punti fissi a cui tornare in caso di problematiche oppure qualora le norme cambino. Restano sempre immutate tre sezioni: sezione dati alfanumerici, dati geografici/geometrici, dati multimediali. PyArchInit sostanzialmente è un'interfaccia di accesso ad un geodatabase in cui si lavora solo con tabelle già presenti per motivi di programmazione. Ha una versione "globale", ovvero dove tutti possono collegarsi in rete e una versione "locale", che altro non è che la versione locale del database "globale". I due database hanno la medesima struttura, in modo che si possa lavorare offline e riallineare il tutto online, senza tuttavia essere legati al web. Essere dentro all'ambiente GIS di QGIS permette di avere sempre aggiornati strumenti di geoprocessing, di elaborazione 3D, oltre a poter fruire di una community ampia e molto attiva. Ad oggi, vi sono infatti vari canali come mailing list dedicate, canali Telegram o gruppi Facebook per ricevere assistenza.

<sup>2</sup> Importanti contributi per la genesi e lo sviluppo di pyArchInit sono stati: FRANCOVICH 1990; GUIDI 1994; FRANCOVICH, VALENTI 2000; FRONZA 2000, 2003; NARDINI 2000; VALENTI 2000; MANDOLESI 2009a, 2009b; GUGNALI *et al.* 2012; MANDOLESI, COCCA 2013; COCCA 2014, 2015; MANDOLESI *et al.* 2021; MATTIVI *et al.* 2021.

Il progetto attualmente ha assunto una dimensione considerevole, sia per la parte di gestione del data entry di dati alfanumerici che geometrici. Per poter apprezzare al meglio il sistema e conoscerne le attuali novità, facciamo un rapido riassunto di come è strutturato e cosa contiene ad oggi pyArchInit. Le tabelle alfanumeriche sono attualmente divise in sezioni (Raccolta dati; Analisi stratigrafica; Archeologia funeraria; Archeologia sperimentale; Utility). In via di realizzazione è la sezione per l'archeologia dei paesaggi e per la redazione della Valutazione di Impatto Archeologico (VIARCH) e di Carte di Potenzialità Archeologica per il Piano Regolatore Generale Comunale (PRG), il Piano di sicurezza e coordinamento (PSC), il Piano Urbanistico Comunale (PUC), etc.

Ogni scheda – collegata ad una o più tabelle geometriche per disegnare su base GIS i dati geografici e a “view”<sup>3</sup> che permettono la realizzazione di query e piante composite tra dati alfanumerici e geometrici – contiene i seguenti campi:

– Sito: tabella per la schedatura di un sito, sia esso un luogo in cui viene realizzato uno scavo in estensione che un luogo che abbia una omogeneità spaziale e di definizione nel tempo. Possiede alcune funzioni come la creazione di Basi GIS e la generazione in automatico dei record nella scheda US.

– Unità Stratigrafica/Unità Stratigrafica Muraria: scheda che raccoglie tutte le US divise per sito, area e numero di US/USM. Oltre a tutti i campi specifici per redigere la scheda, contiene una serie di routine per creare piante di fase composite a partire dalle query sulla scheda tramite un link diretto con le geometrie, sistemi di analisi della successione stratigrafica, controllo automatizzato dell'integrità di inserimento dei rapporti stratigrafici, elaborazione del Matrix di Harris con periodizzazione già compilata, esportazione elenchi e schede in formato .pdf e formato testo. Presenta una routine elaborata appositamente per pyArchInit che, leggendo i rapporti stratigrafici, è in grado di creare un indice di successione stratigrafica per la gestione sia della componente temporale degli strati che della loro corretta sovrapposizione all'interno del GIS.

– Inventario Materiali (artificiali): scheda unica in cui è possibile modellare la raccolta dati di tutti gli oggetti di analisi di un contesto archeologico. È possibile quindi schedare da un singolo tipo di reperto (ad es. un reperto solo metallico) a reperti composti (pensiamo ai reperti multi-materiale come spilloni in bronzo, osso e ambra). Contiene una serie di routine per la generazione di grafici lineari. Attualmente non dispone di schede collegate per la schedatura di dati specifici, ovvero quella serie di attributi che fanno parte solo di una determinata tipologia di reperto.

<sup>3</sup> Nei geodatabase come PostgreSQL/Postgis o in SQLITE/Spatialite, si tratta di query di join (unione) tra due o più tabelle che sono istanziate nel momento in cui sono chiamate a lavorare. Questo permette di avere dati geometrici e alfanumerici uniti e di poter sfruttare query testuali per ottenere planimetrie composite e aggiornate in tempo reale.

- Campioni: contiene tutti i campioni raccolti sia da US e USM oppure prelevati da reperti per analisi di laboratorio.
- Strutture: descrive le singole strutture ed emette la sigla da inserire nelle schede US/USM per poter realizzare le piante composite su base GIS. È collegata ad un layer informativo in cui è possibile realizzare l'ipotesi bidimensionale della struttura.
- Periodizzazione: contiene le sigle di periodizzazione per sito/periodo/fase, una cronologia iniziale e finale assoluta numerica (per ora secondo il metodo di datazione “avanti Cristo” e “dopo Cristo” espressi con numeri negativi e positivi) e una generica datazione letterale. Possiede un codice di periodizzazione numerico univoco per permettere di realizzare su base GIS piante di fase composite. Possiede una routine che genera in automatico tutte le piante composite di tutte le periodizzazioni.
- Individui: scheda per la gestione di ogni singolo individuo rinvenuto in sepoltura.
- Tomba: attualmente si tratta di un ibrido tra una scheda tafonomica e di struttura ed è dedicata solamente alle tombe. È collegata al sito, struttura e individuo.
- Documentazione: permette la schedatura dei rilievi originali fatti sul campo, dai lucidi di scavo, alle ortofoto, punti presi con GNSS, stazione totale, o da 3D con Structure from Motion (SfM) o laser scanner. È collegata direttamente ai layer di disegno delle US e permette l'esportazione degli elenchi della documentazione e la ricostruzione su GIS dei dati originali digitalizzati a partire da quella fonte.
- Gestione immagini: sistema di memorizzazione dei percorsi delle immagini salvate su un hard disk locale o esterno, su un server o altro, con possibilità di taggare le immagini per US/USM, Reperti, Strutture, Tombe. Le immagini saranno così collegate direttamente con le schede e consultabili dalle singole interfacce.
- Esportazione immagini: sistema di esportazione in cartelle nominate delle immagini di un certo sito. Sfrutta il tag assegnato e ha una serie di suddivisioni preimpostate per velocizzare l'ordinamento dei file in directory e sub-directory.
- Esportazione .pdf: sistema per esportare in formato .pdf in un'unica soluzione un intero contesto suddiviso per singole tabelle e tipologie di formato: elenco o scheda.
- Download Excel: esportazione in formato Excel di tutte le schede di pyArchInit per poterle rielaborare in altri software che richiedono il foglio di calcolo.
- Time Manager: permette di interrogare lungo l'asse temporale la stratigrafia in modo relativo o assoluto: in maniera relativa sfrutta l'indice di sovrapposizione stratigrafica della Scheda US/USM e permettere uno “scavo” virtuale degli strati su base GIS avanti e indietro nel tempo; in maniera

assoluta, tramite una query per anno inizio e anno fine (secondo il metodo di datazione assoluto sopradescritto per la periodizzazione), è possibile creare piante di fase coeve tra più contesti di scavo appoggiandosi al codice di continuità periodo.

– Configurazione plugin: tutte le impostazioni del plugin per connessione, scelta di lavoro su singolo contesto, routine di pulizia o riallineamento database, importazione di database globali o locali, esportazioni per matrix, prodotti Lizmap.

– Thesaurus sigle: tabella che contiene i singoli lemmi del database collegati a vari campi nelle schede per la normalizzazione del linguaggio.

– Gestione database: sistema sperimentale per il backup del database.

– Info: pannello con i dati degli sviluppatori, la versione corrente.

PyArchInit possiede un potente ambiente di disegno 2D su base GIS, grazie alla sua integrazione in QGIS. Il geodatabase di pyArchInit è stato realizzato su misura per il lavoro sul campo e permette di gestire tutti i contesti in una soluzione unica: tutti gli scavi possono essere digitalizzati direttamente su un unico layer.

L.M.

## 2. DESCRIZIONE DELLE FINALITÀ DELLA RICERCA E DEL CONTESTO DI STUDIO: IL CASO DI POGGIO GRAMIGNANO

Il sito archeologico di Poggio Gramignano è situato a circa 6 km a SE del Comune di Lugnano in Teverina (Umbria, Italia) a 284 m s.l.m. L'insediamento è collocato lungo il declivio NO della collina di Poggio Gramignano, a circa 2,5 km di distanza dalla riva O del fiume Tevere.

Poggio Gramignano è oggetto di uno scavo ancora in progress, iniziato nel 2016 e frutto di una collaborazione tra Soprintendenza dell'Umbria, University of Arizona, Yale University, Stanford University e Comune di Lugnano in Teverina, che ha proseguito il lavoro avviato sul sito a partire dalla metà degli anni '80. I primi scavi furono condotti, infatti, dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Umbria fra il 1982 e il 1984 e proseguiti, tra il 1988 e il 1992, dagli archeologi dell'Università dell'Arizona, sotto la direzione scientifica del Prof. David Soren.

Le indagini finora condotte hanno portato alla luce i resti dei principali ambienti abitativi della *pars urbana* di una villa rustica di epoca romana, così come di altri spazi adibiti a deposito ubicati sul lato SO dell'insediamento (Fig. 1). Nello specifico, dai dati emersi fino a questo momento, è stato possibile riconoscere differenti periodi di vita del sito.

Il primo, inquadrabile in età pre-romana, è caratterizzato dal ritrovamento di evidenze archeologiche che hanno restituito numerosi frammenti di ceramica buccheroides e d'impasto databili al VII-VI secolo a.C. Tali evidenze

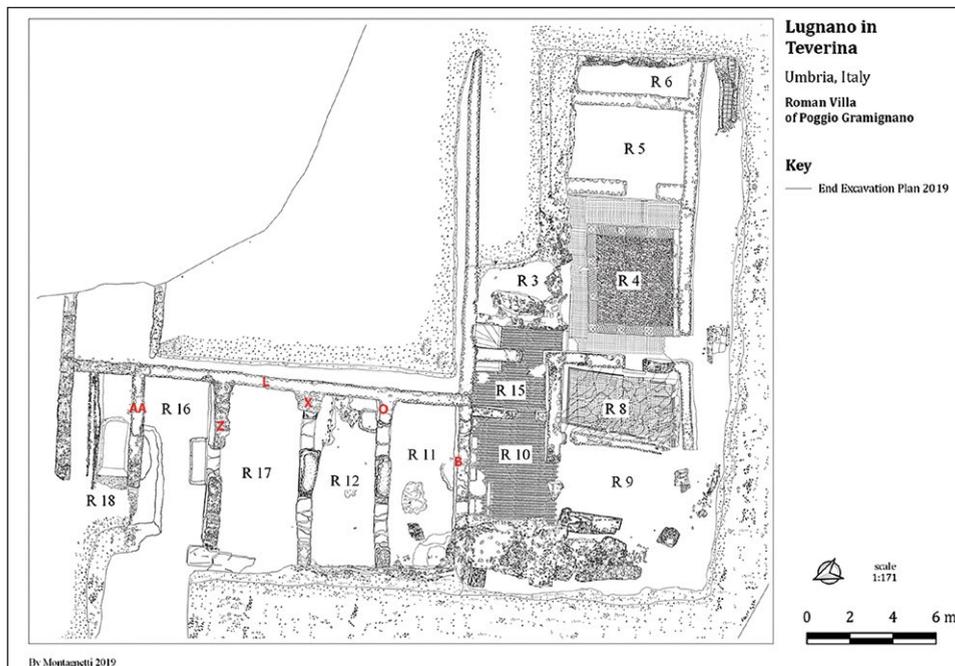


Fig. 1 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Pianta di “Fine scavo” (R. Montagnetti 2019).

risultano poi troncate da uno dei muri della villa di epoca romana il cui primo impianto sembrerebbe risalire alla metà del I secolo a.C. Questa prima fase edilizia del complesso architettonico è caratterizzata dall'uso della tecnica dell'*opus incertum*, dall'*opus reticulatum* e dalla decorazione parietale di alcune delle stanze messe in luce costituita da pitture riconducibili alle fasi IIa e IIb del secondo stile pompeiano.

In un secondo momento, inquadrabile in età flavio-adrianea, vengono eseguiti alcuni restauri ed abbellimenti nella *pars urbana*, testimoniati dall'uso dell'*opus mixtum* su alcune delle murature ancora *in situ* e dell'*opus spicatum* dei pavimenti. Ulteriori interventi messi in atto in questo periodo sono degli ampliamenti atti a creare dei magazzini nell'angolo SO dell'insediamento. In seguito, o già durante questi interventi, si registrano però segni di cedimento delle strutture dovuti a fenomeni di dissesto geologico.

A tutto ciò si cercò di porre rimedio con importanti interventi strutturali, mirati a stabilizzare e rafforzare le murature dell'angolo SO della villa, per contrastare la spinta del terreno. Si tratta di muri in laterizi o contrafforti, posti di fianco a strutture precedenti. Queste attività si inquadrano probabilmente intorno alla metà del II secolo d.C., come suggerito dai bolli laterizi

rinvenuti nei successivi riempimenti e presumibilmente derivanti dai crolli delle strutture di questa fase di rinnovamento. Tale sforzo, infatti, evidentemente non fu sufficiente a contrastare il persistere dei cedimenti e questo settore fu abbandonato. A questo seguì un primo momento di accumulo naturale sui pavimenti, in cui i materiali si datano agli inizi del III secolo d.C.

Forse proprio per le distruzioni arrecate da tali fenomeni naturali, tale settore SO del sito fu scelto per l'installazione del cimitero infantile alla metà del V secolo d.C. circa. Quest'ultimo è costituito da semplici inumazioni nella terra, sepolture in anfora e tombe a cappuccina ospitanti l'inumazione di individui di età prenatale e perinatale morti probabilmente a causa di malaria<sup>4</sup>.

Il proseguimento delle ricerche sul sito di Poggio Gramignano ha quale obiettivo quello di comprendere in maniera più accurata l'evoluzione storica dell'insediamento nel corso dei secoli e i suoi limiti topografici, ma soprattutto quello di portare a termine lo scavo del cimitero infantile e capire se effettivamente la sua installazione e il suo sviluppo possano essere correlati allo scoppio di un'epidemia di malaria. A tale scopo, in concomitanza alle ricerche sul campo, sono state effettuate in laboratorio una serie di analisi genetiche (DNA) e paleonutrizionali, ancora in corso d'opera, su alcuni campioni ossei provenienti dagli individui rinvenuti durante gli scavi. Si auspica che queste analisi possano fornire nuovi dati necessari a definire più precisamente le cause e le modalità di sviluppo del cimitero infantile di Poggio Gramignano e in generale la ricostruzione della storia del sito, permettendo di avere una conoscenza più approfondita sullo stile di vita, sul tipo di ambiente e sull'origine etnica degli antichi abitanti di questo territorio nel V secolo d.C. (MONTAGNETTI *et al.* 2020).

R.M., D.G.P.

### 3. L'USO DI PYARCHINIT NELLA METODOLOGIA D'INDAGINE DEL SITO DI POGGIO GRAMIGNANO E LA SUA INTEGRAZIONE CON LE ALTRE TECNOLOGIE DIGITALI AL SERVIZIO DELL'ARCHEOLOGIA

Lo scavo è condotto con metodo stratigrafico registrando e catalogando ogni azione riscontrata nel terreno sin dal piano di campagna (HARRIS 1979). Per la gestione dei dati di scavo si ricorre all'utilizzo del GIS attraverso il software open source QGIS. All'interno della piattaforma creata è confluita tutta la documentazione elaborata nel corso delle varie campagne di scavo precedenti e quella delle missioni ancora in corso, costituita dai rilievi in scala dei vari strati e delle emergenze architettoniche rinvenute, dalle principali

<sup>4</sup> Tale messa in fase del sito è ancora del tutto preliminare e dovrà essere confermata dal proseguimento delle ricerche sul sito.

schede di documentazione archeologica utilizzate nei cantieri di scavo e dalla documentazione fotografica prodotta nel corso delle indagini.

Nello specifico, tutta la mole dei dati prodotti durante le indagini archeologiche viene gestita all'interno della piattaforma dello scavo attraverso pyArchInit (MANDOLESI 2009a); tale soluzione è infatti l'unica a garantire una serie di praticità che al momento non si ritrovano in altri strumenti di questo tipo e che consistono in:

- mettere a disposizione dell'utente tutto ciò che serve per la documentazione di uno scavo archeologico, ovvero una serie interattiva di layer vettoriali e di tabelle, immagazzinati all'interno di un geodatabase, in cui far confluire l'enorme e diversa quantità di dati elaborati nel corso delle ricerche;
- una serie di tool predisposti dal plugin che permettono di automatizzare molte delle operazioni che si svolgono nel corso dell'elaborazione dei dati archeologici (elaborazione delle piante di scavo, piante di fase, redazione del matrix di Harris e delle schede e altro ancora), consentendo, in qualsiasi momento, il controllo sull'integrità del dato e la validità dell'output e abbattendo notevolmente, in questo modo, i tempi di lavoro;
- realizzare automaticamente delle "view", ovvero delle tabelle virtuali che fondono in sé dati provenienti dalle varie schede, costituendo così un ponte tra i dati alfanumerici e quelli cartografici, velocizzando le operazioni di analisi e di geoprocessing e agevolando l'interpretazione stessa dei dati elaborati;
- possibilità, infine, di avere più gestori per il singolo database spaziale, consentendo di dividere il lavoro di elaborazione fra vari operatori impiegati nello scavo o condividerlo con altri collaboratori al progetto. Quest'ultima cosa si è rivelata di particolare importanza in un progetto internazionale come questo di Poggio Gramignano che vede diverse università e specialisti provenienti da differenti paesi del mondo collaborare insieme.

In cantiere, per quanto riguarda il rilievo delle varie evidenze archeologiche vengono utilizzati in maniera alternata e talvolta combinata due diversi sistemi: uno manuale, condotto con le tecniche tradizionali del rilievo diretto effettuato con misurazioni tramite triangolazione o coltellazione e l'altro digitale, condotto con le tecniche della computer vision basate sugli algoritmi di SfM.

In entrambi i casi il rilievo fa affidamento su alcuni chiodi piantati a terra o alla sommità delle rovine ancora *in situ* per tutta l'area di indagine che sono stati battuti preventivamente con il GNSS. La posizione di tali chiodi viene ricontrollata ogni anno all'inizio della nuova stagione di scavo. Il loro numero inoltre viene implementato di pari passo all'avanzamento dello scavo in modo da avere una copertura sempre aggiornata e regolare di tutta l'area di indagine. Tali chiodi vengono dunque usati sia come origine per la triangolazione delle varie evidenze archeologiche nel rilievo manuale sia come Ground Control Point (GCP) durante l'acquisizione fotogrammetrica.



Fig. 2 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Pianta di “Inizio scavo” (R. Montagnetti 2019).

Per quanto riguarda il rilievo manuale delle varie US/USM, esso prevede, come prima procedura, la composizione di una “Pianta d’inizio scavo” in scala 1:20 (Fig. 2), realizzata utilizzando lo strumento “Editor mappe” di QGIS dopo aver georiferito l’area di scavo tramite il plugin georeferenziatore fornito dal software stesso. Per la realizzazione delle piante di inizio scavo si utilizza in genere il rilievo della pianta di fine scavo dell’ultima campagna effettuata. A tale pianta viene aggiunto il posizionamento dei chiodi fissi preventivamente dislocati all’interno dell’area di indagine (GCP) e il reticolo geografico sotto forma di una griglia larga 2 secondi di grado, in simbolo di croce, capace di scandire uno spazio di 2 m<sup>2</sup> (target topografici). L’inserimento del reticolo geografico, sotto forma di croce, serve principalmente ad aumentare l’accuratezza della georeferenziazione dei vari disegni manuali, garantendo sempre un numero adeguato di GCP e una distribuzione più regolare possibile degli stessi. Per ogni vertice della griglia vengono etichettate le corrispettive coordinate geografiche, così come per i punti che rappresentano i chiodi piantati su tutta l’area di scavo (GCP) per il rilievo manuale delle evidenze archeologiche.

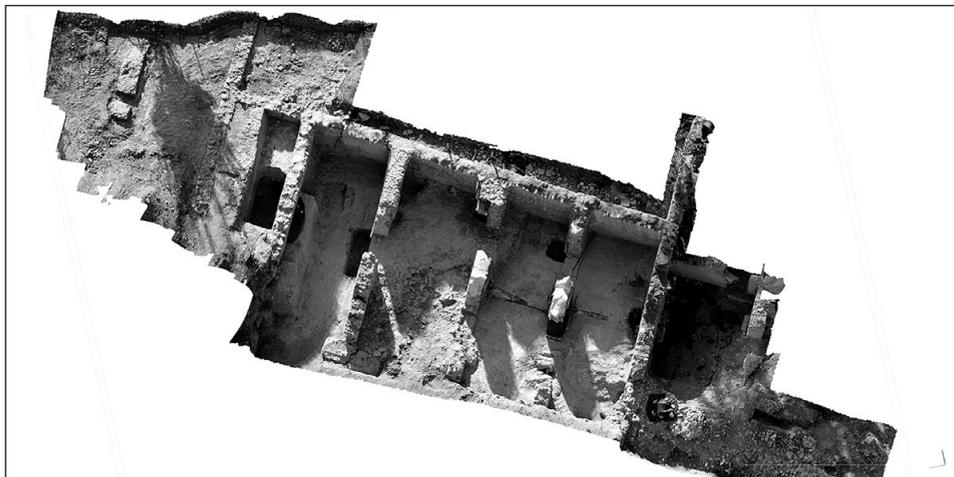


Fig. 3 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Modello 3D ottenuto in seguito ad un rilievo aerofotogrammetrico dell'area di scavo attraverso l'utilizzo del drone (R. Montagnetti 2019).

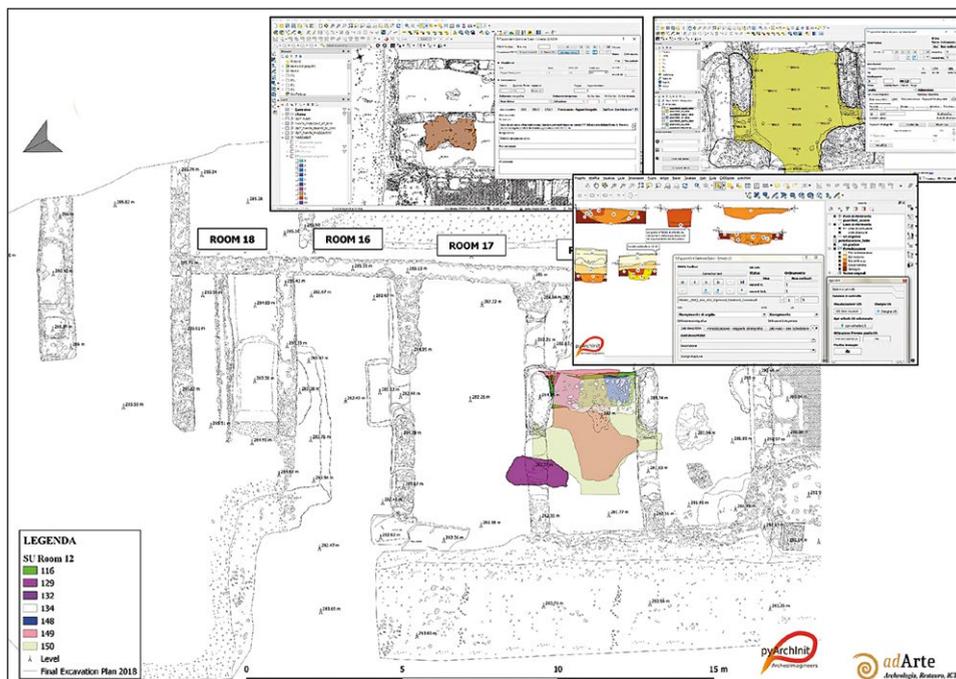


Fig. 4 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Esempi di vettorializzazione delle US/USM e delle sezioni e di compilazione delle schede di documentazione archeologica attraverso gli strumenti forniti da pyArchInit (R. Montagnetti 2019).

Il fine di questa procedura è quello di ottenere una base cartografica georiferita da stampare su plexiglass e portare in cantiere, indispensabile per elaborare in pochi minuti, durante lo scavo, piante cartacee ma già georiferite da inserire direttamente nel GIS. Infatti, con questo sistema, basta semplicemente prendere un foglio lucido, sovrapporlo sulla pianta di inizio scavo in corrispondenza dell'area dove più o meno si trova l'evidenza che deve essere disegnata e ricalcare da essa almeno 4 target topografici assieme alle corrispondenti coordinate di longitudine e latitudine. Fatta questa operazione, si trasferisce il lucido su una tavoletta da disegno e si esegue il rilievo manuale per triangolazione o *coltellatio*.

Ultimato il rilievo dei vari strati, si completa il lavoro georeferenziando in QGIS ogni lucido precedentemente scansionato. Tale operazione viene eseguita importando all'interno del georeferenziatore di QGIS i file relativi alle scansioni delle piante di strato elaborate a mano sul cantiere; il centro di ogni target riportato sul disegno deve corrispondere ai punti da selezionare sullo schermo necessari alla georeferenziazione. Selezionato il centro di ogni target con lo strumento "Aggiungi punto" e inserite manualmente le corrispondenti coordinate X e Y negli appositi riquadri, leggibili direttamente dal foglio lucido, è necessario avviare la trasformazione per ottenere la georeferenziazione di ogni singolo file (MONTAGNETTI, ROSATI 2019). Una volta georeferenziato ogni singolo strato, si può passare alla sua digitalizzazione direttamente in QGIS attraverso i layer vettoriali messi a disposizione da pyArchInit (cfr. Mandolesi *supra*).

Molto spesso, tuttavia, per velocizzare ulteriormente le operazioni sul campo e per il rilievo delle evidenze stratigrafiche più importanti e più ricche di dettagli si ricorre direttamente alla fotogrammetria (KRAUS 1994). Una volta ultimato il processo fotogrammetrico (Fig. 3), ogni ortofoto elaborata viene importata all'interno di QGIS e, come nel caso del procedimento seguito per i rilievi manuali, è possibile vettorializzare le varie evidenze individuate, attraverso i vettori messi a disposizione da pyArchInit, risparmiando notevole quantità di tempo e di manodopera, ma soprattutto elaborando rilievi molto più accurati (Fig. 4). Sempre con questo sistema, inoltre, al termine delle campagne di indagine, è possibile realizzare le piante di fine scavo (MONTAGNETTI, ROSATI 2019).

Per quanto riguarda invece i prospetti e le sezioni, siano esse cumulative, running section o "volanti", vengono disegnati sul campo attraverso il sistema tradizionale con la fettuccia metrica, utilizzando rigorosamente fogli di carta millimetrata di dimensioni standard di 0,40 m di larghezza × 0,27 m di altezza. Ultimati i disegni, tali fogli vengono scansionati per essere poi importati all'interno di QGIS e poterli vettorializzare. Per fare questo, si abilita all'interno di QGIS lo strumento enable grid e si settano i valori di X e di Y che il reticolo dovrà avere a seconda della scala utilizzata nel disegno manuale della sezione in cantiere. In pratica se si è utilizzata una scala 1:20,

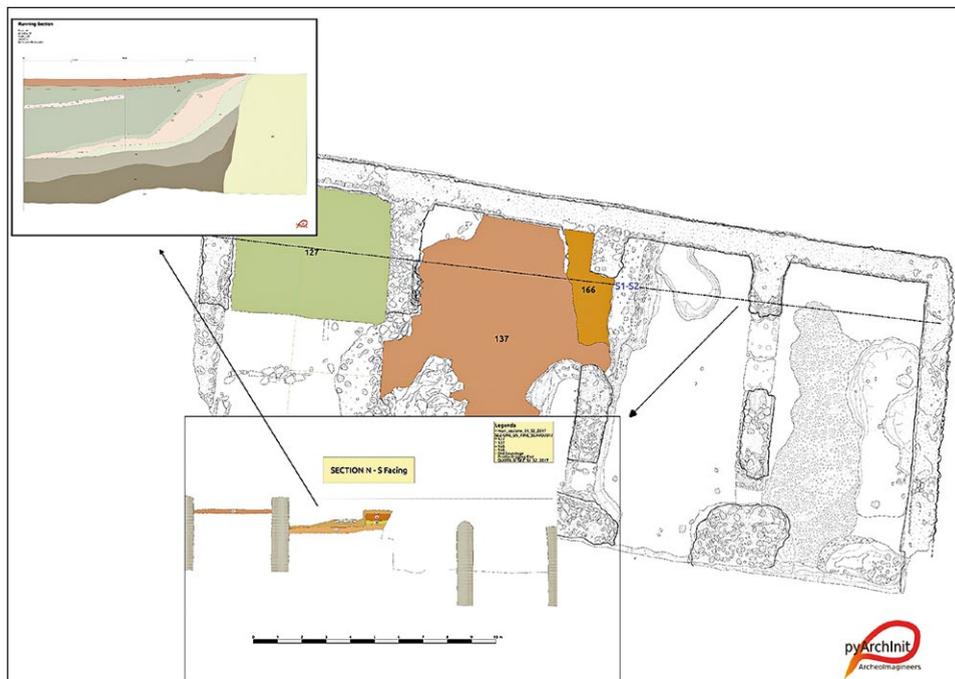


Fig. 5 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Esempio di vettorializzazione delle US/USM di un prospetto attraverso gli strumenti forniti da pyArchInit (R. Montagnetti 2019).

sapendo che le dimensioni del foglio di carta millimetrata per il disegno sono di 0,40×0,27 m, il nostro reticolo dovrà avere un valore X = 8 m (0,40×20) e un valore di Y = 5.4 m (0,27×20). Lo stesso procedimento, ma moltiplicato per 10, si applica se invece abbiamo disegnato sezioni in scala 1:10. Il risultato di questa operazione è la composizione di un reticolo di cui ogni cella ha dimensioni di 8×5,4 m.

A questo punto con lo strumento di QGIS si procede georeferenziando la scansione del foglio di carta millimetrato contenente la sezione disegnata in cantiere, facendo coincidere i quattro estremi del foglio di carta da georeferenziare con i 4 vertici che costituiscono una cella del reticolo realizzato con lo strumento enable grid di QGIS. In seguito a questa procedura è possibile infine vettorializzare il disegno all'interno di QGIS con gli appositi vettori messi a disposizione, ancora una volta, del plugin pyArchInit (Fig. 5). Nello specifico per ognuno dei prospetti e delle sezioni da digitalizzare è stato creato un apposito progetto di QGIS. Tale soluzione risponde alla necessità di dover operare su una vista di prospetto (GIS verticale) e non di pianta (GIS orizzontale; come definiti da FORTE 2002, 34). Tuttavia il collegamento e

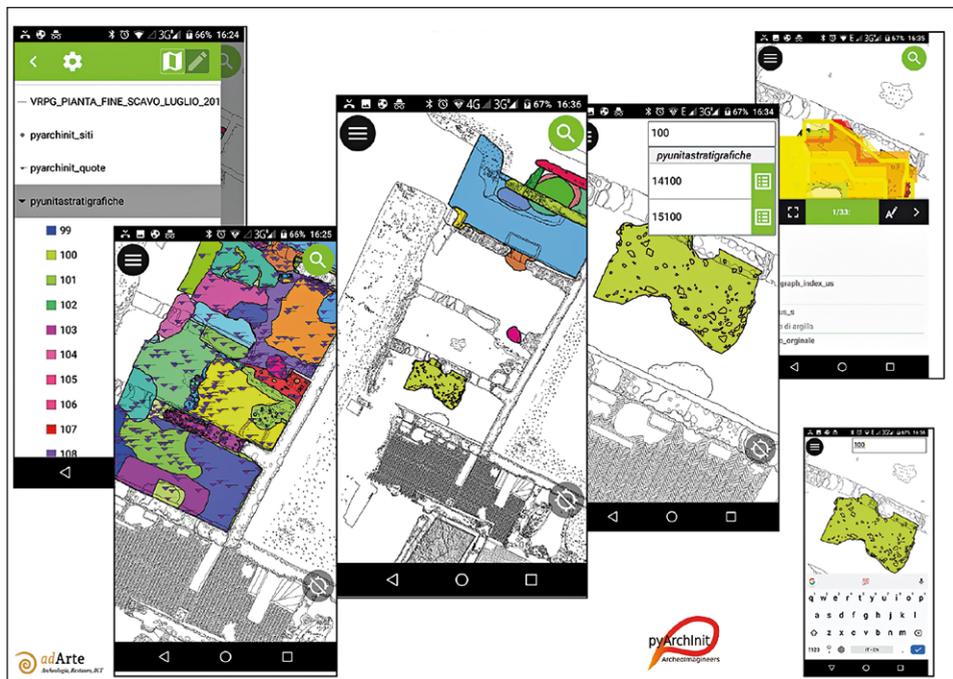


Fig. 6 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Trasferimento in Qfield del progetto (master) elaborato in QGIS (R. Montagnetti 2019).

l'interazione tra il GIS “orizzontale” e quello “verticale” sono assicurati dallo strumento “Azioni” di QGIS, che settato nella tipologia “Apri” permette di aprire altri progetti di QGIS direttamente dal progetto su cui si sta lavorando. In questo caso, cliccando a schermo con lo strumento “Esegui Azioni” il layer “Sezioni di scavo” di pyArchInit permette di aprire il file .qgz del corrispondente prospetto/sezione.

Per supportare al meglio le operazioni di scavo, la piattaforma GIS, contenente tutti i dati raccolti e organizzati attraverso i vettori e le tabelle alfanumeriche fornite da pyArchInit, viene trasferita anche su tablet per poter essere gestita e ulteriormente implementata direttamente in cantiere attraverso l'utilizzo di Qfield (<https://qfield.org/>, Fig. 6), un app Android scaricabile da Google Play e utilizzata anche in ambito archeologico (MONTAGNETTI, GUARINO 2021).

I vantaggi dell'utilizzo di questo sistema sono notevoli: innanzitutto permette di implementare la raccolta dei dati direttamente in cantiere, tenendo costantemente aggiornato il sistema e dando la possibilità di avere una continua overview del sito. Infatti, in questo modo si possono registrare

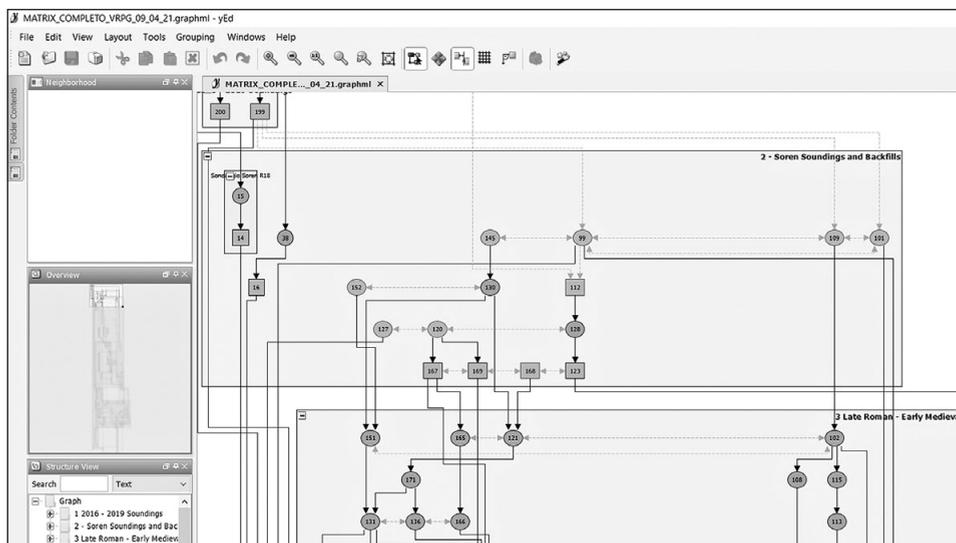


Fig. 7 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Esempio di esportazione del matrix di scavo attraverso pyArchInit (R. Montagnetti 2021).

direttamente i numeri delle varie USS/USSM individuate di volta in volta durante lo scavo all'interno di Qfield, nell'apposita tabella "US\_Table" di pyArchInit e sincronizzare poi il progetto di Qfield con quello del QGIS Desktop a fine di ogni giornata di scavo in modo da mantenere il sistema GIS centrale (master) sempre costantemente aggiornato. La tabella "US\_Table" di pyArchInit non consente di registrare due o più US/USM aventi lo stesso numero. Grazie a questa impostazione si evita l'annoso problema di dover correggere nel database le differenti US a cui è stato dato erroneamente lo stesso numero. Così facendo, si riducono notevolmente i tempi di registrazione e informatizzazione dei dati nel database del sistema, eliminando definitivamente il dispendioso lavoro di digitalizzazione dei registri e delle schede cartacee e demandando alla piattaforma centrale (master), stoccata nel pc, soltanto il compito di controllo e di revisione degli stessi e l'onere di analisi topografiche e geospaziali più approfondite.

A proposito della revisione dei dati, pyArchInit facilita notevolmente questo compito, mettendo a disposizione una serie di funzioni specifiche a questo scopo. Tra queste, quella più importante è sicuramente il ricontrollo automatico della validità delle relazioni stratigrafiche tra le varie US/USM registrate nel database, segnalando ogni volta, attraverso il rilascio di un documento di testo, tutti i rapporti mancanti o non verificati o i cosiddetti "paradossi stratigrafici". In seguito a questo ricontrollo, premendo un

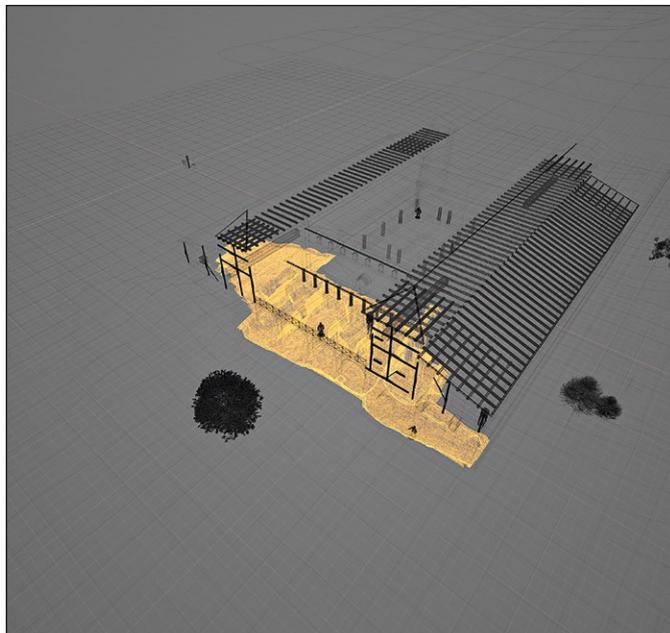


Fig. 8 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Esempio di esportazione della documentazione vettoriale dello scavo in Blender e preliminare ricostruzione tridimensionale degli ambienti scavati (L. Mandolesi 2021).



Fig. 9 – Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR). Preliminare esempio di ricostruzione tridimensionale della *pars urbana* della villa (L. Mandolesi 2021).

apposito pulsante, è possibile quindi esportare il diagramma stratigrafico di scavo (matrix) di cui, a questo punto, si può avere certezza in merito alla sua correttezza (Fig. 7). Non solo, certi ormai della validità dei dati, è possibile esportare direttamente in .pdf la varie schede redatte e i relativi elenchi attraverso appositi pulsanti presenti all'interno delle stesse.

Rimanendo nell'ambito delle esportazioni, merita un cenno, quella relativa alle piante di Periodo/Fase resa possibile sempre da un apposito strumento del plugin che automatizza questa funzione in seguito alla compilazione dell'apposita "Scheda di Periodizzazione" (Periodizzazione\_Table).

Nello scavo di Poggio Gramignano, infine, è affidato al plugin anche l'annoso onere della gestione e dell'organizzazione della cospicua documentazione fotografica acquisita, attraverso lo strumento "Gestore di Immagini". Le foto dei singoli strati, reperti, strutture, tombe e individui, una volta caricate nel database di pyArchInit, vengono collegate attraverso un tag al record delle varie schede di documentazione archeologica a cui si riferiscono. Tale operazione consente, oltre che di visualizzare le foto all'interno delle interfacce grafiche delle schede quando si consultano queste ultime, anche di esportare automaticamente l'elenco di tutta la documentazione fotografica raccolta con tanto di indicazione del numero di foto, del numero di US/USM, Reperto, Struttura o Tomba a cui le foto si riferiscono e di una breve descrizione. Non solo, con questo sistema, tutta questa quantità di foto viene automaticamente divisa dal Gestore di Immagini del plugin in differenti cartelle distinte per numero di US/USM, per numero di Reperto, Struttura o Tomba. Questa procedura, in un progetto pluriennale come Poggio Gramignano, ha velocizzato enormemente il lavoro di gestione delle fotografie acquisite permettendo una costante messa in ordine delle stesse.

In ultimo, la documentazione vettoriale e raster prodotta – in particolar modo i DSM e i DEM ottenuti in seguito al processo fotogrammetrico e la documentazione fotografica dei manufatti rinvenuti – viene poi riutilizzata in Blender per creare ricostruzioni tridimensionali virtuali delle diverse fasi di vita dell'insediamento, del paesaggio storico in cui era inserito e dei manufatti più significativi ritrovati a scopo sia informativo che divulgativo e in termini di valorizzazione turistica (Figg. 8-9) (MONTAGNETTI, MANDOLESI 2019, 30-41).

R.M.

LUCA MANDOLESI, ROBERTO MONTAGNETTI  
adArte s.n.c.

Rimini, Società di ricerca per i Beni Culturali  
luca@adarteinfo.it, robertomontagnetti@gmail.com

DAVID GERALD PICKEL

Department of Classics, Stanford Archaeology Center  
dpickel@stanford.edu

## BIBLIOGRAFIA

- BRASCHI G. 2009, *Antico Catasto Calindri, dalla centuria romana al WEBGIS*, Villa Verrucchio, Pazzini.
- COCCA E. 2014, *Kojtepa 2013: The use of 3D for the drawings of excavation. A methodological approach*, «Newsletter di Archeologia CISA», 5, 1-20 ([https://www.researchgate.net/publication/301299033\\_KOJTEPA\\_2013\\_THE\\_USE\\_OF\\_3D\\_FOR\\_THE\\_DRAWINGS\\_OF\\_EXCAVATION\\_A\\_METHODOLOGICAL\\_APPROACH](https://www.researchgate.net/publication/301299033_KOJTEPA_2013_THE_USE_OF_3D_FOR_THE_DRAWINGS_OF_EXCAVATION_A_METHODOLOGICAL_APPROACH)).
- COCCA E. 2015, *Il GIS nell'ambito di sistemi innovativi per la gestione del dato archeologico. Sviluppo e implementazione di un sistema gestionale e analitico con strumenti open source di banche dati archeologiche. Caso studio Grotta di Fumane*, Phd Thesis, Università di Ferrara.
- COCCA E., MANDOLESI L. 2016, *Analisi statistiche e geostatistiche con pyArchInit: prima sperimentazione*, in P. BASSO, A. CARAVALE, P. GROSSI (eds.), *ArcheoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica. Atti del IX Workshop (Verona 2014)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 8, 132-140 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_8/18\\_Cocca-Mandolesi.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_8/18_Cocca-Mandolesi.pdf)).
- FORTE M. 2002, *I Sistemi Informativi Geografici in archeologia*, Roma, MondoGis.
- FRANCOVICH R. 1990, *Dalla teoria alla ricerca sul campo: il contributo dell'informatica all'archeologia medievale*, «Archeologia e Calcolatori», 1, 15-27.
- FRANCOVICH R., PASQUINUCCI M., PELLICANÒ A. (eds.) 2001, *La Carta Archeologica fra ricerca e pianificazione territoriale. Atti del Seminario di Studi organizzato dalla Regione Toscana, Dipartimento delle Politiche Formative e dei Beni Culturali*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- FRANCOVICH R., VALENTI M. 2000, *La piattaforma G.I.S. dello scavo ed il suo utilizzo: l'esperienza di Poggibonsi*, in G.P. BROGIOLO (ed.), *Il Congresso Nazionale di Archeologia Medievale (Brescia 2000)*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 14-20.
- FRONZA V. 2000, *Il sistema di gestione degli archivi dello scavo di Poggio Imperiale a Poggibonsi (Insegnamento di Archeologia Medievale dell'Università di Siena). Una soluzione all'interno della "soluzione G.I.S."*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 125-137 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF11/1.08%20Fronza.pdf>).
- FRONZA V. 2003, *Principi di Database Management in archeologia: l'esperienza senese*, in R. FIORILLO, P. PEDUTO (eds.), *III Congresso Nazionale di Archeologia Medievale (Salerno 2003)*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 629-632.
- FRONZA V., NARDINI A., VALENTI M. 2009, *Informatica e archeologia medievale. L'esperienza senese*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- GUGNALI S., MANDOLESI L., DRUDI V., MIULLI A., MAIOLI M.G., FRELAT M.A., GRUPPIONI G. 2012, *Design and implementation of an open source GIS platform for management of anthropological data in Journal of Biological Research*, «Bollettino della Società Italiana di Biologia Sperimentale», 350-353 (<https://doi.org/10.4081/jbr.2012.4165>).
- GUIDI A. 1994, *I metodi della ricerca archeologica*, Roma-Bari, Laterza.
- HARRIS E.C. 1979, *Principles of Archaeological Stratigraphy*, London-San Diego, Academic Press.
- KRAUS K. 1994, *Fotogrammetria*, Torino, Ed. Levrotto & Bella.
- MANDOLESI L. 2005, *Progettazione e implementazione di un DBMS relazionale per la gestione e l'analisi di contesti archeologici. Dal deposito alla sintesi storica: il caso della ceramica di Poggio Imperiale a Poggibonsi (Si)*, Tesi di Laurea, Università di Siena.
- MANDOLESI L. 2009a, *pyArchInit - python, QGIS e PostgreSQL per la gestione dei dati di scavo*, in P. CIGNONI, S. PALOMBINI, S. PESCARIN (eds.), *ArcheoFOSS Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica. Atti del IV Workshop (Roma 2009)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 2, 209-222 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_2/20\\_Mandolesi.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_2/20_Mandolesi.pdf)).

- MANDOLESI L. 2009b, *Catasti antichi e G.I.S.*: “Progetto E.L.I.S.A.”, in BRASCHI 2009, 19.
- MANDOLESI L., COCCA E. 2013, *pyArchInit: gli sviluppi dopo ArqueoFOSS 2009*, in M. SERLORENZI (ed.), *ArqueoFOSS Free, Libre and Open Source Software e Open format nei processi di ricerca archeologica. Atti del VII Workshop (Roma 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 4, 128-138 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl\\_4/14\\_Mandolesi\\_Cocca.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/Suppl_4/14_Mandolesi_Cocca.pdf)).
- MATTIVI P., PAPPALARDO S.E., NIKOLI N., MANDOLESI L., PERSICHETTI A., DE MARCHI M., MASIN R. 2021, *Can commercial low-cost drones and open-source GIS technologies be suitable for semi-automatic weed mapping for smart farming? A case study in NE Italy*, «Remote Sensing», 13, 10, 1869 (<https://doi.org/10.3390/rs13101869>).
- MONTAGNETTI R., GUARINO G. 2021, *From Qgis to Qfield and vice versa: How the new Android application is facilitating the work of the archaeologist in the field*, «Environmental Sciences Proceedings», 10, 1, 6 (<https://doi.org/10.3390/envirosciproc2021010006>).
- MONTAGNETTI R., MANDOLESI L. 2019, *QGIS, pyArchInit and Blender: Surveying and management of archaeological data with open source solutions*, «Archeomatica», 10, 4, 30-41 (<https://www.yumpu.com/it/document/view/63265774/archeomatica-4-2019>).
- MONTAGNETTI R., PICKEL D., WILSON J., RIZZO F., SOREN D. 2020, *New research in the Roman villa and late Roman infant and child cemetery at Poggio Gramignano (Lugnano in Teverina, Umbria, Italy)*, «European Journal of Post-Classical Archaeologies», 10, 279-302 ([http://www.postclassical.it/PCA\\_Vol.10\\_files/PCA10\\_Montagnetti-et-al.pdf](http://www.postclassical.it/PCA_Vol.10_files/PCA10_Montagnetti-et-al.pdf)).
- MONTAGNETTI R., ROSATI P. 2019, *Georiferire la stratigrafia archeologica*, in P. GROSSI et al. (eds.), *ArqueoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica, Atti del XII Workshop (Roma 2018)*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 463-466 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.30>).
- NARDINI A. 2000, *La piattaforma GIS dello scavo di Poggio Imperiale a Poggibonsi. Dalla creazione del modello dei dati alla loro lettura*, in A. D'ANDREA, F. NICCOLUCCI (eds.), *Atti del I workshop Nazionale di Archeologia Computazionale (Napoli-Firenze 1999)*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 111-123 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF11/1.07%20Nardini.pdf>).
- PELLICANÒ A., SASSOLI U. 2001, *Il progetto Carta Archeologica della Regione Toscana*, in R. FRANCOVICH, M. PASQUINUCCI, A. PELLICANÒ (eds.), *La Carta Archeologica fra ricerca e pianificazione territoriale. Atti del Seminario di Studi organizzato dalla Regione Toscana, Dipartimento delle Politiche Formative e dei Beni Culturali, Firenze, All'Insegna del Giglio*, 21-23.
- VALENTI M. 2000, *La piattaforma GIS dello scavo. Filosofia di lavoro e provocazioni, modello dei dati e “soluzione GIS”*, in A. D'ANDREA, F. NICCOLUCCI (eds.), *Atti del I Workshop Nazionale di Archeologia Computazionale (Napoli-Firenze 1999)*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 93-109 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF11/1.06%20Valenti.pdf>).

## SITOGRAFIA

- <https://www.claris.com/it/filemaker/pro/>  
<https://www.python.org/>  
<https://www.postgresql.org/>  
<https://www.gaia-gis.it/>  
<https://www.QGIS.org/it/site/>  
<https://github.com/pyarchinit/pyarchinit>  
<https://www.arqueo3.it/>  
<https://qfield.org/>  
<https://pyarchinit.org/>

ABSTRACT

This contribution traces the history of pyArchInit, the first QGIS plugin created directly by archaeologists for the management of archaeological sites. The article describes the structure of the plugin, its features and the main innovations brought to the field of archaeological data management compared to the commonly used applications (CAD and Office package). Furthermore, practical examples of its use and potential will be provided through the description of the methodological procedure, based on pyArchInit, put into the field during the excavation of the archaeological site of Poggio Gramignano - Umbria - Italy. Such excavation is directed by Prof. David Soren of the University of Arizona and has revealed the remains of an important Roman villa reused in the Late Roman period as a cemetery for children.

## IL CONTRIBUTO DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL MOLISE ALLO STUDIO DELLE TECNICHE MURARIE DI ETÀ ROMANA ATTRAVERSO L'USO DI METODOLOGIE INFORMATICHE. DUE ESEMPI DI APPLICAZIONE

### 1. INTRODUZIONE

Il proposito di tracciare un quadro conoscitivo sul tema delle tipologie edilizie nel territorio dell'odierno Molise in età romana è l'obiettivo di uno dei progetti di ricerca dell'Università degli Studi del Molise, inserito in un contesto più ampio denominato "Innovazione e gestione delle risorse pubbliche". Gli ormai molteplici lavori incentrati sulla disciplina dell'archeologia dell'architettura hanno evidenziato come molte possano essere le informazioni da acquisire applicando le metodologie specifiche legate all'analisi dei paramenti murari, integrate ove possibile anche con tecniche interdisciplinari innovative.

La microstoria dell'edificio, desunta dall'analisi stratigrafica, fornisce un potenziale di informazione notevole ai fini della comprensione della situazione indagata, permettendo, insieme con l'acquisizione di informazioni tecniche, ampie possibilità di conoscenza circa la storia del cantiere edilizio, la sua organizzazione e l'individuazione del ciclo produttivo (il tema relativo allo studio dei cantieri viene trattato già in MANNONI, BOATO 2002). L'importanza di questo approccio, applicato allo studio dell'archeologia dell'architettura anche per l'epoca romana, è dimostrato dalla nascita, in seguito ad un incontro sullo studio dei cantieri pubblici di epoca romana organizzato dall'École Normale Supérieure di Parigi nel febbraio 2006 (i cui atti sono purtroppo rimasti inediti), di un gruppo di studio internazionale che ha come obiettivo quello di fornire orientamenti di ricerca e criteri di lavoro condivisi per gli studiosi di varie nazionalità in questo ambito disciplinare. Il suddetto gruppo ha avviato una serie di workshop, iniziati a partire dal 2007, denominati *Arqueología de la construcción*, che vantano ad oggi ben cinque convegni con atti editi (CAMPOREALE *et al.* 2008, 2010, 2012; BONETTO *et al.* 2014; DELAINE *et al.* 2016. Per un bilancio ed un quadro riassuntivo sui primi tre incontri cfr. CAMPOREALE 2018).

Il metodo proposto in questo articolo implica di prendere in considerazione anche elementi che derivano, ad esempio, dalle dinamiche legate alla circolazione di maestranze, alle possibilità finanziarie della committenza, alla capacità di quest'ultima di imprimere i segni della sua volontà, espressa anche attraverso la scelta e il finanziamento di particolari opere architettoniche<sup>1</sup> e

<sup>1</sup> In riferimento all'area oggetto di studio, si può prendere come esempio quanto avviene nel corso del I sec. d.C., quando si assiste alla nascita di un evergetismo privato che si affianca a quello

l'impiego di particolari materiali e finiture<sup>2</sup>, che aiutano a completare il quadro di riferimento mirato ad una più attenta datazione dell'opera.

Uno studio di fattibilità per l'organizzazione di questo lavoro ha condotto a definire diverse fasi: schedatura sistematica, analisi e sintesi. La schedatura sistematica implica lo studio e la realizzazione di un database in grado accogliere tutte le informazioni utili al fine di poter analizzare in modo esaustivo i dati derivanti da un'analisi puntuale del manufatto architettonico. Una lunga ricerca ha portato ad individuare il recente progetto "ACoR, Atlas des techniques de la Construction Romaine" (<https://acor.huma-num.fr/>), che vede il coinvolgimento di un gruppo internazionale di ricercatori, il cui proficuo operato ha consentito la messa a punto di un sistema per la schedatura delle tecniche e degli elementi costruttivi dell'edilizia storica in senso ampio, che va ben oltre le necessità del presente lavoro, includendo non solo murature, ma anche aperture, orizzontamenti, coperture, etc. (CAMPOREALE *et al.* c.s.).

Il fine è quello di avere uno strumento analitico di schedatura e conservazione dei dati che faciliti la comprensione delle dinamiche legate alla creazione e circolazione di tecniche costruttive in tutto l'impero romano ad ampia scala cronologica e geografica. La possibilità di censire i dati sulle opere murarie nell'ambito di un lavoro di schedatura a scala globale offre l'opportunità di confrontare i dati non solo in ambito regionale, obiettivo principale del presente lavoro, e di effettuare raffronti con altri contesti oggetto di schedatura, con evidenti benefici dal punto di vista del lavoro di analisi e ricerca di confronti<sup>3</sup>, ma anche di contestualizzare i singoli siti alla luce della circolazione di maestranze finanziate dalle varie committenze in un ampio contesto, altrimenti di difficile valutazione.

## 2. IL PROGETTO ACoR

Lasciando una più ampia e approfondita descrizione del progetto di catalogazione agli ideatori, ci si limita in questa sede a descrivere brevemente il sistema di schedatura ACoR. La struttura del Data Base (DB) è di tipo gerarchico, costituita da quattro schede principali. Nella prima scheda di tipo generale, denominata "Territori", sono elencati i potenziali paesi interessati dal lavoro di schedatura, che vengono riproposti in un menù a tendina nella

imperiale. Come osservato da M. Gaggiotti le ricche famiglie latifondiste si impegnano per uno sviluppo architettonico cittadino, come «portatori di modelli ideologici coerenti con il nuovo ordinamento politico-sociale, applicati nell'edilizia privata ed in quella funeraria» (GAGGIOTTI 1987-1988, 47-57).

<sup>2</sup> Sulla possibilità di individuare e distinguere murature provenienti dall'operato di maestranze più o meno specializzate e quindi distinguere fra paramenti formati da elementi appositamente scelti e lavorati e paramenti con minor grado di lavorazione cfr. MANNONI 1993, 1997.

<sup>3</sup> Per quanto riguarda i siti schedati, per citare quelli più vicini di area campana, sono già presenti su piattaforma ACoR quelli di Palma Campania, Sarno, Miseno, Napoli, Baia, Pozzuoli, Pompei e Cuma.

successiva Scheda “Siti”. Quest’ultima contiene sia il “nome antico” che il “nome moderno” ed è seguita dalle schede “Edifici” e “Tecniche” strutturate in ordine gerarchico (Preparazione del terreno, Fondazioni, Elevati, Aperture, Orizzontamenti/Coperture, Pavimenti, Archi, Strutture di servizio). Alla gerarchia corrisponde anche un diverso grado di complessità nella compilazione e di completezza delle informazioni derivanti da rilievi in campo, che aumenta in modo significativo, quando si descrivono i dettagli delle tecniche. L’ultima scheda, denominata “Tipologia”, è una scheda riassuntiva di alcune caratteristiche murarie e viene compilata in automatico dal sistema, senza possibilità di modifica manuale da parte dell’utente.

Da un punto di vista della localizzazione delle murature, la modalità standard del sistema, oltre alla localizzazione di tipo puntuale del monumento oggetto di schedatura, da poter indicare nella scheda “Edifici”, al momento fornisce la possibilità, nella scheda “Tecniche”, di inserire una serie di immagini, in cui poter evidenziare nelle viste planimetriche la posizione della muratura analizzata. Proprio il tema legato alle informazioni inerenti la localizzazione è uno degli elementi innovativi del metodo di catalogazione che qui si presenta, con particolare riferimento alla gestione cartografica del dato a scala territoriale.

### 3. I CASI DI STUDIO

Per questo lavoro si sono selezionati due casi di studio che, mostrando caratteristiche profondamente diverse, aiutano a rendere meglio evidente la versatilità del DB ACoR. L’associazione di metodi tradizionali di lettura stratigrafica degli elevati, analisi di tipo metrico e strumenti GIS non ancora applicati a questo specifico settore a scala territoriale (per un esempio sull’uso del GIS applicato al caso di un singolo monumento di veda DESSALES 2020) introducono enormi vantaggi per questa applicazione.

Tra gli elementi di diversità si evidenzia infatti anche il tipo di approccio nell’analisi dei paramenti. Da un lato è stata presa in considerazione una villa romana, come elemento di edilizia privata, con lettura stratigrafica del prospetto effettuata in modo analitico, dall’altro, il caso di un teatro, come elemento di edilizia pubblica, che proprio in virtù della complessità dell’opera esaminata e delle ancora carenti informazioni di letteratura provenienti dalle indagini archeologiche, è stato gestito facendo riferimento ad una metodologia a campioni già sperimentata per i siti di Olimpia (MEDRI 2001), Ostia (BUKOWIECKI *et al.* 2008; DESSALES 2010) e Cuma (COVOLAN 2017).

#### 3.1 *La villa romana in loc. Crocella (cd. Villa dei Neratii), presso San Giuliano del Sannio (CB)*

Il caso di studio relativo ad un esempio di edilizia privata riguarda una villa di età romana in loc. Crocella (cosiddetta Villa dei *Neratii*), presso l’attuale

comune di San Giuliano del Sannio (CB), che ricade nel territorio dell'antico municipio romano di *Saepinum*, per il quale la letteratura è piuttosto ampia (tra i contributi più recenti cfr. GUIDI 2013, 2014; DEL VECCHIO 2014; MATTEINI CHIARI, SCOCCA 2014; CILIBERTO 2015; CECCARELLI, FRATIANNI 2017; CILIBERTO, GUIDI 2017; CILIBERTO, DI PALMA 2018) e dove l'Università degli Studi del Molise dal 2017 ha ripreso le indagini archeologiche, che rientrano in un progetto più ampio dal titolo: "Scavare a San Giuliano del Sannio (CB): un'archeologia a servizio del territorio", diretto dalla Prof.ssa Fulvia Ciliberto (CILIBERTO, NOTARDONATO c.s.).

Il complesso – la cui estensione, fondazione e durata di frequentazione rimangono ad oggi da definire – è stato già oggetto di pregresse campagne di scavo a partire dal 2004 (DE BENEDITTIS 2011; cfr. anche il breve intervento in CECCARELLI, FRATIANNI 2017, 289-290) e costituisce un importante esempio di edilizia privata, dove le opere murarie attualmente rappresentano una delle emergenze archeologiche più rilevanti del territorio sepinato.

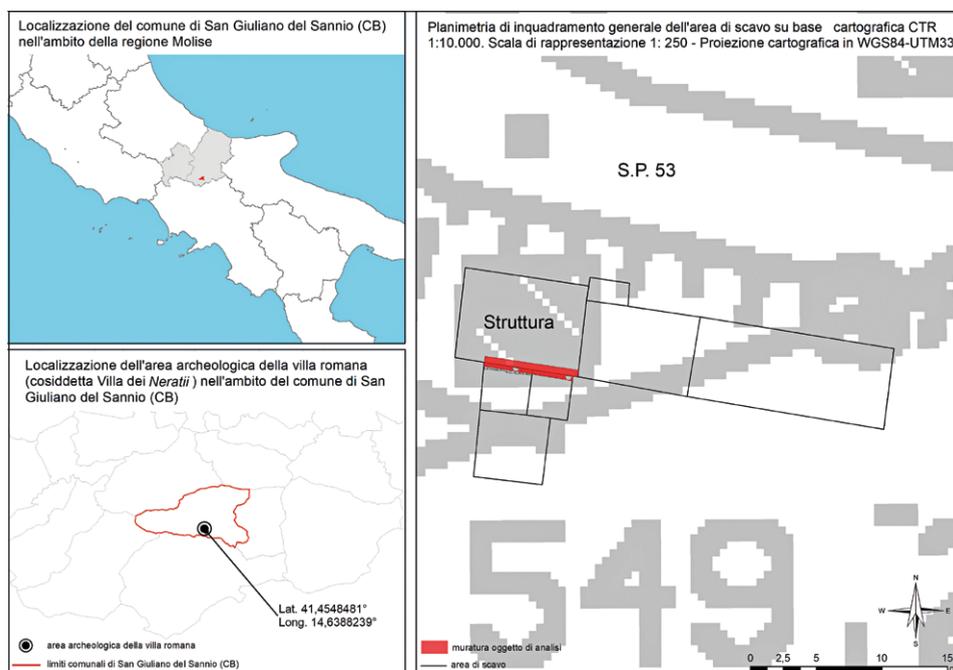


Fig. 1 – Planimetria della Villa dei *Neratii* (loc. Crocella, San Giuliano del Sannio, CB). In tratto nero è riportata l'intera area archeologica, in colore rosso è evidenziata l'ubicazione del muro, oggetto di studio, all'interno dell'area di scavo. Nel riquadro in alto a sinistra, è visibile l'ubicazione del comune di S. Giuliano del Sannio, all'interno della regione Molise.

La schedatura, che qui si presenta, riguarda un tratto di paramento di età romana, oggetto di indagine nelle campagne di scavo 2018 e 2019, l'unico attualmente visibile al di sotto del muro meridionale di una piccola struttura ottocentesca, che insiste su quelle antiche. La Fig. 1 mostra la planimetria su base CTR (Carta Tecnica Regionale), in cui è riportata l'area archeologica (linea nera) della Villa dei *Neratii*. Lo scavo oggetto di studio è localizzato a S della S.P. 53 nel Comune di San Giuliano del Sannio (CB) di cui si indica, nel riquadro in alto a destra, l'ubicazione all'interno della regione Molise. In colore rosso è il tratto di muro portato come esempio di schedatura localizzato alla base del lato S della casa ottocentesca indicata in planimetria con il nome di "Struttura".

Al fine di adeguarsi ai criteri utilizzati per l'archiviazione dei dati all'interno del sistema ACoR, questa fase dello studio della Villa dei *Neratii* si limita ad analizzare esclusivamente la muratura antica, sebbene per completezza di informazione, viene riportata anche l'Unità Stratigrafica Muraria (USM) moderna, con la dicitura USM 13 non oggetto di studio. Per garantire lo standard di precisione relativo al rilevamento dell'intera muratura, il rilievo è stato eseguito tramite ausilio di strumentazione specifica, nella fattispecie una stazione totale, con la quale sono stati misurati una serie di punti sul prospetto, utilizzati successivamente all'interno di un software specifico che ne ha consentito l'ortorettifica. Nel caso di studio in esame, l'operazione di ortorettifica è stata eseguita con software DigiCad 3D, digitalizzando il paramento antico sul quale sono state identificate e delimitate le diverse USM.

La lettura stratigrafica del paramento oggetto di indagine è di certo la prima attività da svolgere nell'analisi muraria. Nel caso specifico sono state individuate 12 USM, tra positive e negative, ossia le interfacce di distruzione (Fig. 2). L'USM 1 è interpretabile come una fondazione ed è costituita da pietre di varia pezzatura, di grandi, medie e piccole dimensioni, con frammenti di laterizi e malta di colore giallo. Questa si lega all'USM 4, una sporgenza funzionale al sostegno delle semicolonne decorative in cotto UUSSMM 6 e 7 (Fig. 2). La sporgenza mostra un'apparecchiatura del paramento tradizionalmente definito opera reticolata e che nel presente lavoro da ora in avanti viene indicato come "Filari a 45°", dicitura mutuata dalle voci utilizzate nella scheda Tecniche/Elevati della piattaforma ACoR. La tecnica è caratterizzata da blocchetti in materiale calcareo di pezzatura pressoché omogenea dove le misure dei lati hanno una media che varia dagli 8 ai 10 cm che non mostrano finiture particolari a facciavista, né particolari attenzioni nella lavorazione dei bordi. Il paramento presenta malta di colore giallo fra i giunti, mentre una malta di colore grigio, attribuibile ad interventi di epoca moderna, appare distribuita in alcuni tratti a copertura dei blocchi.

L'USM 4 si lega alle UUSSMM 1, 5, 10 e 9. L'USM 5, che è separata fisicamente dall'USM 9 ma si eguaglia ad essa, ha le stesse caratteristiche dell'USM 4, sia per quanto riguarda il tipo di paramento a "Filari a 45°", sia

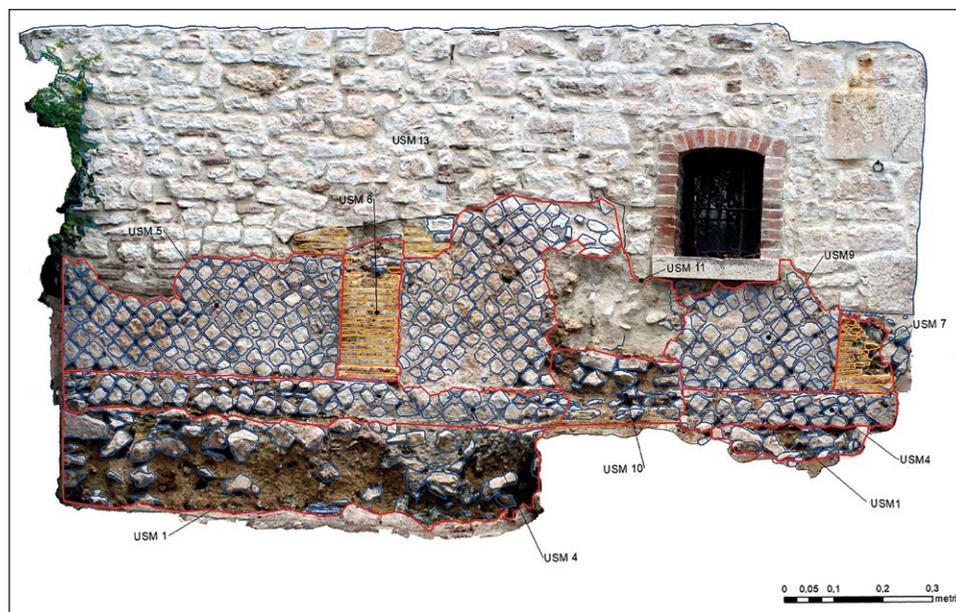


Fig. 2 – Lettura stratigrafica del tratto di muro oggetto di schedatura. L'ubicazione del muro è visibile in colore rosso in Fig. 1.

per il tipo di legante, di colore giallo fra i giunti, che per la malta di colore grigio, a testimonianza anche qui di rimaneggiamenti di epoca moderna (Fig. 2). In associazione all'USM 5, sono presenti i già citati resti di semicolonne in cotto, delle quali si prendono in considerazione le due pertinenti al tratto di muro considerato (UUSMM 6 e 7), che in base ai rapporti stratigrafici risultano in fase con esso. La semicolonna USM 6, integra per un'altezza di circa 64 cm, presenta una base costituita da due elementi: un plinto formato con mattoni quadrangolari ed un profilo convesso, ottenuto sempre con un elemento in laterizio, sul quale si imposta il fusto, costituito da undici ricorsi di mattoni disposti intorno ad un nucleo in malta (su alcune tipologie di sezioni di colonne in laterizio cfr. LUGLI 1957, 574, fig. 120). Fra i giunti rifluenti e nella porzione alta della semi-colonna, dove gli elementi fittili si sono staccati, è possibile osservare il tipo di malta, di colore giallo con inclusi in pietrisco, mentre anche in questo caso sul plinto e sul sovrapposto profilo convesso, si nota la presenza di grumi di malta di colore grigio, associata come già osservato ad interventi di età moderna. L'altra semicolonna, l'USM 7, si conserva invece in minima parte e presenta le stesse caratteristiche della precedente.

Per porzioni di muratura omogenee – il codice ACoR non fa riferimento ad una singola USM ma a gruppi omogenei di murature presenti all'interno

**TECNICHE** MARIA NOTARDONATO MODO LETTURA

**CONTESTO**

Sito: Seapinum (Italia)

Edificio: Villa in loc. Crocella (c.d. Villa dei Neratii)

Fase/i: Progetto originario

**TIPO DI COSTRUZIONE**

Intervento di costruzione: Elevato

Elemento di costruzione: Muro

Numero di elementi: 1 Codice: MR-0442

VEDI LA SCHEDA DI DETTAGLIO

Le UUSSMM nn. 4, 5 e 9 (in planimetria evidenziate in rosso ed in prospetto digitalizzate in colore blu) si compongono di blocchetti in materiale calcareo di pezzatura pressoché omogenea. I blocchi (le

INSERIRE UN'IMMAGINE  
10 max., JPG / PNG / GIF

**Caratteristiche generali**

- A facce parallele
- A semi-colonne (in fase)
- Elemento portante
- Muro di sostegno

**Paramento**

- Materiale/i : Pietra (calcare)
- Filari : Filari a 45°

MR-0442-1 Vista generale

MR-0442-2 Localizzazione in pianta

SCHEDA: AUTORE & DATA    DETTAGLI    WEB

Fig. 3 – Esempio di schedatura all'interno del DB ACoR, Scheda Tecniche (MR-0442) delle UUSSMM 4, 5 e 9. Nella seconda immagine, nella planimetria generale dell'area di scavo, è evidenziata in rosso la localizzazione della muratura schedata.

della stessa struttura – è stata redatta una scheda in ambiente ACoR, di cui si riporta come esempio l'inserimento delle UUSSMM 4, 5 e 9 (Fig. 3) che si caratterizzano per il tipo di paramento in opera reticolata che rientra in un particolare tipo di indagine a campioni illustrato nel prossimo caso di studio relativo al teatro di Venafro (IS).

### 3.2 *Il teatro romano di Venafro (IS)*

Il secondo caso di studio è relativo ad un esempio di edilizia pubblica, nello specifico un edificio di spettacolo, e riguarda il teatro romano di Venafro (IS) (CAPINI 2015, 63-71 e bibliografia citata). Le prime indagini archeologiche risalgono agli inizi degli anni Settanta del XX secolo a cui hanno fatto seguito alterne campagne di scavo e saltuari interventi di restauro di quanto emerso. Attualmente i lavori sono fermi e molto ancora si dovrebbe indagare per poter arrivare ad una comprensione d'insieme dell'edificio. Le parti da riportare alla luce riguardano quasi tutta l'area corrispondente alla *summa caeua*, all'orchestra e all'edificio scenico (CAPINI 2015, 64, nota 15).

Il teatro è annoverabile certamente fra i monumenti più significativi della Venafro romana ed è probabilmente riconducibile ad un ampio programma edilizio collocabile fra l'età augustea e quella di Tiberio, un momento di particolare evoluzione per la città. La datazione del teatro viene genericamente associata ad età augustea (CAPINI 1990, 230). La mancanza di documentazione epigrafica e gli scarsi dati stratigrafici delle campagne di scavo non consentono al momento di poter ricavare informazioni più precise in merito alla sua edificazione e ad un suo più puntuale inquadramento cronologico.

La struttura si sviluppa ai piedi del Monte Santa Croce, con la cavea del teatro addossata alle pendici dello stesso in modo da sfruttarne l'inclinazione del pendio e conferire alla città un aspetto di sicuro impatto scenografico. Altro fattore da valutare in merito all'ubicazione dell'opera potrebbe essere legato a motivazioni di tipo logistico, che vedono la collocazione di opere monumentali in aree caratterizzate sia dalla presenza di viabilità limitrofa sia da spazi aperti, per poter consentire l'impianto di grandi cantieri quali dovevano essere quelli legati alla realizzazione di teatri con fabbriche monumentali spesso imponenti e di lunga durata (BONETTO 2003, 927).

La scena è orientata secondo il reticolo stradale associato alla deduzione augustea, reticolo per gran parte ripercorso dalla moderna viabilità urbana e composto di sei isolati per otto di forma quadrata di circa due *actus* di lato (COARELLI, LA REGINA 1984, 178). La sua ubicazione è immediatamente all'esterno del limite NO dello schema dell'impianto urbanistico della città, dal quale risulta fortemente decentrato ed in asse con la terza fila di isolati partendo da SO.

La presenza di resti di un terrazzamento in opera poligonale con porzioni in opera incerta riferibile ad un antico santuario in uso per tutto il periodo repubblicano (CAPINI 1991b), localizzato in direzione NE rispetto all'edificio teatrale ed esistente nel momento della progettazione urbanistica, ha fatto ipotizzare che la sua posizione possa trovare un inquadramento simmetrico se letto in associazione alla suddetta opera muraria. È stato infatti osservato che la posizione fortemente decentrata rispetto al rettangolo urbanistico lo rendeva simmetrico rispetto al terrazzamento dell'antico santuario di via Mura Ciclopiche, che era stato evidentemente tenuto presente in fase di progettazione dell'impianto urbanistico (CAPINI 2015, 60-64) (Fig. 4).

La parziale attività di indagine archeologica svolta nel teatro non ha restituito molto materiale relativo alla decorazione architettonica e scultorea; tuttavia un importante ritrovamento avvenuto agli inizi del secolo XX, effettuato a qualche decina di metri ad O del monumento in località S. Aniello (AURIGEMMA 1933) ha riportato alla luce una cospicua quantità di reperti marmorei riconosciuti come appartenenti al teatro, che trovano confronti puntuali con materiali di età augustea (CAPINI 1990, 230; cfr. anche PENSABENE, BRUNI c.s.).



Fig. 4 – Planimetria con base cartografica OSM (OpenStreetMap) dove è riportato il reticolato stradale (A, in rosso), la planimetria del teatro in asse con la terza fila di isolati partendo da sinistra (B, in grigio scuro) e i resti del terrazzamento riferibile all'antico santuario in asse con la terza fila di isolati partendo da destra (C, tratto punto in giallo).

Una generale e certamente parziale ricostruzione della storia edilizia del monumento, per la quale al momento i dati a disposizione non consentono di poter delineare un quadro esauriente, mostra come la gradinata dell'*ima* e della *media cavea* sia ascrivibile ad età augustea, mentre in età giulio-claudia avviene l'edificazione della *summa cavea* e delle scale di accesso ai *tribunalia* addossate al muro esterno degli *aditus*, con conseguenti tamponamenti di due delle quattro arcate (CAPINI 1990, 231) (Fig. 5).

In una fase successiva, presumibilmente intorno al II secolo, in direzione O, si pone la realizzazione di una grande esedra in laterizi interpretabile come un ninfeo (AURIGEMMA 1922, 58-60; DIEBENER 1979, 66; CAPINI 1990, 231), a cui fa seguito la modifica dell'orchestra per la realizzazione di giochi d'acqua, per i quali fu evidentemente necessario realizzare una cisterna e le relative canalizzazioni tutt'ora *in situ*. In periodi successivi a quello romano, l'edificio è stato oggetto di interventi di espiazione, come nel caso della *media cavea* quasi totalmente asportata per ricavarne calce. La presenza



Fig. 5 – Campionatura dei due paramenti in reticolato nel teatro di Venafrum. Il campione n. 4 è relativo al muro delle *versurae tribunalia est* associabile al primo impianto del teatro, mentre il campione n. 3 è relativo alla parete interna della *summa cavea*. Nella rappresentazione grafica della muratura è possibile apprezzare il litotipo impiegato. Infine, in basso, si riporta in planimetria la localizzazione delle due murature analizzate (A e B) e, in posizione centrale, lo schema relativo alla misurazione dei parametri L1-L2-Diagonale.

all'esterno del teatro di una grande calcara che ha tagliato le strutture romane è la testimonianza di come con molta probabilità, marmi, decorazioni e statue furono riutilizzati anche per ricavarne calce per le nuove costruzioni (CAPINI 2015, 64, nota 13).

Il censimento delle tecniche murarie utilizzate per la sua edificazione mostra che questa, come per altri esempi dello stesso tipo di edificio localizzati

nel centro Italia<sup>4</sup>, si caratterizza in buona parte per l'impiego del paramento a "filari a 45°". Tale tecnica, per la quale nel presente lavoro si propone un tipo di studio a carattere innovativo rispetto al suo consueto inquadramento, è senza dubbio tra le più rappresentative del periodo romano e anche tra le più significative dal punto di vista dell'ambiente tecnico di produzione (per una breve sintesi relativa all'evoluzione dello studio del reticolato cfr. COVOLAN 2017).

Il principio alla base di tale diverso approccio risiede nel fatto di voler «classificare le opere murarie in rapporto al modo in cui sono costruite ed al tipo di lavorazione dei materiali impiegati, anziché in base a schemi terminologico-tipologici, pericolosamente inclini a stabilire una corrispondenza automatica tra nome e cronologia» (MEDRI 2001, 16).

Nell'ambito del presente studio, da non considerarsi esaustivo, si segue una descrizione basata sull'analisi dei singoli componenti e sul calcolo di parametri matematici e statistici, attraverso i quali possono essere individuate linee di tendenza e peculiarità in rapporto alla diffusione e allo sviluppo della tecnica in determinati contesti geografici (MEDRI 2001; BUKOWIECKI *et al.* 2008; DESSALES 2010), creando inoltre un modello di informazioni comparabili tra loro sia a scala locale che a più ampio raggio e sfruttando per questo tutte le potenzialità dell'archiviazione dei dati in ACoR.

Il lavoro di censimento eseguito prende spunto da studi già effettuati per i siti di Ostia (BUKOWIECKI *et al.* 2008) e di Cuma (COVOLAN 2017), entrambi ispirati al lavoro sul sito di Olimpia (MEDRI 2001, nota 36), con la differenza rispetto a quest'ultimo che l'analisi metrica su campioni di 1×1 m è stata eseguita su 50 elementi. Si precisa inoltre che le tessere "tagliate" dalla cornice del campionamento non sono state incluse nel lavoro di analisi, in quanto rappresentano un dato parziale e quindi non veritiero ai fini dell'analisi statistica.

Per la descrizione dei dati quantitativi e di quelli sulle caratteristiche tecniche dei paramenti censiti sono stati messi a punto due modelli schedografici che hanno consentito una raccolta agevole dei dati in campo. Una scheda è stata impostata per l'analisi metrica dei campioni ed una per l'opera reticolata, prendendo spunto da vari esempi di schedatura fra cui quella contenuta nel volume BUKOWIECKI *et al.* 2008 e dal DB ACoR stesso. Il lavoro ha previsto un esame autoptico dei paramenti, che sono stati controllati partendo dal livello delle fondazioni fino all'osservazione dell'intero prospetto. Una volta individuati i punti della muratura in cui censire il campione, considerando sia le buone condizioni del paramento, sia il fatto di distinguere con attenzione le porzioni di muratura originali da quelle oggetto di restauro "mimetico", molto frequente in interventi della metà del secolo scorso, si è proceduto alla

<sup>4</sup> Per il centro Italia vari sono gli esempi di strutture teatrali che si caratterizzano per l'impiego del cementizio con paramento in reticolato, fra i più noti dei quali si citano quello di *Alba Fucens* e *Peltuinum* (entrambi in provincia dell'Aquila), Cassino e Aquino (entrambi in provincia di Frosinone), Ercolano, Pompei e *Liternum* (tutti e tre in provincia di Napoli) e Ostia (RM); cfr. PENSABENE, BRUNI c.s.

schedatura delle caratteristiche murarie (con una valutazione dei materiali impiegati, del loro grado di lavorazione e della messa in opera) e alla documentazione metrica e fotografica. Per ogni elemento è stato misurato il lato obliquo in alto sinistro e destro (L1 ed L2) e la diagonale a partire dai due lati presi in considerazione. Inoltre si è provveduto a documentare per ogni campione la misura di moduli di 5×5 (la lunghezza di assise e 5 giunti) e lo spessore minimo e massimo dei giunti. L'indagine all'interno del monumento teatrale ha previsto la raccolta di 14 campioni.

Nell'ambito della documentazione metrica, i primi parametri valutati sono stati quelli di forma e dimensione delle tessere:

– *Forma*: si è voluto analizzare se la forma delle tessere fosse innanzitutto quadrata o rettangolare. Dal rapporto tra la lunghezza dei loro due lati, misurati *in situ*, si evince un chiaro riscontro di questo parametro. Più il rapporto si avvicina al valore unitario più la forma è tendenzialmente quadrata, più si discosta (inferiore o superiore a 1) più la forma delle tessere è tendenzialmente rettangolare. La Fig. 5, nello Schema L1-L2-Diagonale, mostra come sono definiti i parametri L1, L2 e Diagonale. Si precisa che il parametro L1, per criterio di uniformità, viene riferito sempre al lato ascendente sinistro e il parametro L2 viene sempre riferito al lato discendente destro. Questo dettaglio consente di valutare, con particolare riferimento alla geometria asimmetrica, ovvero rettangolare, se esiste una orientazione preferenziale, ascendente (L1/L2 superiore a 1) o discendente (L1/L2 inferiore a 1), delle tessere rettangolari.

– *Dimensione*: per l'analisi di questo parametro, considerando la scarsa regolarità della forma delle tessere, qualsiasi tipo di algoritmo basato su formule matematiche avrebbe portato ad un risultato approssimativo e/o molto lungo da implementare e analizzare. Per ovviare a tale limitazione, si è deciso di utilizzare un criterio che risultasse il più oggettivo possibile, in grado di offrire una misurazione dell'area delle tessere identificate a prescindere dalla complessità della geometria con la precisione necessaria. Si è quindi optato di ricavare l'area della singola tessera utilizzando la piattaforma GIS in cui, lavorando su un piano assunto per "verticale" non georiferito, di origine  $x=0$   $y=0$ , vengono inserite, scalate, ortorettificate e vettorializzate le singole tessere oggetto di censimento. Tale metodo implica che l'identificazione del perimetro della singola tessera venga eseguito manualmente, per poi lasciare al software tutti i calcoli automatici del caso. In tal modo, essendo agevole a livello tabellare il calcolo delle aree dei poligoni creati (shape area), si è arrivati ad ottenere l'esatta misurazione della loro dimensione. Sfruttando le abilità native dell'ambiente GIS, è possibile gestire facilmente il passaggio della geometria della singola tessera da censire al formato vettoriale e l'implementazione di una tabella di attributi che è stata utilizzata per indicare, ad esempio, per ogni campione il tipo di materiale lapideo impiegato (Fig. 5). La rappresentazione grafica inoltre consente di apprezzare al meglio le caratteristiche del paramento

in quanto la fotografia è spesso forviante e lascia in ombra le caratteristiche più interessanti (MEDRI 2001, 16).

Per le valutazioni statistiche dei parametri di quantificazione e quelli relativi all'errore, si è fatto riferimento a MEDRI 2001, 19. Nella fattispecie, l'applicazione di tale metodo si è inoltre estesa per tenere conto della diversità dei parametri indicati come L1 e L2, che ulteriormente ampliano e completano il metodo seguito. Così facendo ne è risultato l'elenco dei parametri che si riporta in Tab. 1.

Per ulteriori valutazioni sui parametri di forma e dimensione sono stati estratti i valori numerici, minimi (Forma L1/L2 Min; Area minima tessere cm<sup>2</sup>) e massimi (Forma L1/L2 Max; Area massima tessere cm<sup>2</sup>) ed è stata calcolata la media (Forma Media L1/L2; Area media tessere) e la moda (Forma Moda L1/L2; Area Moda tessere cm<sup>2</sup>), arrivando ad avere una valutazione sufficientemente chiara e leggibile di forma e dimensione dei conci, con particolare riferimento alle tessere quadrate o rettangolari oggetto di studio.

Il lavoro si è concentrato sulla catalogazione di 14 rilievi distinti, ma per semplicità e chiarezza si riportano solamente due esempi di campionamento eseguiti in due punti particolarmente significativi del monumento, che convalidano l'ipotesi relativa a due diversi momenti costruttivi del teatro attraverso un'analisi visiva chiaramente leggibile sia in foto e ancora meglio nella rappresentazione grafica (Fig. 5), ma anche grazie alla valutazione metrica.

All'impianto originario ipotizzato all'età di Augusto (Fig. 5, campione 4), si associa una tecnica in opera reticolata grossolana, caratterizzata dalla presenza di elementi di medie dimensioni piuttosto irregolari esclusivamente in

Descrizione campo →	Numero campione	Numero Tessere	Copertura tessere [%]	Copertura della malta [%]	Dimensioni min lato L1 [cm]	Dimensioni max lato L1 [cm]	Moda lunghezza lato L1	Dimensioni min lato L2 [cm]
<b>Edificio</b>	<b>Campione</b>	<b>NT</b>	<b>CT</b>	<b>CM</b>	<b>L1 min</b>	<b>L1 max</b>	<b>L1 moda</b>	<b>L2 min</b>
Teatro - Summa Cavea Venafro - Parete interna	3	100	59,01%	40,99%	4	10,5	7,5	3
Teatro - Versurae Tribunalia Est lato destro	4	50	80,18%	19,82%	8	17	11	7
Descrizione campo →	Dimensioni max lato L2 [cm]	Moda lunghezza lato L2	Fattore di irregolarità lato medio L1	Fattore di irregolarità lato medio L2	Fattore di irregolarità lato medio	Fattore di irregolarità st. dev. L1	Fattore di irregolarità st. dev. L2	Fattore di irregolarità st. dev.
<b>Edificio</b>	<b>L2 max</b>	<b>L2 moda</b>	<b>Illm L1</b>	<b>Illm L2</b>	<b>Illm</b>	<b>Ill st. dev. L1</b>	<b>Ill st. dev. L2</b>	<b>Ill st. dev.</b>
Teatro - Summa Cavea Venafro - Parete interna	10	7	0,172	0,203	0,187	1,289	1,419	1,368
Teatro - Versurae Tribunalia Est lato destro	14,5	12	0,173	0,158	0,175	1,898	1,892	1,894

Tab. 1 – Parametri statistici dei due campioni del teatro di Venafro. Per comodità di lettura la tabella è stata divisa in due parti sovrapposte divise dalla linea nera centrale di demarcazione. In colore grigio è riportata la descrizione dei campi.

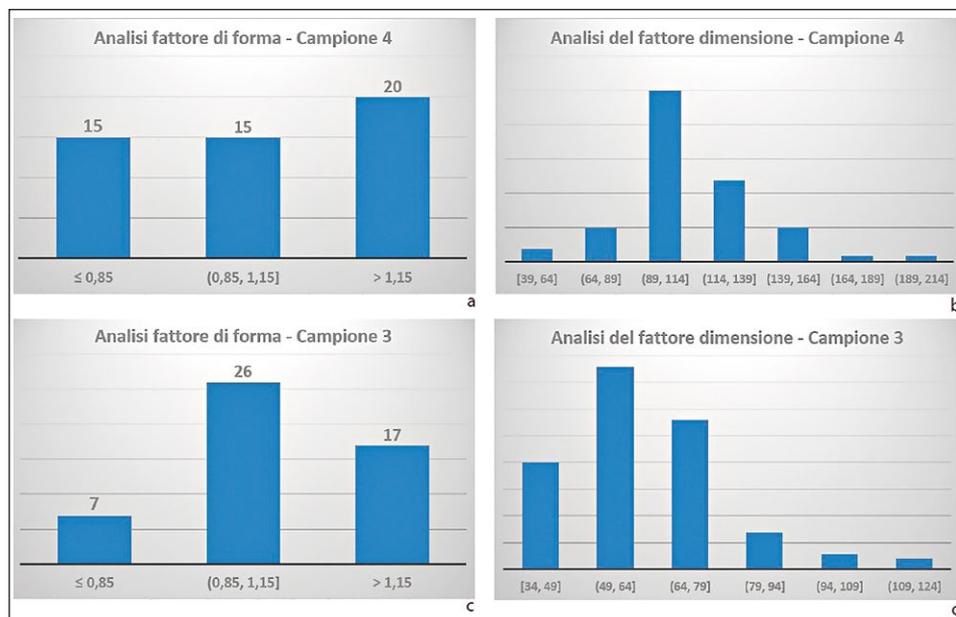


Fig. 6 – Grafici relativi all’analisi dei fattori forma e dimensione delle tessere del campione n. 4 (a-b) e del campione n. 3 (c-d).

materiale calcareo locale. Il caso di Venafro si discosterebbe quindi dalla teoria condivisa nella tradizione di studi dell’opera reticolata che considera nell’epoca augustea un momento di massimo perfezionamento della tecnica (così in LUGLI 1957, 487: «più l’esecuzione è accurata più l’epoca è vicina a quella augustea»).

Tale condizione troverebbe una giustificazione per Venafro se si considera in questa fase l’operato di maestranze locali in un’area effettivamente “periferica” rispetto a ciò che accade nell’Urbe, dove l’accuratezza nel taglio delle tessere doveva essere maggiore (TORELLI 1980). Dai dati numerici censiti si rileva come per il campione analizzato si abbia un’area media delle tessere di 112,1 cm<sup>2</sup> per una percentuale di copertura di circa 80% delle tessere e del 20% circa della malta. Il numero di tessere integre, escludendo quelle tagliate sul perimetro, è di 50 unità (le tessere conteggiate sono esclusivamente quelle non tagliate dai limiti del campione), sulle quali è stato calcolato il parametro relativo alla “forma” (Fig. 6, a), in cui si evidenzia come soltanto 15 di esse, quelle nella colonna centrale, siano tendenzialmente quadrate (lati compresi tra 0,85 e 1,15), mentre per le restanti, 15 hanno una minore dimensione di L1 (lato minore o uguale a 0,85) ovvero rettangolo discendente, e 20 hanno una maggiore dimensione di L1 (lato superiore a 1,15), dando forma così ad un rettangolo ascendente. Il dato che ne deriva, espresso in percentuale,

evidenzia come si abbia il 30% di tessere quadrate e il 70% di tessere rettangolari (ascendenti e discendenti).

Anche per l'analisi del fattore "dimensione" (Fig. 6, b) nonostante si rilevi una notevole diversità fra gli elementi (dai 39 ai 214 cm<sup>2</sup>), la maggior parte dei campioni presentano valori che vanno dagli 89 cm<sup>2</sup> ai 139 cm<sup>2</sup> (terza e quarta colonna da sin.).

Il secondo campionamento è stato eseguito in un tratto di muratura della *summa cavea*, la cui edificazione è attribuibile ad interventi di età giulio-claudia, o comunque in epoca non posteriore all'età flavia. Si tratta, come già accennato, di un intervento di ampliamento del teatro associato ad altre attività edilizie di modifica del monumento, che vede nel caso specifico l'edificazione di un grande muro semicircolare addossato alle pendici del monte Santa Croce con funzione di contenimento dello stesso, rinforzato anche dalla presenza di muri radiali di notevole spessore (circa m 1,20) che formavano piccoli ambienti comunicanti fra loro con funzione di sostegno alla gradinata (Fig. 7).

La tecnica, sempre in opera reticolata realizzata con maggiore cura rispetto a quella del campione precedente, si caratterizza per la presenza di elementi in materiale calcareo associati in questo caso anche a travertino. Essi sono localizzati soprattutto nella porzione bassa del campione (Fig. 5, campione 3), ma in generale distribuiti allo stesso modo lungo tutto il prospetto visibile osservato. In questo caso i parametri metrici rilevati hanno riportato un numero di tessere integre per campione, escludendo quelle tagliate sul perimetro, di 100 unità ed un'area media delle stesse di 61,1 cm<sup>2</sup>, con una percentuale di copertura di 59%, e di 41% della malta.

Il calcolo del parametro relativo alla "forma" (Fig. 6, c) ha restituito, rispetto al campione precedente, un numero maggiore di tessere con forma tendenzialmente quadrata. Infatti 26 di esse, quelle nella colonna centrale, hanno lati compresi tra 0,85 e 1,15, mentre delle restanti soltanto 7 hanno una minore dimensione di L1, rettangolo discendente (lato minore o uguale a 0,85) e 17 hanno una maggiore dimensione di L1, rettangolo ascendente (lato superiore a 1,15), formando in tal modo dei rettangoli. Il dato che ne deriva espresso in percentuale evidenzia come si abbia circa il 50% di tessere quadrate e il 50% circa di tessere rettangolari (ascendenti o discendenti). Anche per l'analisi del fattore "dimensione" (Fig. 6, d) si rileva come ci sia una maggiore uniformità fra gli elementi, in quanto la maggior parte delle tessere si attesta in un intervallo fra 34 cm<sup>2</sup> e 79 cm<sup>2</sup> (prime tre colonne del grafico) in un range generale fra 34 cm<sup>2</sup> a 124 cm<sup>2</sup>.

Dall'analisi dei parametri numerici censiti sui due campioni analizzati si evince come la differenziazione fra essi evidenzia un aspetto più industrializzato nella preparazione delle tessere impiegate per la costruzione del paramento del campione n. 3, che potrebbe indurre ad ipotizzare la presenza di maestranze più specializzate nella fase di ampliamento del teatro. Molti altri sono gli aspetti da dover prendere in considerazione per poter arrivare ad inquadrare



Fig. 7 – Particolare della *summa cavea* (da CAPINI 1991a, 211).

a livello cronologico le tecniche analizzate. Fra i più significativi rientra senza dubbio l'analisi delle malte che nel lavoro di schedatura proposto sono state considerate soltanto a livello macroscopico. Sarebbe infatti interessante campionare le malte attraverso metodologie di tipo archeometrico (radiocarbonio o luminescenza), in quanto la datazione delle malte rappresenta certamente un momento importante nello studio delle tecniche murarie (per una breve panoramica su alcuni recenti lavori cfr. VECCHIANTINI 2019).

La prosecuzione delle analisi metriche, estese a tutti i campioni censiti all'interno del teatro, sarà utile a creare una prima griglia di parametri quantitativi e qualitativi del o dei cantieri che portarono alla realizzazione del monumento. I due esempi riportati costituiscono l'inizio di un percorso di analisi che ha trovato nel teatro di Venafro un primo ambito di applicazione in cui l'evidenza dei diversi paramenti ha consentito di testare il metodo in maniera netta. Il metodo è ad oggi in corso di applicazione anche in altri siti, sia di natura pubblica che privata, del territorio molisano.

#### 4. L'USO DEL GIS NEL PROGETTO DI SCHEDATURA

Il DB ACoR è in grado di fornire una geolocalizzazione di siti ed edifici attraverso l'uso di sistemi GIS (cfr. ad es. DESSALES 2020, in cui è utilizzato il software ESRI ArcWiev). Al suo interno, tuttavia, non è prevista la geolocalizzazione dei singoli elementi schedati, quali ad esempio murature e altri elementi di dettaglio, a scala territoriale. È proprio qui che si inserisce la peculiarità del lavoro presentato, in quanto al potenziale offerto da un tipo di analisi estremamente puntuale e ragionata, fornito dal DB ACoR, si unisce il valore aggiunto della gestione delle emergenze murarie a scala territoriale. Nell'ambito del lavoro di ricerca sulle murature romane in territorio molisano, infatti, è stata creata una piattaforma GIS utilizzando il software open source QGIS nella versione 3.20 per l'inquadramento geografico e cartografico delle emergenze murarie.

La piattaforma è stata implementata attraverso l'acquisizione GPS dei vertici e tramite il rilievo planimetrico degli ingombri delle strutture analizzate a cui ha fatto seguito il trasferimento dei dati acquisiti su piattaforma GIS e la messa a punto delle tabelle associate. La piattaforma GIS, infatti, è in grado di gestire sia il dato cartografico che quello alfanumerico attraverso la tabella "attributi"<sup>5</sup>, legata alle stesse entità murarie con la possibilità di sfruttare le potenzialità dell'analisi spaziale. È proprio in questa tabella, attraverso l'uso di un hyperlink impostato nel campo DB\_ACoR, che gli elementi murari schedati vengono connessi in modalità dinamica, al fine di poterli visualizzare su piattaforma cartografica a scala regionale. Questi ultimi, rappresentati come primitive geometriche poligonali, corrispondono alle UUSSMM, alle quali per ogni struttura possono essere associati uguali codici ACoR come per i codici MR-0442 della Villa dei *Neratii* (Fig. 8) e MR-0529 e MR-0531 del teatro di Venafro (Fig. 9).

Oltre al campo di collegamento al DB ACoR, nella tabella GIS sono stati creati altri quattordici campi (Figg. 8, 9, riquadri B), alcuni dei quali mutuati dallo stesso DB ACoR, attraverso i quali poter eseguire una ricerca per "tipologia" architettonica e tecnica, per "localizzazione" sia in funzione della moderna area geografica che di quella antica legata alla suddivisione municipale di epoca romana, per "cronologia", ove presente, e infine per "conservazione" attraverso il campo "condizione", dove viene riportato lo stato in cui attualmente l'opera riversa.

Nelle Figg. 8 e 9 si riportano i due casi relativi alla mappatura/schedatura su base GIS per i due siti interessati dall'indagine. Per la Villa dei *Neratii* si evidenzia come in mappa, nel riquadro verde (A, verde), attraverso l'utilizzo dello strumento di interrogazione del GIS, siano state selezionate le geometrie corrispondenti alle murature con codice ACoR MR-0442 (in retino rosso) che

<sup>5</sup> [https://docs.qgis.org/2.18/it/docs/gentle\\_gis\\_introduction/vector\\_attribute\\_data.html](https://docs.qgis.org/2.18/it/docs/gentle_gis_introduction/vector_attribute_data.html).

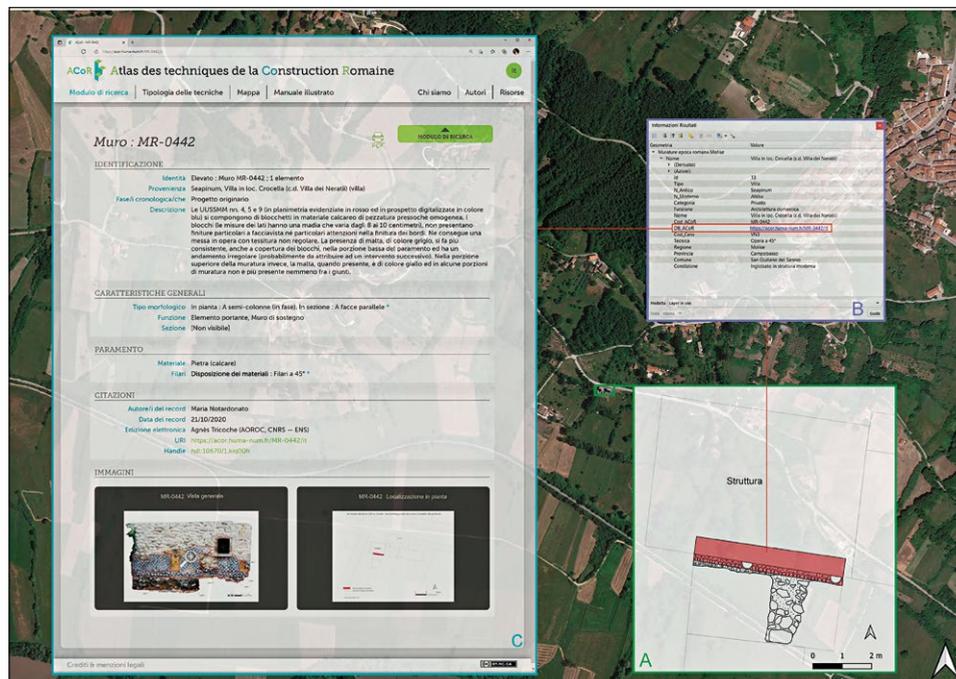


Fig. 8 – Schermata su base GIS del sistema di schedatura GIS/ACoR della villa presso il comune di San Giuliano del Sannio (cd. Villa dei Neratii).

fanno capo alla tabella su base GIS (B, viola) a sua volta collegata tramite il campo DB\_ACoR (evidenziata nel riquadro rosso) alla scheda “Parete: MR-0442” dell’atlante ACoR (C, azzurro).

Per il teatro romano di Venafro (Fig. 9), essendo le murature analizzate di carattere più “monumentale”, la visualizzazione in mappa risulta più agevole. I due censimenti riportati (in giallo il campione n. 4 e in rosso il campione n. 3) sono illustrati, come per il caso precedente, con i poligoni in pianta delle murature censite a cui fanno capo, in Fig. 9, le due tabelle GIS (B, giallo e B, rosso) accessibili attraverso l’utilizzo dello strumento di interrogazione del GIS. Le geometrie corrispondenti al campione con codice ACoR\_MR0529 (B, giallo) che fanno capo alla tabella su base GIS e quella corrispondente al codice ACoR\_MR0531 (B, rosso) sono a loro volta collegate tramite il campo DB\_ACoR (evidenziate con riquadro in giallo e rosso nelle corrispettive tabelle) alle corrispettive schede “Muro: MR0529” (C, giallo) e “Muro: MR0531” (C, rosso) dell’atlante ACoR.

Un aspetto importante risultante da questa operazione è la possibilità, una volta associati in modo univoco gli elementi sulle due diverse piattaforme (GIS e ACoR), di poter consultare il dataset in un unico blocco, ricco di informazioni

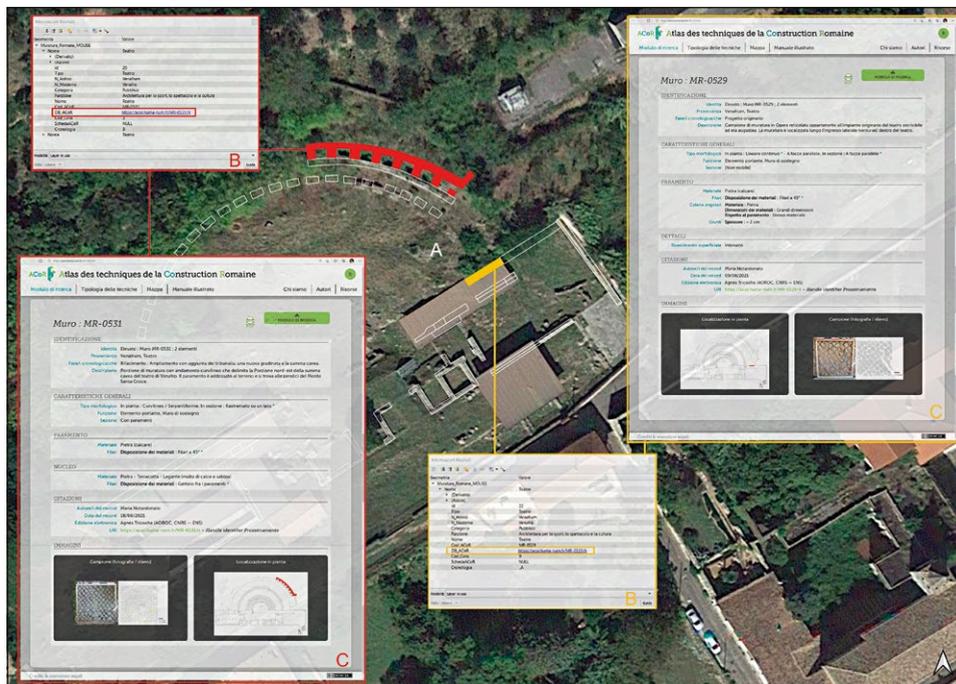


Fig. 9 – Schermata su base GIS del sistema di schedatura GIS/ACoR del teatro di Venafro.

sia tecniche che spaziali. L'utilità principale del sistema consiste nell'apprezzerne la diffusione e correlazione dei dati sul territorio potendo, in modalità simultanea, accedere alle schede specifiche del sistema ACoR attraverso l'interrogazione delle geometrie corrispondenti alle murature georiferite della regione Molise.

## 5. CONCLUSIONI

Il contesto geografico analizzato, ossia il territorio dell'odierno Molise, è attualmente ancora poco indagato e le informazioni sul tema delle opere murarie di epoca romana, sono estremamente frammentarie. Tale condizione ha stimolato la volontà di intraprendere uno studio a carattere innovativo per uno dei tipi di paramento più rappresentativo dell'epoca in esame, l'opera a 45°. L'approccio interdisciplinare impiegato ha unito le potenzialità dei sistemi GIS, utilizzati non solo come strumento per la geolocalizzazione, all'utilizzo di una banca dati internazionale (ACoR). Il lavoro sperimentale così avviato, si pone come un primo contributo allo studio territoriale delle emergenze architettoniche attraverso l'uso di un sistema di schedatura estremamente

esaustivo. La metodologia qui riportata è in corso di applicazione in anche altri siti della regione Molise, insieme alla sperimentazione di nuove tecniche statistiche.

L'obiettivo è quello di implementare il sistema con il maggior numero di dati possibile sfruttando anche l'automazione di alcuni passaggi su base GIS. In particolare, si fa riferimento alla digitalizzazione e calcolo in automatico di alcuni parametri dei componenti presenti all'interno dei campioni censiti. I risultati di queste nuove tecniche di sperimentazione saranno oggetto di future pubblicazioni.

Attraverso il lavoro avviato si vuole offrire, oltre al censimento delle emergenze strutturali di epoca romana, un primo contributo allo studio territoriale delle emergenze architettoniche attraverso l'uso di un sistema di schedatura estremamente esaustivo. La metodologia qui riportata è in corso di applicazione anche in altri siti della regione Molise e ci si augura di implementare il sistema con il maggior numero di dati possibile anche grazie all'automazione di alcuni passaggi su base GIS, relativi in particolare alla digitalizzazione dei campioni censiti.

MARIA NOTARDONATO

Università degli Studi del Molise  
m.notardonato@gmail.com

### *Ringraziamenti*

Desidero ringraziare la Prof.ssa Fulvia Ciliberto che, in qualità di responsabile scientifico per lo scavo della villa romana (cd. Villa dei *Neratii*) nel comune di San Giuliano del Sannio (CB), mi ha autorizzata a pubblicare i dati sulle murature. Ringrazio inoltre la Prof.ssa Hélène Dessales (responsabile del progetto ACoR) per i consigli e le informazioni fornite, il Prof. Stefano Camporeale (componente del gruppo di lavoro del progetto ACoR) e Agnès Tricoche (sviluppatrice del database ACoR) per la disponibilità dimostrata.

### BIBLIOGRAFIA

- AURIGEMMA S. 1922, *Statue imperiali e sculture decorative minori di recente scoperta in Venafro*, «Bollettino d'Arte», 58-76.
- BONETTO J. 2003, *Gli edifici per spettacolo e la viabilità nelle città dell'Italia romana*, in G. TOSI, *Gli edifici per spettacoli nell'Italia romana*, Roma, vol. I, Roma, Quasar, 923-939.
- BONETTO J., CAMPOREALE S., PIZZO A. (eds.) 2014, *Arqueología de la construcción 4. Las canteras en el mundo antiguo: sistemas de exploración y procesos productivos (Padova 2012)*, «Archivio Español de Arqueología», Suppl. 49, Mérida.
- BUKOWIECKI E., DESSALES H., DOUBOLOUZ J. 2008, *Ostie. L'eau dans la ville: châteaux d'eau et réseau d'adduction*, Collection de l'École Française de Rome, 402, Rome.
- CAMPOREALE S. 2018, *Archeologia dei cantieri di età romana*, in A. BECCHI, R. CARVAIS, J. SAKAROVITCH (eds.), *L'Histoire de la construction/Construction History. Relevé d'un chantier européen/Survey of a European Building Site*, «Histoire des techniques», 13, Paris, Classiques Garnier, 1021-1049.

- CAMPOREALE S., DESSALES H., PIZZO A. (eds.) 2008, *Arqueología de la construcción*, 1. *Los procesos constructivos en el mundo romano: Italia y provincias occidentales* (Mérida 2007), «Archivio Español de Arqueología», Suppl. 50, Mérida.
- CAMPOREALE S., DESSALES H., PIZZO A. (eds.) 2010, *Arqueología de la construcción*, 2. *Los procesos constructivos en el mundo romano: la economía de la obras* (Parigi 2009), «Archivio Español de Arqueología», Suppl. 57, Madrid-Mérida.
- CAMPOREALE S., DESSALES H., PIZZO A. (eds.) 2012, *Arqueología de la construcción*, 3. *Los procesos constructivos en el mundo romano: Italia y provincias occidentales* (Siena 2008), «Archivio Español de Arqueología», Suppl. 50, Mérida.
- CAMPOREALE S., DESSALES H., TRICOCHÉ A. (eds.) c.s., *Atlante delle tecniche della costruzione romana. Manuale*, Roma, Quasar, in corso di stampa.
- CAPINI S. 1990, *Venafrò (Isernia). Il teatro romano*, «Bollettino d'Archeologia», 1-2, 229-232.
- CAPINI S. 1991a, *Venafrum*, in S. CAPINI, A. DI NIRO (eds.), *Samnium. Archeologia del Molise*, Roma, Quasar, 209-213.
- CAPINI S. 1991b, *Venafrò*, in *La romanisation du Samnium aux II et I siècles av. J.-C., Actes du colloque organisé par le Centre Jean Bérard en collaboration avec la Soprintendenza archeologica e per i BAAAS del Molise et la Soprintendenza archeologica per le Province di Salerno, Avellino e Benevento* (Naples 1988), Napoli, Centre Jean Berard, 21-33.
- CAPINI S. 2015, *Venafrò, città di Augusto*, in R. CECILIA (ed.), *Venafrum città di Augusto. Tra coltura e cultura, topografia, archeologia e storia*, Roma, Quasar.
- CECCARELLI A., FRATIANNI G. 2017, *Molise*, in S. RINALDI TUFFI (ed.), *Archeologia delle regioni d'Italia*, Roma, BraDypUS.
- CILIBERTO F. 2015, *Nugae sepinati I. Il macellum di Sepino: una puntualizzazione*, «LANX. Rivista elettronica della Scuola di Specializzazione in Archeologia dell'Università degli Studi di Milano», 21, 41-53 (<https://doi.org/10.13130/2035-4797/7614>).
- CILIBERTO F., DI PALMA F. 2018, *La pavimentazione del foro di Saepinum*, in *Altilia, Atti del XXIII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM) (Narni, 2017)*, Roma, Quasar, 553-563.
- CILIBERTO F., GUIDI A. 2017, *Nugae sepinati II. Le pavimentazioni del macellum di Saepinum*, in *Altilia, Atti del XXII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM) (Matera 2016)*, Tivoli, Scripta Manent, 37-48.
- CILIBERTO F., NOTARDONATO M. c.s., *La ripresa degli scavi della villa romana in loc. Crocella (cosiddetta Villa dei Neratii) presso San Giuliano del Sannio (CB): aspetti preliminari*, in corso di stampa.
- COARELLI F., LA REGINA A. 1984, *Abruzzo Molise*, Roma-Bari, Guide Archeologiche Laterza.
- COVOLAN M. 2017, *Venustus est reticulatum. L'evoluzione dell'opera reticolata a Cuma*, «European Journal of Roman Architecture», 1, 7-24.
- DE BENEDITTI G. (ed.) 2011, *San Giuliano del Sannio, La villa dei Neratii*, Campobasso, Palladino.
- DELAINE J., CAMPOREALE S., PIZZO A. (eds.) 2016, *Arqueología de la construcción*, 5. *Man-made materials, engineering and infrastructure* (Oxford 2015), «Archivio Español de Arqueología», Suppl. 75.
- DEL VECCHIO I. 2014, *Testimonianze di Sepino tardo-ellenistica: il caso della pavimentazione con pseudo emblema dall'area della basilica*, in *Atti del XIX Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM) (Isernia 2013)*, Tivoli, Scripta Manent, 5-14.
- DESSALES H. 2010, *Les usages de l'opus reticulatum dans la construction romaine: le cas des enceintes et des aqueducts*, in R. CARVAIS, A. GUILLERME, V. NÈGRE, P. POTIÉ, J. SAKAROVITCH (eds.), *Edifices - Artifices. Histoires Constructives. Recueil de textes issus du premier Congrès francophone d'histoire de la construction* (Paris 2008), Paris, Picard, 493-502.
- DESSALES H. 2017, *L'archéologie de la construction: une nouvelle approche de l'architecture romaine*, «Annales Histoire Sciences Sociales», 72, 75-94.

- DESSALES H. 2020, *The Villa of Diomedes. The Making of a Roman Villa in Pompeii*, Paris, Hermann.
- DIEBNER S. 1979, *Aesernia – Venafrum*, Roma, Giorgio Bretschneider Editore.
- GAGGIOTTI M. 1987-1988, *Presenze senatorie ed evergetismo a Saepinum*, «Annali della Facoltà di Lettere e Filosofia di Perugia», n.s. 12, 47-57.
- GUIDI A. 2013, *Un pavimento in opus sectile da Sepino*, in *Atti del XVIII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM) (Cremona 2012)*, Tivoli, Scripta Manent, 421-432.
- GUIDI A. 2014, *Le pavimentazioni degli edifici lungo il lato SE del foro di Sepino (CB)*, in *Atti del XIX Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM) (Isernia 2013)*, Tivoli, Scripta Manent, 21-30.
- LUGLI G. 1957, *La tecnica edilizia romana: con particolare riferimento a Roma e Lazio*, Roma, Bardi.
- MANNONI T. 1993, *Le tradizioni liguri negli impieghi delle pietre*, in P. MARCHI (ed.), *Pietre di Liguria*, Genova, Sagep, 37-44.
- MANNONI T. 1997, *Il problema complesso delle murature storiche in pietra 1. Cultura materiale e cronotologia*, «Archeologia dell'Architettura», 2, 15-24.
- MANNONI T., BOATO A. 2002, *Archeologia e storia dei cantieri di costruzione*, «Arqueología de la Arquitectura», 1, 39-53.
- MATTEINI CHIARI M., SCOCCA V. 2014, *Saepinum (Altilia)*, in S. CAPINI, P. CURCI, M.R. PICIUTI (eds.), *Regio IV. Alife, Bojano, Sepino, Frana, Tempia, Deluba. Corpus dei luoghi di culto dell'Italia antica (FTD)*, 3, Roma, Quasar, 65-92.
- MEDRI M. 2001, *La diffusione dell'opera reticolata: considerazioni a partire dal caso di Olimpia*, in *Constructions publiques et programmes éditaires en Grèce du II<sup>e</sup> s. av. J.C. au I<sup>er</sup> s. ap. J.C. (Athènes 1995)*, «Bulletin de Correspondance hellénique», Suppl. 39, 15-40.
- PENSABENE P., BRUNI V. c.s., *La normalizzazione dell'ordine corinzio in età augustea e il teatro di Venafro (IS)*, in *Tra sacro e profano pubblico e privato nella città di Venafro dall'antichità al medioevo (Venafro 2019)*, Atti del Convegno, in corso di stampa.
- TORELLI M. 1980, *Innovazione nelle tecniche edilizie romane tra il I secolo a.C. ed il II secolo d.C.*, in *Tecnologia, economia e società nel mondo romano*, Atti del Convegno (Como 1979), Como, 139-161.
- VECCHIATTINI R. 2019, *Datate la malta. Alcuni metodi a confronto*, «Archeologia dell'Architettura», 24, 9-10.

## ABSTRACT

This article is the result of a research project currently being conducted at the University of Molise (Italy), aimed at drawing a cognitive framework of Roman building techniques in today's Molise Region. The methods used to pursue this objective are specifically linked to masonry walls analysis, with an innovative interdisciplinary approach, entailing the use of a database, which is the result of the work of an international team of researchers (ACoR), in addition to the use of experimental methods to analyse the metric and the GIS platform to manage the geo-localization of the sites. Two different case studies are included in this paper, such as a Roman villa, i.e. a private building, in the municipality of San Giuliano del Sannio (CB), and a theatre, i.e. a public construction, in the municipality of Venafro (IS). Thanks to the different nature of the two examples, a different approach was used in analysing the parameters. For the private villa, the method employed was a stratigraphic reading of the structure, performed analytically; whereas for the public building, given its construction complexity being examined and the lack of results from the archaeological investigation, a sample method with metric parameter analysis was applied – already tested on the sites of Olimpia, Ostia and Cuma. The main aim is to contribute, through an extremely accurate analysis, filing, and geo-localization system, in the understanding of an area which is still under-researched and in which architectural information are extremely fragmented and little known.

## RILIEVO PER LA MODELLAZIONE E LA GESTIONE INFORMATIVA HBIM. APPROCCIO MULTICOMPONENTE PER L'ANALISI STRUTTURALE E IL RESTAURO DI EDIFICI STORICI

### 1. INTRODUZIONE

Per progettare il restauro, il consolidamento o la ricostruzione di parti di un edificio storico con problemi di assetto statico è fondamentale realizzare un modello costruttivo intelligente, che migliori la qualità e l'affidabilità del progetto, soprattutto nell'evidenziare le criticità strutturali, le stratigrafie murarie con le relazioni tecnologiche dei componenti edilizi e la loro distribuzione spaziale. Un complesso interrelato di informazioni che trova oggi una sistematizzazione nella modellazione basata sulla creazione di librerie di oggetti HBIM parametrici, concepiti e sviluppati attraverso il linguaggio descrittivo geometrico (GDL – Geometric Descriptive Language) che si affida alle proporzioni classiche degli elementi selezionati e sul loro utilizzo come ponte tra il modello BIM vero e proprio e i dati raccolti dal rilievo (MURPHY *et al.* 2009).

In questo settore, con l'avvento di strumentazioni digitali fotogrammetriche, laser, UAV, il mezzo attraverso il quale comprendere e comunicare il manufatto ha subito una profonda trasformazione, tanto da divenire un contenitore virtualmente illimitato di informazioni da cui estrarre differenti forme di rappresentazione (HERMAN *et al.* 2020). L'elevata precisione millimetrica raggiunta con l'ausilio delle nuvole di punti consente non solo il rilievo accurato di profili 2D orizzontali e verticali, situazioni di fuori piombo, scostamenti negli allineamenti, ma genera modelli parametrici interoperabili specifici con elevati livelli di accuratezza, complessità e informazione (BRUMANA *et al.* 2019).

Ma i dati raccolti con le tecniche geomatiche non sono sufficienti a fornire le informazioni necessarie per creare un modello strutturale rappresentativo dell'assetto statico e dei comportamenti dinamici di un edificio. Un'operazione che richiede una profonda competenza capace di interpretare le fasi del processo edilizio storico da un punto di vista costruttivo (TUCCI *et al.* 2004). Il rilievo diretto del manufatto, registrando notazioni critiche e grafiche approfondite, favorite dalla consuetudine con il monumento, consente di valutare dissesti, quadro fessurativo, confronti ed effetti dei carichi (CARBONARA 1996, 416).

Rilevare e modellare con grande accuratezza geometrico-dimensionale testimonianze dell'architettura storica non garantisce automaticamente di ricostruire gli elementi costruttivi quali le murature, gli orizzontamenti, le coperture che, con tutte le loro morfologie irregolari, con situazioni di dissesto

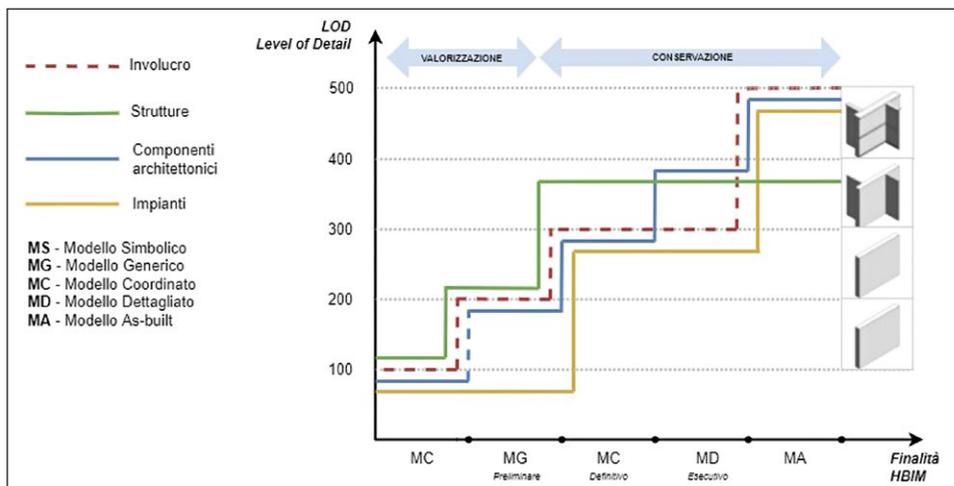


Fig. 1 – Processo HBIM e LOD per differenti finalità (BHiLAB - CNR ISPC).

strutturale, di degrado materico, di vulnerabilità sismica, condizioneranno e indirizzeranno progetti di conservazione non solo di edifici relativamente integri, ma spesso interventi di ricostruzione di fabbricati abbandonati e diruti o crollati per eventi sismici.

Se utilizziamo il sistema di valutazione BIM per decidere il Livello Di Dettaglio (LOD Level Of Details) del modello da realizzare in rapporto alle finalità di progetti esecutivi di conservazione, si chiarisce la differenza tra l’obiettivo della valorizzazione e quello della conservazione (Fig. 1). Partendo dall’assunto di una indispensabile integrazione tra analisi critica delle strutture e rilievo e modellazione 3D, il documento è organizzato come segue:

- approccio metodologico impostato sulla selezione di classi di dati che si combinano nel rappresentare lo stato dell’edificio,
- protocollo per un rilievo integrato guidato da un piano strategico di raccolta dati,
- approccio sistematico con rilievo diretto dei casi studio,
- procedure per un processo di decostruzione virtuale del manufatto e per la creazione di modelli parametrici strutturati con informazioni semantiche.

E.G., G.C.

## 2. APPROCCIO METODOLOGICO PER L’HBIM COSTRUTTIVO

La proposizione «ciò che è specifico dell’architettura è il modo di porre in relazione le varie strutture che confluiscono in essa» (TAFURI 1968)

rappresenta un assioma che con immediata evidenza e in maniera sostanziale esprime la logica su cui si fonda la metodologia proposta. Si parte dall'assunto che l'architettura classica è caratterizzata da un sistema di rapporti dotati di intrinseca logica relazionale tra le parti e il tutto, la quale determina non solo gli aspetti formali, ma anche l'assetto costruttivo. È utile recuperare una riflessione filosofica che rileva come le relazioni posseggano una propria modalità e dunque una forma strutturante che apre ad un'architettura delle relazioni, proiettivamente intesa quale matrice generativa, per affermare che la struttura fondamentale della realtà si definisce come processo e relazione, per cui nessuna forma è isolata e tutte sono interagenti (PACI 1966, 184-185).

La metodologia che viene presentata in questo articolo riguarda un approccio integrato basato sull'identificazione delle relazioni in chiave ontologica che legano quei componenti architettonici che con i loro specifici caratteri e con la loro interdipendenza hanno contribuito a determinare lo stato conservativo di un edificio storico. Questa visione strategica ha indirizzato la documentazione e i rilievi di alcuni complessi monastici rappresentativi di una rete di architettura religiosa di grande valore, situata sulle aree collinari della valle del Drinos nel Sud dell'Albania. A causa di fenomeni di abbandono e crollo di porzioni significative, il processo per il loro restauro, ma soprattutto per la ricostruzione reintegrativa dell'immagine originaria, è partito dall'analisi di grafici e testi di archivio, per poi utilizzare in maniera integrata tecnologie di rilievo strumentale e processi di analisi e ricostruzione virtuale degli edifici originari, così da raccogliere in un unico sistema condiviso, una piattaforma HBIM, dati di diversa natura: storico-evolutivi, geometrico-dimensionali e costruttivi.

La metodologia che è stata sperimentata nel sito di S. Maria in Goranxi, ha previsto l'osservazione sul campo del monumento (fasi di conoscenza), l'individuazione delle parti che lo costituiscono (fase di scomposizione in elementi spaziali, tipologici e componenti strutturali), l'individuazione delle relazioni esistenti tra le parti (semantizzazione e organizzazione delle ontologie). I componenti sono stati classificati in cinque classi di dati, le cui reciproche relazioni contribuiscono a creare l'identità architettonico-strutturale dell'edificio a supporto di un modello costruttivo intelligente.

## *2.1 Classi di dati per l'HBIM*

Se vogliamo analizzare e approfondire le specifiche esigenze di modellazione HBIM per il progetto di restauro alla scala architettonica, è possibile distinguere diversi filoni di ricerca e analizzare lo stato dell'arte. Considerando in generale l'approccio alle componenti architettoniche il lavoro condotto da Dore (DORE *et al.* 2015) integra la modellazione dell'edificio creata da dati storici con la modellazione procedurale sviluppata dal rilievo laser scanner sia per l'analisi strutturale che per quella conservativa. Altri lavori definiscono

librerie di componenti HBIM utilizzando le risorse messe a disposizione da software commerciali per creare librerie dedicate di oggetti parametrici (ORENI *et al.* 2014; GARAGNANI *et al.* 2016; LÓPEZ *et al.* 2017). Sempre collocabile in questo filone ma con il fine di superare i limiti di rappresentazione dell'HBIM possiamo citare i lavori di Garagnani (GARAGNANI 2013; GARAGNANI *et al.* 2021) nel quale la geometria degli elementi viene importata nell'ambiente BIM associandola manualmente ad una macro-categoria di famiglie. Altri lavori sono quelli focalizzati sul tema dell'arricchimento semantico e della gestione della conoscenza (QUATTRINI *et al.* 2017; BRUNO *et al.* 2018; SIMEONE *et al.* 2019).

Un altro tema importante, usualmente collocato sotto il termine di Analisi stratigrafica, riguarda le relazioni esistenti tra parti materiali dell'edificio costruite in epoche diverse. A tal fine, Beltramo (BELTRAMO *et al.* 2019), sulla scorta dei lavori condotti da Chiabrando (CHIABRANDO *et al.* 2017) per la mappatura del decadimento murario in ambiente BIM e da Diara (DIARA, RINAUDO 2018), opera per l'estrazione e gestione dei dati IFC tramite Database Management System (DBMS). Anche il lavoro condotto da Trizio (TRIZIO *et al.* 2019) si concentra sull'analisi stratigrafica, effettuata sia su fotopiani dei fronti, generati dal modello fotogrammetrico, sia sul modello digitale mediante software per la visualizzazione e modifica delle mesh. Borin (BORIN *et al.* 2020) definisce un flusso di lavoro che per la rappresentazione dei diagrammi di Harris ricorre a sistemi ontologici integrati con l'ambiente BIM. Più di recente Banfi (BANFI *et al.* 2022) conduce un lavoro che ha l'obiettivo di individuare in ambiente BIM superfici e volumi stratigrafici mappati con descrizioni e materiali.

Ricerche più direttamente dedicate a comprendere, valutare e rappresentare situazioni di edifici fortemente dissestati, propongono metodi di analisi delle *Strutture Costruttive* come nello studio eseguito da PEPE *et al.* (2020) che propone un flusso di lavoro che integra modelli HBIM, FEM, rilievo geomatico e modellazione. Con un approccio simile il lavoro di Rolin (ROLIN *et al.* 2019) è incentrato sulla stima della deformazione della struttura e sulla distribuzione delle sollecitazioni di compressione e trazione in tutti i componenti della struttura complessa; mentre quello di CURRÀ *et al.* (2021) propone un flusso di lavoro in cui il modello HBIM consente lo scambio strutturato delle conoscenze acquisite sull'edificio esistente e permette l'analisi dei meccanismi locali per verificare le prestazioni dell'edificio.

Sulla creazione e gestione in ambiente HBIM di Abachi delle Murature, Adami (ADAMI *et al.* 2020) propone un nuovo metodo di classificazione, cercando di superare i limiti del tradizionale sistema 2D e di sfruttare appieno il potenziale delle soluzioni offerte dai BIM authoring tools; mentre Diara (DIARA, RINAUDO 2020) propone una classificazione nel formato standard IFC implementata all'interno di un software BIM open source.

Parallele ma distinte da quelle precedenti sono le ricerche riguardanti la classificazione dei Dissesti Strutturali. In quest'ambito ZUCCARO *et al.* 2011

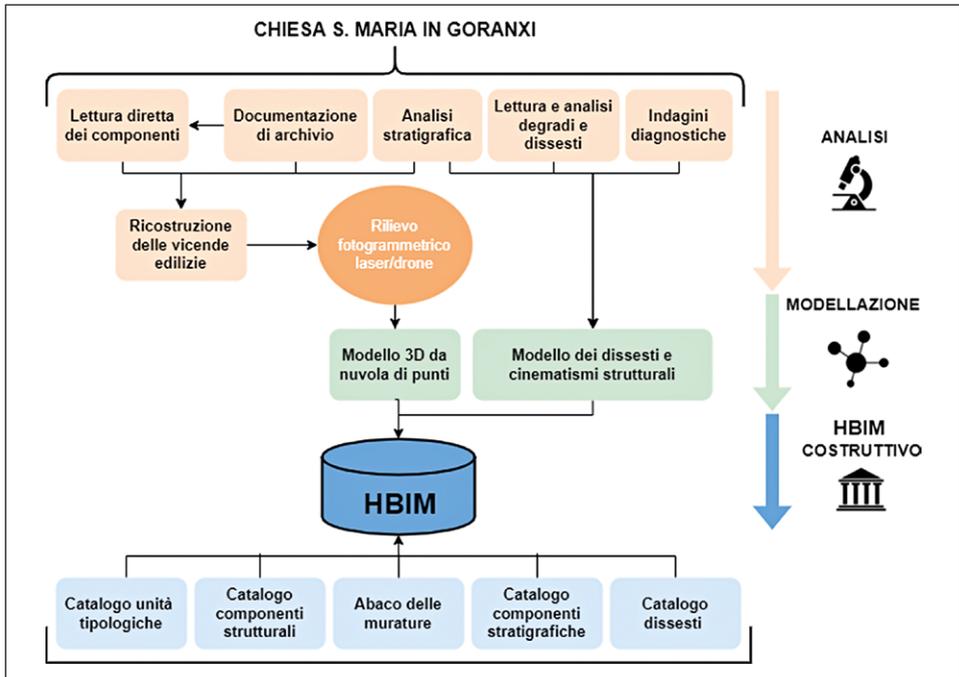


Fig. 2 – Framework proposto, basato sull’integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici per la documentazione completa dell’edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

propongono uno strumento multimediale di autoformazione per la valutazione dei danni provocati dagli eventi sismici. I lavori di Dore (DORE *et al.* 2015) e di Valero (VALERO *et al.* 2018) presentano un sistema per il monitoraggio delle murature integrando strumenti di reality capture, data processing (compreso il machine learning) e modelli HBIM. Il lavoro di Bernardello (BERNARDELLO *et al.* 2020), invece, suggerisce due alternative per creare oggetti semantici tridimensionali in un ambiente BIM nei quali integrare le informazioni solitamente incorporate nei disegni bidimensionali.

Il flusso di lavoro HBIM procedurale che si intende sviluppare è mostrato nella Fig. 2. In una prima fase, dopo la raccolta di documentazione archivistica, si effettuano le analisi per ricostruire le vicende edilizie del monumento. Viene stabilito un protocollo, non solo per la costruzione del database relativo a questi dati, ma per procedere all’incrocio semiautomatico di informazioni relative all’assetto statico. Il protocollo prevede che in maniera semiautomatica si definisca il programma di rilievi integrati, finalizzati a produrre nuvole di punti da importare nel software HBIM e trasformare in un modello 3D, orientato alla modellazione delle informazioni.

A questo scopo il presente contributo introduce il concetto di decostruzione dell'edificio storico articolando i dati in cinque classi distinte in Unità tipologiche, Componenti strutturali, Componenti di discontinuità temporale, Abachi delle murature e degli orizzontamenti, Abachi dei dissesti, dotate delle loro proprietà morfologiche, materiche e costruttive, applicando le potenzialità dell'utilizzo dei modelli semantici e le relazioni tra i vari componenti:

– *Unità tipologiche*. Rappresentano insiemi architettonici che spazialmente e funzionalmente hanno una identità architettonica. Nel caso della chiesa di S. Maria Goranxi, sono unità il naos, il narcece, l'esonarcece, i quali con la loro conformazione spaziale, la disposizione planimetrica e l'aggregazione compositiva, possono influire sull'assetto statico.

– *Componenti strutturali*. Il processo analitico decostruisce il manufatto, distinguendo i vari componenti strutturali (murature in elevazione, pilastri, volte, cupole, etc.) e le relazioni che in termini di posizione, carichi, connessioni costruttive concorrono a provocare i dissesti. Rientrano in questa classe le informazioni geomorfologiche del sito.

– *Componenti di discontinuità temporale*. In un percorso fondato sulla gestione informativa tridimensionale del manufatto, gli elementi architettonici realizzati in epoche diverse, vengono individuati secondo un approccio e modalità operative che si collegano ad una posizione critica (BONELLI 1986) nella quale si afferma che la stratigrafia archeologica (nata per strati orizzontali compatti e registrata con sezioni 2D) mal si adatta alla complessità degli organismi edilizi con spazi vuoti, parti costruttive discontinue, masse murarie spesso trasversali a tutto il complesso architettonico.

– *Abaco delle murature e degli orizzontamenti*. Assimilabile alle famiglie del BIM, cataloga sia le strutture verticali costituenti l'involucro opaco dal punto di vista della composizione materica, delle modalità costruttive e della qualità muraria (tessitura, posa in opera, sezione trasversale, presenza intonaco, collegamenti tra pareti murarie, interventi recenti e stato di consistenza) sia le strutture orizzontali (solai, volte, cupole, coperture). L'Abaco fa riferimento ad un catalogo in progress da costruire utilizzando le monografie di settore, i manuali, gli abachi territoriali.

– *Abaco dei dissesti*. La metodologia considera i 28 meccanismi di danno associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti in una chiesa, così come indicato nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri sulla Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (DPCM 2008). Attraverso un opportuno modello è possibile valutare un indice di vulnerabilità e quindi l'indice di sicurezza sismica dell'edificio (GIGLIARELLI *et al.* 2020). La procedura, nata per tipologie di chiese nazionali, è stata adattata alle chiese in esame.

E.G., L.C.

### 3. RILIEVO INTEGRATO PER L'HBIM

Questa fase del progetto è partita dalla consapevolezza che l'acquisizione oggi avviene attraverso processi che si avvalgono di strumenti avanzati per il rilievo sul campo; parliamo di tecnologie GPS, Lidar, Slam e fotogrammetriche, utilizzabili singolarmente in relazione al dato, oppure abbinando una o più tecnologie affidandosi ad un protocollo procedurale finalizzato ad un processo integrato, in grado di definire dei percorsi di rilievo 3D ottimizzati in funzione delle caratteristiche del modello fisico da rilevare, cercando di risolvere le problematiche di multi-risoluzione e conservazione dell'affidabilità del dato particolarmente critici nel costruito storico.

Il protocollo ha quindi l'obiettivo di selezionare gli strumenti in relazione alle finalità del rilievo e a fattori contestuali al progetto di rilievo (disponibilità di fondi, personale esperto, reperibilità di strumentazione, etc.). Lo stesso protocollo preserva il modello dalla ridondanza di informazioni che è uno dei principali problemi di questo tempo e che ha cambiato l'approccio operativo del rilevatore, un tempo attento selezionatore dei dati utili ad una rappresentazione efficiente, ma oggi accumulatore massivo di informazioni, supportato sempre più da dispositivi capaci di agevolare e democratizzare soprattutto le operazioni di ripresa del dato numerico (nuvole di punti) (BIANCHINI *et al.* 2019; GIGLIARELLI *et al.* 2020).

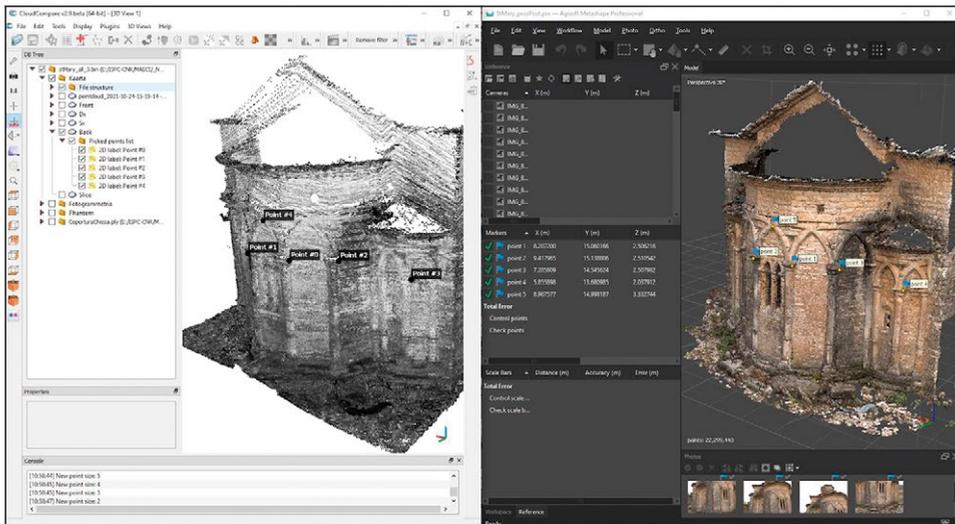


Fig. 3 – Individuazione di punti omologhi nella nuvola rada da laser scanner e nella nuvola dettagliata da fotogrammetria terrestre per trasformare il secondo dato rispetto al primo. Operazione effettuata per l'orientamento del prospetto posteriore della chiesa (BHiLAB - CNR ISPC).

Nei siti studiati sono inoltre emersi altri temi verso cui convergere le successive operazioni di rilievo: la conoscenza dell'orografia del terreno e l'indagine dei resti dei monasteri che circondano le chiese. In base agli obiettivi di indagine e ai fattori contestuali il gruppo di lavoro formato da esperti dell'ISPC CNR, dell'Univpm e dell'IKTK ha ritenuto utile optare per le seguenti tecnologie di rilievo: la fotogrammetria aerea per la mappatura del terreno, la restituzione dell'impianto planimetrico del monastero e delle coperture della chiesa; la fotogrammetria terrestre per la restituzione dei prospetti esterni e dell'intradosso delle volte e infine la scansione laser con tecnologia SLAM per la descrizione spaziale e per la registrazione relativa dei prodotti di rilievo. A supporto di un orientamento globale del dato discreto, si è proceduto con una battuta di punti utilizzando stazioni GPS (Fig. 3).

Attraverso il passaggio Scan-to-Bim si è passati dal modello digitale reality-based al “modello interpretativo/ricostruttivo” in HBIM, considerato ormai da anni come una possibile soluzione in grado di migliorare la rappresentazione del patrimonio costruito e la conoscenza ad esso correlata (LOGOTHETIS *et al.* 2015; POCOBELLI *et al.* 2018), soprattutto grazie alla sua capacità di andare oltre la mera restituzione geometrica per rappresentare informazioni relative ad aspetti del manufatto diversi dalla geometria, nonché di consentire alcune operazioni logiche e di ragionamento su di essi attraverso l'integrazione dei dati in un unico repository coerente e accessibile (VOLK *et al.* 2014). La finalità del modello HBIM sviluppato è stato quello di essere uno strumento di sintesi interpretativa e condivisa per la conoscenza del bene (BANFI *et al.* 2019; CLINI *et al.* 2020) ed una base per il riconoscimento delle unità, dei componenti e degli abachi.

E.G.

#### 4. CASI DI STUDIO. MONASTERI E CHIESE POST BIZANTINE IN ALBANIA MERIDIONALE

L'occasione di sperimentare questa metodologia è nata durante la prima missione del 2019 del progetto “Tecnologie multidisciplinari per lo studio e la conservazione dei Monasteri Post Bizantini in Albania meridionale”, coordinato dall'ISPC CNR e sostenuto finanziariamente dal Ministero degli Affari Esteri della Repubblica Italiana. Il progetto intende contribuire allo studio, alla salvaguardia e alla valorizzazione di tre di questi straordinari monumenti situati nel Sud dell'Albania, nella provincia di Gjirokastra, applicando un programma integrato che parte dalla ricerca storico-architettonica e si sviluppa con tecnologie innovative di rilevamento e di documentazione dati tramite sistemi 3D-HBIM.

I monasteri di S. Maria in Goranxi (Fig. 4), del Profeta Ilia e dei Santi Ciriaco e Giuditta, sono situati sulle colline che sovrastano la valle del Drinos



Fig. 4 – Il complesso monastico di S. Maria in Goranxi. Ortofoto da drone orientata WGS 84 (foto G. Fangi BHiLAB - CNR) e vista lato orientale della chiesa con le absidi centrale e laterali (foto E. Gigliarelli BHiLAB - CNR ISPC).

e fanno parte di un patrimonio consolidatosi a partire dalla metà del XVI secolo, quando grazie al pragmatismo ottomano, vennero costruiti in Albania meridionale numerosissimi monumenti ecclesiastici, con diverse varianti tipologiche e molte caratteristiche comuni, ereditando molti principi formali e costruttivi della ricca tradizione bizantina. Questi edifici videro una grande fioritura nel periodo in cui l'Albania, benché fosse prevalentemente uno stato musulmano, manifestava un atteggiamento tollerante verso le altre religioni, incluso il cristianesimo, consentendone la pratica in alcune regioni (GIAKOUMIS 2002). Questi complessi sono costituiti da corpi di edifici adibiti alla vita monastica. Al centro sorge l'edificio più antico, il *katholikon*, la chiesa con uno schema a pianta centrale tipico della tradizione greco-ortodossa.

Vennero eretti in posizioni dominanti, in punti ben protetti e scenografici, che presentano un carattere difensivo, circondati da alte mura, in alcuni casi dotate di torri di difesa. Alla fine del XVIII secolo la comunità cristiana fu minacciata e la maggior parte delle chiese e dei monasteri vennero abbandonati e furono saccheggiate e distrutte. Da allora i terremoti e i conseguenti danni bellici nelle due guerre mondiali hanno portato alla distruzione della maggior parte dei monasteri e alle pessime condizioni di quelli rimasti.

#### 4.1 Caratteri costruttivi e strutturali dei complessi

In questo capitolo e nel successivo vengono sintetizzate le principali osservazioni preliminari e dirette effettuate sullo stato conservativo dei complessi che nella gestione del metodo proposto rappresentano strumenti critici

per orientare il processo di rilievo e modellazione dei disegni. Sono molti gli elementi comuni che caratterizzano i complessi monastici presi in esame, riconducibili anche ad altre strutture presenti nel territorio, che costituiscono una tipologia che si caratterizza sotto vari aspetti: l'orientamento planimetrico della chiesa, con l'asse orientato secondo un'antica tradizione religiosa sopravvissuta per il forte valore simbolico; la posizione dell'edificio di culto, inserito al centro di un cortile delimitato dai fabbricati di servizio, un insieme di condizioni che hanno riflessi sull'assetto strutturale del complesso edilizio e sulla risposta sismica delle singole parti che lo compongono in un territorio, quello dell'Albania meridionale, segnato dai terremoti.

Pertanto, mentre i corpi perimetrali del monastero trovano nell'assetto distributivo-funzionale le condizioni ottimali per creare efficaci connessioni d'angolo e interazioni che influiscono positivamente sulla risposta sismica, la chiesa si presenta isolata, o collegata tramite corpi accessori successivi alla costruzione originaria, pertanto maggiormente esposta al rischio sismico.

Gli edifici di culto sono concepiti con un assetto che risponde sia alle esigenze funzionali, sia a requisiti di sicurezza, attraverso una migliore qualità della struttura muraria rispetto agli altri edifici e grazie alla configurazione geometrica delle maglie murarie. L'impianto a croce greca, esempio di *Unità tipologica*, oltre ad assumere un significato simbolico, ha anche una sua valenza strutturale, grazie all'articolazione dei muri ortogonali che si prestano ad assorbire le spinte multidirezionali delle volte e delle cupole che ricoprono lo spazio interno.

La condizione di stabilità è accentuata anche dalla conformazione della struttura d'elevazione con i suoi *Componenti strutturali*: a) le absidi disposte ai lati del transetto e dietro il presbiterio operano come robusti contrafforti che stringono la scatola muraria e b) il sistema di volte a botte, vele e cupole, si contrappongono all'interno, e al tempo stesso scaricano le spinte sugli elementi perimetrali e sui muri di controvento. Ad alterare i caratteri costruttivi originari di questi edifici hanno contribuito nel tempo le numerose modifiche apportate per esigenze distributive, prodotte generalmente dall'aggiunta o dalla trasformazione di corpi addossati, veri *Componenti di discontinuità temporale* (Fig. 10).

#### 4.2 La chiesa di S. Maria in Goranxi

L'architettura della chiesa appare alquanto modificata rispetto alla probabile configurazione originaria, con le tre unità tipologiche rappresentate dal naos-corpo a pianta centrale, dal narcece e da un esonarcece originariamente porticato, addossato alla facciata, successivamente sovrapposto per unirsi con la struttura preesistente. In base alle ricognizioni effettuate in occasione di diversi sopralluoghi è stato possibile effettuare una ricognizione generale del complesso e della chiesa in particolare, unica struttura che si conserva con un assetto stabile (Fig. 5).

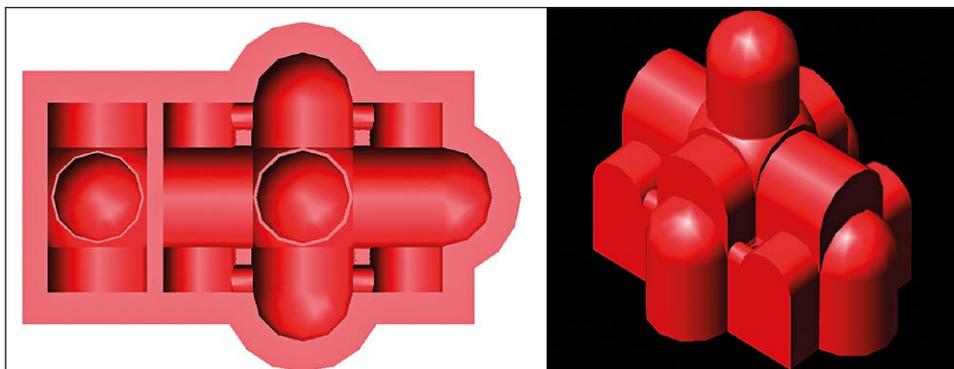


Fig. 5 – A sinistra, impianto a croce greca con schema a trifoglio e avancorpo di epoca successiva, visto dal basso. A destra, volumetria d'insieme dello spazio interno con rappresentazione dei vuoti (BHiLAB - CNR ISPC).

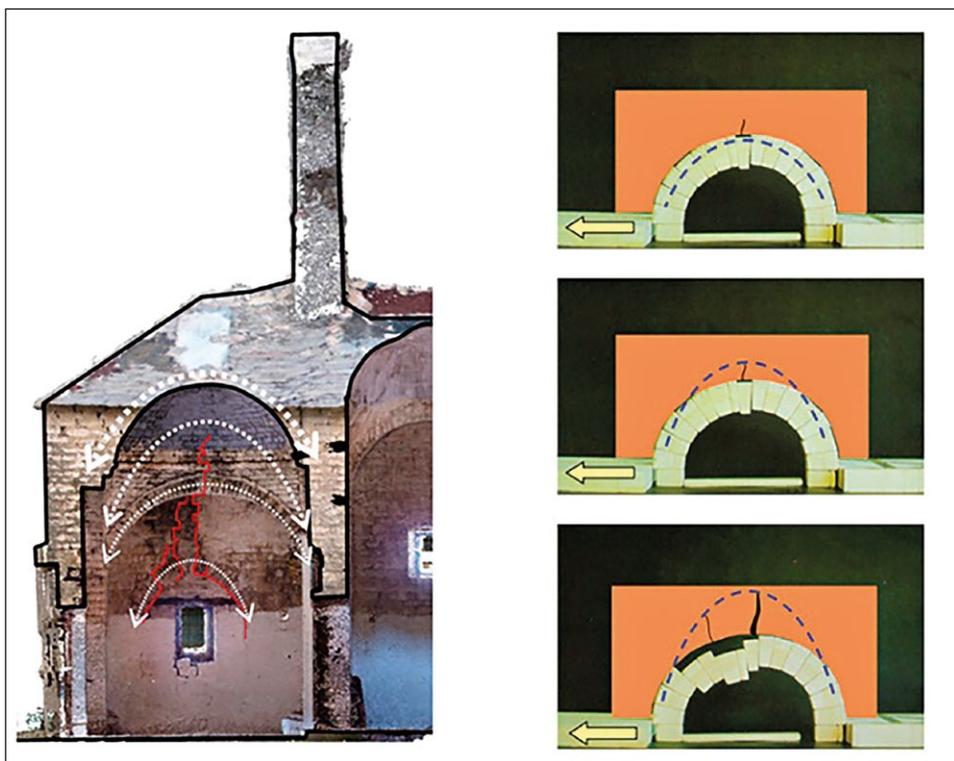


Fig. 6 – La migrazione della curva delle pressioni, dal basso verso l'alto: mentre si riduce la spinta, l'arco si allenta e i conci scorrono pericolosamente. Nel caso in esame la tamponatura dell'arco contrasta il fenomeno (BHiLAB - CNR ISPC).

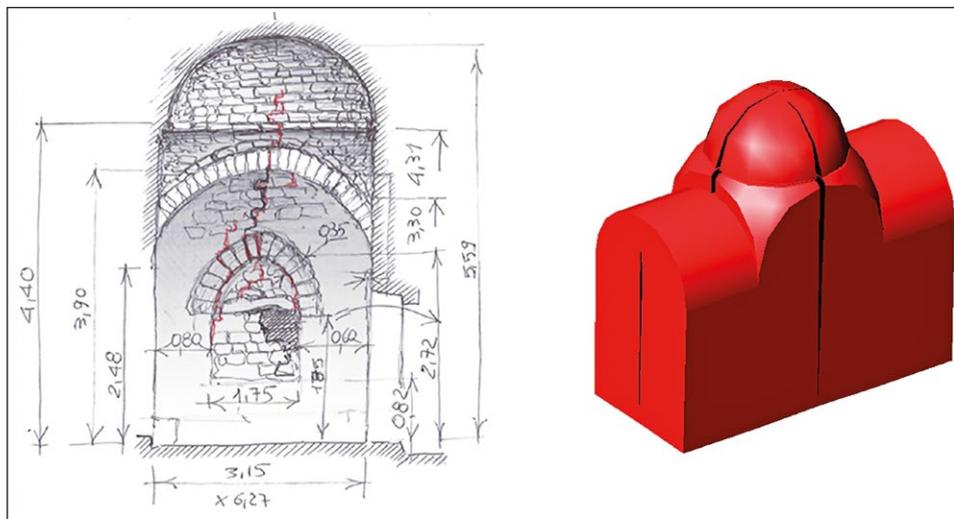


Fig. 7 – Esonartece della chiesa con cupola su pennacchi di vela e volte a botte laterali. Quadro fessurativo e cinematico di danno con formazione di lesioni lungo le mediane associate alla rotazione dei muri esterni (BHiLAB - CNR ISPC).

Le note che seguono riguardano i maggiori dissesti che si riscontrano nella struttura dell'esonartece d'ingresso, tamponato e sopraelevato; il corpo che ha subito le maggiori trasformazioni, ma anche la struttura originaria mostra un evidente stato di danno (Fig. 6). La restituzione del quadro fessurativo indica l'esistenza di modesti, ma significativi cedimenti fondali della parete laterale destra, di cui sarà necessario ricercare le cause. Altri cedimenti si rilevano sul fronte originario, dove sul lato destro è stata individuata un'ampia cripta voltata a botte su cui si imposta in falso il muro. L'assestamento della struttura ha evidentemente trascinato il muro sovrastante con la manifestazione di un fenomeno fisiologico. Questi indizi, sinteticamente descritti, costituiscono in realtà punti cardine dell'analisi strutturale, assieme al quadro fessurativo dell'avancorpo, con le lesioni che si concentrano lungo le mediane in corrispondenza delle chiavi degli archi di scarico. Il meccanismo di danno è quello tipico delle strutture a doppia simmetria, riconducibile a modalità note legate agli effetti delle spinte. La fessurazione mediana delle volte a vela e delle cupole è fisiologica, pertanto non sorprende. Le lesioni corrispondono alle chiavi degli archi di scarico, che non si percepiscono materialmente, ma di cui si intuisce il funzionamento meccanico (Fig. 7).

I muri esterni mostrano un quadro fessurativo compatibile con i cinematicismi osservati all'interno ed evidenziano le tipiche lesioni di strappo dei cantonali, scorrimento e ribaltamenti fuori del piano, classificabili nella

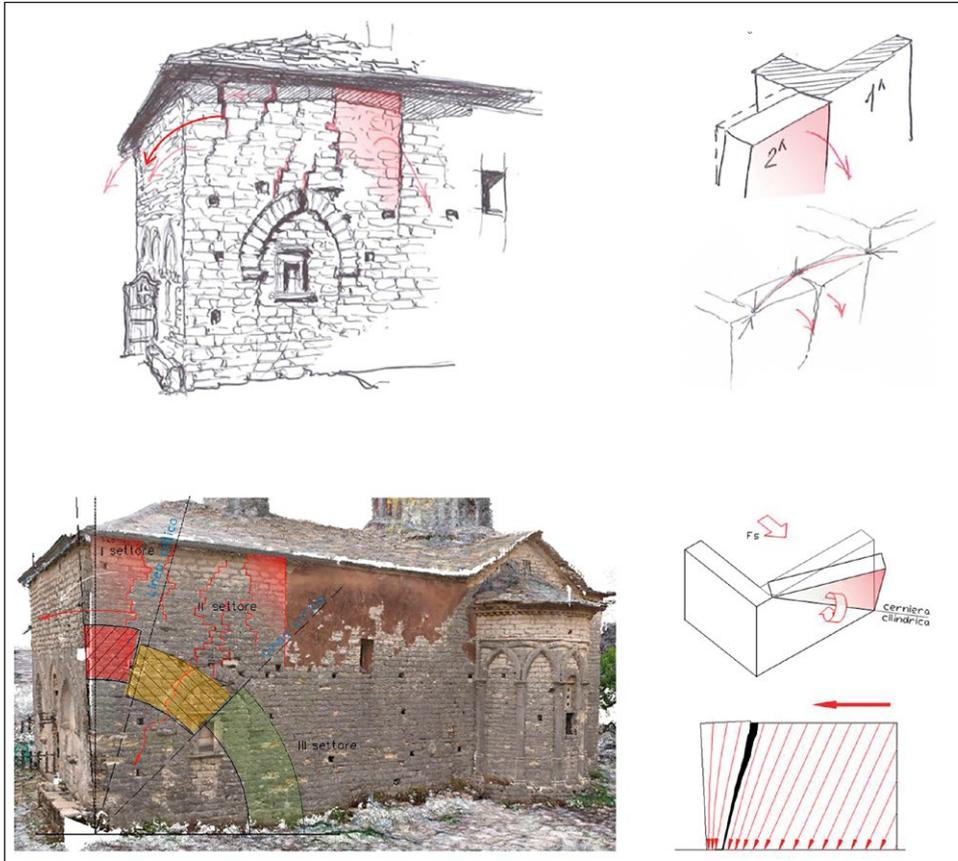


Fig. 8 – Corpo d'ingresso costituito dall'esonartece tamponato e sopraelevato, interessato da meccanismi di dissesto imputabili ad azioni sismiche e alle spinte delle volte e archi contro le pareti esterne (BHiLAB – CNR ISPC).

categoria dei cinatismi di danno di primo modo e secondo modo, imputabili in gran parte agli effetti del sisma. Sulle pareti laterali si riconoscono dei cinatismi composti che tuttavia si possono scomporre in meccanismi elementari da analizzare separatamente.

In particolare, si distinguono due meccanismi nel piano che corrispondono ad un cinatismo di rotazione del cuneo di testata e uno di scorrimento, evidenziato dalle lesioni distese, mentre fuori del piano la parete subisce un ribaltamento dell'estremità priva di connessioni con la struttura originaria. L'evoluzione di questo secondo fenomeno comporta l'innesco di un meccanismo a flessione orizzontale nel momento in cui l'attrito con il cantonale

originario esplica una modesta azione di trattenuta, in grado di modificare il cinematismo originario. La presenza dell'arco tamponato favorisce l'evoluzione al collasso del fenomeno di dissesto (Fig. 8).

G.C., E.G.

## 5. MODELLI ONTOLOGICI

L'approccio proposto si basa sull'integrazione di un ambiente BIM con una base di conoscenza specifica dell'artefatto che mira a fornire una soluzione in grado di coprire completamente la conoscenza elaborata in un processo del patrimonio e necessaria per la sua documentazione e per decisioni consapevoli relative alla sua conservazione. In questa fase, l'integrazione proposta è stata applicata alla rappresentazione di alcuni domini di conoscenza chiave del patrimonio ovvero le unità tipologiche, le componenti strutturali, le componenti di discontinuità temporale, l'abaco delle murature e quello dei dissesti strutturali. La formalizzazione della conoscenza relativa a queste discipline è stata integrata con una rappresentazione basata sui componenti fornita dall'ambiente BIM e necessaria per controllare le caratteristiche geometriche e tecnologiche del manufatto architettonico. In questo processo di integrazione di un modello BIM con una struttura ontologica, un aspetto delicato considerato ha riguardato la definizione della giusta posizione in cui formalizzare le informazioni, così come quali informazioni utilizzare per collegare l'area BIM con la base di conoscenza così da garantire l'interoperabilità tra i due sistemi e limitare la duplicazione dei dati.

Come mostrato in Fig. 9, il dialogo tra questi due ambienti è assicurato dalla trasposizione, nel modello basato su ontologie, dell'insieme delle istanze che compongono il modello dell'edificio, garantita da un identificatore univoco che assicura la corrispondenza uno-a-uno e che può essere utilizzato come riferimento per lo sviluppo di soluzioni ad hoc per trasferire dati da un ambiente all'altro. La replica delle entità HBIM all'interno della base di conoscenza, formalizzata in termini di nodi, incorpora il manufatto e i suoi componenti nella struttura ontologica, permettendo agli specialisti di dominio di collegarli con altri concetti, entità (astratte e concrete), per rappresentare le informazioni necessarie alla sua documentazione e, allo stesso tempo, fornire ad ogni informazione il suo necessario contesto interpretativo.

Integrando ontologie e Building Information Modeling, è stato possibile arricchire la semantica della rappresentazione, includendo per esempio le relazioni tra i diversi componenti strutturali del manufatto nelle sue configurazioni in evoluzione (Fig. 10). Questo è un miglioramento rilevante nella rappresentazione poiché permette la possibilità di includere relazioni come adjacency, assembly-of, part-of, made-by che non possono essere formalizzate

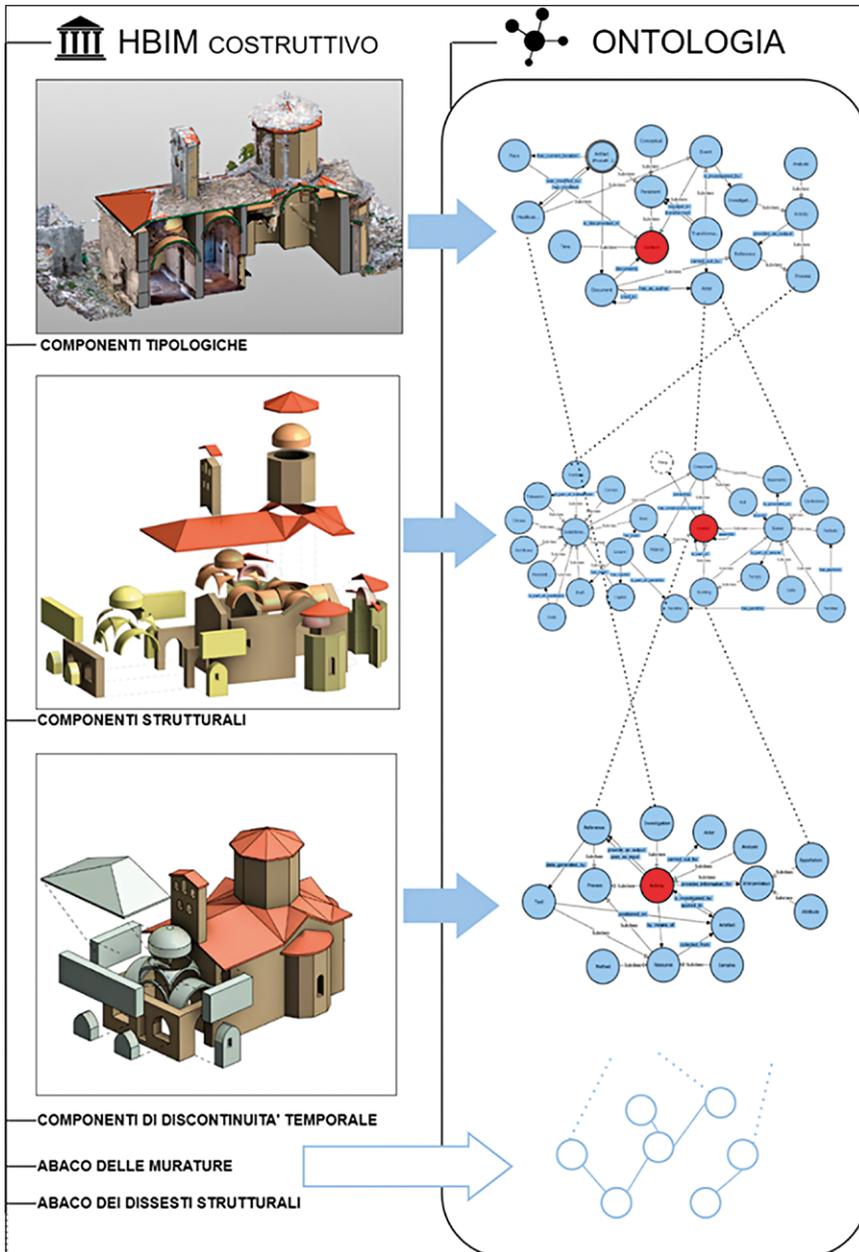


Fig. 9 – Il framework proposto, basato sull'integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici per la documentazione completa dell'edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

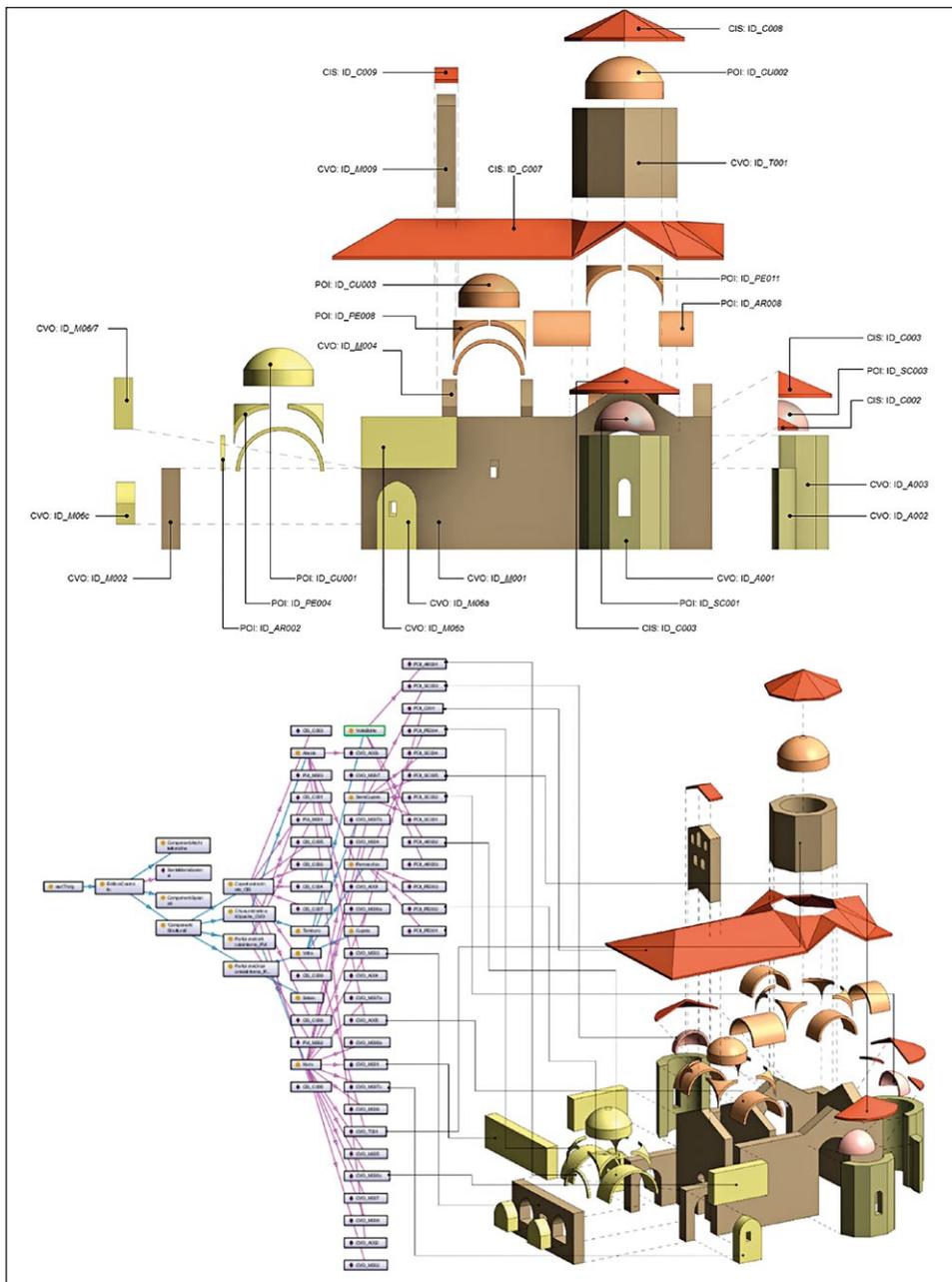


Fig. 10 – L'adozione delle ontologie per arricchire la semantica BIM formalizza la conoscenza relativa alle componenti strutturali dell'edificio (BHiLAB - CNR ISPC).

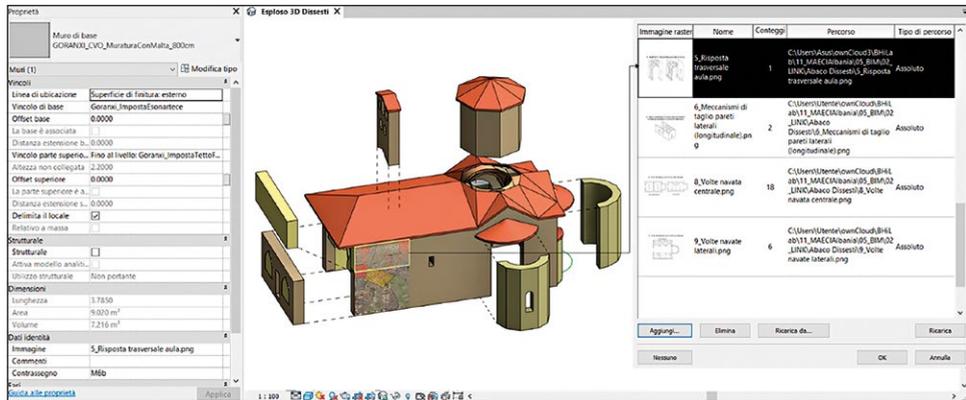


Fig. 11 – Rappresentazione dei dissesti strutturali: modello HBIM e mappatura delle componenti soggette a meccanismi di dissesto (BHiLAB - CNR ISPC).

attraverso lo schema di rappresentazione BIM, essenzialmente basato sulle relazioni *is-a* tra famiglie e istanze.

Alla luce di queste definizioni, la modellazione della chiesa di S. Maria in Goranxi ha mirato a sviluppare un modello HBIM geometrico e informativo (utilizzando il software BIM proprietario Autodesk Revit) coerente con la ricostruzione tecnico-costruttiva derivata dall'analisi dell'edificio e formalizzata nei grafi di conoscenza. La complessità delle geometrie della maggior parte degli elementi costruttivi e tecnici dell'edificio ha necessariamente implicato un compromesso tra la semplificazione della rappresentazione geometrica, adeguando il grado di aderenza alla realtà ad un livello sufficiente per questo livello della ricerca e il valore informativo e parametrico degli oggetti utilizzati.

Ad esempio, nel caso studio in esame, gli studi e le indagini sulle fasi storiche dell'edificio hanno permesso la più accurata individuazione del sistema murario principale e delle trasformazioni subite nel tempo, nonché delle tecniche costruttive e delle tipologie murarie. Pertanto, considerando il tradizionale flusso di lavoro dell'analisi costruttiva, sono state effettuate prima l'analisi dei componenti di discontinuità temporale e lo studio murario, fornendo informazioni relative a tutte le azioni che hanno contribuito all'attuale configurazione del muro; a seguire l'individuazione dei dissesti strutturali. Come mostrato nella Fig. 11, l'approccio proposto permette di formalizzare in modo completo la conoscenza relativa agli abachi dei dissesti fornendo sia la rappresentazione geometrica che le informazioni non geometriche in modo integrato e calcolabile.

E.G., L.C., G.C.

## 6. CONCLUSIONI

Questo documento riporta una procedura efficace per ottenere modelli costruttivi intelligenti 3D per la documentazione completa degli edifici storici, capaci di evidenziarne le criticità strutturali, le stratigrafie murarie con le relazioni costruttive degli oggetti edilizi e la loro distribuzione spaziale. Il framework proposto, basato sull'integrazione tra un ambiente HBIM e modelli di rappresentazione ontologici, viene applicato alla rappresentazione di alcuni domini di conoscenza del patrimonio ritenuti determinanti, ovvero le unità tipologiche, le componenti strutturali, le componenti di discontinuità temporale, l'abaco delle murature e quello dei dissesti strutturali. A questo scopo il framework operativo del metodo che è stato messo a punto si è sviluppato preliminarmente con una campagna di rilievi diretti per raccogliere in maniera sistematica ed esperta notazioni critiche e grafiche approfondite, su dissesti, quadro fessurativo, confronti ed effetti dei carichi, un insieme di strumenti critici formalizzati nei grafi di conoscenza.

Successivamente, per costruire i modelli 3D, il protocollo ha previsto il rilievo geomatico con sistemi integrati di fotogrammetria aerea, fotogrammetria terrestre e scansione laser con tecnologia SLAM, e orientamento globale realizzato con stazioni GPS. Attraverso il passaggio Scan-to-Bim si è passati dal modello digitale reality-based al "modello interpretativo/ricostruttivo" in HBIM, semplificato per rappresentare il comportamento reale delle strutture. Bisogna considerare che data la complessità delle geometrie degli elementi costruttivi, delle loro deformazioni e dei cinematismi presenti, la modellazione parametrica con il software BIM Autodesk Revit, pur nella semplificazione della rappresentazione geometrica, ha mantenuto una adeguata aderenza alla realtà e al valore informativo e parametrico degli oggetti utilizzati. Nel modello basato su ontologie, la formalizzazione delle informazioni è stata effettuata con la trasposizione dell'insieme delle istanze che compongono il modello dell'edificio.

ELENA GIGLIARELLI\*, GIOVANNI CANGI, LUCIANO CESSARI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - CNR

elena.gigliarelli@cnr.it, giovanni.cangi@ispc.cnr.it, luciano.cessari@ispc.cnr.it

### *Ringraziamenti*

Gli autori ringraziano l'Istituto dei Monumenti Culturali di Tirana (IKTK), in particolare Joli Mitrojorgij e Marsela Pliku, per avere messo a disposizione la documentazione e la loro conoscenza dei siti e dei luoghi, oltre all'appoggio logistico, e Romir Mazari per il contributo al rilievo da drone. Un ringraziamento a Michele Calvano dell'ISPC per il lavoro di acquisizione e processamento dei dati per quanto attiene alla fotogrammetria e per rilievi SLAM e da drone ad Alban Gorreja e Awal Rahali del GAP di Univpm, coordinato dalla Prof.ssa Malinverni. Grazie anche a Stefano Corsi dell'ISPC per il contributo alla integrazione del modello BIM con una struttura ontologica.

\* Corresponding Author.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMI A., BRUNO N., ROSIGNOLI O., SCALA B. 2020, *HBIM for planned conservation: A new approach to information management*, in *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2018)* ([https://archiv.chnt.at/ebook\\_chnt23\\_adami/](https://archiv.chnt.at/ebook_chnt23_adami/)).
- BANFI F., BRUMANA R., LANDI A.G., PREVITALI M., RONCORONI F., STANGA C. 2022, *Building archaeology informative modelling turned into 3D volume stratigraphy and extended reality time-lapse communication*, «Virtual Archaeology Review», 13, 26, 1-21 (<https://doi.org/10.4995/var.2022.15313>).
- BANFI F., BRUMANA R., STANGA C. 2019, *Extended reality and informative models for the architectural heritage: from scan-to-BIM process to virtual and augmented reality*, «Virtual Archaeology Review», 10, 21, 14-30 (<https://doi.org/10.4995/var.2019.11923>).
- BELTRAMO S., DIARA F., RINAUDO F. 2019, *Evaluation of an integrative approach between HBIM and architecture history*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11, 225-229 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-225-2019>).
- BERNARDELLO R.A., BORIN P., PANAROTTO F., GIORDANO A., VALLUZZI M.R. 2020, *BIM representation and classification of masonry pathologies using semi-automatic procedure*, in *Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*, London, CRC Press, 771-778.
- BIANCHINI C., SENATORE L.J., CATENA L. 2019, *The democratization of processes and the use of remotely guided acquisition tools for Survey 2.0*, «disegno», 67-78 (<https://doi.org/10.26375/diseigno.4.2019.08>).
- BONELLI R. 1986, *Archeologia stratigrafica e Storia dell'Architettura*, «Architettura: Storia e Documenti», 2, 5-10.
- BORIN P., BERNARDELLO R.A., GRIGOLETTO A. 2020, *Connecting historical information with BIM ontologies. HBIM methods for the visualization of Harris Matrix for the Torrione in Carpi*, in L. AGUSTÍN-HERNÁNDEZ, A. VALLESPÍN MUNIESA, A. FERNÁNDEZ-MORALES (eds.), *Graphical Heritage. EGA 2020*, Graphical Heritage, 5, Cham, Springer International Publishing, 757-770 ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-47979-4\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47979-4_65)).
- BRUMANA R., BANFI F., CANTINI L., PREVITALI M., DELLA TORRE S. 2019, *HBIM level of detail-geometry-accuracy and survey analysis for architectural preservation*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11, 293-299 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-293-2019>).
- BRUNO S., DE FINO M., FATIGUSO F. 2018, *Historic Building Information Modelling: Performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*, «Automation in Construction», 86, 256-276 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.009>).
- CARBONARA G. 1996, *Trattato di restauro architettonico*, 2, Torino, UTET.
- CHIABRANDO F., LO TURCO M., RINAUDO F. 2017, *Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W5, 605-612 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-605-2017>).
- CLINI P., QUATTRINI R., NESPECA R., ANGELONI R., MAMMOLI R. 2020, *Digital facsimiles of architectural heritage: New forms of fruition, management and enhancement. The exemplary case of the Ducal Palace at Urbino*, in L. AGUSTÍN-HERNÁNDEZ, A. VALLESPÍN MUNIESA, A. FERNÁNDEZ-MORALES (eds.), *Graphical Heritage. EGA 2020*, Graphical Heritage 1, Cham, Springer International Publishing, 571-582.
- CURRÀ E., D'AMICO A., ANGELOSANTI M. 2021, *Representation and knowledge of historic construction: HBIM for structural use in the case of Villa Palma-Guazzaroni in Terni*, «TEMA, Technologies Engineering Materials Architecture», 7, 8-20 (<https://doi.org/10.30682/tema0701b>).

- DIARA F., RINAUDO F. 2018, *Open source HBIM for cultural heritage: A project proposal*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2, 303-309 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-303-2018>).
- DIARA F., RINAUDO F. 2020, *IFC classification for FOSS HBIM: Open Issues and a schema proposal for Cultural Heritage assets*, «Applied Sciences», 10, 23, 8320 (<https://doi.org/10.3390/app10238320>).
- DORÉ C., MURPHY M., MCCARTHY S., BRECHIN F., CASIDY C., DIRIX E. 2015, *Structural simulations and conservation analysis -Historic Building Information Model (HBIM)*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-5/W4, 351-357 (<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>).
- DPCM 2008, *DPCM Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri. Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*, Pubblicata sul supplemento ordinario n. 54 alla Gazzetta Ufficiale Serie generale-n. 47 del 26.2.2011.
- GARAGNANI S. 2013, *Building Information Modeling and real world knowledge: A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment*, in *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 1, 489-496 (<https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743788>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GRUŠKA B. 2016, *ArchaeoBIM: AN innovative method for archaeological analysis of an Etruscan temple in Marzabotto*, in *Arqueológica 2.0. 8<sup>th</sup> International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation*, València, Editorial Universitat Politècnica de València, 314-317 (<https://doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.4479>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., MOSCATI P., GAIANI M. 2021, *ArchaeoBIM. Theory, Processes and Digital Methodologies for the Lost Heritage*, Bologna, Bononia University Press.
- GIAKOURIS K. 2002, *The Monasteries of Jorgucat and Vanishte in Dropull and of Spelaio in Lunxheri as Monuments and Institutions during the Ottoman Period in Albania (16<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> centuries)*, PhD Thesis, Birmingham, University of Birmingham.
- GIGLIARELLI E., CESSARI L., CALCERANO F., MARTINELLI L. 2020, *Valutazione della vulnerabilità Sismica attraverso l'integrazione di tecniche tradizionali e sistemi BIM*, in L. CARAVAGGI (ed.), *Progetto SISMI-DTC Lazio conoscenze e innovazioni per la ricostruzione e il miglioramento sismico dei centri storici del Lazio*, Studio. Città e paesaggio. Album, Macerata, Quodlibet, 186-192.
- HERMAN G.V., CACIORA T., ILIES D.C., ILIES A., DEAC A., STURZA A., SONKO S.M., SUBA N.S., NISTOR S. 2020, *3D Modeling of the cultural heritage: between opportunity and necessity*, «Journal of Applied Engineering Sciences», 10, 27-30 (<https://doi.org/10.2478/jaes-2020-0005>).
- LOGOTHETIS S., DELINASIOU A., STYLIANIDIS E. 2015, *Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review*, «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W3, 177-183 (<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>).
- LÓPEZ F.J., LERONES P.M., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J., ZALAMA E. 2017, *A framework for using Point Cloud Data of heritage buildings toward geometry modeling in a BIM Context: A case study on Santa Maria La Real De Mave Church*, «International Journal of Architectural Heritage», 11, 965-986 (<https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325541>).
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2009, *Historic Building Information Modelling (HBIM)*, «Structural Survey», 27, 311-327 (<https://doi.org/10.1108/02630800910985108>).
- ORENI D., BRUMANA R., GEORGOPOULOS A., CUCA B. 2014, *HBIM library objects for conservation and management of built heritage*, «International Journal of Heritage in the Digital Era», 3, 321-334 (<https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.2.321>).
- PACI E. 1966, *Fenomenologia e architettura contemporanea*, in *Relazioni e Significati*, 3, Milano, Lampugnani Nigri, 172-202.

- PEPE M., COSTANTINO D., RESTUCCIA GAROFALO A. 2020, *An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds*, «Applied Sciences», 10 (<https://doi.org/10.3390/app10041235>).
- POCOBELLI D.P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J., GRAU-BOVÉ J. 2018, *BIM for heritage science: A review*, «Heritage Science», 6, 30 (<https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4>).
- QUATTRINI R., PIERDICCA R., MORBIDONI C. 2017, *Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web*, «Journal of Cultural Heritage», 28, 129-139 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>).
- ROLIN R., ANTALUCA E., BATOZ J.-L., LAMARQUE F., LEJEUNE M. 2019, *From point cloud data to structural analysis through a geometrical HBIM-oriented model*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 12, 2, 26 (<https://doi.org/10.1145/3242901>).
- SIMEONE D., CURSI S., ACIERNO M. 2019, *BIM semantic-enrichment for built heritage representation*, «Automation in Construction», 97, 122-137 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.004>).
- TAFURI M. 1968, *Teorie e storia dell'architettura*, Torino, Einaudi.
- TRIZIO I., SAVINI F., GIANNANGELI A., BOCCABELLA R., PETRUCCI G. 2019, *The archaeological analysis of masonry for the restoration project in HBIM*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W9, 715-722 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-715-2019>).
- TUCCI G., BONORA V., COSTANTINO F., OSTUNI D. 2004, *Metodi di rilievo tridimensionale a confronto: affidabilità metrica e capacità descrittiva*, in E.S. MALINVERNI (ed.), *E-Arcom - Tecnologie per Comunicare l'architettura. Atti Del Convegno (Ancona 2004)*, Ancona, CLUA, 553-558.
- VALERO E., FORSTER A., BOSCHÉ F., RENIER C., HYSLOP E., WILSON L. 2018, *High level-of-detail BIM and machine learning for automated masonry wall defect surveying*, in J. TEIZER (ed.), *Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Taipei, Taiwan, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 740-747 (<https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0101>).
- VOLK R., STENDEL J., SCHULTMANN F. 2014, *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs*, «Automation in Construction», 38, 109-127 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>).
- ZUCCARO G., CACACE F., RAUCI M. 2011, *MEDEA: A multimedia and didactic handbook for structural damage and vulnerability assessment- L'Aquila case study*, in L. BRAGANÇA, H. KOUKARI, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU, E. VESIKARI, O. HECHLER (eds.), *Integrated Approach to Life-Time Structural Engineering - Summary Report of the Cooperative Activities of COST Action C25*, 2, Malta, University of Malta, 201-213.

## ABSTRACT

The architectural survey for the restoration of a monument is closely linked to the conservation objectives, the research methodology, and the application of multiple direct and indirect investigation techniques for the construction of adequate geometric and informative models. In particular, the paper aims to understand and evaluate a building from its structural characteristics, developing a methodology that, from the geometric survey, deconstructs the building itself into elements and articulates them in a HBIM platform, which integrates a set of five semantic models representing the architectural components and construction abaci. The approach applies this survey method and modelling workflow to the study of some post-Byzantine monasteries in Albania with a focus on the structural conditions of the church of S. Maria in Goranxi that presents problems of instability due to phases of expansion and over construction.



## METODOLOGIE A SUPPORTO DELLA RICERCA STORICO-ARCHIVISTICA E PER LA TRASPARENZA DEL MODELLO HBIM DEL LAZZARETTO DI ANCONA NEL PROGETTO DI LUIGI VANVITELLI

### 1. INTRODUZIONE

Le potenzialità del BIM per il patrimonio costruito sono note, anche se la ricerca nell'ambito dell'Historical Building Information Modeling (HBIM) è in evoluzione e merita nuove sperimentazioni. La trasparenza, secondo cui fonti e affidabilità delle informazioni sono collegabili al modello e ricercabili in esso, unitamente all'interoperabilità e alla collaborazione multi-disciplinare, ne rappresentano oggi gli obiettivi principali. Dalla Convenzione di Faro, Cultural Heritage rimanda al concetto di eredità, di patrimonio culturale come insieme di risorse ereditate dal passato che le popolazioni identificano quale espressione dei loro valori, credenze, conoscenze e tradizioni. Le ricerche in ambito di material culture e le azioni coordinate di implementazione della conoscenza, tramite documentazione digitale, si legano ai principi della Convenzione.

Data la proliferazione di modelli 3D, informati e non, e la loro sempre crescente qualità, si attesta inoltre la necessità di tutelare questo patrimonio come nuovo patrimonio nativo digitale e garantirne degli usi proficui che vadano oltre la semplice visualizzazione. A questa questione si lega indissolubilmente il concetto di riuso dei dati e dei modelli: sovente i modelli tridimensionali non vengono sfruttati adeguatamente rispetto al fine per cui sono stati concepiti e difficilmente vengono utilizzati da esperti di altre discipline. Considerando i modelli dei beni culturali, un riferimento imprescindibile è naturalmente la Carta di Londra (BEACHAM, DENARD, NICCOLUCCI 2006) che definisce i presupposti per l'uso dei metodi della visualizzazione digitale in relazione all'integrità intellettuale, all'affidabilità, alla documentazione, alla sostenibilità e all'accessibilità. Nei sistemi HBIM ogni elaborazione è frutto di un processo di analisi critica che ripercorre il progetto, la costruzione e le successive trasformazioni.

A partire da tali considerazioni, la presente ricerca affronta la sfida di realizzare non solo un modello tridimensionale informato in grado di raccontare e documentare storicamente l'evoluzione e la trasformazione di un edificio, ma anche la possibilità di ottenere un output spendibile da esperti storici che contribuisca alla strutturazione e validazione dell'apparato informativo. Il caso studio è quello del Lazzaretto di Ancona, progettato da Luigi Vanvitelli, che è stato scelto come caso esemplare di un edificio che testimonia la cultura materiale

coeva. La ricerca documentale che contribuisce a ricostruire la conoscenza del contagio all'epoca confluisce così nell'analisi dell'architettura costruita. Il modello HBIM che viene qui proposto è frutto della ricerca interdisciplinare tra storia e rilievo/rappresentazione digitale e cerca di garantire la massima trasparenza della conoscenza relativa ad entrambi gli ambiti.

## 2. DISAMINA SUGLI APPROCCI HBIM PER LA MODELLAZIONE DELLA CONOSCENZA

Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) hanno determinato negli ultimi anni un rinnovamento in diversi settori come la progettazione, la valorizzazione, il restauro e la conservazione degli edifici storici e stanno spingendo ad applicare approcci nuovi al patrimonio. La trattazione dell'HBIM può essere declinata, per la sua vocazione interdisciplinare e collaborativa, secondo molteplici aspetti. I processi HBIM si propongono come strumenti per una rappresentazione complessa e onnicomprensiva del patrimonio architettonico (MAIEZZA, TATA 2019).

La prima definizione di HBIM è apparsa nel 2009 (MURPHY, MCGOVERN, PAVIA 2009) e indica un modo nuovo di modellare gli organismi edilizi esistenti, generando oggetti tridimensionali intelligenti in grado di gestire informazioni. I vantaggi dell'HBIM si accompagnano ancora ad alcune criticità legate allo sviluppo di modelli virtuali per strutture complesse e alla gestione semantica di informazioni eterogenee. L'implementazione della modellazione informata sull'architettura storica ha prodotto una letteratura scientifica corposa prevalentemente focalizzata sulla risoluzione delle fasi Scan To BIM (VOLK, STENGEL, SCHULTMANN 2014; QUATTRINI *et al.* 2015; LÓPEZ *et al.* 2018), ma anche sulla parametrizzazione degli elementi architettonici e la creazione di librerie riutilizzabili (CHIABRANDO, LO TURCO, SANTAGATI 2017; BRUSAPORCI, MAIEZZA, TATA 2018). Riflessioni si sono articolate sulle criticità di ambienti capaci di gestire le molteplici discipline (BIANCHINI, INGLESE, IPPOLITO 2016; OSELLO *et al.* 2016) e sull'integrazione con sistemi ontologici di conoscenza (SIMEONE *et al.* 2014; CURSI, SIMEONE, TOLDO 2015).

Il paradigma HBIM può abilitare la gestione, coordinata con geometrie complesse, di indagini analitico-scientifiche, ma anche critico-interpretative legate alla comprensione dei valori, come la sua autenticità (MAMMOLI, MARIOTTI, QUATTRINI 2021). La messa a punto di modelli interoperabili e ricchi di contenuti informativi rappresenta un cambiamento sostanziale nella gestione (QUATTRINI *et al.* 2017), ma alcune questioni necessitano di ulteriori approfondimenti: la precisione e affidabilità del rilievo, l'aderenza del modello alla realtà, la gestione dei dati storici (BARBA *et al.* 2020). Inoltre, viene indagato lo strumento per il restauro dell'architettura e per sperimentare strategie di conservazione (DANIOTTI, GIANINETTO, DELLA TORRE 2020; FIORANI *et al.* 2020).

In definitiva il paradigma dell'HBIM è in grado di produrre dei veri data collector popolati da informazioni relative ai vari temi significativi (SCIANNA, GAGLIO, GUARDIA 2020). Le ricerche più interessanti sulla trasparenza del modello si riscontrano soprattutto in ambito archeologico (BENTKOWSKA-KAFEL, DENARD, BAKER 2012; D'ANDREA, BOSCO, BARBARINO 2017; PIETRONI, FERDANI 2021; GARAGNANI, GAUCCI, GOVI 2016; GARAGNANI 2017; GARAGNANI *et al.* 2021), anche al di fuori del paradigma HBIM (COOPER 2018).

R.Q.

### 3. IL LAZZARETTO DI ANCONA: STORIA E CONOSCENZA

#### 3.1 *Il Lazzaretto di Ancona nel progetto del Vanvitelli*

Il Lazzaretto pentagonale di Luigi Vanvitelli ad Ancona (Fig. 1), conosciuto anche come Mole Vanvitelliana, è un singolare e affascinante complesso monumentale commissionato da Papa Clemente XII nel 1732, sostituendo il lazzaretto situato vicino all'Arco di Traiano. I lazzaretti possono essere considerati un microcosmo in cui ricostruire la storia della medicina, la storia culturale, la storia sociale e la storia della cultura materiale. Poiché i lazzaretti venivano utilizzati come stazioni di quarantena permanenti per le persone e le merci, si stabilirono soprattutto in importanti città portuali nel Mediterraneo.



Fig. 1 – Vista della Mole Vanvitelliana dal Belvedere di Piazza San Gallo (foto R. Mammoli, marzo 2019).

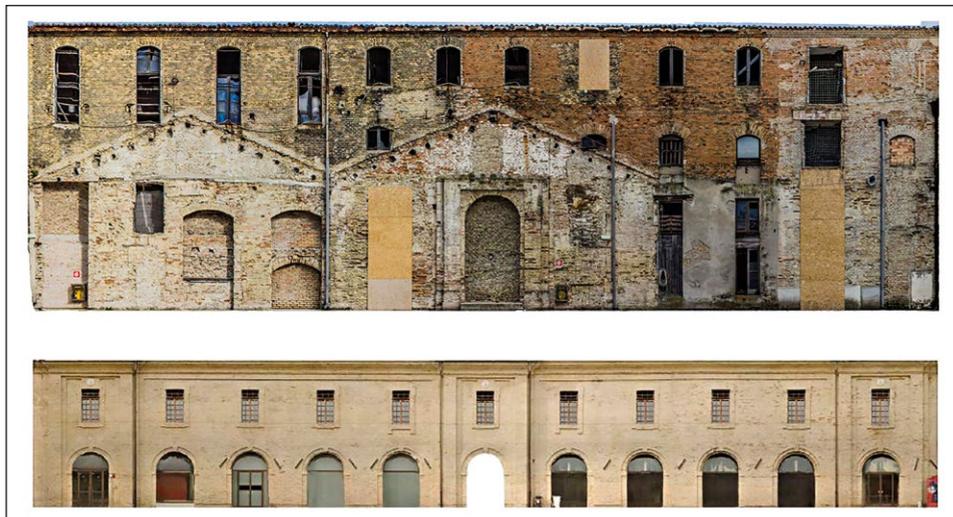


Fig. 2 – In alto: Ortofoto del prospetto SE, lato interno del Lazzaretto. Sulla facciata sono identificabili chiaramente le tracce di una delle fasi storiche: la manifattura tabacchi. I segni presenti sulle murature indicano lo spazio che, dal 1947 al 1997, è stato occupato dai magazzini.

Queste architetture costituivano un sistema di punti nodali (CHASE-LEVENSON 2020), collaborando alla prevenzione della peste e condividendo informazioni sulle epidemie, sulle norme igieniche e sui modelli architettonici.

Ancona si affaccia sull'ansa naturale del porto che si configura come scena sulla quale il Vanvitelli intervenne con la sua costruzione (BUCCIARELLI, MEZZETTI, PUGNALONI 1979). La fondazione dell'edificio si lega alla trasformazione della città di Ancona in porto franco, rilanciando così la città come scalo mercantile tra i più importanti dell'Adriatico e dello Stato Pontificio. La costruzione di un ampio lazzaretto era fondamentale, dato l'accrescersi del traffico commerciale dall'Impero Ottomano e da tutto il Mediterraneo, evitando che con le mercanzie e i viaggiatori si importassero anche peste e malattie.

La storia di questa iconica architettura è estremamente ricca: i cambi di destinazione d'uso lo resero nel 1860 un forte militare, nel 1884 una raffineria di zucchero e nel 1947 una manifattura tabacchi. Le continue trasformazioni funzionali hanno inevitabilmente mutato l'originario assetto del Lazzaretto che testimonia con tracce visibili il susseguirsi degli eventi storici. Nonostante le continue alterazioni, l'insularità del complesso vanvitelliano è di fatto conservata; e sulle facciate esterne, prospicienti il Rivellino, è ancora leggibile l'articolazione in due ordini del corpo di fabbrica e la triplice scansione delle murature in laterizio mediante paraste (Fig. 2).

M.I., R.M.

### 3.2 L'archivio dell'Ufficio di Sanità e i documenti sul Lazzaretto di Ancona

Gli Uffici di Sanità erano gli organi deputati alla gestione dei lazzaretti e della quarantena. Si definiscono come un'istituzione civica locale con poteri legislativi e giudiziari (CIPOLLA 1981, 4). Ad Ancona, l'Ufficio di Sanità nasce probabilmente attorno al XV secolo e quando, nel 1532, Ancona diviene parte dello Stato Pontificio, l'Ufficio passò sotto controllo indiretto degli organi centrali pontifici (ORLANDI 1991, 9, 17; GIACOMINI 2009, 117, 120), preservando parziali autonomie locali.

I documenti dell'Ufficio di Sanità fanno parte dell'Archivio Comunale di Ancona, fondo Antico Regime, Sezione II. Tra il XIX e il XX secolo l'Archivio Comunale ha subito vari riordinamenti e dopo il terremoto del 1972 fu depositato presso l'Archivio di Stato di Ancona (MORDENTI 1992; GIACOMINI 2009) dove si trova tutt'oggi. Sulla forma architettonica e le vicende costruttive della Mole risulta ricco d'informazioni il *Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica delli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità*<sup>1</sup>, un volume cartaceo manoscritto (da diverse mani) rilegato in pelle che riunisce assieme diverse informazioni e decreti dal 1734 agli inizi del XIX secolo. Alcune delle informazioni riportate nel *Libbro* sono state considerate particolarmente importanti per il data enrichment e la ricostruzione di parti dell'edificio nel XVIII secolo. In particolare, sono state trascritte le seguenti sezioni, relazionate poi al modello: Cisterna e Cisterne situate nella Piazza del Lazzaretto, Magazzini delli Nuovi Lazzaretti, Seppolture delli Contumaci, e Polveriera Situata nel Centro del Baloardo delli Novi Lazzaretti.

Per quanto riguarda le fonti iconografiche, la Biblioteca comunale Luciano Benincasa di Ancona, la Biblioteca Federiciana di Fano e il Museo Statale tattile Omero di Ancona hanno fornito per lo più disegni che sono stati usati a integrazione del materiale archivistico cartaceo e a cui sono state aggiunte le copie in possesso all'Archivio del DICEA, Sez. Architettura<sup>2</sup>.

### 3.3 Conoscenza del contagio e sue tracce nell'architettura del Lazzaretto

I documenti d'archivio selezionati sono risultati significativi nell'analizzare l'architettura dei lazzaretti e la distribuzione funzionale degli spazi (Fig. 3), soprattutto in relazione alla teoria del contagio del primo periodo moderno. La Mole è una struttura pentagonale circondata da mura e disposta su tre livelli: il primo livello costituito da un largo camminamento esterno da cui si aveva accesso a 13 magazzini e a due gallerie voltate a botte di collegamento con la piazza interna; poi, la piazza interna attorno a cui erano disposte 30 abitazioni per i

<sup>1</sup> Archivio Comunale di Ancona (ACAn), Antico Regime, II, Ufficio di Sanità.

<sup>2</sup> Quest'ultimo archivio fu costituito in occasione del rilievo dell'edificio condotto nel 1993 da Carlo Mezzetti, Giorgio Bucciarelli e Fausto Pugnalone (che risultò poi nella relativa pubblicazione.

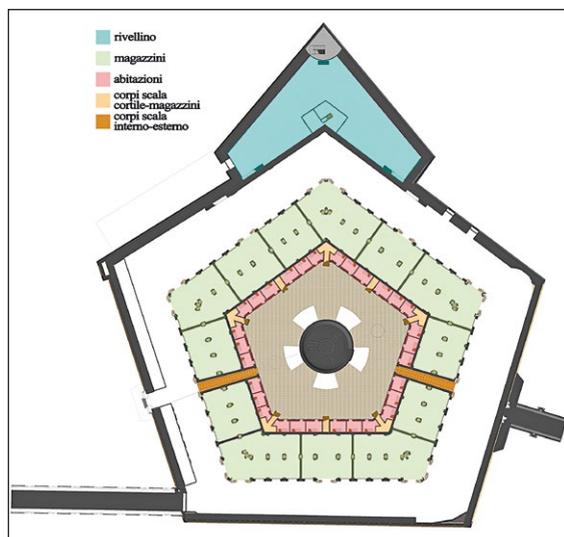


Fig. 3 – Pianta del Lazzaretto: distribuzione funzionale.

passaggeri in quarantena e al cui centro era il Tempietto di San Rocco. L'ultimo livello ospitava altri 13 magazzini raggiungibili da 8 corpi scala, 5 collocati agli angoli e 3 sui lati della piazza interna. I magazzini del primo piano erano coperti da 96 volte a crociera, mentre quelli superiori avevano una copertura con travi e 68 capriate zoppe. Le abitazioni erano costituite da due piani collegati da una ripida scala lignea. Nel rivellino invece si trovava una polveriera, le scale per l'accesso al cammino di ronda sulle mura e una caserma disposta su due piani.

La distribuzione e gestione di questi spazi si basano su teorie mediche del primo periodo moderno (INÌ 2021). Secondo i trattati medici più noti del XVIII secolo, il contagio poteva avvenire tramite contatto diretto con una persona infetta, oggetti contaminati e attraverso le esalazioni dai corpi appestati (MURATORI 1714, 47-48; RUSSELL 1791, 296; NUTTON 1983). D'altra parte, non si credeva che effluvi e miasmi provenienti da malati o da persone infette potessero essere propagati a lunga distanza ma solo a pochi passi (MURATORI 1714, 80). Nel caso di passeggeri provenienti da navi infette o considerate tali, il regolamento del Lazzaretto di Ancona affermava che il personale poteva interagire con i passeggeri stando a 16 passi di distanza, cioè il doppio della distanza minima raccomandata per altri passeggeri in quarantena considerati meno pericolosi<sup>3</sup>. In generale, il distanziamento fisico era anche prescritto tra passeggeri appartenenti a gruppi di quarantene diverse.

<sup>3</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2, c. 171 v.

La paura del contatto, del contagio attraverso oggetti contaminati e attraverso la vicinanza con soggetti infetti influenzò la progettazione degli spazi dei lazzeretti e i loro regolamenti. L'isolamento era una caratteristica essenziale per questi edifici, spesso costruiti su isole o su aree parzialmente o totalmente delimitate dall'acqua (RUSSELL 1791, 104). Il Lazzeretto di Ancona è un esempio caratteristico: la mole Vanvitelliana fu infatti edificata su un'isola artificiale nel porto.

Separazione tra interno ed esterno e separazione degli spazi interni costituiscono gli elementi fondamentali dell'architettura di quarantena. Il Lazzeretto di Ancona, come molti altri, fu progettato con una doppia cinta muraria in modo da costituire un'area cuscinetto già all'interno del lazzeretto, ma non ancora parte delle zone di quarantena più pericolose. Queste aree venivano anche usate dal personale come vie d'accesso sicure in modo da raggiungere diverse parti dell'edificio senza entrare nel cortile in quarantena in cui si trovavano le abitazioni dei passeggeri. Inoltre, la descrizione dei magazzini presente nel *Libbro Preordinato* ci informa che al piano terra, per impedire l'ingresso e la contaminazione di persone non autorizzate, i magazzini erano chiusi da "restelli" cioè doppie cancellate di legno.

La pianta centrale del Lazzeretto di Ancona era anche adatta a fornire diverse vie d'accesso alle abitazioni e magazzini disposti attorno alla piazza centrale con la Cappella di San Rocco al centro. Tuttavia, il fatto che la piazza interna non fosse divisa da setti murari o recinzioni anche provvisorie (come era comune in altri lazzeretti a pianta centrale, per esempio in quello di Verona) preoccupava gli Ufficiali di Sanità che affermavano: «(l'edificio) sarebbe stato di un uso assai più comodo e sicuro se in luogo d'essere di forma regolare fosse stato di struttura irregolare, riuscendo cosa molto disdicevole alla vista, che le contumacie di 13 magazzini, e le persone di 30 abitazioni debbino sbarcare tutte in un solo benché vasto cortile»<sup>4</sup>. Non era possibile, infatti, dividere fisicamente i diversi gruppi di passeggeri in quarantena.

I muri, però, non vennero mai costruiti e il Lazzeretto mantenne il suo sistema di controllo e distanziamento. In una pianta raffigurante il Lazzeretto di Ancona (Fig. 4), i guardiani sono rappresentati con lunghi bastoni usati per assicurarsi la distanza minima di 8 passi tra membri di quarantene diverse<sup>5</sup>. I guardiani e il distanziamento fisico erano strettamente necessari soprattutto quando i passeggeri partecipavano alla messa officiata nel Tempietto di San Rocco. L'unica persona permessa all'interno della cappella era l'officiante, mentre una guardia armata di bastoni controllava che nessuno dei passeggeri si avvicinasse troppo<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, Copialettere dei Provisori, 24, c. 265.

<sup>5</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2, c. 171 v.

<sup>6</sup> *Ibid.* c. 21 r.

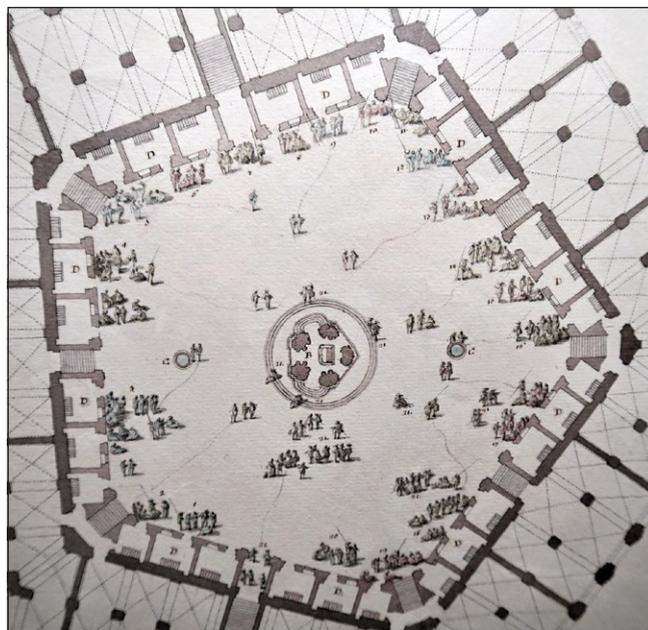


Fig. 4 – Dettaglio della pianta del Lazzaretto in Ancona, Museo della Città, Ancona, 1763-1764.

Il Tempio costituisce il fulcro centrale del Lazzaretto di Ancona. Anche le cappelle dei lazzeretti erano progettate seguendo specifici principi architettonici studiati per evitare il contagio. Il modello più comune prevedeva un piccolo edificio a pianta centrale posto al centro del complesso. Ampie aperture come arcate o finestre permettevano ai passeggeri di seguire la messa dal cortile o direttamente dalle abitazioni, evitando il rischio di contagio. Le grandi aperture consentivano anche la ventilazione della cappella.

I documenti sottolineano come si temesse che il contagio potesse avvenire anche attraverso i paramenti usati per la celebrazione. Ad Ancona, nel caso un prete in quarantena avesse officiato la messa, i regolamenti stabilivano che la cappella dovesse essere completamente pulita e ridecorata con altri paramenti. Queste misure, infatti, testimoniano quanto il contagio tramite oggetti fosse temuto. Nel Lazzaretto di Ancona, i regolamenti richiedevano che i documenti dei passeggeri in arrivo da aree pericolose fossero maneggiati con speciali pinze per evitare il contatto (Fig. 5)<sup>7</sup>. Oggetti toccati da passeggeri e soprattutto merci provenienti da zone potenzialmente infette, come l'Impero

<sup>7</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2, c. 21 r.



Fig. 5 – Luigi Pallavicini, dettaglio di un affresco raffigurante il cortile del Lazzaretto nel Palazzo Benincasa, Ancona, 1788.

Ottomano dove la peste era considerata endemica, venivano maneggiati con ogni precauzione e le merci erano ripetutamente disinfettate. I lazzaretti vennero istituiti soprattutto per lo stoccaggio e disinfezione di merci provenienti dal Levante ottomano (VARLIK 2017). Per questo motivo, gran parte dello spazio del Lazzaretto di Ancona era occupato dai magazzini, in totale 26.

La disinfezione delle merci avveniva in diversi modi, ma la ventilazione era considerato il più importante. La scelta di un luogo ventilato e la presenza di specifici elementi architettonici per assicurare la circolazione dell'aria erano elementi chiave per un buon lazzaretto. Per questo i magazzini del Lazzaretto di Ancona vennero progettati con grandi arcate e grandi finestre.

I regolamenti del lazzaretto sottolineano anche la necessità di un ambiente salubre in modo da evitare la presenza di miasmi. Sporcizia e sostanze in putrefazione venivano ritenute capaci di emanare uno “spirito attivo” capace di cambiare la natura di altri fluidi e di amplificare il potere nocivo dei semi pestilenziali (MEAD 1720, 11-13). Si raccomandava che i lazzaretti fossero costruiti in luoghi asciutti e ariosi, possibilmente in un luogo con una fonte d'acqua (RUSSELL 1791, 104). Il passo del *Libbro Preordinato* riguardante la cisterna del Lazzaretto di Ancona testimonia quanto l'Ufficio di Sanità della città fosse particolarmente orgoglioso del sistema di canalizzazione dell'acqua del Lazzaretto, considerato elemento più riuscito del progetto.

La cisterna raccoglieva l'acqua piovana proveniente solo dai tetti dei magazzini, mentre quella dalle abitazioni veniva convogliata in mare essendo potenzialmente contaminata<sup>8</sup>. La presenza di acqua potabile non era solo es-

<sup>8</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2, c. 62 r-v.

senziale per provvedere ai bisogni dei numerosi passeggeri (e anche animali) o per le procedure di disinfezione, ma anche per il sistema di fognatura. Infatti, un'altra importante caratteristica dei lazzeretti era la presenza di sofisticati sistemi di canalizzazione delle acque reflue per il mantenimento di un ambiente sano. Le latrine venivano considerate fondamentali all'interno dei lazzeretti ed erano presenti sia nelle abitazioni che in diverse parti dell'edificio (INÌ 2021).

Il *Libbro Preordinato* sottolinea come i 26 magazzini fossero dotati di latrina in modo da poter permettere ai guardiani che disinfettavano le merci e ai mercanti che lo volessero di passare la quarantena nei magazzini (per controllare il proprio carico e risparmiare sui costi di quarantena)<sup>9</sup>. Il documento descrive anche la presenza di camini nei magazzini che, oltre a espletare le ovvie funzioni, erano anche di fondamentale importanza per mantenere l'ambiente privo di miasmi. Il fumo e il calore prodotto dal camino erano infatti considerati dei correttivi dell'aria pestilente (CAVALLO, STOREY 2013, 94).

Il *Libbro Preordinato* descrive anche la presenza di due fosse cimiteriali, una per cattolici e una per gli "infedeli" (soprattutto mercanti "levantini", tra cui ebrei e ottomani) progettate e costruite dal Vanvitelli nel rivellino<sup>10</sup>. Infatti, chiunque morisse in lazzeretto, non solo di peste ma anche più comunemente a causa di diverse malattie o incidenti non poteva essere sepolto al di fuori di esso, in quanto il corpo poteva essere ancora potenzialmente contaminato a prescindere dal fatto che la morte fosse causata dalla peste o meno. Da quanto si evince dal documento, nella progettazione dell'edificio il Vanvitelli aveva deliberatamente posto i cimiteri nel rivellino in modo che fossero lontani dallo spazio abitato del Lazzeretto e nascosto alla vista. Infatti, le sepolture potevano esalare miasmi pestilenziali e la vista delle attività di sepoltura poteva allarmare i passeggeri causando disordini.

M.I.

#### 4. IL MODELLO INFORMATO DEL LAZZARETTO DI ANCONA

La Mole Vanvitelliana nel corso dei secoli ha subito molti cambi di destinazione d'uso ed è stata oggetto di numerosi interventi di restauro e manutenzione ordinaria e straordinaria che ne hanno modificato l'assetto e segnato la storia. La costruzione di un HBIM a partire dal rilievo geometrico ha inteso implementare la conoscenza storica del manufatto architettonico, configurando così un modello consapevole della propria evoluzione storica, semanticamente strutturato e funzionale alle indagini archivistiche e alla loro archiviazione innovativa.

R.M.

<sup>9</sup> ACAn, Antico Regime, II, Ufficio di Sanità, 2, c. 110 v.

<sup>10</sup> *Ibid.*, c. 150 r.

#### 4.1 *Il rilievo del Lazzaretto*

La campagna di rilievo<sup>11</sup> è stata condotta posizionando 24 stazioni di presa esterne e 20 interne, generando una nuvola di complessivamente 207 milioni di punti (Fig. 6). La risoluzione delle scansioni è stata impostata come 1 cm a 10 m e l'errore massimo registrato è risultato di 5 mm, mentre il medio di 2 mm.  
R.Q.

#### 4.2 *La modellazione parametrica del Lazzaretto di Ancona*

La modellazione in ambiente di lavoro Revit<sup>12</sup> ha seguito il tradizionale processo Scan-to-Bim (Fig. 7). La modellazione ha riguardato principalmente due fasi storiche della Mole (Fig. 8): quella originaria del XVIII secolo e quella attuale (riferita allo stato di fatto dell'architettura al momento dell'acquisizione dei dati). Per lo stato attuale l'HBIM del Lazzaretto è stato ottenuto seguendo un consolidato workflow che dal rilievo conduce al modello informato organizzato secondo gerarchie e ontologie predefinite. La modellazione parametrica ha riguardato la totalità dell'edificio e gli elementi architettonici principali sia esterni sia interni, quali: cornici delle porte e delle finestre delle abitazioni affacciate sul Cortile, soluzioni angolari, trabeazioni, archi, portali di accesso, sistemi voltati e corpi scala.

Per la modellazione della semantica allo stato del rilievo, i dati acquisiti sono stati integrati con lo studio dei Trattati dell'architettura classica che hanno contribuito alla creazione di librerie parametriche. Su questi elementi architettonici significativi, nonostante, ad eccezione del Tempietto, l'apparato decorativo non sia molto articolato, sono stati identificati tre livelli di dettaglio (LOD). La Fig. 9 mostra la gerarchia degli elementi principali. I frontoni e le trabeazioni del Vanvitelli, seppur evidentemente neoclassici, non sono ascrivibili a nessuno dei cinque ordini classici e per integrare i dati provenienti dall'acquisizioni, le loro modanature sono state parametrizzate secondo regole e rapporti matematici indicati da (BARROZIO DA VIGNOLA 1562; CHITHAM 1987).

Analogamente si è proceduto per le cornici delle aperture prospicienti il cortile. Per gli elementi architettonici degli spazi interni del primo livello, la restituzione si è basata anche sulle informazioni reperibili dalla documentazione della ricerca archivistica. Si è fatto riferimento ai disegni bidimensionali conservati presso gli archivi principali consultati e alle tecniche costruttive settecentesche e si è proceduto secondo un livello di dettaglio geometrico minore.

<sup>11</sup> Il rilievo è stato condotto nell'ambito del Laboratorio del corso di Rilievo dell'Architettura, a.a. 2016/2017 e 2017/2018, Prof. Paolo Clini, mentre parte degli spazi interni sono stati acquisiti in occasione della mostra temporanea *Ecce Homo. Da Marino Marini a Mimmo Paladino: la scultura di figura in Italia*.

<sup>12</sup> Alcune parti del lavoro di modellazione in Revit sono state sviluppate all'interno delle tesi di laurea triennale in Ingegneria Edile della Università Politecnica delle Marche di Serena Gambelli, Michele Zannotti, Jimmie Santoni e Martina Agostini, Relatrice Prof. Ramona Quattrini.

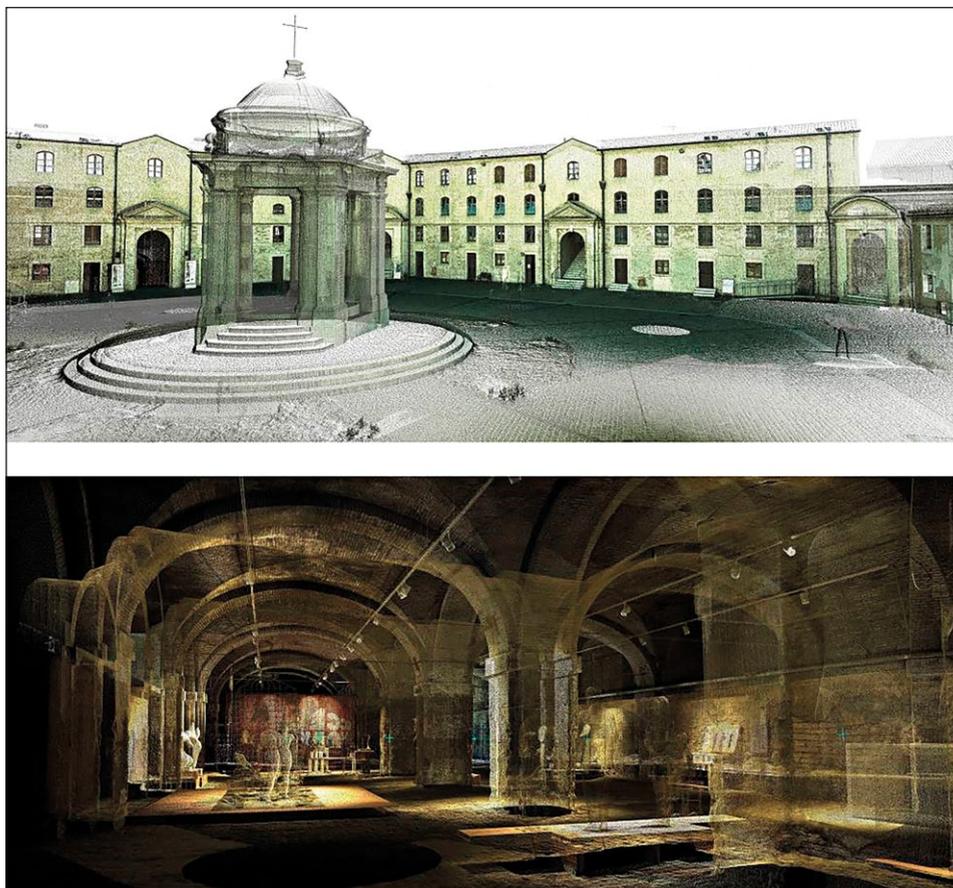


Fig. 6 – Cyclone, nuvola di punti del cortile interno della Mole e Tempio di San Rocco.

Le volte a crociera del primo livello dei magazzini, le capriate lignee del secondo livello e i solai interpiano delle abitazioni, nonostante i significativi restauri, non sono stati alterati, sono stati quindi modellati con affidabilità elevata.

#### 4.3 *Data enrichment: la documentazione d'archivio e la sua interoperabilità*

Il processo di gestione delle informazioni e delle analisi derivanti dal rilievo e della documentazione conservata presso archivi cartacei e digitali è complesso. La ricerca storico-archivistica è fondamentale nella comprensione dell'edificio e le indagini garantiscono una chiara comprensione degli eventi cronologici. Nell'ultimo decennio il tema della dematerializzazione dei documenti e degli atti cartacei, ai fini di una migliore conservazione e di una più



Fig. 7 – Dalla nuvola di punti al modello HBIM.

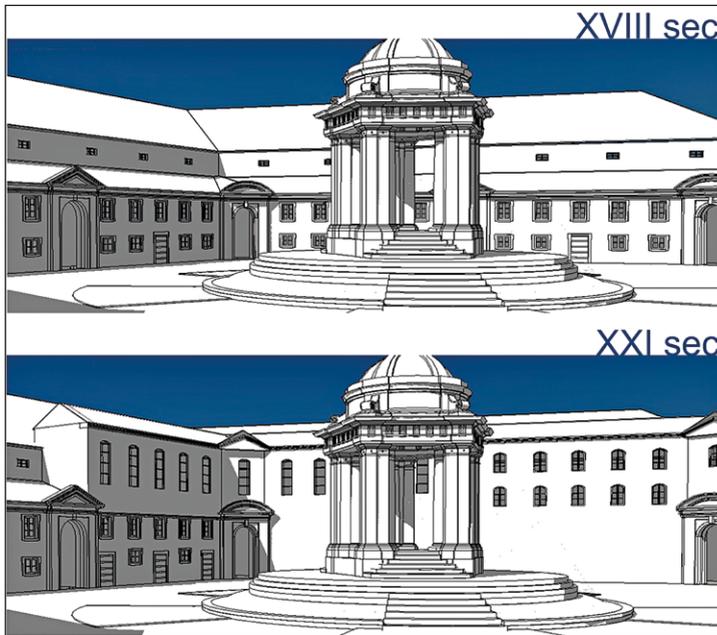


Fig. 8 – Revit, vista del cortile interno del Lazzaretto e Tempietto di San Rocco secondo le due fasi di modellazione: XVIII secolo e XXI secolo.

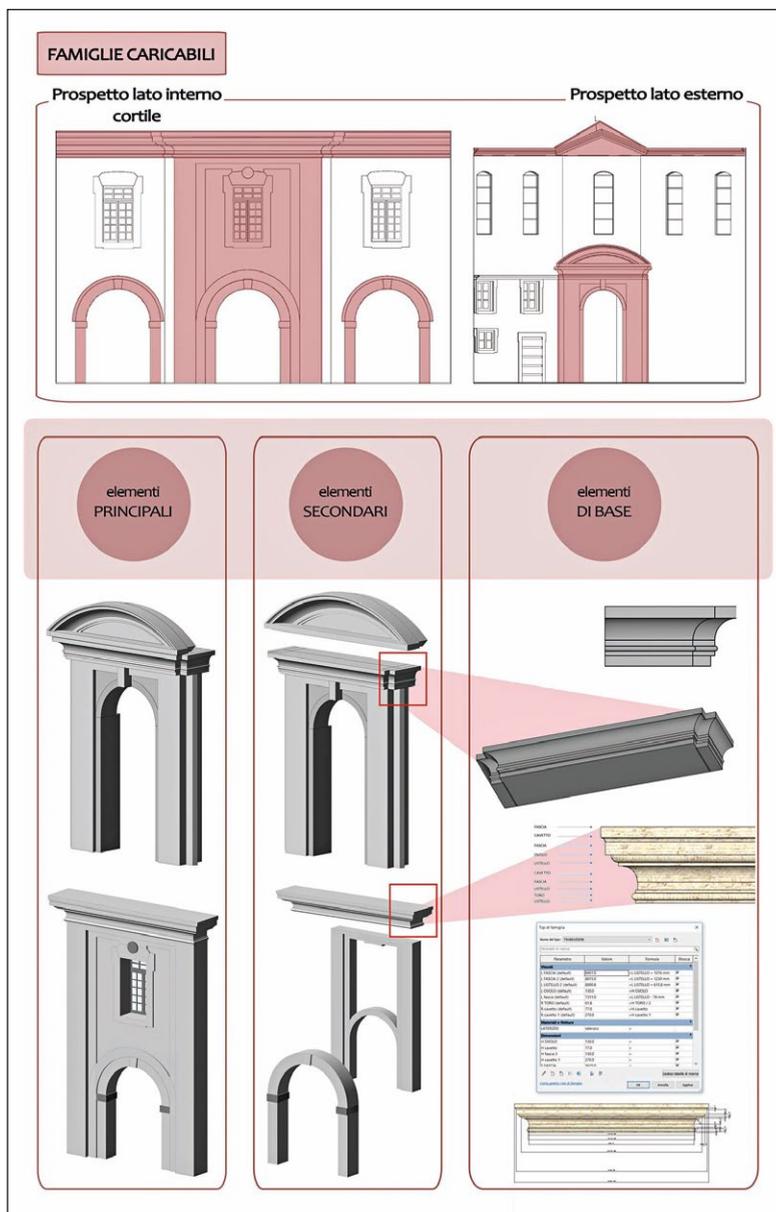


Fig. 9 – Suddivisione semantica del sintagma arco-trabeazione che costituisce rispettivamente le facciate esterne e interne rispetto al cortile centrale. Sono stati individuati gli elementi principali poi scomposti in quelli secondari e in quelli di base. Di quest'ultimi, rappresentati nella colonna di destra, viene illustrata la parametrizzazione.

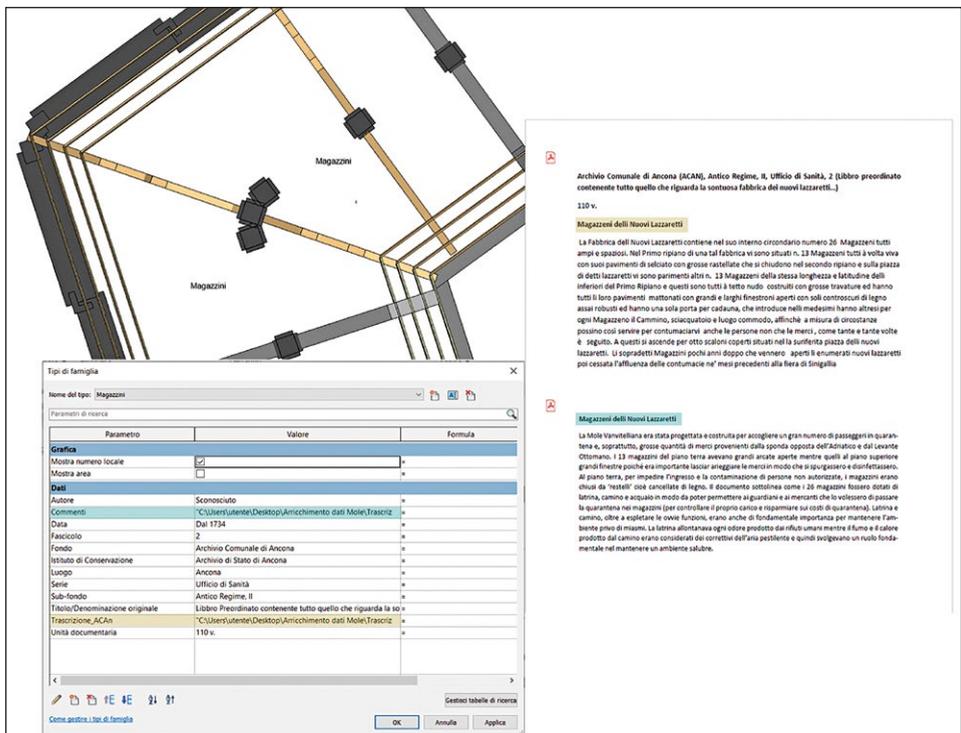


Fig. 10 – Revit, data enrichment: i vani identificati come magazzini sono stati implementati con parametri di progetto che raccolgono le informazioni archivistiche secondo lo standard ISAD. I documenti .pdf sulla destra sono i collegamenti diretti alle trascrizioni.

agevole fruizione, ha avuto ampio rilievo e gli archivi disponibili online si sono sempre più configurati come mezzo di accesso democratico alla conoscenza.

In accordo con il terzo principio della Carta di Londra, per assicurare l'integrità intellettuale dei metodi e dei risultati della visualizzazione tridimensionale, le fonti impiegate a giustificazione e a supporto della modellazione del Lazaretto sono state identificate e valutate in maniera strutturata e hanno influito direttamente sulla creazione del modello nelle sue due fasi costruttive. L'HBIM è stato indagato come strumento per gestire la documentazione archivistica al fine di implementare la conoscenza storica del bene architettonico, utilizzando una classificazione organica e funzionale secondo standard.

Per le trascrizioni dei documenti d'archivio, si fa riferimento all'ISAD (G) (General International Standard Archival Description), definito dal'International Council on Archives e adottato dal Comitato per gli standard descrittivi a Stoccolma nel settembre 1999. Si tratta di uno standard informatico per

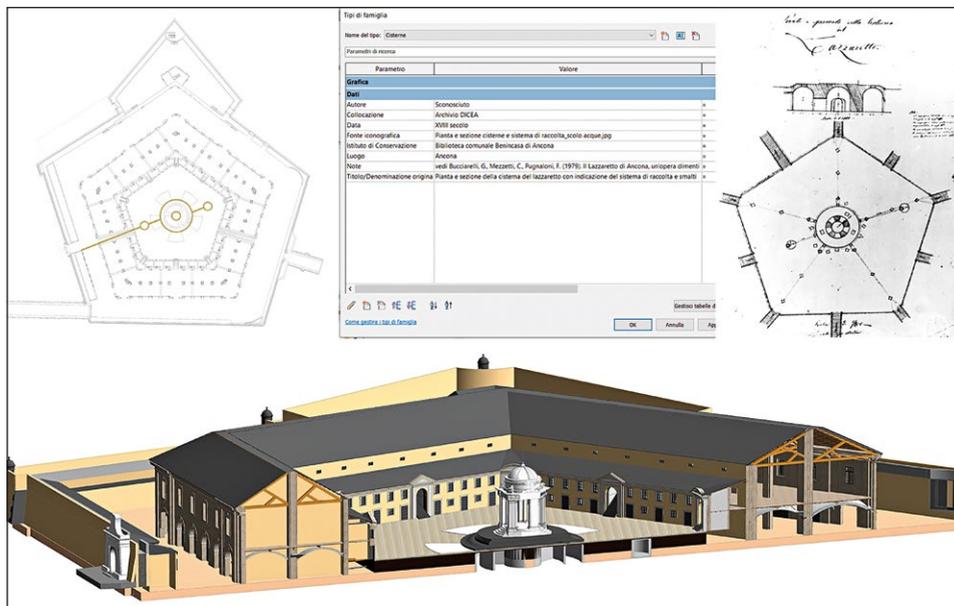


Fig. 11 – Revit, data enrichment per le cisterne.

definire norme generali per l’elaborazione di descrizioni archivistiche e per identificare il contesto e il contenuto della documentazione. Il rispetto della denominazione ha permesso di mantenere un’organizzazione razionale del modello digitale coerente con la documentazione d’archivio raccolta e di mappare puntualmente le informazioni ricavate dalle fonti nel modello.

Le indicazioni ISAD (classificazione e nomenclatura archivistica) sono state riportate all’interno del modello HBIM come parametri di progetto e per ogni elemento architettonico di cui si aveva traccia documentale sono state collegate sia le fonti iconografiche sia le trascrizioni e i loro commenti (Fig. 10). Questa modalità di organizzazione dei dati risulta di facile lettura per gli esperti storici che vengono facilitati nella navigazione all’interno del modello. Nella Tab. 1 è possibile vedere la descrizione dei documenti d’archivio implementati secondo gli standard ISAD. Le fonti iconografiche sono state identicamente catalogate e la Tab. 2 mostra alcuni dei dati implementati e l’immagine relativa.

Data l’importanza storica del sistema di raccolta dell’acqua e la conseguente ricchezza di informazioni documentarie, si porta ad esempio la Fig. 11 che propone la rappresentazione planimetrica e tridimensionale del sistema di raccolta e scolo delle acque accompagnata dal data enrichment. Dalle fonti storiche consultate è emerso che Vanvitelli progettò con gran cura la cisterna e il sistema di raccolta e deflusso delle acque dopo aver studiato attentamente i lazzaretti di Venezia,

Genova e Livorno. Dai punti di raccolta, ancora oggi visibili nel cortile, l'acqua veniva convogliata in tre cisterne, una grande centrale collocata esattamente al di sotto del tempio e due, di dimensioni minori, poste sotto i pozzetti.

R.M.

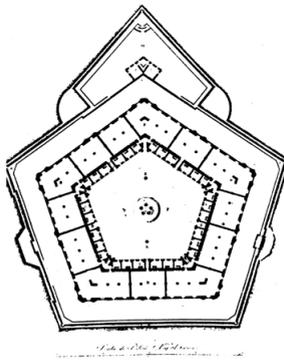
## 5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La costruzione dell'HBIM del Lazzaretto di Ancona ha contribuito a determinare un elevato LOD in cui il grado di certezza, precisione e ricchezza complessiva delle informazioni contenute soddisfano le esigenze

Documenti d'archivio ASAn	
<i>Cisterna e cisterne situate nella Piazza del Lazzaretto</i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica degli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734
Unità documentaria (carta)	62 r. - 63 r.
<i>Magazzini delli Nuovi Lazzaretti</i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica degli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	110 v.
<i>Seppulture delli Contumaci</i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica degli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	150 r.-151 r.
<i>Polveriera Situata nel Centro del Baloardo delli Novi Lazzaretti</i>	
Istituto di Conservazione	Archivio di Stato di Ancona
Fondo	Archivio Comunale di Ancona
Sub-fondo	Antico Regime, II
Serie	Ufficio di Sanità
Fascicolo	2
Titolo o denominazione originale	Libbro Preordinato contenente tutto quello che riguarda la sontuosa fabbrica degli Nuovi Lazzaretti e tutto ciò che concernono le materie di Sanità. Notizie utili e diverse come di ogni altra cosa che si riferisce alli detti Nuovi Lazzaretti di Ancona.
Data	Dal 1734.
Unità documentaria (carta)	196 r.-197 v.

Tab. 1 – Elementi caratterizzanti il Lazzaretto: descrizione dei documenti d'archivio con indicazione della nomenclatura di catalogazione richiesta dallo standard ISAD.

Documentazione iconografica - <i>Pianta del Lazzaretto di Ancona</i>	
Istituto di Conservazione	Sconosciuto
Titolo o denominazione originale	Pianta del Lazzaretto di Ancona.
Autore	Attribuibile al Vanvitelli
Data	XVIII sec.
Luogo	Sconosciuto
Collocazione	Archivio DICEA
Note	Non si conosce la collezione originale in quanto in Bucciarelli, Mezzetti e Pugnali (p. 189) si fa riferimento ad un'altra pubblicazione da cui l'immagine è tratta: Cesare De Seta, "Disegni di Luigi Vanvitelli architetto e scenografo", in <i>Luigi Vanvitelli</i> , Napoli, 1973.



Tab. 2 – Implementazione dati e fonte iconografica d'archivio.

dell'approfondimento storico e ha consentito di valutarne l'uso specifico nella correlazione tra patrimonio tangibile e intangibile.

La metodologia applicata per l'implementazione dati non si è limitata al solo livello di sviluppo/dettaglio del Lazzaretto; la documentazione puntuale dell'edificio ha consentito di modellare, infatti, un manufatto coerente sia dal punto di vista dell'affidabilità (LOR, Level of Reliability), sia da quello dell'evoluzione (LOE, Level of Evolution). Il modello informato dimostra come l'arricchimento dati, ottenuto attraverso piattaforme di BIM authoring, sia un efficace strumento a supporto della ricerca storico-archivistica e garantisca la trasparenza del modello. La restituzione dei dati acquisiti è avvenuta seguendo processi di ricostruzione per oggetti digitali e strategie che si impostano sulla conoscenza e sull'interpretazione critica dell'operatore. L'affidabilità dell'informazione rappresentata non è legata solo alle proprietà geometriche e ai dati di rilievo, ma anche e soprattutto al processo di elaborazione critica dei dati.

La modellazione HBIM rappresenta dunque un affidabile strumento per la ricerca storica, soprattutto dato lo spatial turn che ha interessato più o meno recentemente le discipline storiche (KÜMIN, USBORNE 2013). L'impiego di modelli HBIM in ambiti legati allo studio della cultura materiale potrà sicuramente favorire l'interesse verso lo studio dell'edificio e dello spazio come elemento centrale della ricerca, purtroppo incentrata finora prevalentemente

sullo studio di oggetti e opere d'arte (KING 2016). Inoltre, lo studio storico di edifici e della loro architettura richiede spesso conoscenze interdisciplinari (come la comprensione e interpretazione di fonti visuali), che nel caso della modellazione HBIM vengono mediate dal modello stesso.

Il presente lavoro ha, quindi, soprattutto dimostrato come il modello HBIM rappresenti allo stesso tempo un prodotto e uno strumento a cui la ricerca storica fondata sulla material culture e applicata all'ambiente edificato dovrebbe aspirare. Difatti, in qualità di prodotto il modello riunisce in sé dati di diversa natura essenziali per l'interpretazione globale dell'edificio, del suo significato storico-culturale e dell'epoca e società da cui è originato. Come strumento, il modello integra tutti i riferimenti documentari e la loro contestualizzazione archivistica e storica (intesa quest'ultima non solo in ambito cronologico, ma anche culturale) offrendo un contributo essenziale agli sviluppi futuri della ricerca.

R.Q., M.I., R.M.

RAISSA MAMMOLI

Divisione tecnica edile

Università Politecnica delle Marche

r.mammoli@univpm.it

MARINA INÌ

Department of History

The University of Manchester

marina.ini@manchester.ac.uk

RAMONA QUATTRINI\*

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Università Politecnica delle Marche

r.quattrini@univpm.it

### *Ringraziamenti*

Le autrici desiderano ringraziare il Prof. Paolo Clini del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche per aver messo a disposizione i dati di rilievo, Anna Paola Pugnaroni e Adriana Formato per l'aiuto nella consultazione dell'archivio del Dipartimento. Questo articolo è frutto delle indagini condotte da Marina Inì e Raissa Mammoli per le rispettive tesi di Dottorato. La tesi di Marina Inì, *The System of Lazzaretti in the Early Modern Mediterranean*, è stata sviluppata presso la Facoltà di Storia dell'Università di Cambridge, supervisor Prof. Mary Laven. La tesi di Raissa Mammoli, *Paradigmi tecnologici per un nuovo approccio nella Digital Transformation del patrimonio culturale. BIM per una semantica dell'architettura storica*, è stata sviluppata nel corso di Dottorato in Scienze dell'Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, supervisor Prof. Paolo Clini.

\* Corresponding Author.

## BIBLIOGRAFIA

- BARBA S., BARBATO D., DI FILIPPO A., NAPOLETANO R., RIBERA F. 2020, *BIM-oriented modelling and management of structured information for Cultural Heritage*, in L. AGUSTÍN-HERNÁNDEZ, A. VALLESPÍN MUNIESA, A. FERNÁNDEZ-MORALES (eds.), *Graphical Heritage*, Cham, Springer International Publishing, 630-640 ([https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-47979-4\\_54](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-47979-4_54)).
- BARROZIO DA VIGNOLA M.I. 1562, *La regola delli cinque ordini d'architettura*, Roma.
- BEACHAM R., DENARD H., NICCOLUCCI F. 2006, W4 RL2 *An Introduction to the London Charter, The Evolution of ICTechnology in Cultural Heritage*, CIPA/VAST/EG/EuroMed Event 2006, Nicosia, Cyprus ([http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/beacham-denard-niccolucci\\_intro.pdf](http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/beacham-denard-niccolucci_intro.pdf)).
- BENTKOWSKA-KAFEL A., DENARD H. (eds.) 2012, *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*, London, Routledge (<https://doi.org/10.4324/9781315599366>).
- BIANCHINI C., INGLESE C., IPPOLITO A. 2016, *The role of BIM (Building Information Modeling) for representation and managing of built and historic artifacts*, «Disegnarecon», 9, 10.1-10.9 (<http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/view/152/134>).
- BRUSAPORCI S., MAIEZZA P., TATA A. 2018, *Computational design for as-built modeling of architectural heritage in HBIM processes*, in 2018 IEEE International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArcheo 2018 – Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 199-203 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/9089752>).
- BUCCIARELLI G., MEZZETTI C., PUGNALONI F. 1979, *Il Lazzaretto di Ancona, un'opera dimenticata*, Ancona, Cassa di Risparmio di Ancona, Industrie Grafiche F.lli Anibaldi.
- CAVALLO S., STOREY T. 2013, *Healthy Living in Late Renaissance Italy*, Oxford, Oxford University Press (<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199678136.001.0001>).
- CHASE-LEVENSON A. 2020, *The Yellow Flag*, Cambridge, Cambridge University Press (<https://doi.org/10.1017/9781108751773>).
- CHIABRANDO F., LO TURCO M., SANTAGATI C. 2017, *Digital invasions: From point clouds to historical building object modeling (h-BOM) of a UNESCO WHL site*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, XLII-2/W3, 171-178 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-171-2017>).
- CHITHAM R. 1987, *Gli ordini classici in architettura. I fondamenti storici, gli ordini nei loro particolari, l'uso degli ordini*, Milano, Hoepli.
- CIPOLLA C.M. 1981, *Fighting the Plague in Seventeenth-Century Italy*, University of Wisconsin Press.
- COOPER D. 2018, *Firenze scomparsa: le chiese di Santa Chiara e San Pier maggiore e la loro ricostruzione digitale presso i musei di Londra*, in P. VITOLO (ed.), *Progetti digitali per la storia dell'arte medievale - Digital Projects in Medieval Art History*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 10, 67-80 (<https://doi.org/10.19282/ACS.10.2018.05>).
- CURSI S., SIMEONE D., TOLDO I. 2015, *A semantic web approach for built heritage representation*, in G. CELANI, D.M. SPERLING, J.M. SANTOS FRANCO (eds.), *Communications in Computer and Information Science*, Berlin-Heidelberg, Springer, 383-401 ([https://doi.org/10.1007/978-3-662-47386-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47386-3_21)).
- D'ANDREA A., BOSCO A., BARBARINO M. 2017, *A 3D Environment to rebuild virtually the so-called Augusteum in Herculaneum*, in S. GARAGNANI, A. GAUCCI (eds.), *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the KAINUA 2017 International Conference (Bologna 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.2, 437-446 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.35>).
- DANIOTTI B., GIANINETTO M., DELLA TORRE S. 2020, *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment, Research for Development*, Switzerland AG, Springer Nature.

- FERDANI D., DEMETRESCU E., CAVALIERI M., PACE G., LENZI S. 2020, *3D modelling and visualization in field archaeology. From survey to interpretation of the past using digital technologies*, «Groma. Documenting archaeology», 4, 19, 1-21 (<https://doi.org/10.12977/groma26>).
- FIORANI D., ACIERNO M., CUTARELLI S., DONATELLI A. 2020, *Transformation of tools and conservation of architecture*, «Építés - Építészettudomány», 49, 1-35 (<https://doi.org/10.1556/096.2020.005>).
- GARAGNANI S. 2017, *Archaeological Building Information Modeling: beyond scalable representation of architecture and archaeology*, in S. GARAGNANI, A. GAUCCI (eds.), *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the KAINUA 2017 International Conference (Bologna 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.2, 141-149 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.09>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GOVI E. 2016, *ArchaeoBIM: dallo scavo al Building Information Modeling di una struttura sepolta. Il caso del tempio tuscanico di Uni a Marzabotto*, «Archeologia e Calcolatori», 27, 251-270 (<https://doi.org/10.19282/AC.27.2016.13>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., MOSCATI P., GAIANI M. 2021, *ArchaeoBIM. Theory, Processes and Digital Methodologies for the Lost Heritage*, Bologna, Bononia University Press.
- GIACOMINI C. 2009, *Le magistrature giudiziarie di Ancona nei documenti comunali di antico regime (1308-1797)*, Ancona, Affinità Elettive.
- INÌ M. 2021, *Materiality, quarantine and contagion in the early modern Mediterranean*, «Social History of Medicine», 34, 4, 1161-1184 (<https://doi.org/10.1093/shm/hkaa124>).
- KING C. 2016, *Domestic buildings: Understanding houses and society*, in C. RICHARDSON, T. HAMLING, D. GAIMSTER (eds.), *The Routledge Handbook of Material Culture in Early Modern Europe*, London, Routledge, 115-130 (<https://www.routledge.com/The-Routledge-Handbook-of-Material-Culture-in-Early-Modern-Europe/Richardson-Hamling-Gaimster/p/book/9781409462699>).
- KÜMIN B., USBORNE C. 2013, *At home and in the workplace: A historical introduction to the 'spatial turn'*, «History and Theory», 52, 3, 305-318 (<https://www.jstor.org/stable/24542988>).
- LÓPEZ F., LERONES P.M., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J., ZALAMA E. 2018, *A review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*, «Multimodal Technologies and Interaction», 2, 2, 1-29 (<https://doi.org/10.3390/mti2020021>).
- MAIEZZA, P., TATA A. 2019, *Modelling and visualization issues in the Architectural Heritage BIM*, in C. MARCOS (ed.) *Graphic Imprints. EGA 2018*, Cham, Springer, 521-531 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-93749-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93749-6_42)).
- MAMMOLI R., MARIOTTI C., QUATTRINI R. 2021, *Modeling the fourth dimension of architectural heritage: Enabling processes for a sustainable conservation*, «Sustainability», 13, 9, 1-15 (<https://doi.org/10.3390/su13095173>).
- MEAD R. 1720, *A short discourse concerning pestilential contagion, and the methods to be used to prevent it* (printed by R. Smith and S. Buckley), London.
- MORDENTI A. 1992, *L'inventario Angelini Rota dell'Archivio storico comunale di Ancona*, in *Studi anconitani. Ricerca della città*, Ancona, Archivio di Stato di Ancona.
- MURATORI L.A. 1714, *Del governo della peste, e delle maniere di guardarsene* (printed by B. Soliani), Modena.
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2009, *Historic Building Information Modelling (HBIM)*, «Structural Survey», 27, 4, 311-327 (<https://doi.org/10.1108/02630800910985108>).
- NUTTON V. 1983, *The seeds of disease: An explanation of contagion and infection from the Greeks to the Renaissance*, «Medical History», 27, 1, 1-34 (<https://doi.org/10.1017/s0025727300042241>).
- ORLANDI G. 1991, *La gelosa materia. I Provvisori alla sanità di Ancona (1430-1810)*, Ancona, Archivio di Stato di Ancona.

- OSELLO A., DAVARDOUST S., SEMERARO F., LUCIBELLO G., BARONE L., DELLOSTA M., RONZINO A., DEL GIUDICE M., FONSAI A., UGLIOTTI F.M., RAPETTI N. 2016, *La centralità della rappresentazione con il BIM*, «Disegnarecon», 9, 5.1-5.12 (<http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/view/145>).
- PIETRONI E., FERDANI D. 2021, *Virtual restoration and virtual reconstruction in cultural heritage: Terminology, methodologies, visual representation techniques and cognitive models*, «Information», 12, 4, 1-30 (<https://doi.org/10.3390/info12040167>).
- QUATTRINI R., MALINVERNI E.S., CLINI P., NESPECA R., ORLIETTI E. 2015, *From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, XL-5/W4, 367-374 (<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015>).
- QUATTRINI R., PIERDICCA R., MORBIDONI C., MALINVERNI E.S. 2017, *Conservation-oriented Hbim. The bimexplorer web tool*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, XLII-5/W1, 275-281 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-275-2017>).
- RUSSELL P. 1791, *A treatise of the plague: Containing an historical journal, and medical account, of the plague, at Aleppo, in the years 1760, 1761, and 1762* (printed by G.G.J. Robinson and J. Robinson), London.
- SCIANNA A., GAGLIO G.F., GUARDIA M. 2020, *HBIM data management in historical and archaeological buildings*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 231-252 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.11>).
- SIMEONE D., CURSI S., TOLDO I., CARRARA G. 2014, *B(H)IM - Built Heritage Information Modelling*, in 2<sup>nd</sup> eCAADe Conference at Department of Architecture and Built Environment (Newcastle upon Tyne), England, 613-622 ([http://ecaade.org/downloads/eCAADe2014\\_volume1.pdf](http://ecaade.org/downloads/eCAADe2014_volume1.pdf)).
- VARLIK N. 2017, «*Oriental plague*» or epidemiological orientalism? *Revisiting the plague episteme of the early modern Mediterranean*, in *Plague and Contagion in the Islamic Mediterranean*, Amsterdam, University Press, 57-88 (<https://doi.org/10.1515/9781942401162-005>).
- VOLK R., STENGEL J., SCHULTMANN F. 2014, *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs*, «Automation in Construction», 38, 109-127 (<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>).

## ABSTRACT

In the Cultural Heritage domain, the potential of BIM for the built heritage is well known. However, research in Historical Building Information Modeling (HBIM) is still developing and deserves new experiments. Currently, the main objectives are the model transparency, meaning that sources and reliability of information can be linked to the model and retrieved from it, for a better interoperability and multi-disciplinary collaboration. Given the proliferation of 3D models, both informed and uninformed, and their increasing quality, there is a need to protect this heritage and provide useful uses beyond visualisation. This research not only addresses the challenge of creating an informed three-dimensional model capable of showing and documenting the evolution and transformation of the building, but also aims to achieve an output that can be used by historical experts who contribute to the creation and validation of the information apparatus. The case study is the Lazzaretto in Ancona, designed by Luigi Vanvitelli in the 18<sup>th</sup> century: it is an example of a building that shows the material culture of its time. The information gained from the primary sources, which contribute to the analysis of early modern notions of contagion, are merged with the analysis of the built environment. The proposed HBIM model is the result of interdisciplinary research between history and digital survey/representation and aims to provide the greatest transparency of knowledge in both areas. The informed model shows how the data improvement through HBIM platforms is a powerful tool to support historical-archival research and guarantees the transparency of the model.

IL RILIEVO  
TRA INTERPRETAZIONE  
E RICOSTRUZIONE



## IL CONTRIBUTO DELL'ARCHEOLOGIA DIGITALE ALLO STUDIO E ALL'INTERPRETAZIONE DELL'EDILIZIA STORICA. IL CASO DI SAN MARINO

### 1. INTRODUZIONE

Le attività propedeutiche di analisi archeologica della stratigrafia muraria e di rilevamento sono il presupposto fondamentale per intervenire correttamente sull'interpretazione e sulla conoscenza dei manufatti architettonici. I progressi tecnologici degli ultimi anni hanno portato a un miglioramento delle metodologie e degli strumenti di rilevamento tridimensionale e analisi dei dati. L'utilizzo di tecniche di rilievo quali la fotogrammetria digitale, il remote sensing e la scansione laser; di software di simulazione, visualizzazione 3D e di organizzazione informatizzata dei dati archeologici, hanno avuto uno sviluppo esponenziale trovando una sempre maggiore applicazione consapevole anche nel settore dell'archeologia dell'architettura. La continua sperimentazione da una parte ha aperto a prospettive e problematiche di ricerca prima impensabili, dall'altra ha portato all'ideazione e sviluppo di metodi e tecniche specifiche per il settore archeologico o all'assimilazione di paradigmi sviluppati, in origine, per altri settori (FORTE *et al.* 2012; REMONDINO, CAMPANA 2014; LANDESCHI *et al.* 2016).

Tuttavia, ad oggi, tali strumenti e metodi non sono ancora entrati appieno nello standard della pratica archeologica e le potenzialità offerte sono sfruttate solamente in parte. Di fatto, l'archeologia digitale è una branca appena nata nell'ambiente accademico e solo in pochi ambienti universitari fa parte del programma di apprendimento. Nel recente passato spesso il suo ruolo è stato puramente tecnico, finalizzato ad una documentazione più completa, veloce ed efficace mentre la sua importanza nel processo interpretativo e cognitivo è stata sottovalutata. Tale sfiducia dipende certamente dal fatto che le prime applicazioni avevano diverse debolezze, mancavano infatti degli obiettivi che mirassero a trovare risposte precise (FORTE 2000; HERMON 2007). La spettacolarizzazione e la novità finivano per offuscare le potenzialità di queste tecnologie e i loro output diventavano il fine e non il mezzo per risolvere domande di ricerca. Tuttavia, col tempo l'uso delle tecnologie digitali in archeologia ha avuto un grande impatto sulla disciplina, soprattutto nel modo in cui i dati vengono raccolti, gestiti e soprattutto interpretati e visualizzati.

Spesso, ancora oggi, un uso poco consapevole di queste tecnologie sia a livello accademico che professionale, fa sì che queste vengano applicate su campo solamente per ottenere una documentazione più precisa e accurata di un sito archeologico, oppure per automatizzare processi tediosi. Questi sono sicuramente vantaggi importanti, ma a nostro avviso ciò che fa davvero la

differenza è l'utilizzo del dato ottenuto come strumento analitico. Le tecnologie di rilievo e visualizzazione 3D hanno infatti permesso di supportare i processi cognitivi e interpretativi per una migliore comprensione degli scenari archeologici, aiutando gli studiosi a strutturare fonti complesse e a testare il ragionamento interpretativo in modelli di realtà virtuale e simulazioni. Come afferma ZUBROW (2006), il loro approccio non è solo metodologico poiché esse creano teoria o influenzano l'aspetto teorico.

Un ulteriore elemento che aiuta a delineare i vantaggi che derivano da un impiego "analitico" dei modelli 3D è l'introduzione del concetto di "replica digitale" del contesto originario (DEMETRESCU *et al.* 2020). La replica digitale è un sostituto visuale di un sito archeologico che è stato introdotto per soddisfare le necessità di tutela estensiva del patrimonio culturale (sito archeologico e suo contesto considerati nel loro insieme come paesaggio culturale) evidenziate da istituzioni di rilevanza internazionale come ICOMOS e UNESCO. La rappresentazione conforme del paesaggio culturale e dei suoi siti e monumenti ha aperto una sfida tecnologica e metodologica che porta alla creazione delle loro repliche digitali, ovvero modelli con altissima risoluzione e accuratezza. Come verrà approfondito nella sezione sull'uso dei modelli 3D, tali modelli hanno permesso di eseguire delle attività di analisi della stratigrafia muraria laddove l'analisi autoptica non era praticabile.

In questo contributo presentiamo dunque un flusso di lavoro, dal rilievo alla pubblicazione, che mostra come alcune applicazioni pratiche dei modelli tridimensionali possano coadiuvare il processo di analisi e interpretazione del dato archeologico in contesti operativi e interpretativi complessi.

Il caso di studio che andremo ad analizzare riguarda le fortificazioni del centro storico di San Marino. Tali strutture, di origine medievale, sono state oggetto di numerosi interventi nel corso dei secoli, in ultimo da importanti restauri stilistici e parziali ricostruzioni condotti senza alcun approccio filologico tra la fine del XIX secolo e la prima metà del XX ad opera dell'ing. Gino Zani (ZANI 1933; ROSSI 2015; MORGANTI 2018). Questi ultimi in particolare hanno alterato l'immagine dei manufatti creando problemi legati all'"autenticità" e alla "riconoscibilità" delle opere e causando gravi conseguenze all'identità storica e tutela del patrimonio monumentale sammarinese. Dal 2016, a seguito della stipula di un protocollo d'intesa in tema di ricerca e cooperazione tra l'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR ISPC) e gli Istituti Culturali della Repubblica di San Marino (ICRSM), sono stati avviati studi storici, rilevamenti archeologici e architettonici nel centro storico di San Marino allo scopo di conoscenza, tutela e valorizzazione dei manufatti. I palinsesti architettonici finora analizzati presentano gradi di complessità molto elevati (dipendenti dal contesto operativo urbano, dall'inaccessibilità di alcuni contesti, dall'estensione del sito, dalla difficoltà interpretativa di alcune stratigrafie manomesse dai restauri, etc.) che richiedono un approccio multidisciplinare

finalizzato all'elaborazione di un modello interpretativo sia sul livello storico che su quello tecnico (FERDANI *et al.* 2019). L'integrazione di diversi metodi e tecniche 3D in questo progetto di archeologia dell'architettura, incrociati con le fonti iconografiche e di archivio, ha contribuito significativamente al risultato colmando alcune lacune interpretative e permettendo di analizzare e confrontare dati con approcci non ancora sperimentati nel sito.

## 2. IL CONTESTO DI ANALISI

Il territorio della Repubblica di San Marino (61,2 km<sup>2</sup>) è situato tra Romagna e Marche ed è incentrato sul massiccio del Monte Titano (739 m s.l.m.), dalla linea di crinale del quale, nei versanti NE e S, si sviluppano rupi scoscese, con pareti verticali alte talvolta oltre 100 m (GUERRA *et al.* 2011). Visibile da grande distanza, dominante sul solco vallivo del Marecchia e posto in posizione mediana tra la costa adriatica e l'area del valico di Viamaggio, il Titano è stato insediato fin dall'età protostorica (GIORGETTI 1994; BOTTAZZI, BIGI 2008) e costituisce l'esempio paradigmatico di un insediamento d'altura che dal Medioevo, acquisendo progressivamente una autonomia statale, è giunto fino alla contemporaneità. Le fonti documentali di età tardoantica e altomedievale che attestano una presenza insediativa o l'esistenza di un *castellum/castrum Sancti Marini* sul Monte Titano sono molto frammentarie.

Al 511, in età gota, data la *Vita Sancti Severini*, nella quale Eugippio menziona l'esistenza sul Titano di un *monasterium*, verosimilmente situato nell'area della Pieve di San Marino. La Pieve è ricordata per la prima volta in un documento del 1069 (CARTE DI FONTE AVELLANA 1972, 66-70), ma ha restituito elementi architettonici altomedievali, riferiti al IX secolo (VALENTI 2008, 140-144). Sul crinale del Monte Titano, a 370 m a S della Terza Torre, sono stati rinvenuti in località "Tanaccia" una cisterna, costruita con laterizi di reimpiego, e materiali archeologici e numismatici datati al IV-VI secolo d.C. (GIORGETTI 1994, 67-72). Sempre alla "Tanaccia" sono stati ritrovati frammenti di armi in ferro, che sono stati riferiti anch'essi all'età tardoantica (GIORGETTI 1994, 19, n. 11). Tali elementi hanno consentito di ipotizzare la presenza sul Titano, strategico per il controllo dell'entroterra collinare di Rimini, di un *castrum* di età gota durante la guerra greco-gotica (535-553).

Procopio di Cesarea (*De bello gothico*, VI, XI, 3) attesta l'esistenza di un *castrum* goto a San Leo di Montefeltro, forte di 500 uomini e posto a controllo della valle del Marecchia nel 538. San Leo è citato anche da Eugippio, all'inizio del VI secolo, e sembra essere compreso nell'elenco dei castelli bizantini di Giorgio di Cipro. Il *castellum Sancti Marini* è citato in tarda età longobarda, nell'elenco dei castelli controversi tra il re dei Franchi, Pipino, i Longobardi e il Papa Stefano II (BONACINI 1994). Per i secoli successivi il ruolo strategico di San Leo è ancora ben evidente per la nota vicenda dell'assedio che contrappone



Fig. 1 – Alcuni dei corpi di fabbrica oggetto di analisi e rilievo. 1) Prima Torre; 2) Seconda Torre e mura della Fratta; 3) Mura e torri del Secondo Girone; 4) Terza Torre; 5) Porta San Francesco nel Terzo Girone. Nelle immagini si può notare la complessità delle architetture e la presenza di criticità operative indicate (DHiLab - CNR ISPC).

Berengario e l'imperatore Ottone I negli anni 961-963. Mancano invece ulteriori testimonianze riferibili a San Marino come luogo fortificato. La prima attestazione documentata data al 1125 con la bolla di Papa Onorio II a Pietro, vescovo del Montefeltro, nella quale si nomina la «plebem Sancti Marini cum castello et cum omnibus pertinentiis suis» (LOMBARDI 1976, 78; SASSI 2005, 166).

Tra XII e XIII secolo il territorio di San Marino, originariamente limitato al Titano e alle sue immediate pertinenze, si espande a E: San Giovanni, Valdragone, Cailungo, Piandavello, Domagnano, Sterpeto. Verso la metà del Duecento sono acquisiti Cerreto – sul quale sono stati riscontrati resti di un sito fortificato (BOTTAZZI, BIGI 2013) – e Ventoso, che in un documento del 20 dicembre 1243 erano ancora menzionati come *castra* appartenenti a un signore territoriale, Guido da Cerreto (CAMBRINI 2013; LOMBARDI 2017, 38-39). Nel 1253 il vescovo di Montefeltro e i consoli sammarinesi acquisiscono i diritti su Casole, in precedenza sotto il controllo dei Montefeltro e probabilmente già decastellato (LOMBARDI 2017, 37-38). Nel 1320, su richiesta degli abitanti, viene annesso al Comune di San Marino Busignano, territorio

posto sotto la giurisdizione di Pieve Corena (CAMBRINI 2012, 175-183; DI CARPEGNA FALCONIERI 2012). L'ultima espansione territoriale di San Marino avviene nel 1463. Sulla base del trattato sottoscritto il 21 settembre 1462, dopo la sconfitta di Sigismondo Pandolfo Malatesti ad opera della coalizione pontificia guidata da Federico di Montefeltro, San Marino, con la bolla di Pio II del 27 giugno 1463, ottiene Fiorentino, Montegiardino, Serravalle e Faetano, raddoppiando quasi la sua estensione territoriale (COLOSIMO 2017).

L'esito dei processi fortificatori e costruttivi avvenuti sul Titano nel Medioevo è tratteggiato nella *Descriptio provinciae Romandiolae* del cardinale Anglico de Grimoard dell'anno 1371: «Castrum S. Marini, positum super quodam Sasso altissimo in cuius summitate sunt tres Rocchae fortissimae, quae custodiuntur per homines dicti Castri» Il complesso archeologico della Prima Torre o "Guaita" è citato nel 1253 e negli Statuti del 1317. Il nucleo originario probabilmente consisteva in una torre difesa da un recinto murario, poi modificato e ampliato nei secoli successivi (Fig. 1). Al 1450 ca. è datata la cinta esterna, al 1470 la ricostruzione della torre, al 1487 la ricostruzione della porta della cinta interna e, a seguire, l'ampliamento della "casermetta". Ulteriori interventi sarebbero stati realizzati a partire dal XVI secolo quando il complesso viene adeguato alla difesa dalle armi da fuoco. Al XVI secolo (1530) risale anche la costruzione della torre campanaria, mentre al XVII secolo (1622-1623) il baluardo della cannoniera della cinta esterna (PASINI 2005, 18-19).

Dal XIV al XX secolo alcuni ambienti della Prima Torre furono adibiti a prigione. Nel corso dei secoli la Rocca è stata oggetto di ristrutturazioni e rifacimenti; gli interventi più rilevanti datano al secolo scorso, tra il 1933 e il 1935, e, successivamente, nel 1942, quando sono state restaurate cortine e merlature e rialzata la torre principale sotto la direzione di Gino Zani (ZUCCONI 1992, 35-39; MORGANTI 2001, 139-140). Nel 1960, vicino all'ingresso del complesso, è stata invece edificata in stile neo-medievale la cappella di Santa Barbara, originariamente ospitata nella seconda torre rompitratte della cinta esterna della Rocca (PASINI 2005, 18). La Seconda Torre o "Cesta", risalente secondo lo Zani al XIII secolo, è attestata nelle fonti archivistiche fin dal XIV secolo e costituisce il secondo grande complesso fortificato del Titano. Secondo le fonti subì interventi di aggiornamento nel 1396, 1535 e 1549. La Terza Torre o "Montale", a pianta pentagonale, è costruita nella zona S-E, in posizione isolata e strategica per il controllo della viabilità. La Seconda Torre e la Terza Torre hanno subito importanti restauri nel corso dei secoli, i più significativi tra il 1925 e il 1935 per la Seconda Torre e nel 1935 per la Terza Torre. Le fotografie precedenti a tale data testimoniano l'entità della ricostruzione, in particolare per la Seconda Torre.

Anche le cinte murarie, costruite a difesa della città nel Medioevo, hanno avuto nel corso del tempo ampliamenti, modifiche, rifunzionalizzazioni e demolizioni. Alle più antiche mura cittadine, le cosiddette "mura del primo girone", sono riferiti pochi lacerti sul terreno sottostante la porta della Rocca.

Le mura partivano presumibilmente dalla Prima Torre, da cui scendevano verso il nucleo abitato per inglobare le cisterne dei Fossi, la prima casa del Comune e terminare in prossimità della Pieve. Un “secondo girone” di mura fu costruito a partire dal XIII secolo e corrisponde alla tratta che oggi si trova a strapiombo sulla sottostante cava antica. Le mura, prive di scarpa o risega, sono intervallate da torrette a pianta quadrata. Nei pressi di una torretta è stata realizzata in età moderna la porta della “Fratta”, poi più volte modificata.

In questo tratto il “secondo girone” è ben conservato e nonostante i restauri operati da Zani, che hanno interessato soprattutto la parte sommitale, mantiene un’ottima leggibilità delle strutture murarie originarie. In prossimità della porta della Fratta, nel corso del XV secolo, fu realizzato un ulteriore tratto di mura difensive, detto anch’esso della Fratta, che collegava il nucleo urbano alla Seconda Torre. Il tratto, ben conservato, si estende per quasi trecento metri ed è intervallato da quattro torrette semicircolari aperte alla gola. Nella seconda metà del XV secolo, contestualmente all’ultima espansione territoriale di San Marino, le mura cittadine si ampliarono ulteriormente fino al perimetro dell’attuale centro storico. La principale porta di accesso alla “Città” diviene la Porta del Locho o Porta San Francesco, attigua alla omonima chiesa edificata nel XIV secolo. Anche queste fortificazioni sono state più volte restaurate e/o ricostruite, mantenendo l’orientamento originario. Sempre nella seconda metà del Quattrocento San Marino si dota delle grandi cisterne del Pianello, infrastruttura realizzata al di sotto del piano di calpestio della omonima piazza, la cui costruzione è avviata dal 1476 (GOBBI 1999, 52, 159-160) (Fig. 2). Ne emerge dunque un quadro estremamente articolato con strutture che presentano continuità di vita dal Medioevo ad oggi.

### 3. AMBITO DI STUDI E FLUSSO DI LAVORO

L’ambito di studi che stiamo trattando riguarda l’archeologia dell’architettura la cui finalità è quella di ricostruire l’evoluzione storica di complessi architettonici o interi apparati urbani attraverso lo sviluppo sia di un modello storico sia di un modello tecnico. Il “modello storico” ha lo scopo di interpretare, nelle forme edilizie e scelte progettuali, il sostrato culturale e le condizioni economiche della committenza, gli interessi politici, militari ed economici, le scelte estetiche e la presenza di tendenze costruttive e culturali. Il “modello tecnico” è orientato alla comprensione del contesto materiale e delle fasi del cantiere edile, alla classificazione delle tecniche costruttive e dei processi produttivi adottati nelle attività edilizie, all’individuazione della funzione ed evoluzione delle tipologie edilizie e alla ricostruzione dell’aspetto originale dei manufatti.

Ricostruire tali modelli richiede un approccio multidisciplinare ed un paziente lavoro di analisi e interpretazione dei dati. Nel caso di San Marino tale studio, attualmente in corso, è stato applicato su tutte le fortificazioni del

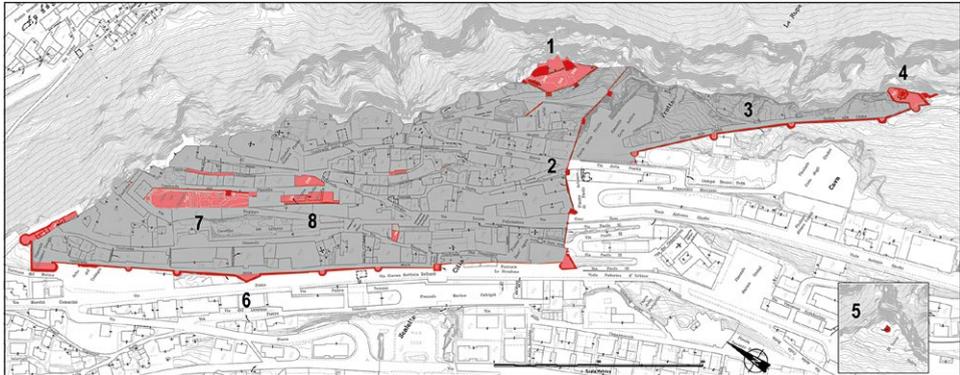


Fig. 2 – Planimetria catastale del centro storico di San Marino. In rosso sono indicate le architetture oggetto di analisi e rilevate con tecniche fotogrammetriche e/o di laser scanning. I numeri indicati di seguito si riferiscono ai settori di indagine: 1) Prima Torre; 2) Mura del Secondo Girone; 3) Mura della Fratta; 4) Seconda Torre; 5) Terza Torre (circa 300 m a S rispetto alla Seconda); 6) Mura del Terzo Girone; 7) Mura del Pianello; 8) Cisterne del Pianello (DHiLab - CNR ISPC).

centro storico che comprendono le tre rocche e i cinque circuiti murari (Fig. 2). Tale lavoro si inserisce nel contesto di studi emiliano-romagnolo (SETTIA 2007; AUGENTI *et al.* 2009, 2012; FIORINI 2015; SASSI 2005; SACCO, TOSARELLI 2016) che negli ultimi anni ha conseguito importanti risultati nello studio dei castelli, proprio grazie all'archeologia dell'architettura grazie ad un censimento delle tecniche murarie, allo studio delle tipologie edilizie e all'applicazione di nuove tecnologie digitali allo studio e interpretazione dei contesti (FIORINI *et al.* 2011; FIORINI 2018).

Le difficoltà che in genere si incontrano nel documentare e interpretare i manufatti storici sono molteplici. Nel caso di San Marino queste sono state amplificate da una serie di fattori di seguito elencati:

- Strutture integrate nel tessuto urbano: la maggior parte dei circuiti murari sono inglobati nell'attuale tessuto e si sviluppano lungo le principali vie di transito urbano. Ciò rende complessa la pianificazione del rilievo che ha richiesto l'interruzione temporanea di alcuni servizi (parcheggio, transito, accesso ai pedoni) e di conseguenza finestre limitate per la conduzione delle operazioni di documentazione.
- Inaccessibilità alle strutture: alcuni complessi architettonici, soprattutto le tre torri, sono costruiti sulla testa dell'acrocoro con il fronte occidentale in linea con lo strapiombo della Rupe. Molti prospetti sono dunque inaccessibili ad un'analisi autoptica.
- Presenza di vegetazione: dopo i restauri del '900 la vegetazione ad alto fusto è cresciuta a ridosso di alcuni circuiti murari ed in particolare quello esterno della Fratta coprendo parzialmente i paramenti murari.

- Restauri stilistici: Come precedentemente accennato i manufatti sono stati interessati tra fine '800 e prima metà del '900 di numerosi interventi di restauro mimetico che rendono tutt'oggi complesso individuare e differenziare in modo netto i confini stratigrafici.
- Documentazione estensiva: le strutture conservate coprono una superficie enorme e pertanto richiedono tecniche di documentazione speditive ma che permettano una lettura accurata e di dettaglio delle superfici murarie.
- Lettura sinottica: alcune strutture murarie come torri o tratti di cinta urbana privi di rapporti fisici (poiché alcune tratte difensive sono state obliterate da strutture costruite in epoche successive) non sono mai state interessate da indagini comparative che permettessero una lettura sinottica e di confronto tipologico. Pertanto, ad oggi non è ancora chiaro se certe strutture siano coeve tra loro o frutto di interventi diversi.

Considerando le finalità del progetto, l'estensione dei manufatti e le criticità operative si è deciso di optare per un rilievo del contesto monumentale attraverso diverse tecniche (laser scanner, fotogrammetria con diversi sensori, riprese da drone, campagna topografica per la georeferenziazione) successivamente integrate in laboratorio. La ridondanza delle informazioni, se da un lato ha appesantito il processo di raccolta dati, dall'altro ha permesso una copertura il più omogenea possibile. La post-produzione del dataset, oltre alla suddetta integrazione, ha previsto una serie di scelte deliberate per mantenere costante la risoluzione e l'accuratezza delle diverse parti del modello, sempre tenendo a mente la vera finalità dell'indagine ovvero quella di analizzare i corpi di fabbrica e interpretare genesi e sviluppo nei secoli.

Il flusso di lavoro adottato per la raccolta e l'elaborazione dei dati digitali è stato sperimentato nel sito della Prima Torre e pubblicato in FERDANI *et al.* 2019. Qui tale approccio è stato migliorato ed esteso a tutti i contesti sopra indicati.

1. Analisi documentaria: prima di iniziare le campagne di rilievo è stata raccolta e vagliata tutta la documentazione più significativa sulle architetture difensive di San Marino. Ci si riferisce non solo alla bibliografia degli studi sopra citata che è stata ampiamente utilizzata al fine di meglio comprendere e contestualizzare gli interventi costruttivi, ma anche alle testimonianze storiche. Di particolare aiuto sono stati i catasti storici, le piante, i sigilli, i dipinti, le vedute, le fotografie, le cartoline e le carte dell'archivio di stato della Repubblica. Questi documenti in molti casi sono stati decisivi non solo per attestare aspetto e stato di conservazione dei manufatti prima dei restauri stilistici, ma soprattutto per determinare il *terminus ante quem* per la data di realizzazione di alcuni interventi nonché finalità e committente.

2. Analisi archeologica delle architetture: durante la campagna è stata effettuata una analisi degli apparati murari al fine di registrare su apposite schede ed

eidotipi le informazioni archeologiche utili alla documentazione e comprensione dei manufatti, quali relazioni stratigrafiche murarie (USM), elementi architettonici, rapporti strutturali tra i corpi di fabbrica e tracce dei cantieri edilizi (buche pontarie, marche di maestranza, tracce degli strumenti, etc.). Tale analisi è stata condotta adottando i metodi elaborati negli ultimi decenni nell'ambito accademico Senese, Genovese e Padovano (tra i principali testi di riferimento si vedano in particolar modo BOATO 2002, 2008; FRANCOVICH, BIANCHI 2002; BROGIOLO, CAGNANA 2012; MANNONI 2021).

3. Rilievo tridimensionale dei manufatti. Il rilievo tridimensionale è stato suddiviso nelle seguenti attività:

- a) Inquadramento topografico: è stata realizzata una rete topografica costituita da una serie di capisaldi architettonici finalizzati all'inquadramento geografico e di target distribuiti in modo omogeneo sulle architetture necessari al controllo dell'accuratezza e alla georeferenziazione dei prodotti del rilevamento fotogrammetrico e laser scanner. Dopo aver realizzato uno schema operativo, si è proceduto con la battuta topografica. In prima istanza sono stati posizionati cinque capisaldi topografici agli estremi dello scavo e successivamente sono stati misurati con un GPS a doppio differenziale in sistema di coordinate WGS84 UTM 32 EPSG 32632 così da poter georiferire il successivo rilievo. In seguito, sono stati applicati sui prospetti i target e rilevati con una stazione totale laser (precisione angolare di 1" di grado) la cui base è stata georiferita e orientata sui punti GPS così da ottenere un rilievo in coordinate assolute. I target a scacchiera avevano vari formati, alcuni molto grandi (formato A4 e A5) in modo da risultare ben leggibili anche da ripresa aerea con drone e sono stati distribuiti in modo omogeneo lungo tutta le superfici murarie.
- b) Rilevamento tridimensionale delle architetture storiche: una volta completato il rilievo topografico è stato condotto il rilievo utilizzando sia tecniche fotogrammetriche che di laser scanning. Essendo la lettura archeologica delle superfici murarie uno degli obiettivi principali, tutte le superfici sono state acquisite con tecniche di fotogrammetria automatica mediante sensori professionali: camera full frame da 20 Mp con ottica fissa a 35 mm per gli scatti terrestri e camera con sensore 1/2.3 da 12 Mp con ottica grandangolare montata su drone per scatti aerei. Tali tecniche sono un'evoluzione della fotogrammetria tradizionale che, integrando algoritmi di computer vision, permettono di estrarre informazioni metriche, elaborare un modello tridimensionale ed ottenere ortofoto, partendo da fotografie digitali. La buona accuratezza e qualità dei risultati e l'automazione dei processi più complessi hanno fatto sì che tale tecnologia sia ormai da diversi anni adottata nella pratica archeologica (DELLEPIANE *et al.* 2013). In alcuni settori, oltre al rilievo fotogrammetrico, è stata realizzata anche una scansione laser al fine di integrare i dati e ottenere modello con

maggior accuratezza metrica sia per integrare il dato fotogrammetrico documentando aree problematiche. Ad esempio, tale approccio è stato particolarmente utile nel rilevamento della cinta esterna della Prima Torre o del Secondo Girone, le quali sono parzialmente nascoste da una fitta vegetazione e dunque impossibili da documentare completamente con la sola fotogrammetria. Il fascio laser è invece riuscito a filtrare attraverso le fronde degli alberi e ha restituito, seppure con lacune dovute alle zone d'ombra, la superficie dei prospetti.

- c) Processamento dei dati: concluse le attività su campo si è proceduto al processamento dei dati acquisiti per sviluppare gli elaborati tridimensionali necessari alla documentazione ed analisi dello stato di fatto e per procedere ad un'analisi comparativa ed interpretativa dei manufatti architettonici (Fig. 3). Tutti i dati fotogrammetrici sono stati elaborati studio mediante ben noti software di fotogrammetria come Agisoft Metashape e 3DFZephyr seguendo un workflow che prevede l'impiego di algoritmi di Structure from Motion (SfM) e multiview stereo (MS) per estrarre nuvole di punti georeferenziate dalle immagini orientate e dai dati topografici. Quando disponibili, sono state preferibilmente utilizzate le nuvole di punti ottenute dalla registrazione delle singole scansioni del rilievo laser scanner e integrate, nelle zone d'ombra (coperture, aree inaccessibili), con le nuvole ottenute dal processamento fotogrammetrico di foto aeree scattate da drone. Le nuvole sono state poi triangolate per ottenere le mesh poligonali, che rappresentano la superficie ed i volumi dei singoli manufatti in uno spazio virtuale. Queste sono state infine parametrizzate e texturizzate sfruttando le informazioni di colore derivate dalle immagini orientate. Il risultato è una replica digitale fotorealistica di ciascun manufatto architettonico. Durante l'elaborazione è stata data particolare attenzione all'ottimizzazione geometrica dei modelli e alla risoluzione e numero delle texture al fine di ottenere una replica digitale ad alto dettaglio da poter impiegare nelle successive attività di analisi ed estrazione di elaborati derivati. Per portare un esempio concreto, si riportano di seguito alcuni dati relativi alla replica digitale della Prima Torre. Si tratta di un modello 3D da 6 milioni di poligoni con un'accuratezza generale di 2 cm, segmentato in 37 elementi (per una miglior gestione in software di visualizzazione 3D) e 120 texture da 4096x4096 pixel che coprono una superficie di circa 7800 m<sup>2</sup>. La risoluzione media complessiva è quindi di 767 triangoli per m<sup>2</sup> e 2.55 mm rappresentati da un pixel.

Il flusso di lavoro fin qui descritto è scalabile ovvero applicabile al singolo corpo di fabbrica così come a interi complessi architettonici. Nel caso delle cinte murarie, e in particolare quella del Terzo Girone che ha uno sviluppo lineare di oltre 500 m, è stato infatti necessario analizzare i contesti a diverse

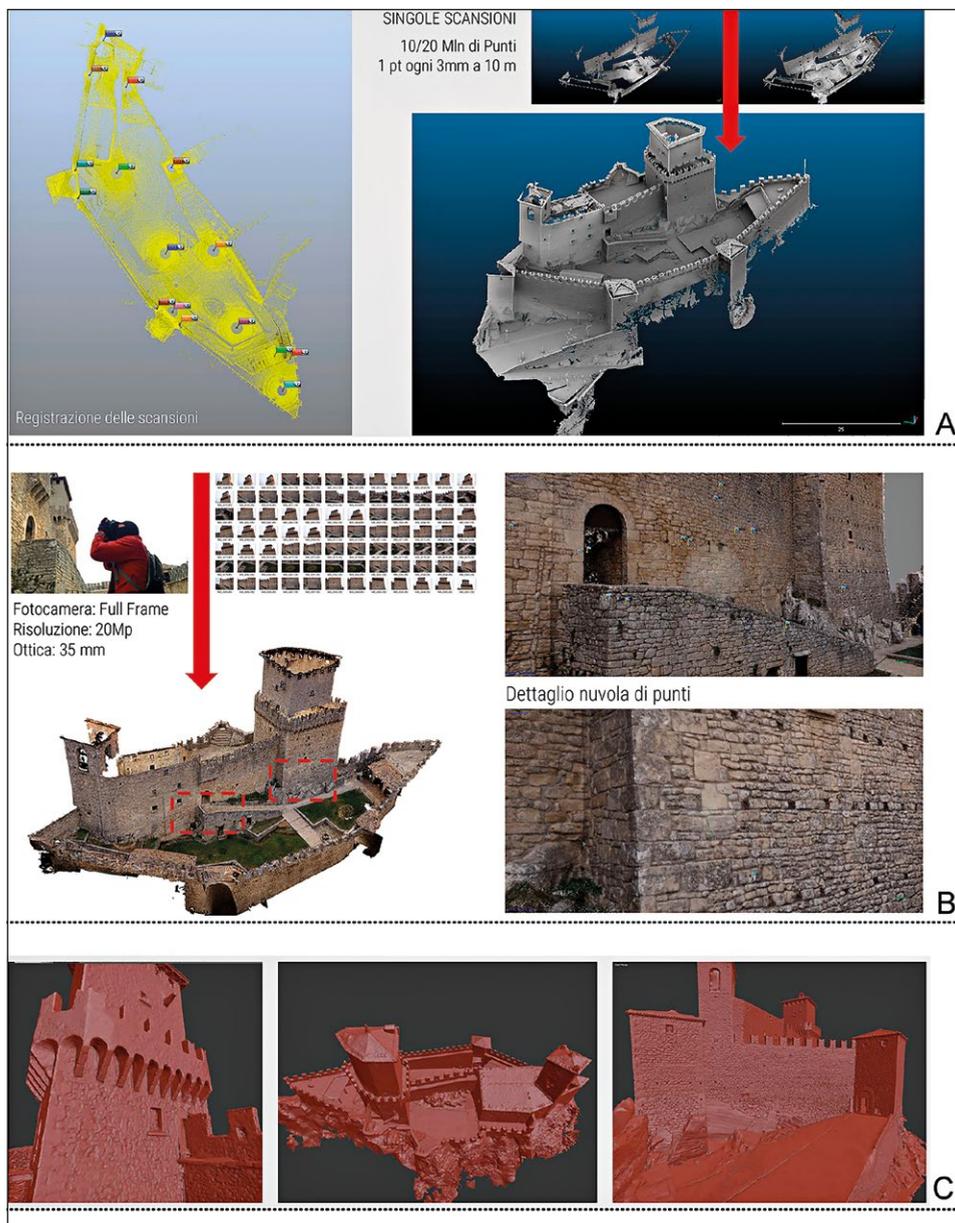


Fig. 3 – Processamento dei modelli 3D dai dati del rilievo della Prima Torre: A) Laser scanning; registrazione delle singole scansioni e calcolo di un'unica nuvola strutturata; B) Fotogrammetria; processamento delle immagini con algoritmi di SFM e MS e ricostruzione della nuvola di punti con informazioni colore RGB; C) Mesh poligonale risultante dalla triangolazione della nuvola di punti (DHILab - CNR ISPC).

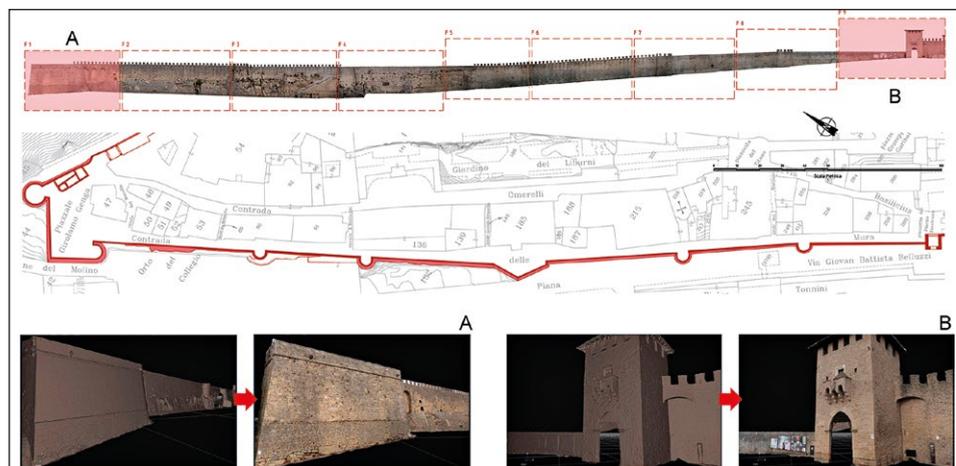


Fig. 4 – Vista generale del tratto occidentale del Terzo Girone ottenuta dal modello 3D. In basso dettaglio (mesh e mesh con texture fotografica) di alcuni modelli di strutture parte del circuito difensivo: A) Baluardo del Molino; B) Porta San Francesco (DHiLab - CNR ISPC).

scale di rappresentazione: dalla piccola scala per studiare i singoli elementi architettonici e le stratigrafie murarie, alla grande scala per analizzare l'articolazione dell'intero complesso ed il suo rapporto col tessuto urbano (Fig. 4).

#### 4. I MODELLI 3D COME STRUMENTO ANALITICO

Terminata la fase di raccolta, elaborazione dei dati da rilievo ed analizzata tutta la documentazione storico-archeologica relativa ai siti oggetto di indagine, si è proceduto all'interpretazione. In questa fase si è fatto largo utilizzo dei modelli 3D per migliorare la lettura e l'interpretazione dei manufatti o per risolvere questioni interpretative non risolvibili con la semplice indagine autoptica.

In questa sezione vengono dunque illustrate le principali applicazioni del 3D come strumento scientifico di supporto all'analisi archeologica.

##### 4.1 *Analisi off-site e lettura stratigrafica*

Sebbene l'analisi autoptica rimanga il metodo più efficace per il riconoscimento e la lettura dei palinsesti stratigrafici, questo non sempre è stato possibile. Come illustrato nel paragrafo precedente, molti paramenti murari sono inaccessibili a causa della morfologia del territorio o per la presenza di ostacoli. Questa situazione li rende non ispezionabili. La semplice fotografia scattata, ad esempio da un drone, è insufficiente a fornire tutte le informazioni necessarie ad una interpretazione soddisfacente. Infatti, non può restituire l'andamento della superficie muraria, evidenziare piccole variazioni della

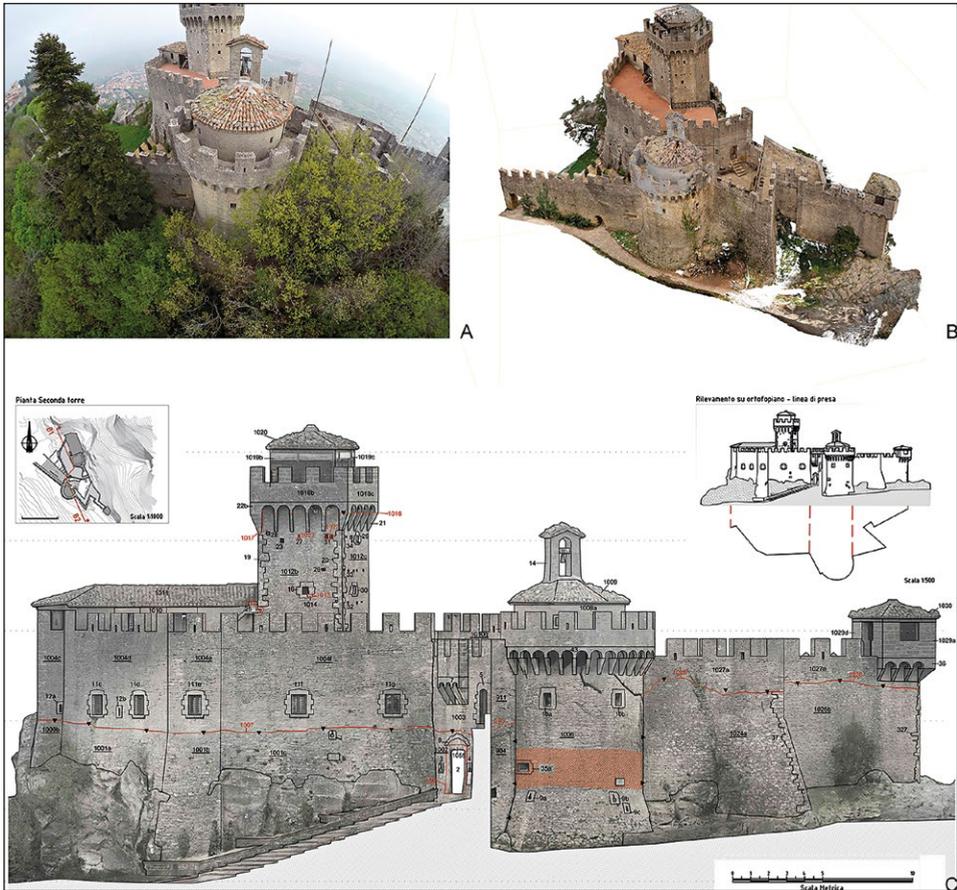


Fig. 5 – A) Stato di fatto della Seconda Torre, caratterizzata dall'inaccessibilità di numerosi tratti murari; B) Modello 3D del complesso architettonico, dopo la rimozione digitale degli ostacoli, usato per l'ispezione delle aree inaccessibili; C) Ortofotopiano del prospetto generale nord-occidentale con mappatura tematica delle stratigrafie archeologiche (DHiLab - CNR ISPC).

topologia (sganciamenti, fuori piombo, presenza di giunti, etc.) e soprattutto non permette di effettuare misure sugli elementi lapidei ed elementi architettonici necessari alla documentazione e al confronto tipologico. Per ovviare a questo problema, si è proceduto ad una lettura della stratigrafia direttamente sul modello 3D per le aree o quote precluse *in situ*.

L'alta risoluzione poligonale dei modelli e il dettaglio delle texture hanno dato la possibilità di leggere i cambi di stratigrafia, basandosi su differenze di forma, dimensione e colore degli elementi coinvolti. Nella Fig. 5 si riporta un chiaro esempio applicativo.



Fig. 6 – Tavola sinottica di Porta San Francesco. A sinistra dall'alto: nuvola di punti e modello 3D con texture fotografica. A destra: ortofoto dei singoli prospetti a confronto e mappatura del palinsesto stratigrafico e delle fasi edilizie (DHiLab - CNR ISPC).

Il complesso architettonico è inaccessibile da un lato a causa del dirupo, mentre dall'altra la presenza di vegetazione ad alto fusto preclude l'accesso e la visibilità delle parti superiori. Grazie a scatti inclinati ed effettuati da diverse prospettive con un drone è stato possibile restituire le parti invisibili e rimuovere digitalmente gli ostacoli.

La lettura stratigrafica effettuata in campagna, verificata e integrata in laboratorio con l'analisi delle repliche digitali è stata infine riportata su elaborati grafici. Si tratta di viste assonometriche e ortofotomosaici ad altissima risoluzione (circa 30.000 px) ottenuti direttamente dal modello con apposite procedure di proiezione ortogonale. Essendo privi di distorsioni prospettiche sono stati utilizzati per le operazioni di lettura e rappresentazione dei palinsesti stratigrafici e di misura delle superfici murarie.

In particolare, la realizzazione di viste ortogonali per ciascun prospetto di un corpo di fabbrica ha permesso di produrre tavole sinottiche che ci hanno permesso di effettuare un'ulteriore analisi comparativa tra superfici contigue così da verificare la continuità di stratigrafie o riscontrare eventuali allineamenti nelle buche pontai e nei piani di posa delle apparecchiature murarie. Nella Fig. 6 si riporta un chiaro esempio dell'utilità di tali elaborati derivati dal modello 3D. Tale approccio è stato utilizzato per confrontare il volume, lo spessore e la tessitura muraria di alcuni corpi di fabbrica come le torri di fiancheggiamento o le porte urbane. Strutture apparentemente simili

e ritenute costruite nello stesso periodo storico hanno mostrato, ad un confronto puntuale, evidenti differenze formali.

#### *4.2 Ricostruzione di prospettive e confronto analitico con le fotografie storiche*

Le fotografie storiche rappresentano una testimonianza preziosa per apprezzare lo stato di fatto di un edificio in un determinato momento nel tempo. A San Marino è conservata una grande quantità di fotografie e cartoline datate tra la seconda metà dell'800 e prima metà del '900. Queste sono una testimonianza fondamentale in quanto attestano lo stato di conservazione dei manufatti prima dei restauri. Poiché spesso la lettura stratigrafica non permette un chiaro riconoscimento dei confini, data la natura mimetica degli interventi di ricostruzione, si è deciso di utilizzare tale risorsa per risolvere alcuni dubbi.

La Fig. 7 rappresenta la Prima Torre prima dei restauri di fine '800 e, nella stessa presa prospettica, la nostra replica digitale. Per operare una sovrapposizione di questo documento con lo stato attuale della fabbrica, sarebbe stata necessaria la non semplice attività di scattare una foto analoga con stessa angolatura e impostazioni di camera (sensore, lente, focale, etc.). Ciò è reso impossibile dal fatto che l'evoluzione urbana dell'ultimo secolo ha alterato il tessuto edilizio e certi punti di vista non sono più riproducibili a causa della presenza di ostacoli.

La replica digitale ci permette però di svolgere una attività iterativa di prove ed errori per arrivare a collimare una "camera virtuale" con il documento storico. Questa tecnica impegna un operatore per pochi minuti all'interno di un software di computer grafica, in questo caso Blender, e fornisce una base per confrontare le due viste e trasferire le informazioni stratigrafiche dalla foto alla replica digitale verificando visivamente cosa sia originale e cosa frutto di un restauro stilistico.

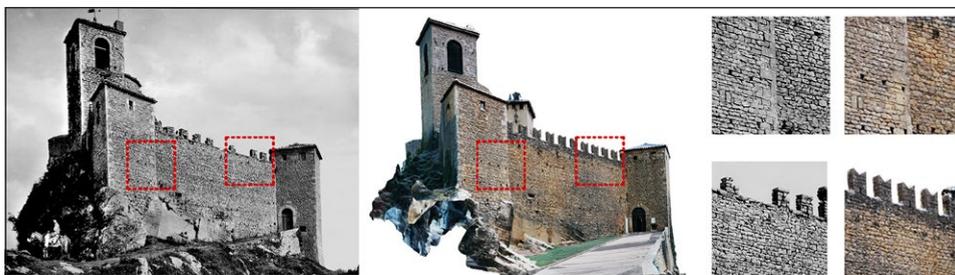


Fig. 7 – A sinistra foto dell'Archivio Alinari di Firenze, ripresa da Rossi 1982 (Prima Torre, 1870-1890 ca.). A destra lo stesso punto di vista ripreso sulla replica digitale e alcuni campioni murari a confronto. Da notare l'assenza della parte superiore della torre della Penna, la diversa sistemazione della strada di accesso e le merlature frammentarie. La torretta di fiancheggiamento e le murature di cinta fino alla quota dei merli non sono state rimaneggiate (DHILab - CNR ISPC).

#### 4.3 Analisi architettonica e configurazionale

Sui corpi di fabbrica è stata effettuata anche un'analisi architettonica e configurazionale, ovvero non basata esclusivamente sui rapporti stratigrafici, talvolta impossibili da individuare, ma anche sulla forma delle strutture, sull'andamento delle superfici, spessori murari, sulla presenza di particolari elementi architettonici e sulla presunzione che alcuni rapporti tra unità funzionali debbano essere obbligatori per motivi strutturali. Sezionando i modelli 3D con specifici strumenti è stato possibile produrre viste "impossibili", come planimetrie a diverse quote, spaccati assonometrici sui quali confrontare superfici interne ed esterne, spessori murari e sviluppo di aperture all'interno dei setti murari, e verificare l'andamento di interfacce stratigrafiche passanti. Di seguito un esempio: sotto il Palazzo del Governo abbiamo rilevato le cosiddette Cisterne del Pianello realizzate nel corso del XV secolo (Fig. 8).

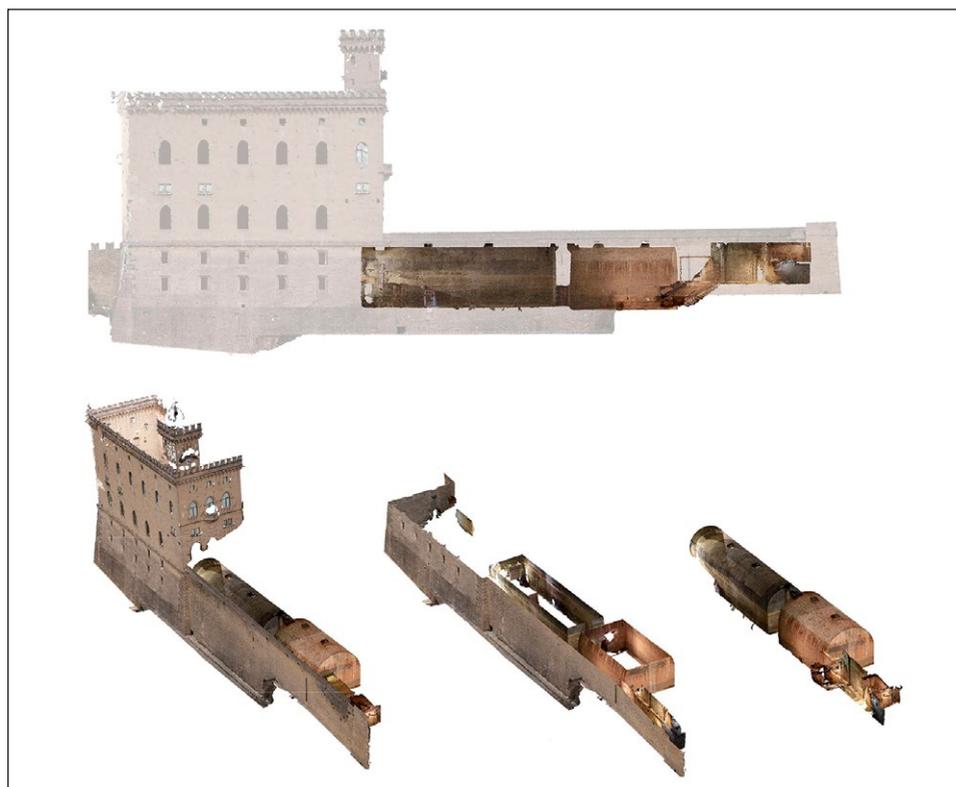


Fig. 8 – Cisterne del Pianello: sezionamento della nuvola di punti per produrre diversi spaccati utili alla comprensione dello spessore ed orientamento dei setti murari nonché al confronto tra prospetti interni ed esterni (DHILab - CNR ISPC).

L'interpretazione di quest'area è piuttosto complessa in quanto le strutture delle cisterne si impostano a ridosso di strutture più antiche che si presume appartenessero al secondo circuito murario, il quale prosegue all'esterno a N dell'intero complesso. La lettura delle murature è continuamente interrotta dalla presenza di vani e superfetazioni moderne. L'unica soluzione per verificare l'andamento delle strutture è stata digitalizzare l'intero complesso così da produrre sia delle viste sinottiche dei prospetti fisicamente lontani, così da confrontarne la tessitura muraria, sia degli spaccati che ci hanno mostrato variazioni degli spessori e degli allineamenti murari.

## 5. CONCLUSIONI

Il flusso di lavoro costituito da rilievo estensivo e analisi delle fortificazioni urbane e da un'accurata gestione delle fonti ha permesso di ottenere modelli tridimensionali dello stato di fatto e sviluppare elaborati derivati di fondamentale utilità per discutere e verificare le varie ipotesi interpretative attraverso simulazioni e visualizzazioni interattive nell'ambiente digitale. Tale approccio ci ha permesso così di distinguere al meglio non solo quali fossero gli interventi di restauro operati tra XIX e XX secolo, ma anche di comprendere l'evoluzione diacronica per fasi dei singoli manufatti e di poter giungere ad una comprensione globale dello sviluppo urbano dal XIII secolo in poi. Le attività condotte finora si sono concentrate soprattutto sulla raccolta e interpretazione dei dati per ciascun manufatto architettonico.

Al momento sono in corso il confronto e l'analisi dei dati su scala urbana per poter giungere a un'interpretazione globale del sito. Una sfida importante per il futuro sarà quella di strutturare tutte le informazioni all'interno di un modello di conoscenza, ovvero un modello semantico, costruito con processi come l'Heritage Building Information Modeling (H-BIM) (KHALIL, STRAVO-RAVDIS 2019) o l'Extended Matrix (DEMETRESCU 2015), corredato da una banca dati che permetta di strutturare e, soprattutto, evidenziare il rapporto tra le informazioni raccolte e la loro provenienza (ad es., le fotografie storiche o la descrizione dello stato di conservazione delle architetture al momento degli ultimi rilievi). Ciò aiuterebbe inoltre a velocizzare e migliorare i processi di gestione e interrogazione dei dati raccolti direttamente sul modello 3D. Tale intervento, sebbene sia tra i futuri traguardi, non è ancora stato affrontato sia perché gli obiettivi prioritari dell'attuale progetto sono maggiormente orientati agli aspetti analitici del dato archeologico, sia perché le dimensioni e la quantità delle fonti e del dato rilevato da gestire richiederebbero tempi e risorse ingenti ancora da finanziare.

Le indagini fin qui condotte sulle fortificazioni del centro storico di San Marino sono un importante risultato in quanto si tratta dei primi interventi di ricerca strutturati ed estesi all'intero sito e sono in corso di pubblicazione

in un volume che affronterà l'evoluzione urbanistica con maggior dettaglio e presentazione dei dati archeologici. Il lavoro interpretativo, in via di finalizzazione, oltre a restituire identità storica ai manufatti, contribuirà ad arricchire la conoscenza delle architetture fortificate e delle dinamiche evolutive delle fortificazioni urbane non solo a livello locale, ma anche in ambito territoriale romagnolo e montefeltrano/urbinate.

DANIELE FERDANI\*, EMANUEL DEMETRESCU  
Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - CNR  
daniele.ferdani@cnr.it, emanuel.demetrescu@cnr.it

GIANLUCA BOTTAZZI, PAOLA BIGI  
Istituti Culturali, RSM  
glbottazzi@gmail.com, paola.bigi@pa.sm

## BIBLIOGRAFIA

- AUGENTI A., FIORINI A., MONTANARI M., SERICOLA M., URCIA, A., ZAFFAGNINI, F. 2009, *Archeologia dell'architettura in Emilia-Romagna: primi passi verso un progetto organico*, «Ocnus», 17, 65-76 (<https://disci.unibo.it/it/ricerca/publicazioni-e-attivita-editoriale/riviste/ocnus-quaderni-scuola-specializzazione-beni-archeologici/ocnus-online/volume-17-2009>).
- AUGENTI A., FICARA M., RAVAIOLI E. 2012, *Atlante dei beni archeologici della provincia di Ravenna, I. Il paesaggio monumentale del Medioevo*, Alma Mater Studiorum-Università degli Studi di Bologna Dipartimento di Archeologia.
- BOATO A. 2008, *L'archeologia in architettura*, Venezia, Marsilio.
- BONACINI P. 1994, *L'assetto territoriale di San Marino tra Longobardia e Romania dal Rinascimento al Montefeltro nei secoli VI-X*, in P. BONACINI, G. BOTTAZZI (eds.), *Il territorio sammarinese tra età romana e primo medioevo. Ricerche di topografia e storia*, Quaderni monografici del Centro Studi Storici Sammarinesi, 4, San Marino, Centro di studi storici sammarinesi, 49-134.
- BOTTAZZI G., BIGI P. (eds.) 2008, *Primi insediamenti sul Monte Titano. Scavi e ricerche (1997-2004)*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- BOTTAZZI G., BIGI P. 2013, *Il sito fortificato di Montecerreto*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Acquaviva*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 126-133.
- BROGIOLO G.P. CAGNANA A. 2012, *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- BUSCARINI C. 2012, *Una difficile integrazione*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Serravalle*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 213-222.
- CAMBRINI S. 2012, *Documenti*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Chiesanuova*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 173-190.
- CAMBRINI S. 2013, *Documenti*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Acquaviva*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 238-243.
- COLOSIMO C. (ed.) 2017, *San Marino 1462-1463. I patti di Fossombrone e la bolla di Pio II. Conflitti militari, diplomazia, assetto territoriale e produzione artistica tra Montefeltro e Malatesta nel primo Rinascimento*, San Marino, Ente Cassa di Faetano.
- CONTI M. 2017, *I documenti dei "Patti di Fossombrone" nell'Archivio di Stato della Repubblica di San Marino*, in COLOSIMO 2017, 163-189.

\* Corresponding Author.

- DELLEPIANE M., DELL'UNTO N., CALLIERI M., LINDGREN S., SCOPIGNO R. 2013, *Archaeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques*, «Journal of Cultural Heritage», 14, 3, 201-210 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.01.011>).
- DEMETRESCU E. 2015, *Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice*, «Journal of Archaeological Science», 57, 42-55.
- DEMETRESCU E., D'ANNIBALE E., FERDANI D., FANINI B. 2020, *Digital replica of cultural landscapes: An experimental reality-based workflow to create realistic, interactive open world experiences*, «Journal of Cultural Heritage», 41, 125-141 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.018>).
- DI CARPEGNA FALCONIERI T. 2012, *Busignano prima di Chiesanuova*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Chiesanuova*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 127-132.
- FERDANI D., DEMETRESCU E., D'ANNIBALE E., BOTTAZZI G., BIGI P. 2019, *Le fortificazioni del Titano: un progetto di indagine multidisciplinare per la conoscenza e la tutela dell'edilizia medievale sammarinese*, «Archeologia dell'Architettura», 24, 195-215 (<https://doi.org/10.1400/271833>).
- FIORINI A. 2015, *Archeologia dell'architettura in Romagna: la banca dati territoriale*. «Archeologia e Calcolatori», 26, 275-288 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF26/32\\_Fiorini.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF26/32_Fiorini.pdf)).
- FIORINI A. 2018, *An urban archaeological project in Rimini. Preliminary report (2017-2018). The contribution of building archaeology to research and conservation*, «Groma. Documenting archaeology», 1-15 (<https://doi.org/10.12977/groma18>).
- FIORINI A., URCIA A., ARCHETTI V. 2011, *The digital 3D survey as standard documentation of the archaeological stratigraphy*, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Goslar, Eurographics Association, 145-152.
- FORTE M. 2000, *About Virtual Archaeology: Disorders, Cognitive Interactions and Virtuality*, in J.A. BARCELO, M. FORTE, D.H. SANDERS (eds.), *Virtual Reality in Archaeology*, Oxford, BAR International Series 843, 247-259.
- FORTE M., DELL'UNTO N., ISSAVI J., ONSUREZ L., LERCARI N. 2012, *3D archaeology at Catalhöyük*, «International Journal of Heritage in the Digital Era», 1, 3, 351-378 (<https://doi.org/10.1260/2047-4970.1.3.351>).
- FRANCOVICH R., BIANCHI G. 2002, *L'archeologia dell'elevato come archeologia*, «Arqueología de la Arquitectura», 1, 101-111 (<https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2002.9>).
- GIORGETTI D. (ed.) 1994, *Le radici del Titano. Materiali archeologici dal santuario della "Tanaccia" a San Marino*, San Marino, Museo di Stato.
- GOBBI O. 1999, *Risorse e governo dell'ambiente a San Marino tra XV e XIX secolo*, San Marino, Università degli Studi della Repubblica di San Marino.
- GUERRA C., BIGI P., PEDINI D., MULARONI C. 2011, *L'analisi geomorfologica e geologico strutturale a supporto dell'indagine archeologica. L'esempio del santuario romano della Tanaccia nella repubblica di San Marino*, in *Scritti, Studi e Ricerche di Storia Naturale della Repubblica di San Marino*, III, San Marino, Centro Naturalistico Sammarinese, 321-329.
- HERMON S., NIKODEM J. 2007, *3D Modelling as a Scientific Research Tool in Archaeology*, in A. POSLUSCHNY, K. LAMBERS, I. HERZOG (eds.), *Layers of Perception. Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Berlin 2007)*, Bonn, Habelt Verlag, 1-6.
- KHALIL A., STRAVORAVDIS S. 2019, *H-BIM and the domains of data investigations of heritage buildings current state of the art*, in *2<sup>nd</sup> International Conference of Geomatics and Restoration, GEORES 2019 (Milano 2019)*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, W11, 661-667.
- LANDESCHI G., DELL'UNTO N., LUNDQVIST K., FERDANI D., CAMPANARO D.M., TOUATI A.M.L. 2016, *3D-GIS as a platform for visual analysis: Investigating a Pompeian house*, «Journal of Archaeological Science», 65, 103-113 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.11.002>).
- LOMBARDI F.V. 1976, *La bolla di Onorio II a Pietro Vescovo di Montefeltro (anno 1125)*, «Studi Montefeltrani», 4, 55-99.

- LOMBARDI F.V. 2017, *La progressiva espansione territoriale di San Marino prima dell'assetto definitivo del 1463*, in C. COLOSIMO (ed.), *San Marino 1462-1463. I patti di Fossombrone e la bolla di Pio II. Conflitti militari, diplomazia, assetto territoriale e produzione artistica tra Montefeltro e Malatesta nel primo Rinascimento*, San Marino, Ente Cassa di Faetano, 31-61.
- MANNONI T. (ed.) 2021, *Caratteri costruttivi dell'edilizia storica*, III, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- MANNONI T., BOATO A. 2002, *Archeologia e storia del cantiere da costruzione*, «Arqueología de la Arquitectura», 1, 39-53 (<https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2002.5>).
- MORGANTI L.M. 2001, *Il patrimonio dello Stato. L'architettura storica della Repubblica di San Marino*, San Marino, Aiop.
- MORGANTI L.M. (ed.) 2018, *Gino Zani: l'ingegnere, l'architetto, lo storico*, Collana Sammarinese di Studi Storici, 42, San Marino, Bookstones Edizioni Soc. Coop. a r.l.
- PASINI P.G. 2005, *La rocca*, in P.G. PASINI (ed.), *La rocca ritrovata. Indagini, scoperte e restauri nella casermetta della Prima Torre*, San Marino, Museo di Stato, 11-20.
- PIERUCCI C., POLVERARI A. (eds.) 1972, *Carte di Fonte Avellana*, Roma, Edizioni di Storia e Letteratura.
- REMONDINO F., CAMPANA S. 2014, *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and Best Practices*, Oxford, BAR International Series, 2598.
- ROSSI G. 1982, *San Marino nelle vecchie fotografie. Lettura del paese attraverso le immagini, ambiente e costumi del passato*, Bologna, La Fotocromo Emiliana.
- ROSSI G. 2015, *Gino Zani, ingegnere, 1882-1964*, Busto Arsizio, Centro Sammarinese di Studi Storici.
- SACCO D., TOSARELLI A. 2016, *La Fortezza di Montefeltro. San Leo: processi di trasformazione, archeologia dell'architettura e restauri storici*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- SASSI M. 2005, *Castelli in Romagna. L'incastellamento tra X e XII secolo nelle province romagnole e nel Montefeltro*, Cesena, Il Ponte Vecchio.
- SETTIA A.A. 2007, *L'incastellamento in Romagna-Montefeltro e le concordanze "padane"*, «Studi montefeltrani», 29, 7-18.
- VALENTI D. 2008, *La cultura altomedievale nel Montefeltro*, San Leo, Società di studi storici per il Montefeltro.
- ZANI G. 1933, *Le fortificazioni del Monte Titano*, Napoli, Istituto Arti Grafiche G. Rispoli.
- ZUBROW E.B.W. 2006, *Digital archaeology*, in P. DALY, T.L. EVANS (eds.), *Digital Archaeology. Bridging Method and Theory*, London, Routledge, 10-31.
- ZUCCONI G. 1992, *Gino Zani la rifabbrica di San Marino 1925-1943*, Venezia, Arsenale.

## ABSTRACT

The archaeology of standing buildings and archaeological survey are the essential prerequisite to properly investigate and interpret the evolution of historical buildings. Technological advances in recent years have led to an improvement in the methodologies and tools for three-dimensional survey and data analysis. However, so far, many of these tools and methods are not fully integrated in the archaeological practice, and their potential is only partially exploited. In some cases, technology becomes the goal and not the tool to answer research questions. Often, its implementation is only limited to documentation, while the analytical contribution is ignored. The article illustrates a method already well established in the research activities of the DHILab laboratory of the CNR ISPC, which makes use of three-dimensional survey and visualization techniques as support tools for the analysis and interpretation of the medieval fortification of San Marino, including the three Towers and the city walls. The aim is to solve interpretative issues and answer complex research questions in order to better document and analyse the urban context and to reconstruct its architectural evolution in the late medieval and post-medieval periods.

## ANALISI E DOCUMENTAZIONE ARCHEOLOGICA DELL'EDILIZIA STORICA IN AREE A RISCHIO SISMICO: DALL'ATLANTE DEI TIPI COSTRUTTIVI MURARI ALL'IMPIEGO DELLE MODERNE TECNOLOGIE DI RILIEVO

### 1. INTRODUZIONE

Gli ultimi eventi sismici che hanno riguardato la nostra Penisola, localizzati nel Centro e nel Nord, hanno messo in luce la fragilità del nostro patrimonio edilizio e quanto una piena consapevolezza delle sue vulnerabilità debba essere attentamente valutata in senso qualitativo e quantitativo. In tale prospettiva, negli ultimi anni in Italia si stanno sviluppando progetti in aree a medio-alto rischio sismico che prevedono analisi dell'edilizia storica effettuate da team composti da geologi, architetti, ingegneri, sismologi e archeologi, strutturati in funzione di una prima valutazione e analisi dello stato di conservazione e delle vulnerabilità dei complessi architettonici. La grande novità di queste esperienze è la centralità della figura professionale dell'archeologo che assume un ruolo di primo piano nella compagine del gruppo di lavoro come parte attiva nei processi di analisi e documentazione, producendo dati indispensabili allo sviluppo del processo conoscitivo e alla conseguente valutazione del rischio a cui sono sottoposti i manufatti. Una moltitudine di dati che si legano da un lato alle proprietà intrinseche della fabbrica degli edifici, mediante l'integrazione tra storia costruttiva e meccanica; dall'altro lato, attraverso l'integrazione di più casi studio, i dati elaborati permettono una visione inedita della sismicità storica di un territorio, aggiungendo informazioni a quelle già in possesso e talvolta producendo scenari inediti per alcuni periodi storici di riferimento (ARRIGHETTI 2015).

In questo processo entrano in gioco tecnologie, tecniche, metodi e strumenti che non restano più ad esclusivo servizio del singolo professionista, ma diventano una base sulla quale ogni membro di un progetto viene chiamato a riflettere. Dunque un processo di analisi progressivo, che spesso richiede di tornare sui propri passi, ma che impone la capacità collettiva di confronto e di discussione, in un'ottica globale e territoriale. Questa impostazione viene applicata anche nelle fasi di documentazione delle tecniche costruttive, dove l'apporto interdisciplinare nell'analisi dei manufatti permette una registrazione dei campioni che assume importanza sia sotto l'aspetto della comprensione delle caratteristiche materiche, costruttive e meccaniche delle murature, ma anche per quanto concerne il profilo storico-archeologico. Una documentazione che permette dunque di proporre un approccio evolutivo ai caratteri delle murature, connesso ad una loro analisi crono-tipologica in chiave territoriale,

che da un lato permette di connettere specifici sistemi costruttivi a periodi storici di riferimento, ma dall'altro offre l'opportunità di confrontare tali cambiamenti ai contesti sociali, politici ed economici in cui questi avvengono.

Questo approccio, se utilizzato in aree a rischio sismico, impone riflessioni importanti sull'evoluzione delle tecniche in funzione delle caratteristiche delle committenze e delle maestranze, legando spesso l'utilizzo di specifici materiali e scelte tecnico-operative alle esigenze imposte dalle dinamiche di emergenza o alle fasi di ricostruzione (ARRIGHETTI 2016). In quest'ultimo caso spesso si assiste alla volontà di sperimentare empiricamente nuove soluzioni, varianti più o meno complesse delle tecniche tradizionali, di derivazione autoctona o alloctona, che portano alla strutturazione di culture costruttive tese a contrastare o mitigare gli effetti di nuovi eventi sismici che permangono invariate in specifiche aree per un breve o lungo periodo, talvolta perdendo la funzione per cui erano state pensate (ARRIGHETTI *et al.* 2019).

## 2. L'ATLANTE DEI TIPI COSTRUTTIVI MURARI

In Italia, sebbene il territorio sia caratterizzato da un'intensa attività sismica, il settore sismologico non ha mai avuto un ruolo preponderante negli studi archeologici ad ampio raggio sull'edilizia storica. La prima sperimentazione in tal senso sembra essere l'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia, uno strumento nato per la catalogazione delle tecniche costruttive in aree a rischio sismico che mosse i suoi primi passi in riferimento al terremoto del Friuli del maggio-settembre 1976. Dopo tale evento, nel 1985 si costituì il Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico con il quale il Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Ufficio Centrale per i Beni Ambientali, Architettonici, Archeologici, Artistici e Storici) cercò di dare una uniformità al panorama nazionale della tutela e del restauro architettonico, elaborando un programma basato su due linee di attività: da una parte la ricerca e la sperimentazione e dall'altra gli aspetti normativi e metodologici.

Tale Comitato, a sua volta, si espresse dando vita ad una serie di interventi a carattere istituzionale, sotto forma di "Raccomandazioni" (nel 1986 elaborò le Raccomandazioni relative agli interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica), di "Programmi" (all'interno del I Seminario Nazionale di Studio, svoltosi a Venezia nel 1987, dette avvio all'attività del Programma Quadro delle Ricerche) e di "Direttive" (nel 1989 elaborò le Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendente interventi di miglioramento antisismico e manutenzione nei complessi architettonici di valore storico artistico in zona sismica).

Questi furono i presupposti con i quali venne affrontato il II Seminario Nazionale, svoltosi a Roma nell'aprile del 1997, dove venne redatto

un bilancio delle ricerche fino a quel momento effettuate. Nell'incontro, per la prima volta, i risultati delle indagini svolte in questo campo vennero presentati alla comunità scientifica, ponendo le questioni della ricerca su di un nuovo piano di valutazione. Fra i risultati attesi, sicuramente rivestivano notevole importanza quelli delle Università italiane, con le quali per la prima volta il Ministero affrontò «in maniera organica un rapporto di mutua collaborazione di natura interdisciplinare, con studi finalizzati alla tutela del patrimonio culturale su un tema specifico di grande significato sociale e tecnico-culturale» (BALLARDINI 1998, 75). In tal senso, tre Università italiane (Genova, Siena e Salerno) nel 1985 vennero incaricate di elaborare un Atlante dei Tipi Costruttivi Murari, ovvero uno strumento che, tramite l'utilizzo di apposite schede, permettesse la registrazione e la catalogazione delle tecniche costruttive caratterizzanti l'edilizia storica delle province italiane in funzione della prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico.

Lo studio investì tutto il territorio nazionale portando alla produzione di tre atlanti presentati al Seminario di Roma del 1997: uno per l'Italia settentrionale (coordinato dal prof. Tiziano Mannoni, MANNONI, CICIRELLO 1998), uno per l'Italia centrale (coordinato dal prof. Roberto Parenti e ad oggi rimasto inedito) ed uno per l'Italia meridionale (coordinato dal prof. Paolo Peduto e dalla prof.ssa Tiziana Saccone, PEDUTO, SACCONI 1998). Lo studio sistematico di ognuna delle tre macro-aree geografiche in questione si sviluppò suddividendo il territorio in sub-regioni. In particolare vennero individuate: 22 aree per l'Italia settentrionale, 20 aree per quella centrale e 3 macro-aree per quella meridionale, quest'ultima a sua volta suddivisa in 18 sub-aree dove la sismicità storica era stata maggiore del VII grado della scala MCS (Mercalli - Cancani - Sieberg). Tale suddivisione venne effettuata da un lato per agevolare e snellire il lavoro e dall'altro per distinguere all'interno di uno stesso territorio amministrativo, ad esempio all'interno della stessa regione, le zone che presentavano caratteristiche omogenee dal punto di vista geologico e costruttivo.

Dal punto di vista tecnico, gli atlanti erano composti da schede appositamente redatte per l'analisi architettonica di strutture murarie geograficamente e cronologicamente eterogenee, al fine di comprenderne il loro comportamento sotto sollecitazione sismica. Tale apparato grafico conteneva da 79 a 85 campi informativi, la metà dei quali campi di definizione, riguardanti la localizzazione, la funzione e la datazione dell'opera muraria, osservazioni varie e codici informatici. L'altra metà dei campi erano analitici, contenevano cioè le caratteristiche dei materiali (litici, laterizi e leganti), le tecniche costruttive e gli eventuali degradi strutturali. Le aree sottoposte ad analisi, per agevolare il lavoro, venivano a loro volta suddivise in sub-aree, solitamente definite dalle province o dalle città di grandi dimensioni presenti al loro interno. In tali sub-aree fu operata un'ulteriore scelta interna tesa ad individuare quali edifici erano funzionalmente variabili e corrispondenti alle seguenti categorie:

- strutture abitative,
- impianti produttivi (mulini, fonti, cisterne),
- edifici ecclesiastici (pievi, cattedrali, chiese),
- edilizia pubblica civile (palazzi, torri),
- strutture difensive (cinte murarie, porte, fortezze).

Il campione preso in esame fu a sua volta ridimensionato in base alla rappresentabilità dei campioni costruttivi e alla difficoltà di trovare cronologie assolute, privilegiando così le zone abitative, i castelli e i monasteri, rispetto agli edifici isolati e dispersi nel territorio. Per ogni area fu dunque prodotta una vasta documentazione rappresentata da:

- un *corpus* di schede dove sono stati registrati gli studi effettuati sulle strutture,
- un allegato dove sono state elencate le strutture indagate e, per ogni edificio, è stata prodotta una breve sintesi discorsiva delle informazioni ricavabili dalla schedatura che lo riguarda,
- un allegato rappresentante la sintesi finale del lavoro, nel quale sono state indicate le notizie di carattere geologico, storico e geografico dell'area indagata, sono state enunciate le metodologie impiegate nello studio dei contesti e infine sono stati presentati i materiali da costruzione individuati e le tecniche costruttive rilevate. A conclusione di questo allegato è stata poi elencata la bibliografia utilizzata durante lo studio.

Le schede di catalogo, nonostante facciano parte di un'unica metodologia di analisi e della medesima azione costruttiva, per far fronte alla richiesta specifica da parte degli ingegneri strutturisti, furono articolate in due diverse tipologie suddivise in base all'elemento architettonico indagato: muratura e angolata (oltre ad una particolare attenzione alle sezioni delle murature).

### 3. IL PERIODO POST-ATLANTE E IL PROGETTO ARCHEOSISMOLOGICO PER LA TOSCANA

Purtroppo alla realizzazione dell'Atlante non fece seguito un nuovo impulso verso l'applicazione dei metodi archeologici di analisi e di documentazione delle architetture di aree a rischio sismico a scala territoriale. Solo in tempi recenti, in particolar modo dopo le attività sismiche che hanno coinvolto il territorio aquilano nel 2009 e quello emiliano nel 2012, gli archeologi hanno nuovamente riflettuto in modo concreto sul piano metodologico, sulle possibilità offerte dalla disciplina in riferimento alla conoscenza e alla prevenzione dell'edilizia storica dagli effetti dei sismi (per citare solo alcuni fra i lavori: BROGIOLO, FACCIO 2010; BROGIOLO, CAGNANO 2012; REDI *et al.* 2012; ARRIGHETTI 2015). Tali analisi però si sono sviluppate in modo estremamente eterogeneo, spesso caratterizzandosi per una grande quantità di dati elaborati, purtroppo difficilmente sistematizzati in modelli organici di

analisi dei manufatti o del territorio o tesi alla costruzione di vere e proprie prassi operative nello studio archeosismologico dei territori.

Partendo da questi presupposti, dal 2010, in Toscana sono state avviate dallo scrivente, in collaborazione con il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze<sup>1</sup>, una serie di campagne di rilievo e analisi archeosismologica di alcune aree a rischio sismico. In particolare, accanto a progetti pluriennali ormai già conclusi e pubblicati, *in primis* il progetto svolto dal 2010 al 2013 in Mugello (ARRIGHETTI 2015), sono stati avviati una serie di lavori, attualmente in corso di svolgimento, che stanno fornendo risultati molto interessanti dal punto di vista territoriale: sono i casi dell'area del Casentino, in provincia di Arezzo (ARRIGHETTI *et al.* 2022b), e del centro storico della città di Firenze (ARRIGHETTI 2018; ARRIGHETTI, MINUTOLI 2019). In questi contesti, nel corso delle letture stratigrafiche degli edifici, sono stati evidenziati dissesti, danni e restauri relativi a possibili, e talvolta specifici, eventi sismici. L'integrazione fra il dato archeologico, le complesse vicende storiche legate alle società che hanno costruito e abitato il territorio nel corso del tempo e i dati contenuti nei cataloghi sismologici, ha fornito risultati eccellenti a livello storico, sismologico e architettonico.

Fra i territori interessati dalle analisi svolte dal 2010 ad oggi, esiste però un complesso architettonico esemplificativo, la Pieve di Sant'Agata del Mugello, probabilmente il caso di studio più completo e qualitativamente eccellente fra tutti quelli analizzati dall'inizio del progetto, che ha restituito dati eccezionali dal punto di vista storico-architettonico e sismologico, avvalorati e confermati da un sisma che ha interessato la struttura nel 2019. L'edificio, le cui vicende storico-architettoniche sono state recentemente pubblicate (ARRIGHETTI *et al.* 2022a) e non saranno dunque trattate nel presente elaborato, rappresenta un esempio di enorme interesse sia dal punto di vista metodologico che di conoscenza della sismicità storica di una specifica area.

#### 4. LA PIEVE DI SANT'AGATA DEL MUGELLO: IL PROGETTO ACROSS E IL TERREMOTO DEL 2019

La Pieve di Sant'Agata, date le sue caratteristiche architettoniche, le innumerevoli testimonianze storiche e la sua localizzazione in un'area a medio/forte attività sismica, è un caso di studio unico nel suo genere. La chiesa rappresenta infatti un testimone di grande valore storico, culturale e scientifico dell'attività sismica della regione. Attraverso le diverse fasi di trasformazione dell'edificio nel corso della sua storia è possibile risalire alle caratteristiche

<sup>1</sup> I progetti vedono il coordinamento dello scrivente per la parte archeologica, del prof. Giovanni Pancani (DIDA - UNIFI) per la parte di rilievo e del prof. Giovanni Minutoli (DIDA - UNIFI) per la parte di diagnostica strutturale.

del moto sismico del suolo che ha interessato a più riprese (ad es. nel 1542, 1597, 1611, 1919) il comune di Scarperia e San Piero (FI). Conoscere il moto del suolo legato ad un terremoto permette di migliorare la stima della pericolosità sismica e di lavorare alla mitigazione del rischio a cui è esposta la popolazione. La Pieve si presenta come un complesso architettonico pluri-stratificato le cui vicende costruttive si possono far risalire ai secoli centrali del Medioevo con dissesti, danni, restauri e ricostruzioni, queste ultime anche di notevole entità, avvenute a più riprese nel corso della sua storia (ARRIGHETTI *et al.* 2022a). Per questo motivo un gruppo interdisciplinare e internazionale (Italia-Francia) composto dall'Università degli Studi di Siena, dal CNR di Firenze, dall'Università degli Studi di Firenze, dall'École Normale Supérieure de Paris e dall'Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (Paris), nel biennio 2018-19, ha sviluppato un progetto di ricerca innovativo di analisi dell'edificio denominato AcRoSs-Archeologia, Restauro, Sismologia.

La ricerca, in breve, si è basata sulla realizzazione di un modello digitale della chiesa e degli edifici annessi, mediante l'integrazione dei prodotti derivati dall'utilizzo di moderne tecnologie, la cui progettazione ha integrato le analisi storico-archeologiche, il rilievo tridimensionale della struttura avvenuto con l'ausilio di laser scanner (Fig. 1), fotogrammetria terrestre e da

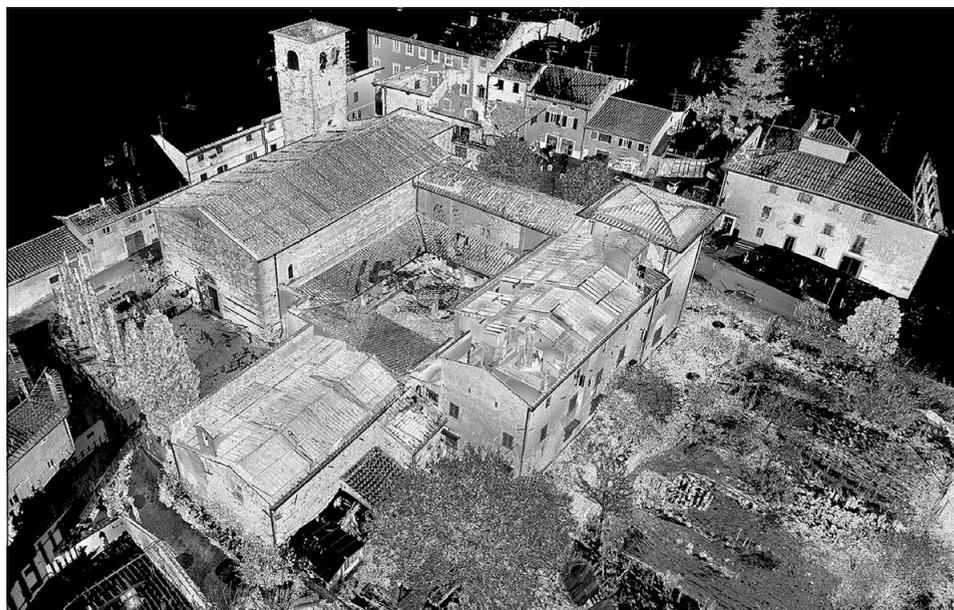


Fig. 1 – Nuvola di punti del complesso architettonico di Sant'Agata ottenuta dal rilievo laser scanner (rilievo: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).



Fig. 2 – Planimetria del complesso architettonico di Sant'Agata con particolare della stratigrafia e degli Elevation Maps del prospetto O esterno della chiesa (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

drone, le analisi sui materiali costruttivi con particolare riferimento a malte ed elementi lapidei e laterizi, e una serie di informazioni ottenute attraverso l'auscultazione della risposta dell'edificio al rumore sismico.

L'integrazione di tutti questi dati ha fornito *in primis* un modello altamente dettagliato della morfologia della struttura utilizzabile nella progettazione di futuri interventi di restauro, che ha permesso di evidenziare le patologie attualmente presenti sull'edificio integrate alla sua evoluzione storico-costruttiva (Fig. 2). Inoltre il modello generato dall'elaborazione dei dati acquisiti dalle varie analisi ha permesso di ipotizzare in modo estremamente dettagliato la risposta della chiesa a futuri terremoti. I risultati dell'indagine sono stati presentati per la prima volta al pubblico attraverso una conferenza e una mostra organizzate all'interno della Pieve e nel chiostro nel corso dell'autunno del 2019 e pubblicati all'interno di una rivista internazionale (MONTABERT *et al.* 2020).

Due mesi dopo la conclusione del progetto, il 9 dicembre 2019, si è verificato un sisma nel Mugello che ha interessato, fra le varie zone, anche il comune di Scarperia e San Piero. La Pieve di Sant'Agata, nei giorni seguenti all'evento sismico, dopo una prima analisi sul campo senza l'ausilio di strumentazioni tecnologiche, ha mostrato alcuni dissesti circoscritti collocabili

nella zona absidale, dove è stato evidenziato un allargamento di alcune lesioni, e nella porzione interna della struttura, nella quale è stato attestato il crollo di materiale incoerente di piccole dimensioni dalla parte sommitale delle murature perimetrali. Ad un primo esame, la situazione appariva dunque abbastanza stabile e, ad eccezione dell'abside centrale dove il tamponamento del finestrone mostrava un evidente aggravamento di una deformazione già presente (Fig. 3), la chiesa non presentava nuovi dissesti o cambiamenti significativi. A margine di questa prima analisi è stato dunque strutturato un secondo progetto di rilievo mediante laser scanner teso a confrontare i dati acquisiti mediante le analisi archeosismologiche e diagnostiche della chiesa e del campanile nelle situazioni di pre- e post-sisma. I dati restituiti sono

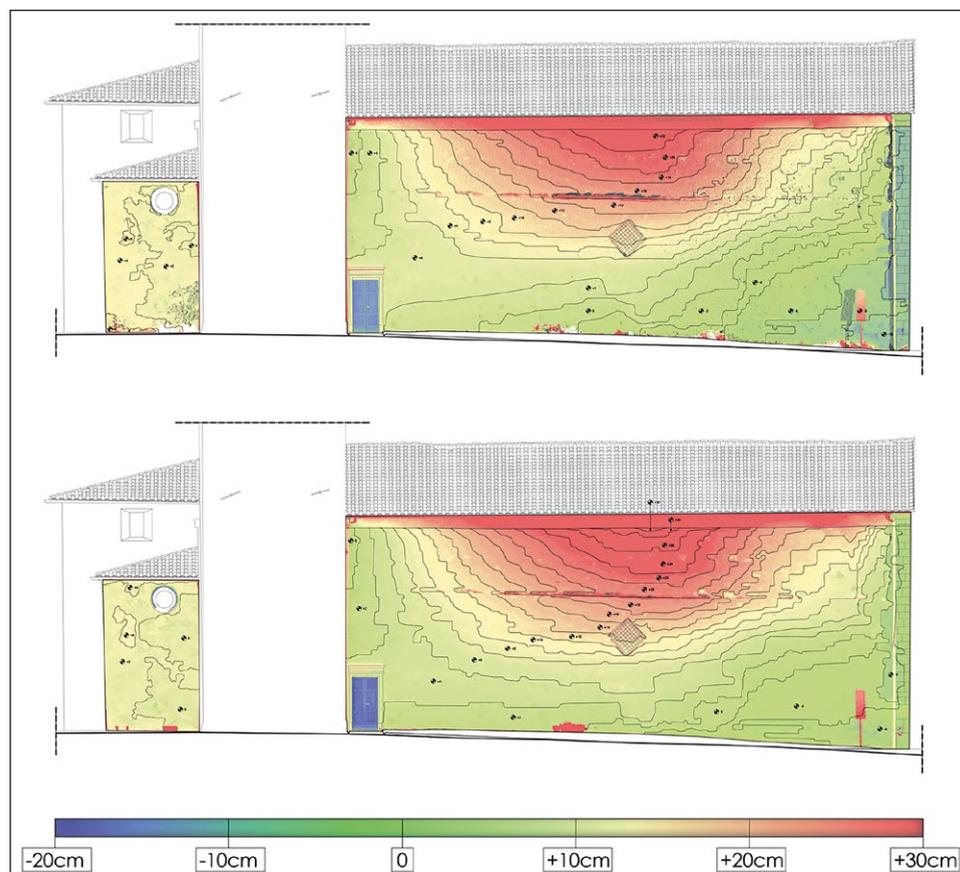


Fig. 3 – La deformazione mostrata dagli Elevation Maps della parete N della chiesa prima (in alto) e dopo (in basso) il terremoto del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

stati davvero interessanti se rapportati alla storia costruttiva e alle interfacce stratigrafiche presenti sulle murature del manufatto.

Il rilievo è stato condotto con le medesime condizioni di quello precedente, utilizzando la stessa strumentazione, con una prassi operativa che ricalcava quella utilizzata nella fase pre-sisma. La restituzione del rilievo è stata confrontata con quella antecedente, sovrapponendola in ogni sua parte mediante punti topografici di appoggio, e andando a creare piani di sezione ad altezze predefinite nei punti di maggiore interesse (colonne, copertura, murature perimetrali). Inoltre sono stati realizzati nuovi Elevation Maps della struttura (BERTOCCI, BINI 2012; MINUTOLI 2012) che sono stati sovrapposti sia con quelli pregressi (Fig. 3), che con la stratigrafia.

Di seguito vengono presentati, a titolo di esempio per fornire un quadro completo della metodologia adottata, alcuni passaggi effettuati nello studio del manufatto, comparando le situazioni pre- e post-sisma. L'intento dei paragrafi successivi non è quello di mostrare i risultati ottenuti dalle analisi dell'edificio dal punto di vista strutturale e meccanico, cosa che richiederebbe l'intervento di un ingegnere strutturista, ma piuttosto quello di mostrare come, attraverso le moderne tecnologie di rilievo unite alla lettura archeologica delle murature, sia possibile determinare una notevole quantità di dati in senso qualitativo e quantitativo. Queste informazioni risultano elementi di grande interesse sia dal punto di vista storico-archeologico, sia nella progettazione degli interventi sulle strutture.

#### 4.1 *Le colonne*

Sulle colonne è stata svolta un'analisi comparativa tra la situazione pre- e post-sisma del 2019. Per tutti questi elementi è stato condotto uno studio sulla deformazione delle stesse sezionando, dalla nuvola di punti ottenuta mediante rilievo laser scanner, ogni elemento alla base e immediatamente sotto ai capitelli

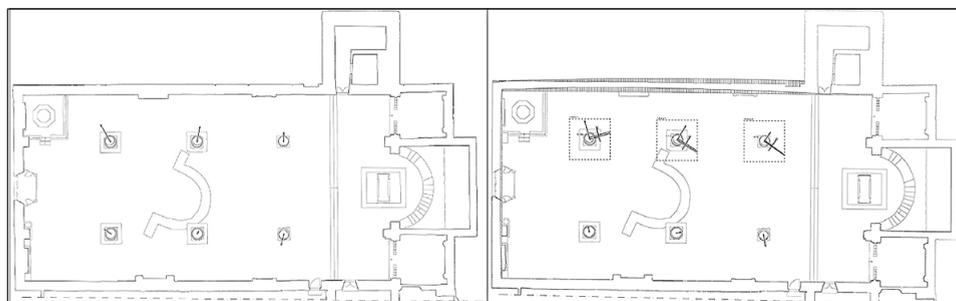


Fig. 4 – Sezione planimetrica della chiesa con sovrapposizione delle colonne a loro volta sezionate all'altezza dei capitelli, utile a mostrare il cambiamento nella direzione dell'inclinazione delle colonne (graficizzato da una freccia) nei periodi pre- (a sinistra) e post- (a destra) sisma del dicembre del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

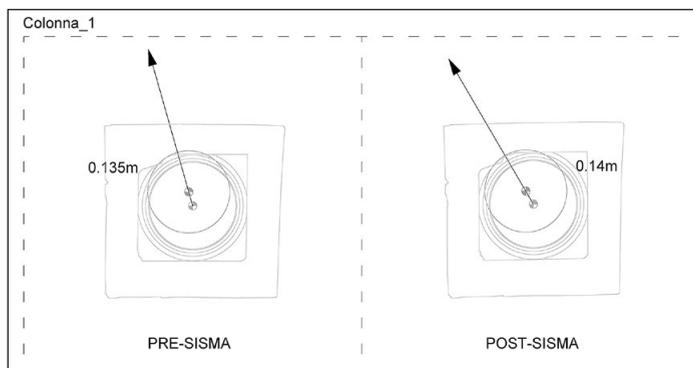


Fig. 5 – Particolare del tipo di analisi svolto su una colonna prima e dopo il sisma del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

e sovrapponendo i risultati fra le situazioni ante- e post-sisma (Fig. 4). In questo modo è stato possibile comprendere come il terremoto abbia modificato l'inclinazione già presente in questi elementi e, conseguentemente, come il tetto (ancorato alle colonne mediante specifiche cerchiature in ferro inserite nel corso dei restauri del XVI secolo) e le pareti laterali (collegate a sua volta alle travi del tetto mediante catene in ferro) siano ruotati seguendo specifici assi e dinamiche correlati alla morfologia e alle caratteristiche costruttive dell'edificio.

Se rapportiamo questo dato alla stratigrafia del monumento (Figg. 6 e 7) appare ipotizzabile come la deformazione che ha interessato la struttura spingendola verso l'angolo NO (Fig. 4) sia probabilmente correlabile a due fattori: da un lato l'angolo si presenta come l'unico punto libero dei due perimetrali della struttura dove si innesta la copertura, mentre nelle altre porzioni si presentano corpi di fabbrica in appoggio che offrono un sostegno assimilabile a quello di un contrafforte (a S il chiostro, a NE il campanile); dall'altro lato, nella porzione sottostante all'angolo NO, il terreno in cui sono state scavate le fondazioni dell'attuale edificio religioso si presenta incoerente poiché frutto del crollo e dell'interramento della vecchia chiesa di Sant'Agata, visibile in tratteggio leggero nelle Figg. 6 e 7 e scoperta a seguito del rifacimento del pavimento interno della chiesa negli anni '60 del Novecento e sulla quale viene ad impostarsi l'attuale edificio religioso probabilmente nella seconda metà del XII secolo (ARRIGHETTI *et al.* 2022a).

#### 4.2 Le pareti perimetrali esterne e interne

Le analisi delle meccaniche dei dissesti delle murature, da una prima caratterizzazione sovrapposta del quadro deformativo e fessurativo sulla

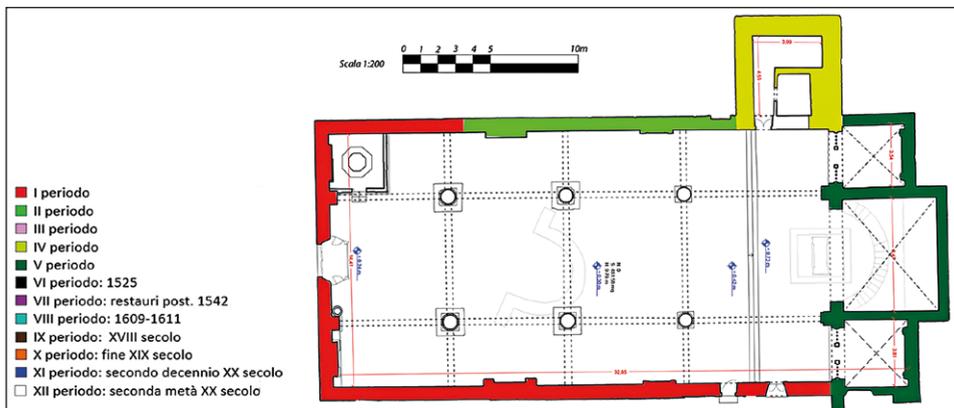


Fig. 6 – Sezione planimetrica della Pieve di Sant'Agata all'altezza di circa 1,5 m da terra (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

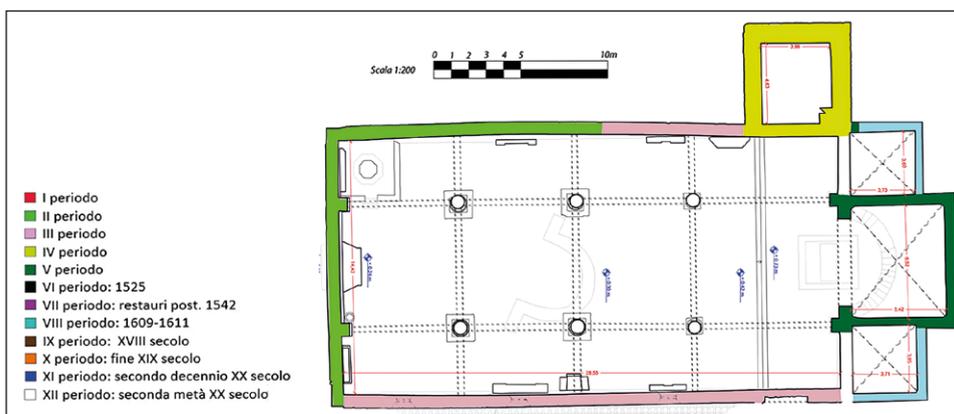


Fig. 7 – Sezione planimetrica della Pieve di Sant'Agata sotto i capitelli delle colonne (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

lettura archeologica, mostrano una connessione tra le interfacce stratigrafiche e i punti di rotazione o ribaltamento sia nella situazione pre-sisma, che nei successivi movimenti scaturiti a seguito del terremoto del dicembre 2019. In particolare, le evidenze deformative già messe in luce a seguito dell'analisi pre-sisma, già strettamente correlate alle interfacce stratigrafiche presenti nei prospetti (Fig. 8), hanno visto una netta accentuazione, interessando i medesimi contorni stratigrafici delle diverse Unità Stratigrafiche Murarie (USM, Fig. 9). Se andiamo ad esempio a confrontare il perimetrale S della chiesa (Figg. 8, 9), interessato prima del dicembre 2019 da una deformazione nella



Fig. 8 – Sezione del perimetrale interno S della Pieve di Sant’Agata nella situazione pre-sisma del 2019 con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

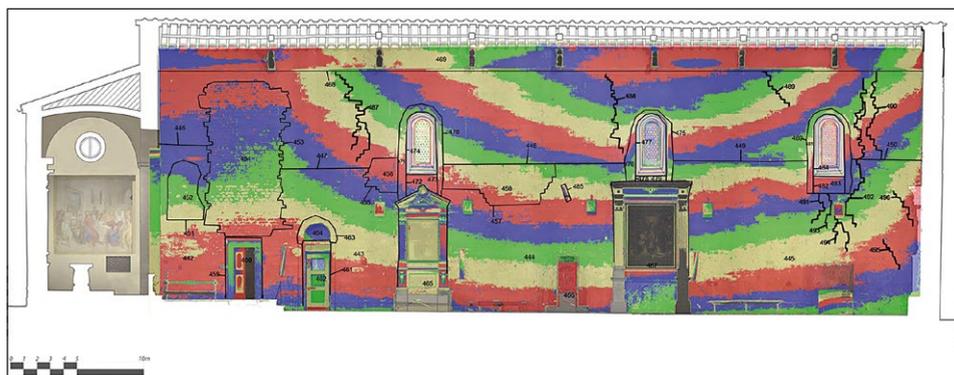


Fig. 9 – Sezione del perimetrale interno S della Pieve di Sant’Agata nella situazione post-sisma del 2019 con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

porzione alta del prospetto che segue la linea di interfaccia tra la prima fase della chiesa e il suo rialzamento operato probabilmente nel corso del XIII secolo, la situazione post-sisma mostra una accentuazione della deformazione preesistente partendo proprio dalla linea di contatto tra le fasi costruttive precedentemente menzionate. Allo stesso modo prendendo come esempio la facciata (Fig. 10), anch’essa caratterizzata da una deformazione ben evidente nella porzione centrale-alta della parete, all’altezza del tamponamento del vecchio rosone, risulta chiaramente visibile la relazione tra deformazioni e stratigrafia tra prima e seconda fase costruttiva (distinguibile in basso con due linee orizzontali nette presenti a destra e sinistra della porta di accesso),

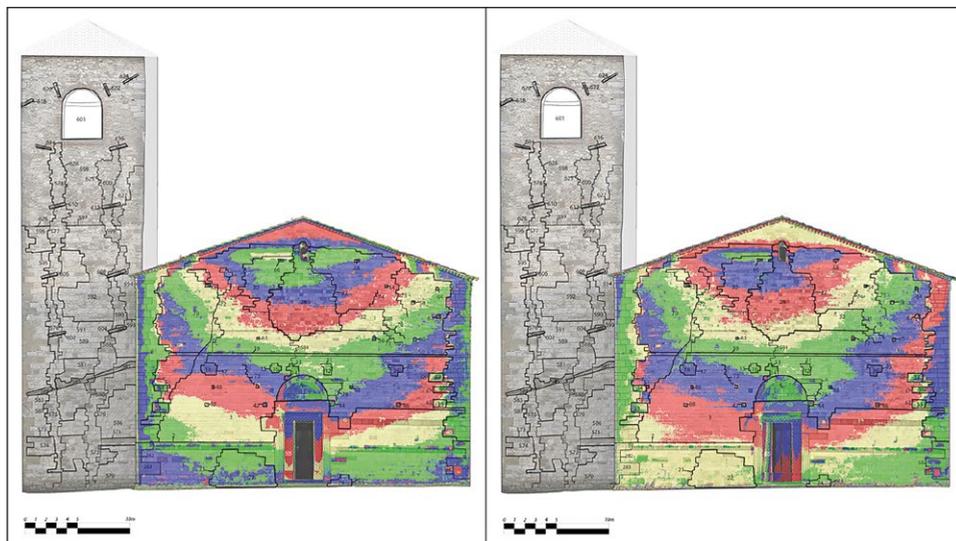


Fig. 10 – Sezione del perimetrale esterno O della Pieve di Sant'Agata nella situazione pre- (a sinistra) e post- (a destra) sisma del 2019, con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

tra il tamponamento del rosone e la muratura circostante (soprattutto nella porzione bassa) e tra le angolate e la muratura (ricostruite a seguito di un esteso fuori-piombo dei prospetti ad esse collegati).

#### 4.3 *Le tecniche costruttive murarie*

Le tecniche costruttive murarie riscontrabili nella Pieve sono in totale tredici e riguardano i principali periodi costruttivi dell'edificio. Ogni tecnica è stata individuata a seguito della lettura archeologica delle murature, cercando di descrivere al meglio il cambiamento nel know-how delle maestranze presenti nei diversi cantieri costruttivi (Fig. 11). Allo stesso tempo la caratterizzazione delle tecniche ha previsto la documentazione dei danni e dei dissesti visibili sull'edificio e degli interventi messi in opera per riparare o per contrastare tali problematiche. La registrazione delle tecniche, dei danni/dissesti e delle riparazioni è avvenuta mediante un'apposita schedatura (ARRIGHETTI 2019) che ne ha permesso una registrazione puntuale in senso qualitativo e qualitativo, inserendo questi elementi all'interno del processo di indagine stratigrafica dell'edificio. Si è cercato dunque di legare questi interventi al divenire storico-costruttivo del manufatto e di interpretarli nell'ottica di una conoscenza del bene dal punto di vista archeosismologico. Per quest'ultimo punto un passo di fondamentale importanza è stato la possibilità di avere

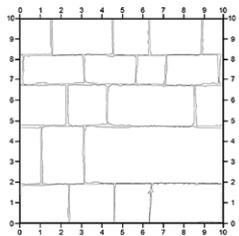
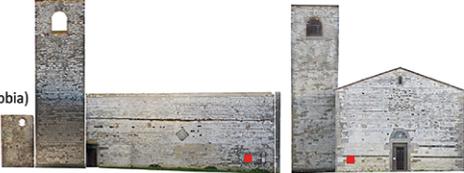
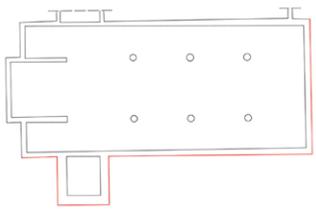
Codice: TCM 1	
Collocazione nel C.A.: Prospetto Nord CF1	
Fase costruttiva: Fase 1	
Cronologia relativa: ant. Fase 2	
Cronologia assoluta: 1175 (?)	
Dettagli: Originale	
Stato di conservazione: Ottimo	
Ruolo strutturale: Muratura d'ambito esterno	
Materiale da costruzione: Pietra Alberese e Serpentinite	
Provenienza: Scavo locale	
Altezza dei conci: 14 cm – 27 cm	
Larghezza dei conci: 13 cm – 67 cm	
Lavorazione: Squadratura e spianatura	
Finitura: Strumento a lama piana (scalpello e sabbia)	
Giunti e letti di posa: 0,25 cm – 1,1 cm	
Apparecchiatura: Regolare di conci squadrati	
Presenza di zeppe: No	
Presenza di diatoni: Non determinabile	
Presenza di vuoti: No	
Dimensione dei vuoti:	
Descrizione/interpretazione: Muratura d'ambito esterno probabilmente riferibile al primo impianto della chiesa (databile al 1175), composta da conci di pietra alberese con la presenza di elementi decorativi in serpentinite posti su filari orizzontali paralleli.	

Fig. 11 – La scheda utilizzata per la registrazione delle tecniche costruttive murarie.

fonti scritte, epigrafiche, iconografiche e cartografiche eccezionalmente puntuali e specifiche, che hanno permesso di datare e interpretare con precisione l'origine della maggior parte dei dissesti e degli elementi costruttivi impiegati (ARRIGHETTI *et al.* 2022a).

Le tecniche individuate all'interno dell'indagine sono state infine catalogate all'interno di un database digitale denominato OPUR (Outil Pour Unités de Réparation / Strumento per unità di riparazione), sviluppato all'interno del programma RECAP (Reconstruire après un tremblement de terre. Expériences antiques et innovations à Pompéi / Ricostruzione dopo un terremoto: antiche esperienze e innovazioni a Pompei)<sup>2</sup> da un team di ricercatori dell'École Normale Supérieure-Université PSL di Parigi<sup>3</sup>. Il database, inizialmente impostato per la documentazione delle tecniche di riparazione post-sismica individuate nel sito archeologico di Pompei, è stato quindi testato, e attualmente è in fase di aggiornamento, per la registrazione delle evidenze emerse dall'analisi in Mugello con l'indagine della Pieve di Sant'Agata e successivamente con l'ampliamento dello studio a ulteriori strutture a seguito dell'attivazione del nuovo progetto "ACROSS-Archaeology, inventory of Reconstruction, Seismology and Structural engineering"<sup>4</sup>.

## 5. RISULTATI

Il sisma che il 9 dicembre 2019 ha colpito alcuni comuni del Mugello ha provocato danni a numerose fabbriche religiose e civili, rendendo evidente quanto risulti indispensabile garantire la buona conservazione del patrimonio architettonico con interventi di manutenzione periodici. Allo stesso tempo, i danni causati dal terremoto hanno messo in evidenza quanto sia urgente avviare l'esecuzione degli interventi di miglioramento sismico, unica garanzia di conservazione per edifici che, essendo collocati in un territorio classificato come a pericolosità sismica media, possono essere comunque sottoposti a scosse con importanti effetti sul patrimonio edilizio. Si ricorda, infatti, che nel 2019 ricorreva il centenario del sisma che nel giugno del 1919 ha seminato morte e distruzione in Mugello e che, nonostante l'evidenza storica, buona parte degli edifici interessati dall'ultimo terremoto versava in condizioni piuttosto critiche già prima del 9 dicembre.

Nel dicembre del 2019, all'interno della chiesa e del chiostro della Pieve di Sant'Agata del Mugello si erano appena concluse le giornate di presentazione del progetto "AcRoSS-Archaeologia, Restauro, Sismologia" e l'esposizione

<sup>2</sup> Progetto ANR-14-CE31-0005, 2015-2019, coordinato dal dipartimento AOROC (UMR 8546, ENS-CNRS-EPHE, Université PSL), associando l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154), l'INRIA (Institut national de de recherche en informatique et en automatique, Paris-Rocquencourt, UMR 8548) e il Centre Jean Bérard (USR 3133, CNRS-EFR), in collaborazione con il labex TransferS, l'ISTerre (UMR 5275), l'Università degli Studi di Padova, l'Università degli Studi di Napoli Federico II e il Parco archeologico di Pompei: cfr. <http://recap.huma-num.fr>.

<sup>3</sup> Il database OPUR è stato creato in Filemaker 13 da Agnès Tricoche, sotto la supervisione di Hélène Dessales, con i contributi di Guilhem Chapelin (CNRS, CJB) e Julien Caverio (ENS, labex TransferS) per la sua progettazione.

<sup>4</sup> Il nuovo progetto ACROSS, coordinato dalla Dott.ssa Maria Lancieri dell'IRSN, è attualmente in corso di svolgimento in Mugello e prevede l'analisi dal punto di vista interdisciplinare di numerose strutture presenti nel territorio (<https://across-project.github.io/>).

da parte del team italo-francese dei risultati ottenuti dall'analisi dell'edificio. A pochi giorni dallo smontaggio della mostra sulle attività svolte dal progetto è avvenuto un terremoto che, fortunatamente, non ha causati danni di grandi proporzioni. L'evento è stato però "registrato" dalle murature della Pieve, diventando per noi un'occasione unica per verificare direttamente le ipotesi che avevamo proposto in riferimento alla vulnerabilità del complesso, andando dunque a validare o confutare la metodologia di analisi utilizzata, e nel comprendere come la stratigrafia architettonica, a tutti i suoi livelli di approfondimento, ha interagito con il movimento sismico.

L'analisi svolta sulla Pieve di Sant'Agata a seguito del sisma del 2019 è stato dunque un evento di eccezionale interesse dal punto di vista conoscitivo e metodologico. Capita infatti raramente di poter rapportare su di un edificio una situazione pre- e post-terremoto, avendo a disposizione un rilievo molto accurato dal punto di vista morfo-metrico.

Da una prima analisi senza strumentazione svolta sulla chiesa di Sant'Agata è apparso subito chiaro è che a seguito del terremoto del 2019 la chiesa sia stata caratterizzata da un'evidente accentuazione delle deformazioni già presenti (Fig. 3), con particolare incidenza nel prospetto laterale N, nella facciata e nelle colonne, queste ultime soggette ad una progressiva inclinazione verso l'unico spigolo libero da strutture di sostegno, ovvero quello NO. Il lato del chiostro, dove si presentano strutture in appoggio alla chiesa, che durante il sisma hanno rivestito una funzione di contrafforte, il lato absidale, nel quale sono state inserite in emergenza catene metalliche come intervento post-sisma da parte di Vigili del Fuoco, e l'angolo interessato dal campanile costruito in appoggio al perimetrale N non sembravano invece mostrare segni particolari di movimento.

L'impiego delle tecnologie di rilievo ha aiutato in modo sensibile nella documentazione dei reali effetti del terremoto. Mediante l'elaborazione dei dati è stato infatti possibile determinare con estrema accuratezza tutte le dinamiche innescate dal sisma e come queste si siano relazionate ai dissesti già presenti e alle interfacce stratigrafiche di riferimento.

## 6. CONCLUSIONI

La conoscenza è una fase operativa imprescindibile in un qualsiasi progetto che preveda un intervento diretto sull'edificato storico. Leggere la stratificazione degli eventi naturali e antropici sulle architetture, fornendo una valutazione quanto più attenta possibile della loro complessità storico-costruttiva, è un passo indispensabile verso una piena consapevolezza delle caratteristiche formali e fisiche che caratterizzano il manufatto oggetto di analisi.

Il contributo, partendo dalla revisione delle schede adottate per la documentazione dell'edilizia storica in aree a rischio sismico all'interno del

grande progetto ministeriale dell'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia, si è proposto di illustrare, mediante un apposito caso studio esemplificativo, quello della Pieve di Sant'Agata, come l'apporto delle moderne tecnologie di rilievo abbia migliorato sensibilmente la registrazione del dato archeosismologico in senso qualitativo e quantitativo. Queste informazioni, una volta interpretate, permettono una piena conoscenza storico-costruttiva e sismica del singolo bene, aiutando in modo sensibile il processo di conoscenza storica del contesto di studio e allo stesso tempo migliorando la fase di documentazione, valutazione e progettazione degli interventi di restauro.

In questo articolo, sebbene non si sia cercato di arrivare a conclusioni sulle meccaniche dell'edificio, non avendone le competenze, si è cercato però di mettere in luce come le moderne tecnologie di rilievo, in particolare l'impiego del laser scanner e della fotogrammetria, se rapportate con la stratigrafia presente sulle superfici di un monumento, permettano di arrivare ad una conoscenza approfondita di un'architettura.

Da questa analisi risulta dunque molto chiaro come un monitoraggio specifico delle strutture, realizzato mediante strumenti che garantiscano precisione e affidabilità del dato ad una scala millimetrica, accompagnato da una serie di analisi multidisciplinari operate a diretto contatto con la loro fabbrica, possa fornire dati assolutamente importanti alla conoscenza di ogni edificio e alla progettazione delle possibili modalità di intervento più idonee in previsione di un futuro evento sismico. Dati che, se elaborati con carattere sistematico, permetteranno nel prossimo futuro di salvaguardare il patrimonio e le popolazioni di intere aree a rischio.

ANDREA ARRIGHETTI

École normale supérieure - Université PSL

AOROC, UMR 8546

andrea.arrighetti@ens.psl.eu

## BIBLIOGRAFIA

- ARRIGHETTI A. 2015, *L'archeosismologia in architettura. Per un manuale*, Firenze, Firenze University Press.
- ARRIGHETTI A. 2016, *Materiali e tecniche costruttive del Mugello tra Basso Medioevo e prima età moderna*, «Archeologia de la Arquitectura», 13 (<http://dx.doi.org/10.3989/arq.arqt.2016.001>).
- ARRIGHETTI A. 2018, *Archeosismologia in architettura. Nuove prospettive di un dialogo multidisciplinare*, «Archeologia dell'Architettura», 23, 11-17.
- ARRIGHETTI A. 2019, *Registering and documenting the stratification of disruptions and restorations in historical edifices. The contribution of archaeoseismology to architecture*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 23, 243-251 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.10.028>).
- ARRIGHETTI A., CANTISANI E., FRATINI F., LEPORINI R. 2022a, *Nuovi dati dall'analisi archeosismologica delle architetture della pieve di Sant'Agata del Mugello*, «Archeologia dell'Architettura», 27.1, in corso di stampa.

- ARRIGHETTI A., FRATINI F., MINUTOLI G., PANCANI G. 2022b, *Historical seismic events and their traces on Medieval religious buildings*, in S. D'AMICO, V. VENUTI (eds.), *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, Springer International Publishing ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7\\_76](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_76)).
- ARRIGHETTI A., MINUTOLI G. 2019, *A multidisciplinary approach to document and analyze seismic protection techniques in Mugello from the Middle Ages to Early Modern Time*, «Annals of Geophysics», 62,3 (<https://doi.org/10.4401/ag-7991>).
- BALLARDINI R. 1998, *Il programma di attuazione delle ricerche universitarie. Obiettivi e aree tecnico-scientifiche di integrazione. Le proposte normative. Relazione generale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 71-79.
- BERTOCCI S., BINI M. 2012, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, CittàStudi.
- BROGIOLO G.P., FACCIO P. 2010, *Stratigrafia e prevenzione*, «Archeologia dell'Architettura», 15, 55-63.
- BROGIOLO G.P., CAGNANA A. (eds.) 2012, *Archeologia dell'Architettura: metodi ed interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- MANNONI T., CICIRELLO C. 1998, *Atlante dei tipi costruttivi murari dell'Italia settentrionale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 87-99.
- MINUTOLI G. 2012, *Il rilievo strutturale*, in S. BERTOCCI, M. BINI (eds.), *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, CittàStudi, 317-338.
- MONTABERT A., DESSALES H., ARRIGHETTI A., CLEMENT J., LANCIERI M., LYON-CAEN H. 2020, *Tracing the seismic history of Sant'Agata del Mugello (Italy, Tuscany) through a cross-disciplinary approach*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 33 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102440>).
- PEDUTO P., SACCONI T. 1998, *Atlante dei tipi costruttivi murari nell'Italia meridionale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 101-111.
- REDI F., FORGIONE A., ROMITI E. 2012, *Rilevamento dell'edilizia storica e valutazione del danno sismico all'Aquila e territorio prima e dopo il 6 aprile 2009*, in F. REDI, A. FORGIONE (eds.), *Atti del VI Congresso degli Archeologi Medievisti Italiani*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 763-768.

## SITOGRAFIA

<http://recap.huma-num.fr>  
<https://across-project.github.io/>

## ABSTRACT

Knowledge is an essential operating procedure in any project involving direct intervention in historic buildings. Reading the stratification of natural and anthropic events on the architecture, providing the careful evaluation of its historical-constructive complexity, is a crucial step towards a full knowledge of the formal and physical characteristics of the building under analysis. The contribution, starting from the revision of the sheets used for documenting historical buildings in areas at seismic risk within the Ministry project of the 'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia', aims to illustrate, by means of a distinctive case study, that of the Pieve di Sant'Agata, how the contribution of modern surveying technology has significantly improved the recording of archaeo-seismological data both qualitatively and quantitatively. This information, once interpreted, provides a full historical, constructive and seismic understanding of the architectures, helping the process of historical knowledge of the context under study and, at the same time, the documentation, evaluation and planning of the restoration work.

DALLO STUDIO ALLA RICOSTRUZIONE:  
FONTI E METODOLOGIE PER LA RAPPRESENTAZIONE  
DI UN CONTESTO PERDUTO. IL CASO DEI GRANAI E FIENILI  
AL COMPLESSO DI DOMIZIANO (FORO ROMANO-PALATINO)

*Non bisogna aspettarsi da queste leggi una spiegazione lineare dei fenomeni macroscopici, del mondo come lo osserviamo e lo vediamo a occhi nudi, nello stesso modo in cui non possiamo spiegare direttamente l'architettura romana a partire dalle proprietà fisico-chimiche del mattone*

(G. PARISI, *La chiave, la luce e l'ubriaco. Come si muove la ricerca scientifica*, Roma 2021, 8).

## 1. INTRODUZIONE

Ricostruire contesti antichi è l'obiettivo cui una ricerca archeologica ambisce. Tuttavia, la ricostruzione non è che una delle fasi finali del lungo percorso di ricerca che comincia con il lavoro sul campo, che sia scavo archeologico o "scavo" d'archivio, rilievo di edifici storici o studio di reperti. La raccolta dei dati è infatti la fase primaria e basilare di una buona ricerca, quando tutte le informazioni vengono collezionate senza risparmio e senza che ancora si sappia precisamente in che direzione il lavoro stia conducendo. La raffinazione di questi dati interessa la fase centrale del lavoro dell'archeologo, quando il materiale informativo viene organizzato qualitativamente e quantitativamente, arricchendo la ricerca di stimoli ulteriori e consultando ogni genere di fonte che abbia qualcosa da dire. Questo lavoro di definizione, con un po' di buone intuizioni, permette di arrivare a una plausibile interpretazione che rappresenta l'ultima e temporanea conclusione sull'argomento, valida fintantoché non viene smentita da un accrescimento o da una rilettura dei dati. La ricostruzione è il momento di sintesi interpretativa che risponde simultaneamente e in modo plastico a tutte le domande che ci si è posti nel corso della ricerca (MEDRI 2003, 186; FORTE 2017, 126).

La provvisorietà delle conclusioni di uno studio è un fatto ancor più evidente quando si tratta di ricostruzioni ipotetiche o altamente ipotetiche. Esse si basano su elementi spesso scarni, tenuti insieme da una catena di ipotesi formulate su base deduttiva e sequenze logiche che assieme compongono il frammentario mosaico della ricostruzione (MEDRI 2017, 220-221). In alcuni casi, il momento ricostruttivo è puramente mentale, costituito dal racconto della storia che si è tracciata nello studio di un contesto. In altri casi, invece, la ricostruzione si traduce in questione "fisica" o "virtuale". Questi due termini, i cui significati sono spesso antinomici, rappresentano in questo caso due concetti similissimi. Ciò che prima si era soliti ricostruire



Fig. 1 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest, prima delle demolizioni, anno 1885 (in alto) e dopo le demolizioni, anno 2020 (in basso) (SANFILIPPO 1992, 50; DEL PRETE 2002, figg. 4-5).

dal vero, un plastico ad esempio, in anni recenti – almeno dagli anni '90 – si è più soliti farlo in ambiente informatico, andando così a costituire un nuovo settore dell'archeologia ricostruttiva (DJINDJIAN 2019, 13-20; GABELLONE 2021, 214-215): «ricostruzioni mentali, che si concretizzano nella grafica al computer» (CARANDINI 2017, 157). I modelli ricostruttivi si rivelano dunque strumenti utilissimi per verificare la fattualità delle ipotesi e diventano un veicolo di comunicazione tra studiosi e verso il grande pubblico caratterizzato da una formidabile carica persuasiva: «fare ricerca è anche imparare a comunicare» (MANACORDA, SANTANGELI VALENZANI 2011, 9-10).

In aggiunta, negli ultimi anni si è andata consolidando la convinzione che le metodologie di studio archeologico possono applicarsi a pieno titolo a svariati tipi di contesti, più o meno antichi (DE FELICE, CAMERIANO, PAVONE 2021, 195-212). Le frontiere della ricerca si aprono così a nuovi orizzonti, oltrepassando schemi accademici ormai superati. Per dirla con Andrea Carandini: «il metodo stratigrafico che consente di scavare e di leggere in successione le strutture sepolte e le rovine e i monumenti in elevato vale sia per l'archeologia dell'antichità e sia per l'archeologia e per l'architettura del Medioevo e dell'età moderna» (CARANDINI 2017, 95).

In questo contributo si presenta il caso studio del Complesso dell'imperatore Tito Flavio Domiziano al Foro Romano nella ricostruzione dei magazzini di fase moderna (Fig. 1). L'edificio in rovina, a partire dalla fine del XVI secolo, fu occupato da una serie di quattro casupole che si appoggiarono alla struttura architettonica antica. Le superfetazioni moderne furono utilizzate come depositi di grano e fieno, fino alla fine del XIX secolo, quando la prosecuzione dei grandi scavi al Foro Romano portò alla demolizione delle strutture moderne, per permettere la “liberazione” del monumento antico.

## 2. GRANAI E FIENILI DI ROMA MODERNA

Edifici come granai e fienili erano estremamente comuni nella Roma dei secoli moderni, soprattutto tra il XVI e il XIX secolo. Uno studio generale ha permesso di censire circa 400 edifici adibiti alla conservazione e allo stoccaggio delle merci nel panorama della Roma dei primi anni dell'Ottocento. La loro pervasività nel tessuto urbano si legava alla necessità di garantire l'approvvigionamento alimentare alla popolazione cittadina facendo da *trait d'union* tra la campagna produttiva e il centro città. Poi, nel corso dell'Ottocento, la necessità di trasformare Roma in una moderna capitale e il progredire dei trasporti su ferro resero superflue queste strutture, che furono demolite o ristrutturare e rifunzionalizzate.

Papa Gregorio XIII nel 1575 aveva fatto costruire il primo grande granaio camerale, cosiddetto Granaro Gregoriano, sulla cima del colle Viminale, presso il complesso antico delle Terme di Diocleziano a Termini. A

questo primo magazzino pubblico ne seguirono degli altri sorti sulle rovine delle antiche terme: il Granaio Paolino (1609), il Granaio Urbano (1649) e il Granaio Clementino (1703), sotto il diretto controllo della Prefettura dell'Annona. Si tratta di grandi costruzioni, commissionate direttamente dai pontefici e realizzate da valenti architetti elaborando accorgimenti architettonici specifici per assolvere alla funzione di conservazione e stoccaggio (DA GAI 2008, 595-606).

Oltre ai granai camerali, la quasi totalità dei magazzini cittadini erano in mano a facoltosi cittadini o a enti ecclesiastici e potevano essere adoperati per la conservazione delle scorte di grano o di fieno. Roma moderna fino ancora all'Ottocento inoltrato era una città fortemente arretrata e ruralizzata, dove scene di vita di campagna si mischiavano a quelle più tipicamente urbane. Questi granai e fienili privati erano edifici molto diversi dai magazzini camerali; si trattava di umili casupole realizzate tra la fine del Cinquecento e il corso del Seicento con materiali poveri e spesso di riuso. Poteva accadere che le strutture sorgessero a ridosso di edifici e monumenti antichi, riutilizzandone intere porzioni, come nel caso dei magazzini al Complesso di Domiziano.

### 3. I GRANAI E I FIENILI AL COMPLESSO DI DOMIZIANO

#### 3.1 *Profilo storico*

Il Complesso di Domiziano tra Foro Romano e Palatino è un grande e articolato edificio costruito alla fine del I secolo d.C., composto da una serie di tre aule e un quadriportico monumentali e da una rampa che metteva in collegamento la piazza pubblica e la residenza dell'imperatore (SOMMAINI 2019, 219-255). Dal Medioevo fino all'età moderna il sito del Complesso di Domiziano fu caratterizzato dalla presenza costante di edifici religiosi. La prima fu la basilica palatina di Santa Maria Antiqua, costruita tra V e VI secolo presso il Quadriportico dell'edificio domiziano. Seguirono poi la chiesa e monastero di Sant'Antonio *de Inferno* (IX-XI secolo) e di Santa Maria *de Inferno* (XIII-XV secolo), che a partire dal Quattrocento era conosciuta con il titolo di Santa Maria *libera nos a poenis Inferni*. Al termine di un periodo di profonda crisi dell'istituto ecclesiastico, che perdurò per quasi tutto il Cinquecento, alla fine di questo secolo la chiesa ricevette una donazione in denaro che consentì il parziale recupero delle strutture architettoniche.

La morte del nobiluomo Michele Lante garantì un lascito testamentario per il rinnovamento degli edifici che, verosimilmente, furono abbondantemente restaurati. In questa occasione, forse, venne costruito un primo granaio all'interno delle rovine dell'Aula Ovest che era di proprietà del cardinale Giambattista Leni (edificio 1), membro di una famiglia romana che si era

arricchita nel XV secolo proprio attraverso il mercato delle granaglie. Pochi anni dopo, però, per intercessione del cardinale Marcello Lante e del marchese Marcantonio Lante, la chiesa fu interamente ricostruita dall'architetto Onorio Longhi in stile barocco (1617-1618). Negli stessi anni, altre tre strutture con funzione di magazzino vennero costruite attorno ai muraglioni dell'Aula Ovest (edifici 2, 3, 4). Questo modesto complesso annonario composto da quattro casupole sopravvisse fino all'anno 1884-85, quando nel corso degli scavi del Foro Romano si decise di demolire le superfetazioni moderne per "liberare" e scavare le strutture antiche di quello che veniva interpretato come il Tempio del Divo Augusto.

Oggi, grazie ad un uso integrato di fonti archeologiche e iconografiche, è possibile ricostruire il contesto architettonico perduto.

### *3.2 Fonti archeologiche*

Lo studio di architetture povere come granai e fienili di Roma moderna è reso difficoltoso dalla completa scomparsa di queste strutture dal panorama della città. Tuttavia, proprio il caso di studio del Complesso di Domiziano fornisce notevolissime informazioni archeologiche in negativo, utili a comprendere la scansione interna, oltre che esterna, di questi edifici.

L'Aula Ovest del Complesso è costituita oggi da tre grandi muri in laterizio, alti fino a 28,5 m, più una piccola porzione del muro occidentale, che abbracciano una superficie di poco più di 800 mq. Questi muri rappresentano a tutti gli effetti delle "pareti palinsesto" poiché conservano tracce molto evidenti delle molteplici fasi storiche che si sono succedute in questo sito, dalla fine del I secolo d.C. a oggi. Il progetto di studio che coinvolge questo monumento – e che è ancora in corso – ambisce all'edizione completa dell'edificio, servendosi di tutti gli strumenti propri dell'archeologia dell'architettura e dell'archeologia urbana per uno studio integrale e diacronico dell'intero contesto.

Lo strumento di analisi principale è quello del rilievo archeologico di strutture architettoniche. Fino ad alcuni anni fa un rilievo accurato di rovine di tali dimensioni sarebbe stato pressoché impossibile; invece, lo sviluppo di moderne tecnologie ha consentito la formulazione di nuove tecniche di analisi. In questo modo, si sono potute coniugare l'immediatezza e l'immanenza del rilievo diretto alle possibilità concesse dal rilievo indiretto, bypassando il problema dell'accessibilità connaturato a un monumento di queste dimensioni (architetture XXL, VOLPE *et al.* 2018). La campagna di analisi viene condotta con gli innovativi e oramai consolidati strumenti della fotogrammetria digitale e del laser scanner (FERDANI *et al.* 2017, 169-177; BIANCONI, FILIPPUCCI 2019, 207-210; SOMMAINI *et al.* 2019, 251-254).

Si è proceduto attraverso il rilievo con tecnica fotogrammetrica dei prospetti interni ed esterni del monumento (Fig. 2). Lo strumento fotografico è

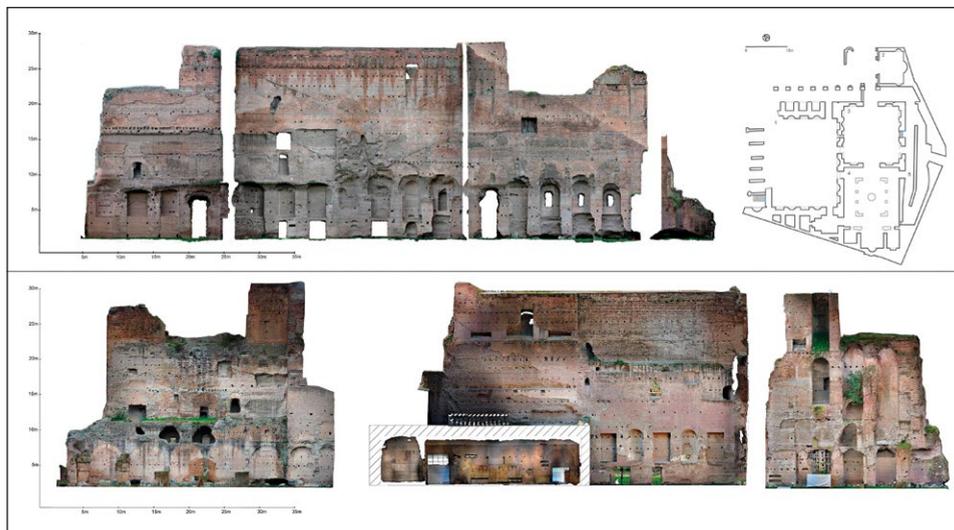


Fig. 2 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: in alto, ortofoto dei prospetti interni (fotogrammetria digitale) e planimetria; in basso, ortofoto dei prospetti esterni (elaborazione F. Sommaini).

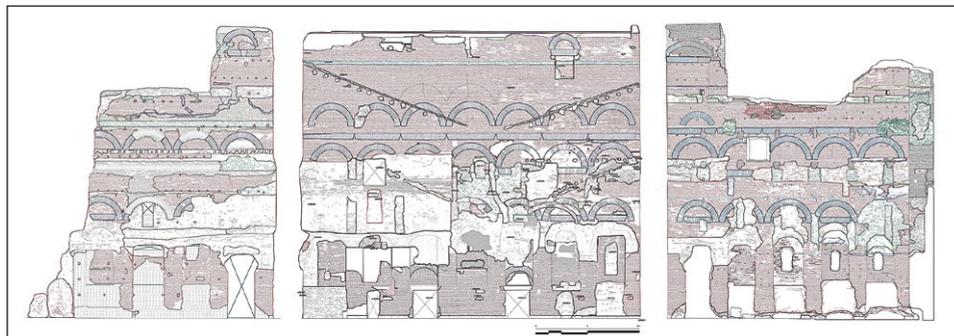


Fig. 3 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: rilievo stone by stone dei prospetti interni (elaborazione F. Sommaini).

stato associato all'utilizzo di un drone, per permettere la completa copertura fotografica dell'edificio antico. Si sono ottenuti modelli 3D (Agisoft Photoscan e Agisoft Metashape) di ciascuna parete da cui poter estrarre immagini orto-rettificate. In parallelo è iniziata una campagna di rilievo con stazione totale e con laser scanner (Leica Cyclone e 3D Reshaper) anche per ricavare tutte le informazioni metriche così da verificare e modificare le planimetrie già disponibili. Piante e prospetti sono gli strumenti essenziali e tradizionali per lo

studio di un oggetto architettonico (MEDRI 2003, 3-19; PAKKANEN 2018, 117). Le ortofoto hanno costituito non soltanto il risultato della campagna di rilievo, ma anche il punto di partenza dell'analisi del monumento.

Il disegno "a fil di ferro" di queste immagini in ambiente CAD sta portando alla definizione di uno dei rilievi stone-by-stone più grandi mai eseguito (AYÁN VILA *et al.* 2003, 21; BOATO 2008, 97; DELAINE 2008, 322; SOMMAINI *et al.* 2019, 251-264) (Fig. 3). La sua realizzazione costituisce propriamente una delle fasi attive della ricerca come analisi *in fieri* del costruito. La sua lettura permette di identificare un numero a tre cifre di Unità Stratigrafiche Murali – i "mattoni" dell'analisi stratigrafica (BOATO 2008, 49) – alcune delle quali riferibili alle strutture dei magazzini di età moderna.

### 3.2.1 Le pareti interne

La parete E interna all'Aula Ovest è la fonte di informazioni più eloquente (Figg. 2, 3). L'osservazione del rilievo del prospetto permette l'immediata identificazione di tracce significative, come i segni lasciati dai tetti a falda da parte dell'edificio 1 e 2. I magazzini si collocavano rispettivamente negli angoli SE e NE dell'Aula antica ed erano divisi in più piani, tre per l'edificio 1 e quattro per l'edificio 2. A separarli era un cortile. Sulla sinistra, la presenza di una porta a oltre 10 m dall'attuale piano di calpestio, che taglia la parete antica in corrispondenza dell'edificio 2, ci permette di notare come questo magazzino fosse in diretta comunicazione con l'area retrostante che era adibita ad orto e agrumeto. I due piani intermedi di questo edificio furono realizzati "scavando" nella parete laterizia antica, laddove, infatti, è assente la cortina in mattoni che fu asportata (visibile anche nella parete interna settentrionale). Sembrerebbe che i due piani intermedi dell'edificio fossero divisi in diversi ambienti per la presenza di tramezzi, che si innestavano sulla parete E e correvano in direzione E-O. Il dettaglio non è da poco e può suggerire che in un certo momento fossero stoccati in diverse stanze materiali diversi: più varietà di prodotti oppure merci di proprietà diverse.

La lettura incrociata del prospetto interno orientale con quello settentrionale permette di ricostruire nel dettaglio i solai che scandivano i diversi piani dell'edificio 2. Le tracce in negativo indicano l'originaria orditura principale e secondaria in travi e travetti in legno con assito superiore per il piano pavimentale calpestabile (Fig. 7). Il piano intermedio era forse rinforzato da un ulteriore ordine di travetti. Per il piano inferiore, la ricostruzione del pavimento è resa difficile dall'esteso intervento di restauro che ha determinato la totale o parziale cancellazione della muratura originaria, tramite risarcitura o ricostruzione del tessuto murario riconoscibile dai tipici mattoni lavorati alla martellina.

La parete interna settentrionale completa le informazioni sull'edificio 2. Dal pianterreno una porta era stata ricavata sotto l'arco di scarico antico e

immetteva su una scala che forse conduceva a un piccolo ambiente ricavato nello spessore del muro antico (oltre 2 m). Di contro, il muro esterno N non presenta tracce di apertura in questo preciso punto. Lo stato di conservazione dell'intero muraglione è peggiore rispetto alla parete E, in quanto la parte più alta ha subito notevoli crolli, per altro visibili in alcune macerie conservate e musealizzate in sito.

La parete interna meridionale aggiunge alcune informazioni sull'edificio 1. È possibile che anche questo magazzino avesse tre piani divisi in più ambienti per la presenza di tracce compatibili con l'innesto di ben 6 tramezzi in direzione N-S. È interessante notare come la traccia della porta visibile a quota 16 m da terra (ossia al secondo piano del magazzino moderno) sia visibile sul lato opposto del muraglione S, indicando come l'edificio 1 e l'edificio 4 fossero in comunicazione.

La piccola porzione del muro O che sopravvive conserva una rarissima traccia in positivo del vecchio magazzino. Qui si vede uno stipite della finestra incorniciata e leggermente strombata che caratterizzava la facciata dell'edificio 1.

### 3.2.2 I muri esterni

L'edificio 3 si appoggiava sul muro settentrionale dall'esterno (Fig. 2). Osservando l'ortofoto si nota la presenza di un gran numero di tracce, ma anche di porzioni fortemente restaurate, sicché è più difficile distinguere con chiarezza tutte le Unità Stratigrafiche Negative riconducibili al magazzino. Gli arconi che compongono la facciata della struttura antica erano inglobati nella costruzione moderna, così anche gli speroni, uno dei quali fu tagliato per realizzare una porta attraverso cui passavano delle scale. Evidentemente la scansione della struttura antica definiva anche l'articolazione per ambienti interna all'edificio 3. All'altezza del pianterreno si vedono i segni di alcuni tramezzi, per cui anche questo livello era diviso in più stanze. Al di sopra del passaggio che immette nell'Aula Ovest, sotto l'arcone superstite si vede una porta che appare ostruita. Non sembra che questa garantisse il passaggio dall'edificio 3 al 2, perché segni non se ne vedono sul prospetto interno settentrionale. Forse si trattava di un altro piccolo locale scavato nello spessore del muro.

Il muro S all'esterno presenta i segni della scansione in più piani dell'edificio 4 e le tracce che un piccolo ambiente era stato ricavato nello spessore del muro antico al pianterreno. Le evidenze architettoniche al di sotto di questa quota (10-12 m) sono pertinenti agli Horrea Agrippiana e devono considerarsi interrati al tempo in cui il magazzino 4 era stato costruito.

Per finire, il muro esterno E, che corrisponde alle pareti del cosiddetto Atrio di Santa Maria Antiqua (o Aula Est) e della chiesa stessa, non fu mai di appoggio per costruzioni come granai e fienili, bensì di alcune strutture retrostanti alla chiesa di Santa Maria Liberatrice. Sopra la porta di comunicazione



Fig. 4 – Screenshot del database (Adobe Lightroom) per le immagini che riproducono l'isolato annonario al Complesso di Domiziano (elaborazione F. Sommaini).

con l'edificio 2 interno all'Aula Ovest stava una specie di tettoia o una piccola struttura, attaccata a un edificio collegato alla chiesa che aveva funzione forse di sacrestia.

### 3.3 *Fonti iconografiche*

Per questo genere di architetture umili le fonti scritte sono spesso carenti. Di contro, questo settore sud-orientale, trovandosi a ridosso dei principali monumenti del Foro Romano, a partire dal Rinascimento fu sempre inserito in molte rappresentazioni (disegni, dipinti, stampe e poi fotografie). Le casupole adibite a granaio o fienile compaiono frequentemente anche se di rado sono il soggetto principale della rappresentazione. Le immagini sono state reperite dall'Archivio del Museo di Roma di Palazzo Braschi, dall'Archivio cartografico e fotografico del Parco Archeologico del Colosseo, dal Rodolfo Lanciani Archive, dall'Archivio on line dell'American Academy of Rome e da quello dell'ICCD, oltre che consultando l'edito e alcuni siti online che raccolgono soprattutto materiale fotografico. Il lotto di immagini consta di circa 200 oggetti, da alcuni anni prima della costruzione del primo granaio fino a poco tempo dopo la demolizione dei magazzini e della chiesa di Santa Maria Liberatrice.

L'organizzazione di questi materiali in un database ha consentito di seguire l'evoluzione negli anni del complesso annonario. Per la costruzione

del database, la scelta è ricaduta sul software Adobe Lightroom, per una serie di ragioni. Molte delle immagini mostrano solo secondariamente l'isolato sud-orientale del Foro Romano, perciò è stato necessario modificare le inquadrature e le impostazioni dei file attraverso Adobe Photoshop (che a Lightroom è collegato). In un caso si disponeva dell'immagine in negativo di una fotografia storica, i cui parametri di luce andavano ribaltati. Inoltre, il programma ha un'interfaccia semplice e intuitiva che consente di organizzare i dati in maniera continuativa secondo cronologie assegnate (Fig. 4). Altri dettagli di natura tecnica (modalità di esecuzione, supporto, luogo di conservazione) non sono stati ritenuti necessari per questa fase della ricerca, ma sono in corso di inserimento. Al termine del caricamento delle immagini, si è potuto seguire negli anni lo sviluppo di questo settore del Campo Vaccino: la costruzione del primo granaio alla fine del Cinquecento (almeno dal 1593); la realizzazione della chiesa barocca e dei rimanenti magazzini (1618-1630); il primo scavo di Santa Maria Antiqua (1702); il rinforzo della facciata dell'edificio 3 con alcuni contrafforti (1727); la costruzione della casa riservata al rettore di Santa Maria Liberatrice (1728); la nascita di botteghe e officine al pianterreno dei magazzini; il rimpicciolimento del cortile O della chiesa (1871); la demolizione dei granai e dei fienili fino alla distruzione di Santa Maria Liberatrice (1884-85 e 1900); i restauri delle pareti laterizie (anni '10, anni '50-60, anni '90).

Complessivamente l'agglomerato dei magazzini viene riprodotto da ogni angolatura, fatta eccezione per il fronte esterno da S che rimane quasi del tutto sconosciuto (tuttavia, un singolo disegno di Aloisio Giovannoli fornisce alcuni dettagli significativi ed è attualmente in fase di studio e di pubblicazione). Un altro punto d'ombra è rappresentato dal cortile interposto tra gli edifici 1 e 2, visibile solo dall'esterno o in vedute precedenti alla costruzione dell'intero complesso annonario. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, si possono desumere informazioni sull'aspetto delle casupole, come la scansione esterna, il colore degli edifici, la forma dei tetti o l'atmosfera dell'intero isolato.

#### 4. DAL MODELLO 3D ALLA RICOSTRUZIONE PITTORICA

Negli ultimi trent'anni, il proliferare delle ricostruzioni archeologiche, realizzate con il crescente, variegato e sempre più avanzato uso della computer graphics, ha palesato la necessità di un controllo critico su questi prodotti. Gli studiosi si sono dati alcune regole in termini di trasparenza e riconoscibilità sia delle fonti impiegate per la ricostruzione, sia delle metodologie ricostruttive adottate. Il fine deve essere quello di garantire il valore scientifico dei modelli sviluppati e assicurare la sincerità del messaggio anche all'attenzione del vasto pubblico (BRIENZA, CARLANI 2016, 105-106). Perciò è necessario azzerare, o almeno limitare, la distanza ancor presente tra le ricostruzioni, proposte

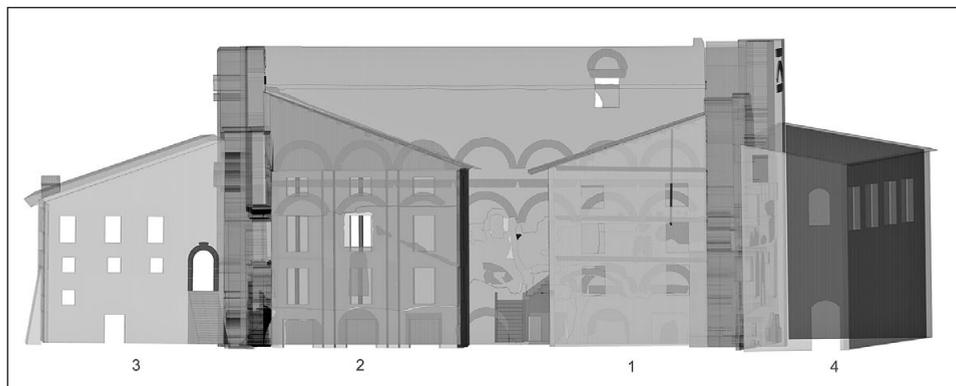


Fig. 5 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: modello 3D ricostruttivo dell’isolato anonario (AutoCAD 3D) (elaborazione F. Sommaini).

dagli specialisti e circolanti negli ambienti accademici, e quelle “irrazionali” – ossia non basate sulla ricerca scientifica – ingiustamente concepite ad uso e consumo di visitatori e turisti (MANACORDA 2008, 234-235).

Il lavoro di ricostruzione per i magazzini al Complesso di Domiziano ha avuto inizio dalle operazioni conclusive di rilievo, ossia dal disegno dei prospetti in ambiente AutoCAD per ottenere dei grafici stone by stone (Fig. 3). Già da questo disegno si è potuto desumere molto riguardo ai vecchi magazzini, come le misure dei tetti e la scansione dei diversi piani, oltre che altri dettagli sulla distribuzione interna degli spazi (tramezzi e porte di comunicazione).

Le informazioni più importanti sono state messe in evidenza e i singoli prospetti dell’Aula Ovest sono stati montati in ambiente AutoCAD 3D. Si è ricostruito così in tre dimensioni il contesto di rovine odierno, usando il comando “estrudo” e altri strumenti. La scelta di utilizzare AutoCAD per la modellazione 3D è legata a due considerazioni. Innanzitutto, questo stesso programma era stato impiegato per realizzare la pianta e i prospetti stone-by-stone dell’Aula Ovest, che costituiscono per l’archeologo i documenti essenziali per formulare un’ipotesi ricostruttiva. Analogamente, AutoCAD 3D muove dagli stessi principi di base utilizzando questi prodotti per realizzare un modello tridimensionale. In secondo luogo, AutoCAD permette di mantenere il controllo sul dato metrico della rappresentazione e in questa sede è sembrato prioritario evitare ricostruzioni arbitrarie (GABELLONE 2021, 213-217).

Per modellare le strutture dei magazzini si sono utilizzate le immagini zenitali del Catasto Pio-Gregoriano (1816-1835) per disporre dei dati planimetrici fondamentali. Così, i prospetti “estrusi” dell’Aula Ovest sono stati montati sulla pianta del Catasto ottenendo come informazione immediata l’invaso degli edifici moderni rispetto ai muraglioni antichi. Da qui, si è cominciato

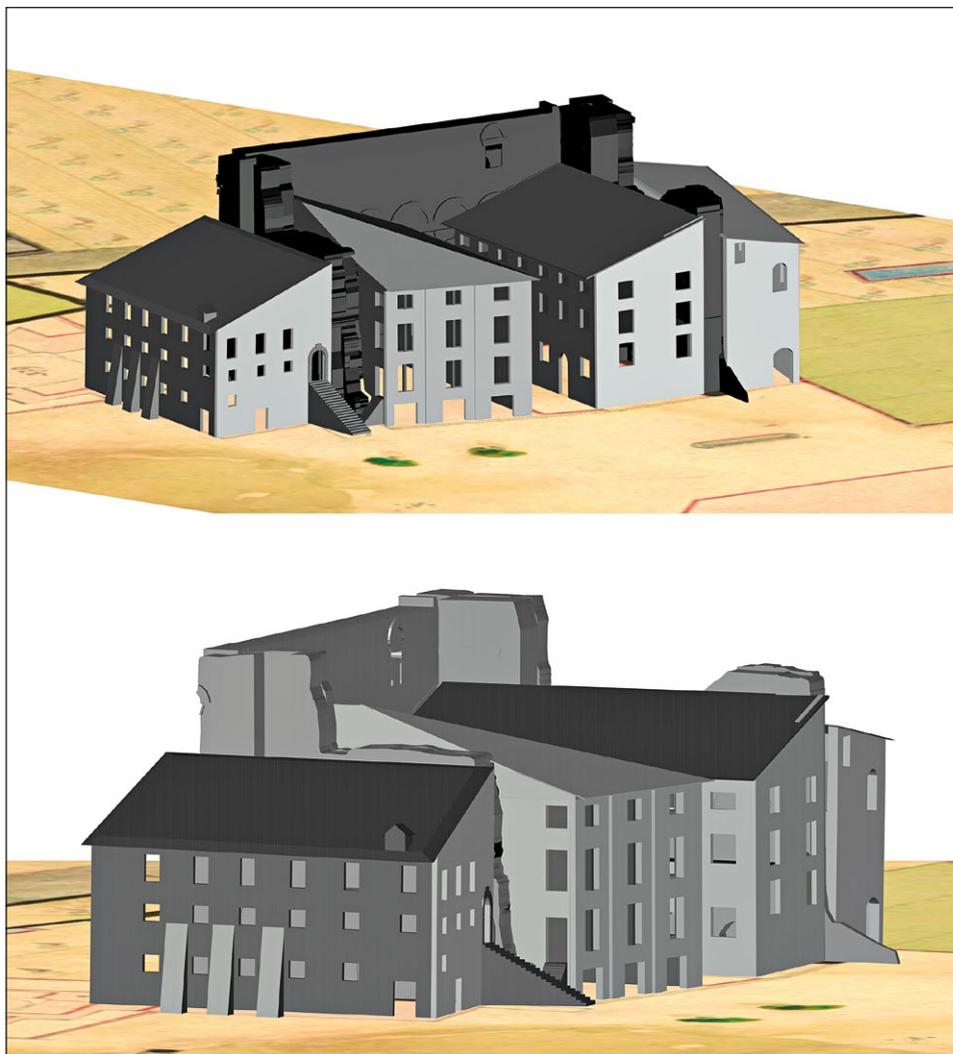


Fig. 6 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: modelli 3D ricostruttivi dell'isolato anonario montati sulla planimetria del Catasto Pio-Gregoriano (AutoCAD 3D) (elaborazione F. Sommaini).

a disegnare i diversi corpi di fabbrica mettendo insieme le informazioni in negativo visibili sulle pareti e quelle desumibili dalle immagini del database (Fig. 5). Il risultato è un modello tridimensionale, la cui caratterizzazione preliminare è stata minima, così da poterlo considerare valido per l'intera fase storica del Complesso di Domiziano come isolato anonario (Fig. 6).

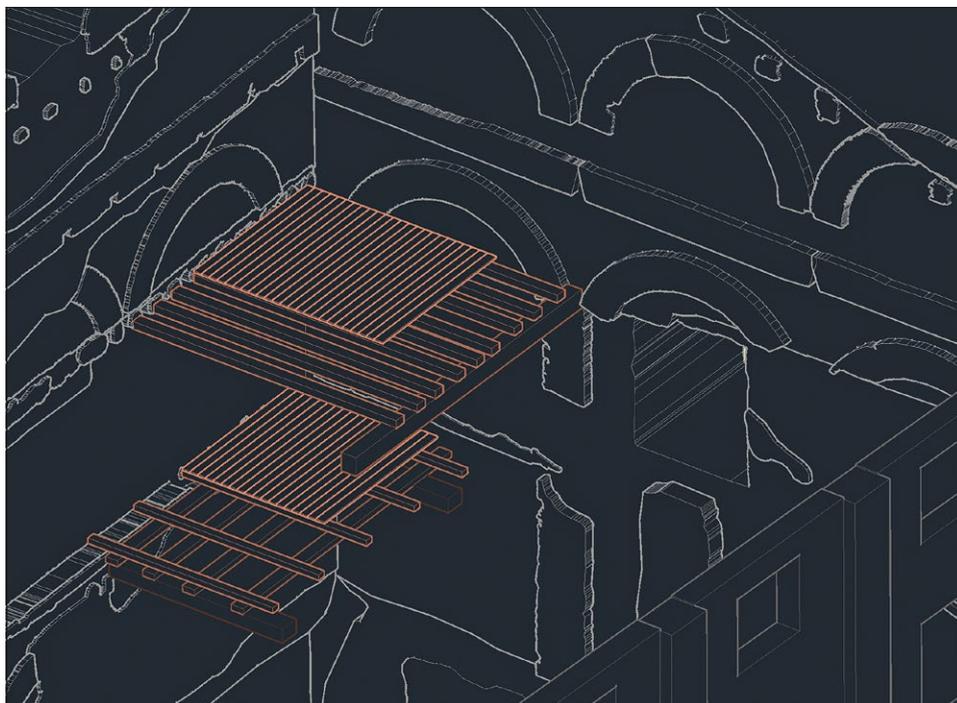


Fig. 7 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: modello 3D ricostruttivo del sistema dei solai per l'edificio 1 (AutoCAD 3D) (elaborazione F. Sommaini).

In più, tra i software di modellazione tridimensionale AutoCAD 3D non è forse il più consigliabile per la produzione di rendering naturalistici. Però, rispetto a una delle immagini storiche, anche la più dettagliata, il modello 3D conserva maggiori informazioni, fornendo visioni multiple e immediate con dettagli ipotetici ma verosimili come la scansione interna dei piani e la ricostruzione dei percorsi negli ambienti dei magazzini. Inoltre, la costruzione virtuale di ciascun edificio ha permesso di chiarire alcuni elementi tecnici sulla fattibilità delle ipotesi ricostruttive, come l'innesto dei tetti a falda (edifici 1 e 2), la copertura di ambienti a pianta irregolare (edificio 2 e 4), la relazione fisica tra questi magazzini, la composizione dei solai in travi e travetti (Fig. 7).

Come passaggio ulteriore, si è proseguito alla realizzazione di modelli di ricostruzione più connotati e persuasivi, per soddisfare le esigenze comunicative ad ogni livello di pubblico. Infatti, il freddo scheletro dell'edificio non è sufficiente a trasmettere l'idea e il senso di un contesto storico perduto, né può definirsi una ricostruzione verosimile. Questa ricostruzione in stile monocromo – per così dire total white – rielabora l'immagine sotto canoni stilistici



Fig. 8 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: modelli 3D ricostruttivi dell'isolato annonario (Blender) (elaborazione F. Sommaini).

essenziali ma anche minimalisti e risulta influenzata dal gusto e dall'estetica moderna. Si è allora proceduto a una forma ulteriore di interpretazione, per fornire connotazioni qualitative come i colori e i materiali, e inserire arredi, figure umane e altri dati ambientali. Del resto, una realtà storica interpretata, seppur ipotetica, di sicuro non è meno mistificante della ricostruzione asettica e "da laboratorio" che è utile per comunicare le forme e la meccanica delle architetture. Ciò non è infatti sufficiente per trasmettere l'atmosfera storica di un contesto antico, medievale o moderno. La ricostruzione, invece, deve convincere e comunicare, non per questo però ingannare o illudere. Dunque, aumentare il livello interpretativo è legittimo quando si fonda su ricerche storiche rigorose.

Il modello AutoCAD 3D (.dwg) è stato esportato nel software CAD Exchanger (.3DX) e da qui si è passati a Blender (ZAMBRUNO *et al.* 2013, 371-377). Questo programma di modellazione e computer graphics open source è al momento tra i più utilizzati per ricostruzioni architettoniche più connotate dal punto di vista materico e cromatico. Il modello 3D non è stato dunque modificato né volumetricamente né plasticamente, ma solo nelle modalità di visualizzazione. Inoltre, in Blender il modello può essere esplorato e osservato sfruttando diverse texture da diversi punti di vista, con un risultato più gradevole rispetto a quello generato da AutoCAD 3D (Fig. 8).



Fig. 9 – Roma, Foro Romano-Palatino: tavola ricostruttiva ad acquarello e matita dell'isolato annuario e Santa Maria Liberatrice (disegno M.V. Soracco; elaborazione M.V. Soracco, F. Sommains).

Come approdo finale, si è scelto di realizzare una tavola ricostruttiva in stile “realistico”, con fine sia scientifico che divulgativo (MEDRI 2003, 205). Sono stati impiegati strumenti più tradizionali, la matita e l’acquerello, con una finale revisione in ambiente informatico (Adobe Photoshop). La resa di questo tipo di prodotti rimane ancora oggi tra le più convincenti, frutto della collaborazione interdisciplinare tra l’illustratore e l’archeologo, in questo caso l’artista Maria Vittoria Soracco (Accademia delle Belle Arti di Roma) e chi scrive (BACCI *et al.* 2010, 63-67). Il modello di riferimento è quello reso molto popolare nei settori dell’archeologia e della museografia italiana dallo studio di Firenze Inklink, a cui si devono, ad esempio, le ricostruzioni dei Fori Imperiali, del Museo della Crypta Balbi, la nuova pannellistica del Parco Archeologico di Ostia Antica e molto altro.

La realizzazione della tavola ricostruttiva pittorica ha richiesto l’utilizzo di diverse fonti – architettoniche, archeologiche, iconografiche e storiche – utili alla ricomposizione di un contesto perduto. L’utilizzo rigoroso di questi

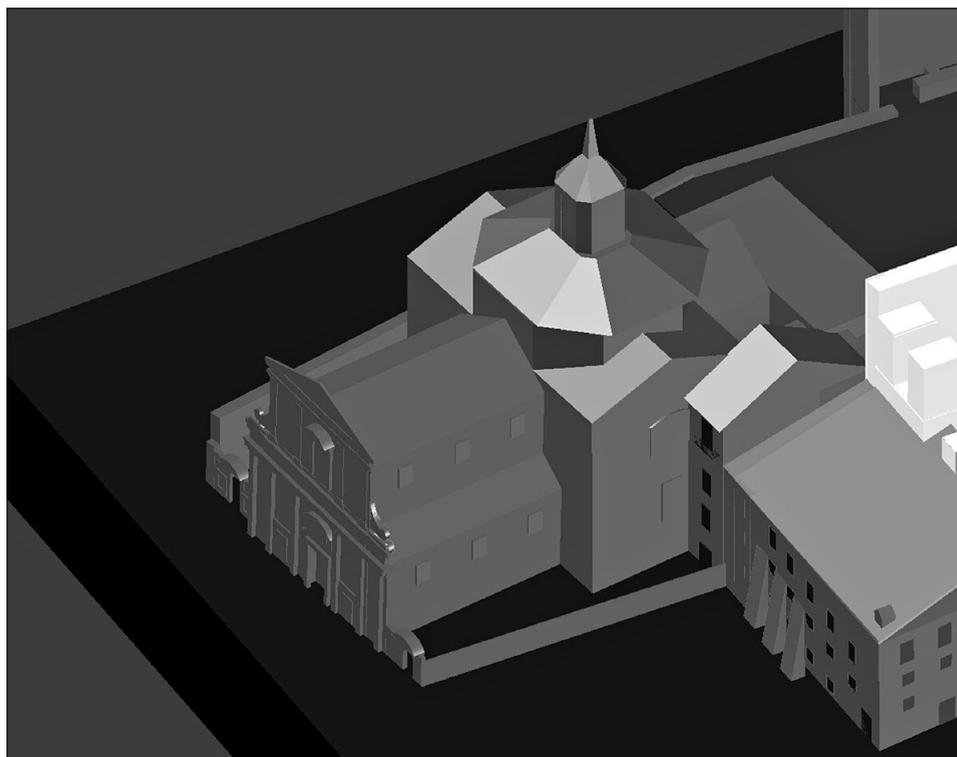


Fig. 10 – Roma, Foro Romano-Palatino, Aula Ovest: modello 3D ricostruttivo di Santa Maria Liberatrice (AutoCAD 3D) (elaborazione F. Sommaini).

materiali legittima l'operazione interpretativa di ricostruzione non soltanto del monumento e delle architetture ma anche dell'atmosfera storica che li circondava (MANACORDA, PELLECCI 2012, 7). Bisognava scegliere il momento esatto da voler riprodurre per una fase storica che, sebbene unitaria, ha visto cambiamenti evidenti. Non si trattava dunque di un modello generico dell'isolato annonario, bensì di un brano di realtà da rappresentare, prendendo a riferimento l'ultima fase di questi magazzini, per la quale la presenza di fonti fotografiche è stata ritenuta di grande utilità.

Da questi presupposti, si è costruita la tavola ad acquerello e matita che ripropone un'interpretazione dell'intero isolato nella seconda metà del XIX secolo (Fig. 9). Lo strumento fondamentale per il disegno dei magazzini è stato proprio il modello 3D, che ha fornito le informazioni basilari sulla forma e la dimensione degli edifici. Il repertorio di immagini storiche, dai dipinti alle fotografie, ha permesso di comprendere meglio i dettagli dei materiali dei singoli elementi architettonici e dunque il loro colore, le murature e gli intonaci. Di particolare rilevanza è stata l'immagine *Granari al Palatino*, conservata in originale presso l'Archivio del Museo di Roma di Palazzo Braschi (Fig. 1, in alto) e recentemente esposta nella sua lastra in negativo alla mostra *Roma nella camera oscura. Fotografie della città dall'Ottocento a oggi* (27/03-22/09/2019, Museo di Roma). L'immagine mostra frontalmente gli edifici 1 e 2, il fontanile abbeveratoio per animali, cavalli e cocchieri, fieno ammucciato vicino a dei carri e le insegne di diverse attività commerciali sorte al pianterreno dei magazzini: "A. Pascucci. Falegname, ebanista" e "Luigi del Grande verniciario 57. Spaccio di vino". Questi elementi sono stati inseriti all'interno della rappresentazione ad acquerello. Altri dettagli caratterizzanti sono stati tratti liberamente da altre foto storiche, come *Archeologi al Foro Romano*, *Buoi al Campo Vaccino* e altre. I dati cromatici, invece, si sono reperiti dalla vasta collezione di acquerelli e dipinti realizzati tra il XVII e il XIX secolo.

Come si vede dalla tavola ricostruttiva, sono parte della composizione anche la chiesa di Santa Maria Liberatrice e l'orto con frutteto retrostante. Per l'edificio ecclesiastico non è stato necessario portare avanti una ricerca simile a quella relativa ai granai e fienili, dal momento che uno studio era stato già eseguito per la mostra di Roma *La Rampa imperiale* e pubblicato nell'omonimo catalogo (FORTINI, MEZZELLA 2015, 199-206). Inoltre, trattandosi di un'architettura significativa, la documentazione d'archivio e altri lavori editi forniscono sia studi sull'edificio, che piante, prospetti e rilievi. Alcuni disegni recuperati dal Rodolfo Lanciani Archive e i rilievi pubblicati da John Henry Parker hanno fornito le basi per la realizzazione di un ulteriore modello 3D (AutoCAD), con metodologia simile a quella illustrata finora, che ha costituito il punto di riferimento nella composizione della tavola (Fig. 10). Per l'orto alle spalle della chiesa, invece, le informazioni sono scarsissime e le fonti iconografiche pressoché assenti. Dunque, il grado di ricostruzione è altamente ipotetico,

basato soltanto su documenti di archivio e altri testi scritti che menzionano l'area ortiva e l'agrumeto presso Santa Maria Liberatrice. Al tempo degli scavi di Giacomo Boni il giardino doveva essere particolarmente rigoglioso se si valutò la ricollocazione degli stessi alberi in altri luoghi della città storica.

## 5. CONCLUSIONI

Il risultato finale è un prodotto dall'aspetto tradizionale ma dallo spiccato senso persuasivo e accattivante (Fig. 9). L'immagine riproposta è stata costruita riflettendo su ogni minimo aspetto, le strutture architettoniche sono state ricostruite filologicamente e con dovizia di particolari ogni volta che è stato possibile. Gli elementi accessori, come personaggi e arredi, pur essendo arbitrari, sono stati ispirati da fonti iconografiche contemporanee alla realtà storica che si stava rappresentando. L'elemento puramente ipotetico della composizione è stato limitato il più possibile, ma fondato sempre sui dati della ricerca storica.

Il caso di studio dei magazzini al Complesso di Domiziano illustra compiutamente il percorso scientifico all'origine di una ipotesi ricostruttiva – dallo studio del mattone al pc al disegno manuale – espressa attraverso metodi innovativi (computer graphics) e tradizionali (matita e acquerello). I prodotti ottenuti si prestano ad essere interrogati scientificamente, ma anche ad essere adoperati con funzione illustrativa e didascalica in quanto sono a disposizione di ogni tipo di pubblico.

FABRIZIO SOMMAINI

Brandenburgische Technische Universität

Cottbus-Senftenberg

Humboldt Universität zu Berlin

Fabrizio.Sommaini@b-tu.de

## BIBLIOGRAFIA

- ANGELINI A., GABRIELLI R. 2013, *Laser scanning e photo scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici ed archeologici*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 379-394 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/21\\_Angelini\\_Gabrielli.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/21_Angelini_Gabrielli.pdf)).
- AYÁN VILA X.M., BLANCO ROTEVA R., MAÑANA BORRAZÁS P. 2003, *Archaeotecture: Archaeology of Architecture*, Oxford, Archaeopress.
- BACCI E., BONI S., CANONICI T., DA POZZO V., RABATTI A. 2010, *L'utilizzo della ricostruzione nella comunicazione del patrimonio archeologico. L'approccio, il metodo, le finalità e alcuni spunti di discussione*, «Virtual Archaeology Review», 1.2, 63-67.
- BIANCONI F., FILIPPUCCI M. 2019, *La fotomodellazione per il rilievo archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 205-228 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.13>).
- BOATO A. 2008, *L'archeologia in architettura*, Venezia, Marsilio.
- BRIENZA E., CARLANI R. 2015, *Information and Communication Technology per la ricostruzione virtuale delle architetture e dei paesaggi antichi finalizzata alla valorizzazione e al restauro*, «Geologia dell'Ambiente», 2, 105-110.

- BUKOWIECKI E., VOLPE R., WULF-RHEIDT U. (eds.) 2015, *Archeologia dell'Architettura XXL. Il laterizio nei cantieri imperiali. Roma e il Mediterraneo. Atti del I workshop (Roma 2014)*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 213-219.
- CARANDINI A. 2017, *La forza del contesto*, Bari-Roma, Laterza, edizione digitale.
- DA GAI E. 2008, *Struttura e tipo edilizio dei granari dell'Annona a Roma (1575-1705)*, in «Mélanges de l'École française de Rome. Italie et Méditerranée», 120.2, 595-606 ([https://www.persee.fr/doc/mefr\\_1123-9891\\_2008\\_num\\_120\\_2\\_10567](https://www.persee.fr/doc/mefr_1123-9891_2008_num_120_2_10567)).
- DE FELICE G., CAMERIANO A., PAVONE R. 2021, *Archeologia virtuale del passato contemporaneo. Dal rilievo alla ricostruzione digitale del Campo PG 65 di Altamura (BA)*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 195-212 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.11>).
- DEL PRETE F. 2002, *Il fondo fotografico del piano regolatore del 1883*, Roma, Gangemi.
- DELAINE J. 2008, *Conclusions*, in S. CAMPOREALE, H. DESSALES, A. PIZZO (eds.), *Arqueología de la construcción, 1. Los procesos constructivos en el mundo romano: Italia y provincias occidentales*, «Archeologia Española de Arqueología», Suppl. 50, 321-328.
- DJINDJIAN F. 2019, *Archaeology and computers: A long story in the making of modern archaeology*, in P. MOSCATI (ed.), *30 anni di Archeologia e Calcolatori. Tra memoria e progettualità*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 13-20 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.02>).
- FERDANI D., DEMETRESCU E., D'ANNIBALE E. 2017, *Prima Torre. Verso nuovi orizzonti di ricerca e valorizzazione del patrimonio medievale*, in G. ALLEGRETTI (ed.), *Città di San Marino*, Storia dei castelli della Repubblica di san Marino, IX, 169-177.
- FORTE M. 2017, *Comunicazione archeologica*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di archeologia*, Roma-Bari, Laterza, edizione digitale, 126-133.
- FORTINI P., MEZZELLA M. 2015, *La ri-costruzione di Santa Maria Liberatrice. Il modello 3D della chiesa e dei monumenti correlati*, in P. FORTINI (ed.), *La rampa imperiale. Scavi e restauri tra Foro Romano e Palatino*, Milano, Electa, 199-206.
- GABELLONE F. 2021, *Principi e metodi dell'archeologia ricostruttiva. Dall'approccio filologico alla ricostruzione tipologica*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 213-232 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.12>).
- MANACORDA D. 2008, *Lezioni di Archeologia*, Roma-Bari, Laterza, 234-235.
- MANACORDA D., PELLECCHI S. 2012, *Le fornaci romane di Giancola (Brindisi)*, Bari, Edipuglia.
- MANACORDA D., SANTANGELI VALENZANI R. (eds.) 2011, *Il primo miglio della via Appia a Roma*, Roma, Edizioni Università degli Studi Roma Tre.
- MEDRI M. 2003, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Laterza.
- MEDRI M. 2017, *Disegno ricostruttivo*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di archeologia*, Roma-Bari, Laterza, edizione digitale, 219-225.
- PAKKANEN J. 2018, *Three-dimensional documentation of architecture and archaeology in the field. Combining intensive total station drawing and photogrammetry*, in A. BRYLSBAERT, V. KLINKENBERG, A. GUTIÉRREZ GARCIA-M, I. VIKATOU (eds.), *Constructing Monuments, Perceiving Monumentality & the Economics of Building. Theoretical and Methodological Approaches to the Built Environment*, Leiden, Sidestone Press, 117-140 (<https://www.sidestone.com/openaccess/9789088906961.pdf>).
- SANFILIPPO M. 1992, *La costruzione di una capitale 1870-1911*, Milano, Silvana.
- SOMMAINI F. 2019, *Il Complesso di Domiziano tra Foro Romano e Palatino. Storie cronologiche e strutture murarie dell'Aula Ovest*, «Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts. Römische Abteilung», 125, 219-255.
- SOMMAINI F., DI COLA V., ALBANO V. 2019, *L'Aula Ovest del Complesso di Domiziano tra Foro Romano e Palatino: metodologie a confronto per un rilievo XXL*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 251-272 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.15>).
- ZAMBRUNO S., VAZZANA A., BUTI L., ORLANDI M. 2013, *Cloud computing e fotomodellazione come integrazione della modellazione 3D per l'Architettura storica. La chiesa di San Giovanni Evangelista in Ravenna*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 371-377 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/20\\_Zambruno\\_et\\_al.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/20_Zambruno_et_al.pdf)).

ABSTRACT

Nowadays, new surveying technologies and 3D modelling techniques allow high precision reconstructions of lost historical contexts. Indeed, in recent times, modern and broader perspectives of the archaeological research push to analyze post-ancient contexts with stratigraphic methods. The case of study concerns granaries and barns erected in the Early-modern age on the ancient ruins belonging to the Complex of the Emperor Domitian (Roman Forum-Palatine). At the end of 19<sup>th</sup> century, these modern structures were demolished. Now, significant traces on the ancient architectures (3D photogrammetry survey) and the large number of iconographic sources (organized in a digital database) give the possibility to reconstruct this block of vernacular buildings, with significant implications both on the scientific documentation and on the dissemination.

## RILIEVO, DOCUMENTAZIONE E RICOSTRUZIONE DI UN CENTRO MONUMENTALE CON FOTOGRAMMETRIA E MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALI: IL CASO DELLA CITTÀ ROMANA DI SALA

### 1. INTRODUZIONE

#### 1.1 *Il rilievo, l'analisi e la ricostruzione 3D di un centro monumentale nord africano*

Questo intervento descrive l'esperienza di rilievo e documentazione degli edifici che formano il centro monumentale della città romana di *Sala*, localizzata nei pressi di Rabat, capitale del Marocco, e anticamente parte della provincia romana di *Mauretania Tingitana*. La ricerca sul centro monumentale di *Sala* si è svolta nell'ambito di una tesi di Dottorato di Ricerca (Dottorato Regionale Toscano), ma si imposta su una tradizione di studi che vede l'Università di Siena impegnata da più di vent'anni nel territorio marocchino con ricerche a *Thamusida* (AKERRAZ *et al.* 2008, 2013; GLIOZZO *et al.* 2009), *Lixus* (MASCIONE *et al.* 2016), *Volubilis*, *Zilil* e *Sala*<sup>1</sup>, e si pone l'obiettivo di contribuire alla conoscenza della città antica tramite l'analisi degli edifici che lo formano.

La città è stata scavata negli anni '30 e tra il 1959 e il 1987 da équipes di ricerca francesi, le cui attività hanno riportato alla luce tutto ciò che è oggi visibile. Gli scavi francesi non sono stati però corredati da pubblicazioni esaustive su stratigrafie e ritrovamenti e su di esse, oggi, abbiamo notizie incomplete, spesso riguardanti solo ben determinate tipologie di reperti. Data la mancanza di dati precisi su stratigrafie e materiali, si è deciso di tentare un'interpretazione tramite gli strumenti offerti dall'Archeologia dell'Architettura e dall'Archeologia della Costruzione per tracciare un quadro dell'evoluzione costruttiva delle strutture e di quella urbanistica del quartiere. Gli edifici sono stati analizzati nei loro rapporti stratigrafici per delinearne l'evoluzione e le peculiarità costruttive e proporre una ricostruzione.

I nuovi dati derivanti dall'analisi sul campo sono stati inseriti in una piattaforma GIS, analizzati e combinati a quelli desumibili dalle pubblicazioni e, in alcuni casi, anche da documenti fotografici inediti realizzati dagli scavatori, conservati a Rabat (Photothèque de la Division du Patrimoine Culturel) e ad Aix-En-Provence (Fototeca del Centre Camille Jullian). L'approccio metodologico adottato si è rivelato utile ed efficace per la riuscita di questa ricerca,

<sup>1</sup> Le ricerche, ancora in corso, sono parte di un programma di cooperazione internazionale promosso dall'Agenzia Italiana per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico e il Ministero della Cultura del Marocco.

basata su missioni brevi e svolte in parte con un solo operatore e con risorse economiche limitate, dovute alla mancanza di una borsa di studio a sostenere le attività. Il lavoro di elaborazione, analisi e ricostruzione degli edifici ha potuto contare su una base topografica solida già impostata dall'equipe di Archeologia Classica dell'Università di Siena, grazie alla quale è stato possibile georeferenziare i prodotti del rilievo fotogrammetrico tridimensionale. Questi ultimi hanno costituito la base di tutte le analisi effettuate off-site, in particolare l'elaborazione di una o più ipotesi ricostruttive tridimensionali per le strutture di età romana e l'evoluzione urbanistica del quartiere.

## 1.2 *Il centro monumentale di Sala*

*Sala* sorge a ca. 3,5 km dall'estuario del fiume Bou Regreg, nei pressi della porta di Bab Zaer della cinta muraria almohade di Rabat, capitale del Marocco. L'insediamento si trova nei pressi del confine meridionale della provincia romana di *Mauretania Tingitana*, creata intorno al 42 d.C. dall'imperatore Claudio. L'abitato oggi visibile ha un'estensione di ca. 1,2 ha e si sviluppa lungo il pendio occidentale di una collina. All'interno della città convivono testimonianze risalenti a diverse epoche: la cinta muraria, datata all'età merinide, circonda sia i resti di una necropoli monumentale ad essa contemporanea, sia quelli del centro più antico, di età preromana, romana e tardoantica.

La conformazione del terreno ha influenzato l'organizzazione dell'abitato, che si articola su terrazzamenti digradanti verso la valle del fiume Bou Regreg, dove doveva trovarsi l'antico porto della città. I resti del centro antico (Fig. 1) comprendono soprattutto edifici di funzione pubblica, culturale e commerciale, organizzati intorno a una grande area lastricata, tradizionalmente ritenuta il decumano massimo della città. Su di essa affacciano gli edifici del centro monumentale, datati all'età preromana (edifici F e D e templi A, B e C), e all'età romana (*Capitolium*, arco a tre fornicati, un edificio con ninfeo monumentale, tradizionalmente noto come Basilica o *Curia Ulpia* e la piazza antistante il tempio A, considerata il foro). Un quartiere forse commerciale con ambienti a pianta rettangolare (complesso G) sorge immediatamente a N del *Capitolium*, lungo un decumano secondario, ed è affiancato a O da un distretto artigianale, con presse da olio e vasche mosaicate. A S del decumano massimo sorgono anche un impianto termale, costruito su strutture più antiche di non chiara identificazione, e a E di questo, a un livello inferiore rispetto alla piazza lastricata, una serie di ambienti giustapposti, interpretabili come botteghe. Il territorio circostante a *Sala* ospita anche delle necropoli, localizzate a N, S e O della cinta muraria. Il sito è stato indagato da gruppi di ricerca francesi, che hanno portato alla luce tutte le strutture che si possono vedere oggi. I primi scavi all'interno delle mura merinidi ebbero luogo nel 1929-30, sotto Jules Borély e Kadija Fouad Riaz Bey, su commissione del direttore del Service des Antiquités del Protettorato francese, Louis Chatelain.



Fig. 1 – Pianta del sito archeologico di *Sala* (in alto) e dettaglio con indicazione degli edifici che lo formano (in basso) (R. Pansini, UNISI).

Questi lavori portarono alla luce i monumenti di epoca islamica e alcuni di quelli romani (un edificio con ninfeo, l'edificio F, un arco onorario e parte di un complesso termale), ma non esistono rapporti o diari di scavo che registrino dettagliatamente queste attività e i ritrovamenti ad esse collegati (brevi riferimenti si trovano solo in resoconti successivi: cfr. CHATELAIN 1930a, 1944, 81-101). La seconda grande fase di scavi archeologici fu realizzata da Jean Boube durante un lungo periodo di tempo, dal 1958 al 1986. Grazie a questi lavori, furono scoperti gli altri edifici esistenti all'interno dell'antico quartiere civico: il *Capitolium*, il complesso a tre terrazze del Tempio A, l'edificio D, e i Templi/Edifici B-C. Purtroppo, come i suoi predecessori, Boube non ha pubblicato una sintesi completa delle sue ricerche<sup>2</sup>.

## 2. L'ANALISI DEGLI EDIFICI DEL CENTRO MONUMENTALE: LA METODOLOGIA D'INDAGINE

### 2.1 *La raccolta dei dati*

La raccolta dei dati per l'analisi degli edifici del centro monumentale di *Sala* si è svolta in tre missioni di circa 10 giorni ciascuna, avvenute tra il 2016 e il 2017. Occorre segnalare che i dati raccolti sul campo sono stati integrati con quelli già in possesso del Laboratorio di Archeologia Classica dell'Università degli Studi di Siena, comprendenti i rilievi topografici con DGPS e stazione totale e i rilievi fotogrammetrici degli edifici noti come Tempio A, Basilica/*Curia Ulpia*, Edificio D, Edificio F e arco a tre forni. Oltre a questo materiale, è stato possibile usufruire anche dei rilievi fotogrammetrici dei reperti statuari in marmo ritrovati durante gli scavi degli anni '30 e '60-'80 nell'area monumentale, custoditi al Museo Archeologico Nazionale di Rabat e nei magazzini del sito archeologico, e dei documenti della Phototheque de la Division du Patrimoine Culturel di Rabat. Questo materiale è stato raccolto durante una missione effettuata a *Sala* tra il 6 settembre e il 4 ottobre 2015, alla quale chi scrive ha partecipato attivamente insieme ai colleghi dell'equipe di Archeologia Classica dell'Università di Siena. Parte integrante di ognuna delle missioni è stata anche l'attività di schedatura delle strutture e delle Unità Stratigrafiche Murarie, registrate su apposite Schede di Archiviazione Veloce.

#### 2.1.1 Il rilievo topografico e la fotogrammetria tridimensionale

Il rilievo topografico del centro monumentale è stato realizzato previo posizionamento di due punti notevoli, localizzati sulle aree lastricate, la cui posizione è stata registrata tramite DGPS e successivamente convertita secondo

<sup>2</sup> Le pubblicazioni di Boube riguardano principalmente i reperti archeologici, in particolare la ceramica. Solo gli scavi nell'area della necropoli sono pubblicati in due volumi (BOUBE 1977, 1999). Riferimenti alle sue scoperte all'interno del centro civico si trovano sparsi in alcuni articoli: cfr. specialmente BOUBE 1966, 1967, 1990.

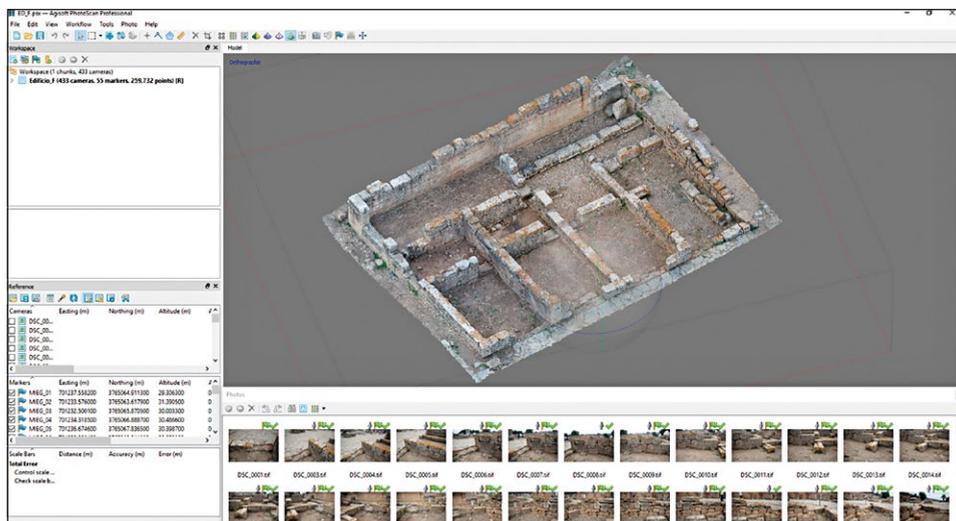


Fig. 2 – Esempio di elaborazione fotogrammetrica del modello 3D di un edificio (edificio F), realizzata in un'unica soluzione (R. Pansini, UNISI).

il sistema di riferimento WGS 84-UTM 29N (EPSG:32629). Il posizionamento dei due punti notevoli ha permesso di creare una base topografica georeferenziata su cui effettuare misurazioni tramite stazione totale. Il rilievo ha interessato tutti gli edifici del centro monumentale e ha previsto la registrazione di tutti i punti utili a ricostruirne la pianta e delle quote di conservazione delle strutture che li formano.

Al rilievo topografico è stato affiancato quello fotogrammetrico tridimensionale, che ha permesso di registrare la volumetria delle strutture e il loro aspetto materico tramite la realizzazione di numerose prese fotografiche, la cui elaborazione ha prodotto mesh tridimensionali texturizzate e georeferenziate. Esso è stato realizzato previo posizionamento sulle murature di marche topografiche, la cui posizione è stata misurata tramite stazione totale. Le prese fotografiche sono state realizzate da altezze e angolazioni differenti, con una successione di scatti che ha garantito che ciascuna immagine ritraesse almeno il 90% della superficie ritratta nello scatto precedente. La realizzazione dei modelli fotogrammetrici tridimensionali è avvenuta tramite il software apposito Agisoft Photoscan Professional, successivamente noto come Agisoft Metashape. A seconda dell'estensione e dell'articolazione dell'edificio, si è optato per la realizzazione di progetti fotogrammetrici unitari (per le strutture meno estese e articolate, che permettono di effettuare foto ben elaborabili e riconoscibili dal software, per esempio l'edificio F, Fig. 2) o in porzioni (per strutture più estese e articolate, divise in ambienti tra loro separati o con

salto di quota che non permettevano la realizzazione di un progetto unitario affidabile). Queste ultime, dopo l'elaborazione, sono state opportunamente allineate tramite i punti topografici e fuse tra loro, a formare una struttura unitaria.

L'approccio fotogrammetrico si è rivelato fondamentale per la buona riuscita del lavoro, basato su missioni brevi, durante le quali era necessario raccogliere il maggior numero possibile di informazioni. L'attività sul campo, una volta impostata la base topografica georeferenziata, non ha previsto l'utilizzo di attrezzature costose: una macchina fotografica e un monopiede estensibile fino a 3 m di altezza hanno, infatti, costituito gli strumenti di lavoro principali. Ciascuno degli edifici rilevati è stato ritratto in ogni sua angolazione, prevedendo delle prese che ritraessero le strutture in tutte le loro parti, sia verticali (elevati), sia orizzontali (creste). I modelli 3D ottenuti hanno un alto grado di qualità, sia in termini di precisione volumetrica (con un errore medio di circa 1,5 cm), sia per risoluzione fotografica. Questo ha permesso di verificare, anche off-site, le letture stratigrafiche realizzate sul campo, le misurazioni manuali degli spessori dei muri e degli elementi formanti la muratura, le osservazioni sulle tecniche edilizie utilizzate nelle costruzioni, e di produrre degli ortofotopiani geometricamente corretti sui quali digitalizzare le Unità Stratigrafiche Murarie individuate. I modelli fotogrammetrici in alta risoluzione costituiscono, così, delle rappresentazioni molto vicine alla realtà e allo stesso tempo dei contenitori di dati e informazioni, da utilizzare come veri e propri strumenti di lavoro e analisi e basi per l'attività di ricostruzione. Di contro, la realizzazione di modelli in alta risoluzione necessita di tempi di elaborazione piuttosto lunghi durante l'attività di laboratorio e di macchinari con elevata capacità di calcolo.

### 2.1.2 La registrazione delle informazioni

Come si è già anticipato, all'attività di rilievo si è affiancata quella di registrazione di tutte le caratteristiche delle murature. A questo scopo sono stati utilizzati dei modelli di scheda SAV (Scheda di Archiviazione Veloce), utili alla registrazione speditiva delle peculiarità dei paramenti. Ogni edificio è stato inoltre schedato nelle sue caratteristiche principali tramite un'altra scheda apposita (Scheda Edificio), che ne ha registrato: denominazione, stato di conservazione, forma, visibilità, limiti, numero di ambienti che formano la costruzione, numero dei corpi di fabbrica, funzione dell'edificio, tipologia, datazione, tecniche edilizie utilizzate nella costruzione.

## 2.2 *Lo studio degli archivi e dell'edito*

I dati raccolti durante le missioni sul campo sono stati combinati a quelli desumibili dalle pubblicazioni prodotte dai ricercatori che hanno lavorato a *Sala* e ai documenti d'archivio che è stato possibile reperire, costituiti da

album fotografici. Particolare attenzione è stata dedicata alla ricostruzione delle attività di scavo compiute da Jules Borély e Khadija Fouad e da Jean Boube. Come già accennato in precedenza, gli scavi Borély-Fouad non sono stati corredati da relazioni di scavo, né da pubblicazioni che descrivessero i lavori e i reperti individuati. La ricostruzione dell'estensione dell'area indagata, degli edifici scavati e di alcuni reperti rinvenuti è stata possibile grazie all'analisi dell'archivio fotografico della Division du Patrimoine Culturel di Rabat, che costituisce, ad oggi, la sola fonte di informazioni su queste attività. Per gli scavi di Jean Boube si dispone, invece, di alcune informazioni in più, desumibili dalle pubblicazioni redatte dall'archeologo nel corso del tempo. Queste, tuttavia, riguardano argomenti circoscritti (per esempio classi ceramiche, tecniche edilizie, monete) e contengono, a volte, solo fugaci riferimenti alle stratigrafie ritrovate. Solo in un caso, concernente gli scavi al di sotto della piazza del foro, abbiamo una descrizione più estesa della stratificazione rinvenuta (BOUBE 1962), mancante, tuttavia, di riferimenti puntuali ai reperti.

Le attività di restauro delle strutture, realizzate durante e subito dopo gli scavi di Boube, non sono state descritte dall'autore: di esse si hanno solo brevissimi riferimenti nelle *Chroniques* annuali pubblicate sul «Bulletin d'Archeologie Marocaine» (BEKKARI 1968-1972, 246-248). L'individuazione sul campo degli interventi di restauro si è rivelata particolarmente difficile in alcuni casi, nei quali le murature sono state completamente o parzialmente ricostruite secondo un principio imitativo, come avvenuto nel caso del Tempio A. A questa difficoltà hanno sopperito in parte i clichés della Photothèque del Centre Camille Jullian dell'Università di Aix-en-Provence e Marsiglia, costituiti da fotografie realizzate da Boube durante gli scavi della struttura. Le immagini, pur scattate spesso a grande distanza, ritraggono, infatti, le murature nel loro aspetto originario e permettono, quindi, di individuare gli elementi originali e distinguerli da quelli riferibili ai successivi interventi di conservazione. Pur costituendo un elemento importante, i dati desunti da pubblicazioni e archivi non sono sufficienti a risolvere tutte le criticità emerse durante l'analisi degli edifici. Per alcuni di essi, infatti, non si dispone di alcuna documentazione, né scritta, né fotografica, delle attività di scavo che le hanno messe in luce. La mancanza di informazioni sulle stratigrafie orizzontali impedisce inoltre di trovare conferme o smentite a ciò che sembra rivelare l'esame del costruito.

## 2.3 La gestione dei dati

### 2.3.1 La base di dati

Le informazioni raccolte durante le attività sul campo sono state immagazzinate in un database MS Access, strutturato secondo un modello già sperimentato in passato da chi scrive per l'analisi delle evidenze murarie del quartiere della pendice orientale della collina di *Lixus* (PANSINI 2012-2013). La base di dati è formata da quattro tabelle correlate: USM; Edificio; Fase

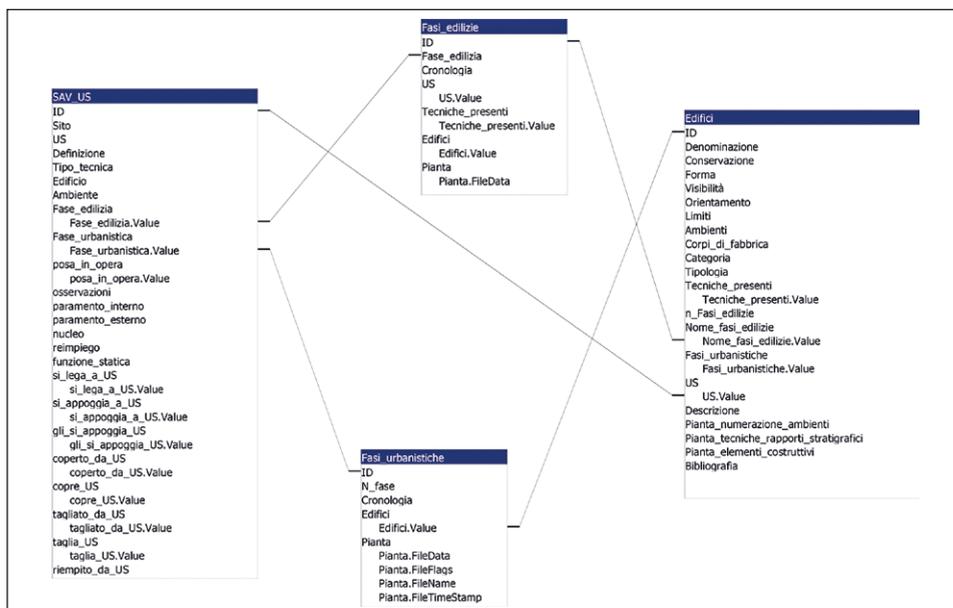


Fig. 3 – Schema delle relazioni dirette del DB MS Access realizzato per la registrazione dei dati (R. Pansini, UNISI).

edilizia; Fase urbanistica (Fig. 3). Le prime due tabelle ricalcano le schede SAV ed Edificio utilizzate sul campo, con l’aggiunta di alcuni campi utili a creare una relazione con le altre tabelle.

### 2.3.2 La piattaforma GIS

Successivamente all’immissione dei dati nel database si è proceduto alla costruzione di un Sistema Informativo Geografico dell’area di indagine tramite il software ArcGIS Pro. I fotopiani e i modelli 3D ottenuti dall’elaborazione fotogrammetrica sono stati utilizzati come base per la digitalizzazione delle USM dell’area. In particolare ciascuna delle unità è stata digitalizzata come poligono e associata al corrispettivo record nel database tramite una connessione OLE DB. L’alta risoluzione necessaria per le analisi di archeologia della costruzione determina che i file generati siano molto pesanti e quindi poco gestibili, sia dai software GIS, sia da quelli dedicati alla modellazione tridimensionale. L’inserimento dei modelli georeferenziati su GIS (Fig. 4), in particolare, ha richiesto l’attuazione di accorgimenti, che hanno previsto l’iniziale inserimento del modello in coordinate assolute e la sua sostituzione con uno in coordinate relative per ottimizzare la topologia e risolvere il problema di visualizzazione dei dati tridimensionali (DELL’UNTO *et al.* 2016; DELL’UNTO, LANDESCI 2022).

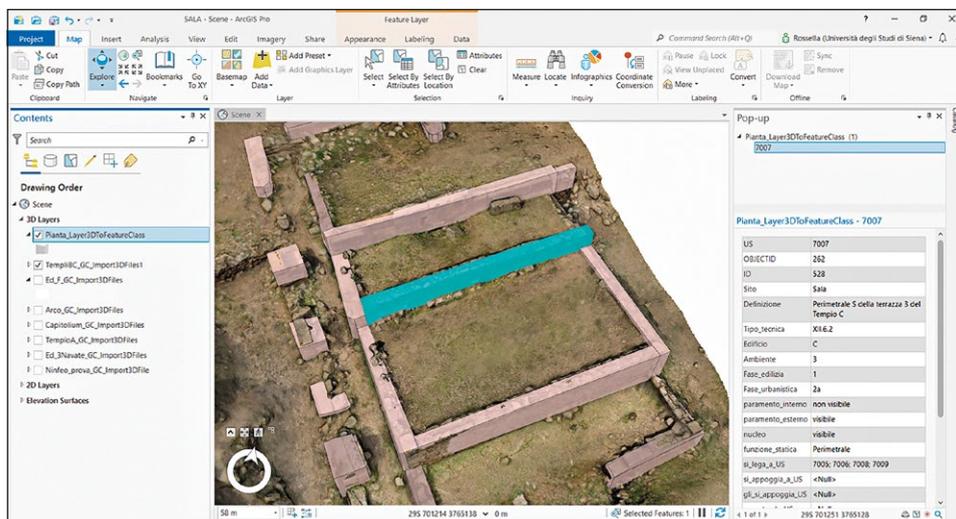


Fig. 4 – Esempio di visualizzazione dei dati digitalizzati all’interno del software ArcGIS Pro: la digitalizzazione delle US avviene direttamente sul modello fotogrammetrico; gli attributi immagazzinati nel DB MS Access sono visibili grazie alla connessione OLE DB (R. Pansini, UNISI).

## 2.4 La ricostruzione degli edifici

I rilievi topografici e fotogrammetrici, l’analisi stratigrafica degli elevati e la successiva fase d’interpretazione hanno portato a formulare delle ipotesi ricostruttive per gli edifici del centro monumentale di *Sala*, costituite da disegni bidimensionali e modelli tridimensionali delle strutture, realizzati con i software Autodesk Autocad (in 2D) e Blender (in 3D). Il grado di affidabilità di tali ipotesi (MASCHEK *et al.* 2009) dipende dallo stato di conservazione degli elevati e dalla disponibilità di materiali di archivio o di notizie di scavo che ne attestino le fattezze prima delle operazioni di restauro, oltre che dalle informazioni deducibili dall’analisi sul campo. Per ciascuno di questi edifici si è tentata una ricostruzione della pianta, degli elevati, degli apparati decorativi e delle coperture, tramite l’utilizzo di confronti con altre strutture di carattere pubblico e religioso del panorama africano in età preromana e romana. Oltre ai confronti, si è inoltre optato per l’utilizzo di testi specialistici e tecnici sull’architettura romana e delle fonti antiche, come il *De Architectura* di M. Vitruvio Pollione. L’analisi dei moduli costruttivi ha portato anche alla formulazione di alcune ipotesi sui progetti architettonici.

Queste considerazioni sono state possibili solo per gli edifici che presentano uno stato di conservazione tale da permettere la formulazione di ipotesi ricostruttive, o che siano corredati da informazioni sul loro aspetto al momento del ritrovamento. Come già detto, alcune strutture non sono associate

ad alcun dato, sono conservate solo a livello di rasatura o hanno subito dei restauri imitativi non documentati e non ben individuabili. In questi casi si è optato per una restituzione che ne definisce solo la dimensione planimetrica: una ricostruzione dettagliata di edifici non conservati e senza dati di scavo non troverebbe, infatti, alcun supporto scientifico.

In questo caso la modellazione 3D è stata utilizzata sia come strumento di verifica delle ipotesi ricostruttive realizzate in due dimensioni, sia come strumento di studio e analisi delle soluzioni costruttive adottate e del loro ruolo nella statica degli edifici. La commistione di tecniche edilizie differenti, ma riferibili allo stesso orizzonte cronologico, all'interno di uno stesso edificio è stato interpretato come una scelta costruttiva legata alla statica delle strutture e alla necessità di scaricare il peso in punti della muratura ben determinati, in modo da garantire la solidità della costruzione e la sua sopravvivenza nel tempo.

### 3. IL MONUMENTO CON NINFEO DI SALA: RACCOLTA, ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DEI DATI

#### 3.1 *Descrizione e storia delle ricerche*

Il monumento con ninfeo (Figg. 5-6) sorge sul lato S del decumano massimo, nei pressi della *Khalwa* islamica, ha una pianta rettangolare e si articola su due livelli: il primo si sviluppa ad una quota corrispondente a quella del decumano massimo, mentre il secondo comprende ambienti il cui piano di calpestio si sviluppa ca. m 5,60 più in basso, in corrispondenza del terrazzamento posto immediatamente più a S, lungo il versante della collina. Gli elevati del livello superiore sono quasi del tutto scomparsi, mentre quelli del piano inferiore, costruiti contro il taglio del terrazzamento, presentano un buon grado di conservazione. La struttura ha come fulcro un corpo centrale (ambiente 3), disposto al livello inferiore, che a sua volta si sviluppa in elevato su tre livelli sovrapposti. Nella parte bassa dell'ambiente si trova una vasca circolare di diametro m 5,54, altezza variabile tra m 0,72 e 0,74 e fondo degradante da O verso E. La porzione intermedia ha pianta ottagonale e dimensione più ampia rispetto alla vasca sottostante (diametro della circonferenza circoscritta di m 6,80 e altezza media di m 0,77); è edificata in *opus caementicium* con rivestimento in laterizi di forma triangolare.

In corrispondenza degli spigoli interni dell'ottagono si trovavano dei pilastri sporgenti in laterizi rettangolari con frammenti di rivestimento marmoreo, solo alcuni dei quali sono ancora conservati, mentre di altri è visibile la traccia della loro asportazione. Il livello più alto dell'ottagono, anch'esso in *opus caementicium* rivestito in laterizi, ha un'altezza compresa tra m 2,74 e 2,78, un'ampiezza maggiore rispetto al precedente (diametro della circonferenza circoscritta di m 7,02) e ospita su ciascuno dei suoi lati una nicchia semicircolare,

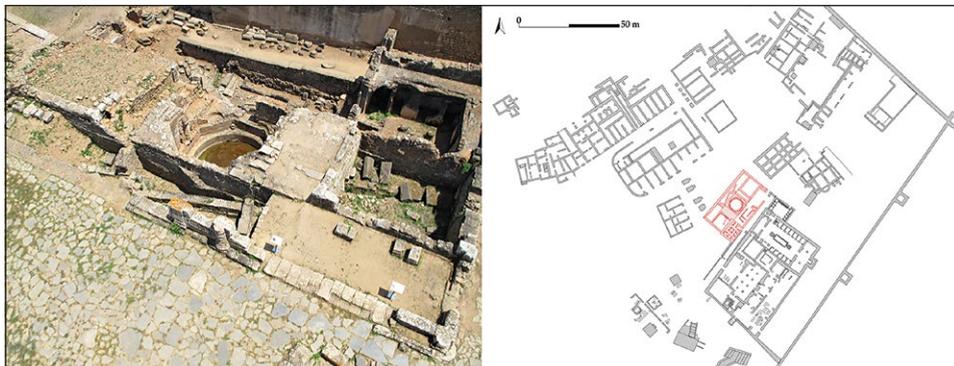


Fig. 5 – L'edificio con ninfeo di *Sala*: a sinistra, vista dal decumano (L. Passalacqua, UNISI) e, a destra, pianta con posizionamento rispetto agli altri edifici del centro monumentale (R. Pansini, UNISI).

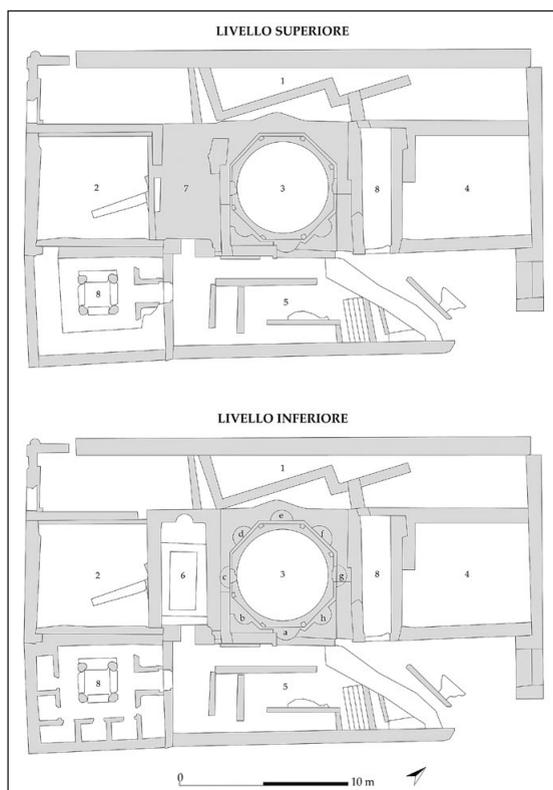


Fig. 6 – Edificio con ninfeo di *Sala*: pianta degli ambienti del livello superiore e inferiore (R. Pansini, UNISI).

con diametro medio di m 1,25. Delle otto nicchie, cinque, disposte sui lati E, N e O, sono conservate in elevato (nicchie c, d, e, f, g, altezza media di m 2,5) e presentano una volta a semicupola, mentre delle tre sul lato S rimangono solo le murature rasate (nicchie a, b, h). In corrispondenza della nicchia a si osservano dei fori per cardini, che dovevano inquadrare un'apertura (ampiezza: m 0,93) realizzata in una fase successiva a quella originaria.

La nicchia è sormontata da un architrave in marmo, che doveva costituire parte dell'apparato decorativo. La stessa nicchia, insieme a quella ad essa affrontata (nicchia g), è stata in parte asportata e successivamente obliterata da elementi in muratura, costituiti da blocchi in pietra sagomati a formare il fusto di una colonna, da ascrivere ad una fase successiva a quella originaria. I paramenti del terzo livello dell'ottagono presentano un rivestimento bianco, aggiunto in una fase più tarda rispetto alla costruzione.

Sulla terrazza superiore si trovano un corridoio rettangolare (ambiente 1) orientato SO-NE, lungo il lato del decumano massimo, e due aule laterali a pianta quasi quadrata, localizzate ai lati NE (ambiente 4) e SO (ambiente 2) del corpo centrale. Al di sotto del piano di calpestio dell'ambiente 1 sono presenti strutture in blocchi squadrati rivestiti da malta idraulica, pertinenti alla prima fase di vita dell'edificio. Una delle aule laterali (ambiente 2) è preceduta da un ingresso con tracce di rivestimento pavimentale in marmo (ambiente 7). L'ambiente 2 ospita sul fondo, a livello della terrazza inferiore, un canale alimentato da una vicina sorgente, che porta l'acqua in un bacino voltato (ambiente 6), localizzato al di sotto dell'ambiente 7, e successivamente all'interno del bacino ottagonale. Specularmente agli ambienti 6 e 7, sul lato NE, si trova un corridoio (ambiente 8), creato in una fase successiva a quella originaria. Lungo il lato SE l'edificio si affaccia su uno spazio aperto (ambiente 5) che ospita strutture molto degradate, forse identificabili come vasche di fontane, impostate su una pavimentazione in *opus spicatum* in quota con il fondo dell'ambiente 3, e i resti di una scalinata in pietra che ne permetteva l'accesso dal lato E.

La messa in luce dell'edificio risale agli anni '30 del XX secolo e si deve a Jules Borély e a Kadija Fouad Riaz Bey. Il ritrovamento durante gli scavi della base onoraria per *M. Sulpicius Felix*, datata al 144 d.C. e recante il testo di un decreto dei decurioni salensi riuniti nella *Curia Ulpia*, ne ha determinato l'identificazione con la *Curia* cittadina (CHATELAIN 1930, 1930-1931a, 1930-1931b, 1944, 94-99; GSELL *et al.* 1931; CARCOPINO 1943, 201-230; IAM Lat 307; IAM Lat Suppl. 307). La presenza dell'aggettivo *Ulpia* aveva inoltre spinto i ricercatori ad ipotizzare che *Sala* avesse acquisito lo statuto di *municipium* sotto l'imperatore Traiano (GSELL, CARCOPINO 1931). In realtà, come sottolinea Jacques Gascoy (1991, 152), l'aggettivo è da considerarsi come proprio dell'edificio e non della città e potrebbe testimoniare che la *Curia* sia stata edificata, ingrandita o abbellita grazie all'aiuto pecuniario dell'imperatore. Anche l'interpretazione stessa dell'edificio come *Curia* non

trova il favore generale della comunità scientifica: secondo Jean Charles Balty (1991, 125-126) la sua posizione topografica e la sua organizzazione interna non sarebbero compatibili con questa tipologia di struttura.

Lo scavo delle strutture localizzate al di sotto del corridoio di ingresso (ambiente 1) si deve, invece, all'attività di Jean Boube, da collocarsi tra il 1973 e il 1975 (HASSAR-BENSLIMANE 1976, 249-250). A Boube si deve anche l'ipotesi che il piano superiore dell'edificio sia da identificare come basilica (BOUBE 1997), ma non conosciamo le motivazioni di tale interpretazione. Recentemente l'edificio è stato oggetto di studio da parte di A. Ammar, che lo considera come un sistema di depurazione e distribuzione delle acque di carattere monumentale, composto da *castellum aquae*, bacino ottagonale, considerato un ninfeo monumentale con funzione di *piscina limaria* e fontane sul lato SE (AMMAR 2008). La stessa interpretazione è stata ripresa anche da altri studiosi, come Eliane LENOIR (2009, 64-65) e Nicolas LAMARE (2019, 296-298). L'edificio ha una continuità di utilizzo molto lunga, che si estende dall'età pre-romana fino a quella islamica e ha subito numerosi rimaneggiamenti finalizzati al cambiamento della sua destinazione d'uso. Oltre alle modifiche subite in età antica, esso è stata anche oggetto di interventi di restauro non documentati, che hanno compromesso la leggibilità di alcune sue parti o ne hanno eliminate altre.

### 3.2 *Il rilievo fotogrammetrico e la base GIS*

La struttura del monumento con ninfeo si presenta particolarmente articolata, con numerosi ambienti che si sviluppano su differenti quote assolute e con elevati conservati fino a 5 m di altezza. Questa articolazione non ha permesso la realizzazione di un rilievo unitario. Si è scelto, invece, di dividere la struttura in blocchi e di procedere successivamente all'allineamento delle singole parti tramite i punti topografici. Ciascuno dei blocchi è stato rilevato in tutte le sue dimensioni, con prese fotografiche a distanza, che ritraevano il blocco nella sua interezza e il suo rapporto con gli altri, facilitando la successiva fase di allineamento, e particolari, in modo da ritrarre tutte le peculiarità delle murature. Il modello fotogrammetrico è stato poi inserito all'interno di una piattaforma GIS, attraverso opportune operazioni che ne hanno ottimizzato la visualizzazione e la gestione. Una volta inserito all'interno della piattaforma, si è proceduto alla digitalizzazione delle unità stratigrafiche murarie come PolygonZ, e tra gli attributi è stato inserito il numero di US, utile per la successiva fase di collegamento alla base di dati già realizzata in MS Access tramite collegamento OLE DB.

### 3.3 *Le ricostruzioni tridimensionali*

I poligoni ottenuti dalla digitalizzazione delle USM sono stati poi tematizzati in modo da ottenere la rappresentazione delle fasi costruttive dell'edificio.

Quelle relative alla fase romana imperiale sono state poi esportate in formato shapefile e utilizzate nel programma Blender come base della ricostruzione 3D della struttura, insieme al modello fotogrammetrico dell'edificio. La ricostruzione degli elevati si è basata sugli elementi architettonici conservati lungo la facciata che affaccia sul decumano, ossia due basi, una di lesena e una di semicolonna, e un capitello angolare, riferibile allo spigolo nord-orientale del complesso, che presenta sia il capitello di semicolonna, sia il capitello di lesena, intagliati nello stesso blocco. Le proporzioni utilizzate per la determinazione dell'altezza dei fusti hanno seguito i principi classici di Vitruvio e i più recenti studi di Mark WILSON JONES (2006; 2009, 135-156; 221-225), che ha individuato come, a Roma e nelle province, vi siano particolarità regionali che rendono il canone classico molto più elastico di quanto non si sia pensato finora.

A partire dall'ampiezza della base del fusto di lesena, di m 0,596, è stata quindi elaborata una colonna di m 6,12, equivalente a 21 piedi o 12 cubiti, e quindi a 3 moduli costruttivi. Così facendo, ci si discosta dall'applicazione del canone vitruviano, che indica un rapporto di 1:10 tra la base del fusto e l'altezza dell'intera colonna, optando per un rapporto di 1:10.4. Applicando i principi vitruviani per la ricostruzione della trabeazione, di cui non esistono resti, essa risulta alta 3,5 piedi, ossia di  $\frac{1}{2}$  del modulo costruttivo utilizzato per la determinazione della pianta, ma equivale anche a 3 piedi punici di m 0,344.

A partire da questi dati sono state elaborate quattro ipotesi ricostruttive, influenzate dall'interpretazione funzionale dell'edificio, che rimane ancora materia di dibattito. Le prime tre ipotesi vedono il complesso come edificio di carattere culturale o come struttura polifunzionale religiosa e civile. Il ruolo del bacino centrale, in esse, sarebbe stato puramente estetico, oppure legato ad una forma di culto delle acque, data la presenza di una vicina sorgente. Sulla base delle tracce archeologiche rinvenute, che indicano la mancanza di un ingresso diretto, si può desumere che esso fosse fruibile dagli avventori solo tramite l'osservazione dall'alto.

La prima proposta ricostruttiva (Fig. 7, A) prevede una copertura del corridoio lungo il decumano con una terrazza, una a doppio spiovente per le aule laterali e uno spazio scoperto intorno al bacino ottagonale, delimitato da un parapetto utile all'affaccio da parte degli avventori. La seconda versione (Fig. 7, B) è una variante della prima e prevede un portico coperto a terrazza sviluppato su tre lati (SO, NO e NE) intorno al bacino, con pilastri a garantire la stabilità strutturale della copertura. La decorazione dei pilastri ricalca quella dell'esterno, con lesene e capitelli corinzi a foglie lisce. La terza ipotesi (Fig. 7, C) differisce dalla prima per la copertura a spiovente del corridoio lungo il decumano, che determina un'elevazione superiore delle due aule e quindi delle loro coperture.

La quarta ipotesi (Fig. 7, D), sicuramente più elaborata e problematica, prende le mosse da precedenti interpretazioni della struttura come sistema di

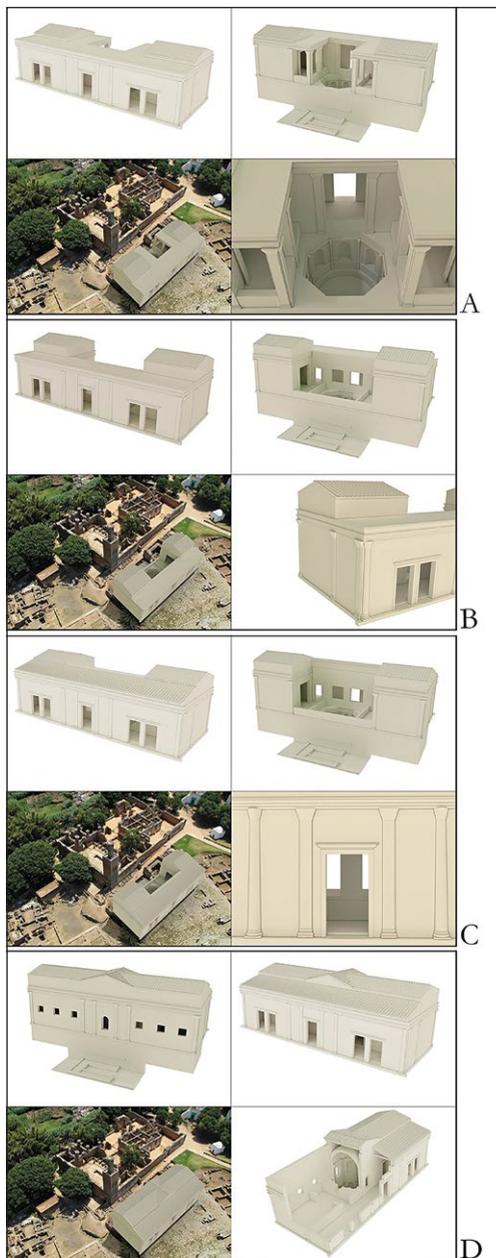


Fig. 7 – Edificio con ninfeo di *Sala*: le quattro proposte ricostruttive realizzate sulla base dei dati stratigrafici, strutturali e bibliografici (R. Pansini, UNISI).

depurazione e distribuzione delle acque di carattere monumentale, composto da *castellum aquae*, bacino ottagonale, considerato un ninfeo monumentale con funzione di *piscina limaria*, e fontane sul lato SE. Nel bacino, in particolare, l'acqua proveniente dalla sorgente doveva subire un ulteriore processo di depurazione, per poi passare tramite un sistema di troppo pieno nelle vasche all'esterno dell'edificio nell'area a S. Lungo la facciata SE dell'edificio, in effetti, sono presenti dei segni di asportazione di tubature che, forse, dovevano servire al rifornimento delle vasche. Le cavità sono oggi obliterate dai restauri della vasca circolare e non è possibile verificare se esse fossero davvero parte di questo sistema. Un foro per il troppo pieno obliterato si trova lungo il perimetro della vasca circolare, nei pressi della nicchia h, e potrebbe essere stato collegato ai tre fori localizzati lungo la facciata SE tramite *fistulae*, o ancora a una canalizzazione che da esso portava l'acqua ai quartieri circostanti.

Questa ipotesi prevede dunque che il bacino fosse completamente coperto, in modo da assicurare la protezione da possibili inquinamenti esterni dell'acqua di sorgente, che doveva essere utilizzata nelle fontane. Nel nostro caso la necessità di protezione dell'acqua determina che le murature dell'ottagono abbiano un'elevazione ben maggiore rispetto a quella oggi conservata e, di conseguenza, è possibile prevedere all'interno del bacino non uno, ma due ordini di nicchie sovrapposte, osservabili dagli avventori dall'alto tramite finestre. La copertura dell'area ottagonale, non priva di criticità, potrebbe essere stata con tetto a doppio spiovente. Sulla base dei confronti citati è anche possibile ipotizzare che essa fosse coperta con una volta ottagonale in laterizi, il cui sostegno sarebbe stato assicurato dalle quattro poderose angolate in cementizio del bacino.

L'analisi del costruito porta a considerare la quarta ipotesi come la meno verosimile, poiché prevede un impianto estremamente poderoso e articolato dal punto di vista strutturale e funzionale, che non trova alcuna conferma nei resti rinvenuti sul campo<sup>3</sup>. L'ipotesi più plausibile è quella che prevede che il bacino ottagonale fosse scoperto e che il suo rifornimento tramite il *castellum aquae* fosse indipendente da quello delle fontane della parte S. Il *castellum*, profondamente modificato durante l'età islamica, in età antica doveva probabilmente rifornire sia l'ottagono, sia le fontane tramite due sistemi di tubature separate, che garantivano che entrambi ricevessero acqua pulita.

ROSSELLA PANSINI

Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali  
Università degli Studi di Siena  
rossella.pansini@unisi.it

<sup>3</sup> Anche LAMARE 2019, 297-298 sottolinea che la copertura del bacino non è sicura.

### Ringraziamenti

Il permesso alla ricerca nei siti del Marocco è stato accordato dall'ex Direttore della divisione Patrimonio Culturale del Ministero della Cultura del Marocco, A. Alaoui, che desidero ringraziare. L'accesso ai singoli siti archeologici è stato possibile grazie alla grande disponibilità e alle autorizzazioni concesse dai Conservatori M. Ramdani (*Sala*), R. Arharbi (*Banasa*), M. Atki (*Volubilis*), M. Benhaddou (*Zilil*) e H. Hassini (*Lixus*), ai quali va il mio ringraziamento. Questa ricerca non sarebbe stata possibile senza la supervisione del Prof. Stefano Camporeale, l'aiuto dei colleghi del Laboratorio di Archeologia Classica dell'Università degli Studi di Siena L. Passalacqua, G. Carpentiero, C. Felici e L. Bigi e l'autorizzazione del Direttore Scientifico, Prof. Emanuele Papi.

### BIBLIOGRAFIA

- AKERRAZ A., CAMPOREALE S., PAPI E. (eds.) 2013, *Sidi Ali ben Ahmed - Thamusida, 3. I materiali*, Roma, Quasar.
- AKERRAZ A., PAPI E. (eds.) 2008, *Sidi Ali ben Ahmed - Thamusida, 1. I contesti*, Roma, Quasar.
- AMMAR H. 2008, *A propos du nymphée de Sala*, in J. GONZÁLEZ, P. RUGGERI, C. VISMARA, R. ZUCCA (eds.), *L'Africa romana. Le ricchezze dell'Africa. Risorse, produzioni, scambi. Atti del XVII Convegno di studio (Sevilla 2006)*, Roma, Carocci, 559-569.
- BALTY J.C. 1991, *Curia Ordinis. Recherches d'architecture et d'urbanisme antiques sur les curies provinciales du monde romain*, Bruxelles, Académie Royale de Belgique.
- BEKKARI M. 1968-1972, *L'archéologie marocaine en 1968 et 1969*, «Bulletin d'Archéologie Marocaine», 8, 241-248.
- BOUBE J. 1962, *Découvertes récentes à Sala Colonia (Chellah)*, «Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques», 141-145.
- BOUBE J. 1966, *Fouilles archéologiques à Sala*, «Hespéris-Tamuda», 7, 23-32.
- BOUBE J. 1967, *Documents d'architecture Maurétanienne au Maroc*, «Bulletin d'Archéologie Marocaine», 7, 263-367.
- BOUBE J. 1977, *Sala III, Les nécropoles, planches.*, Villes et sites archéologiques du Maroc (VESAM), ed. 1, Rabat, Musée des Antiquités.
- BOUBE J. 1990, *La dédicace du Capitole de Sala (Maroc) et la base honorifique de C. Hosidius Severus*, «Mélanges de l'École Française de Rome. Antiquité», 102, 213-246.
- BOUBE J. 1997, *Sala*, in *Enciclopedia dell'Arte Antica*, II Suppl. (1971-1994), Roma, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, 62-64.
- BOUBE J. 1999, *Les nécropoles de Sala*, Paris, Éditions Recherche sur les Civilisations.
- CARCOPINO J. 1943, *Le Maroc antique*, Paris, Librairie Gallimard.
- CHATELAIN L. 1930a, *Le forum de Sala*, «Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres», 74, 336-340.
- CHATELAIN L. 1930b, *La Ville romaine de Sala*, «Maroc», 22, 23-24.
- CHATELAIN L. 1930-1931a, *Inscriptions de Sala*, «Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques», 225-228.
- CHATELAIN L. 1930-1931b, *Inscriptions latines de Sala*, «Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques», 171-15.
- CHATELAIN L. 1944, *Le Maroc des Romains*, Paris, De Boccard.
- DELL'UNTO N., LANDESCHI G. 2022, *Archaeological 3D GIS*. London-New York, Routledge (<https://doi.org/10.4324/9781003034131>).

- DELL'UNTO N., LANDESCI G., LEANDER TOUATI A.-M., DELLEPIANE M., CALLIERI M., FERRANDI D. 2016, *Experiencing ancient buildings from a 3D GIS perspective: A case drawn from the Swedish Pompeii Project*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 23, 73-94 (<https://doi.org/10.1007/s10816-014-9226-7>).
- GASCOU J. 1991, *Hypothèse sur la création du municipe de Sala*, «Antiquités africaines», 27, 151-156.
- GLIOZZO E., TURBANTI MEMMI I., AKERRAZ A., PAPI E. (eds.) 2009, *Sidi Ali ben Ahmed - Thamusida, 2. L'archéometria*, Roma, Quasar.
- GSELL S., CARCOPINO J. 1931, *La base de M. Sulpicius Félix et le décret des décurions de Sala*, «Mélanges d'archéologie et d'histoire», 48, 1-39.
- HASSAR-BENSLIMANE J. 1976, *L'archéologie marocaine de 1973 à 1975*, «Bulletin d'Archéologie Marocaine», 10, 243-252.
- LAMARE N. 2019, *Les fontaines monumentales en Afrique romaine*, Collection de l'École française de Rome 557, Roma, École Française de Rome.
- LENOIR E. 2009, *Documents sur le contrôle et la distribution de l'eau dans le Maroc antique*, in V. BRIDOUX (ed.), *Contrôle et distribution de l'eau dans le Maghreb antique et médiéval. Actes du Colloque organisé par l'Institut National du Patrimoine de Tunisie et l'École Française de Rome (Tunis 2002)*, Roma, École Française de Rome, 41-83.
- MASCHEK D., SCHNEYDER M., TSCHANNERL M. 2009, *Virtual 3D reconstructions. Benefit or danger for modern archaeology?*, in *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Congress Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2009)*, Wien, Museen der Stadt Wien, Stadtarchäologie, 447-460.
- MASCIONE C., PANSINI R., PASSALACQUA L. 2016, *Integrated methodologies for the reconstruction of the ancient city of Lixus (Morocco)*, in S. CAMPANA, R. SCOPIGNO, M. CIRILLO, G. CARPENTIERO (eds.), *CAA2015. Keep the Revolution Going. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Siena 2015)*, Oxford, Archaeopress, 157-166.
- PANSINI R. 2012-2013, *Lixus (Marocco) – il quartiere della pendice orientale: tecniche edilizie e impianto urbanistico tra età maura e islamica*, Tesi Magistrale, Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali.
- WILSON JONES M. 2006, *Ancient architecture and mathematics: Methodology and the doric temple*, «Nexus - Architecture and Mathematics», 6, 149-170.
- WILSON JONES M. 2009, *Principles of Roman Architecture*, 3<sup>rd</sup> ed., New Haven-London, Yale University Press.

## ABSTRACT

The paper analyses the practise of surveying and reconstruction of the buildings in a Roman North Africa monumental centre by means of photogrammetry and three-dimensional modeling. Photogrammetry, in particular, proves to be an efficient and economic method for field analysis, although it has limitations in terms of processing time and the need for very powerful computers. Photogrammetric models, characterized by a high volumetric and colorimetric quality, constitute an ideal basis for reconstruction by means of 3D modeling, particularly in the case of research, such as this one, related to the Archaeology of Construction.

LA COMUNICAZIONE  
DEL DATO ARCHEOLOGICO



## STRUMENTI PER LA COMUNICAZIONE E LA CONSERVAZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE DEL PATRIMONIO ARCHEOLOGICO: IL COMPLESSO DI VILLA ADRIANA (TIVOLI, RM) E IL SITO ARCHEOLOGICO DI MASADA (ISRAELE)

### 1. INTRODUZIONE

Il compito di chi fa ricerca sul patrimonio culturale è incentrato sull'individuazione di percorsi operativi che, partendo dalla selezione di modelli di ricerca idonei, passano poi alla comprensione critica dei prodotti della ricerca stessa con lo scopo di giungere, in conclusione, alla proposizione di interpretazioni, pratiche operative e metodologiche che sono messe a disposizione di contesti e mondi diversi: da quello della ricerca specialistica, a quello delle istituzioni, a quello dell'impresa, fino a raggiungere quello che rimane senza dubbio l'osservatorio principale, cioè la società contemporanea nella quale viviamo e nella quale operiamo. Oggi siamo in grado di produrre una considerevole quantità di informazioni in relazione alle opportunità offerte dal mondo della documentazione digitale del patrimonio in tutti i suoi aspetti, dal rilievo 3D laser scanner fino alla fotogrammetria di ultima generazione. Al notevole miglioramento delle capacità di acquisizione di dati non fanno tuttavia oggi riscontro adeguate metodologie di gestione, conservazione e possibilità di fruizione a vari livelli delle banche dati generate, una problematica ancora aperta che coinvolge tutto il mondo della ricerca.

Il tema dell'interdisciplinarietà della ricerca è strettamente correlato a quanto sopra accennato e inizia a configurarsi, nel panorama odierno, in una maniera abbastanza diversa rispetto alla metodologia tradizionale basata su sequenze lineari di procedimenti: pensiamo ad esempio al processo consequenziale di analisi che lega le pratiche scientifiche del rilievo, dell'archeologia e del restauro, nel campo della conservazione del Patrimonio. Oggi questa visione positiva di implementazione della ricerca basata sulla condivisione di esperienze che vanno ad accrescere un unico risultato scaturito dalla sommatoria delle sintesi di diverse esperienze forse non costituisce l'unica modalità di processo. Secondo le recenti tendenze di pensiero, è assodato che la ricerca può procedere anche per salti, il percorso non è sempre lineare e spesso questi salti, anche casuali, portano a un prodotto che è il risultato della coesistenza di idee e ragionamenti che seguono propri percorsi. Parlare di interdisciplinarietà o multidisciplinarietà nella ricerca non significa più raggiungere un risultato positivo composto da una sommatoria di prodotti, ma si tende più a vedere il prodotto della ricerca come il risultato dalla commistione dei diversi saperi che nella loro aggregazione creano un prodotto unico, diverso da quello

che può offrire la singola esperienza, arricchito e completato dall'incontro, dai molteplici aspetti e dall'esperienza dell'uno e dell'altro specifico settore disciplinare (NANETTI 2018).

Nell'ambito della documentazione e del rilievo digitale emerge quindi il fondamentale tema del dialogo fra le diverse competenze in relazione all'utilizzo delle tecnologie e degli strumenti per la diagnostica e la conservazione del patrimonio culturale che sono oggi a disposizione. Ed emerge anche la necessità di un dialogo a livello interdisciplinare e multidisciplinare sempre più stringente tra saperi diversi e tra strutture di ricerca, istituzioni e organismi di tutela. Il tema della conoscenza dell'opera d'arte, sia essa un reperto archeologico, una pittura o un'architettura, necessita di approcci di indagine in cui sia sempre ben calibrato e meditato il rapporto tra metodologie e strumenti che si vogliono applicare nell'indagine e risultati che si vogliono conseguire. Risulta evidente il ruolo fondamentale della figura dell'archeologo, come pure dell'architetto che si occupa del settore, che vede negli strumenti del rilievo e della diagnostica il momento preparatorio e propedeutico a passi successivi che guidino verso la soluzione delle criticità dell'interpretazione dei manufatti, del loro degrado e, più in generale, coniuga queste tematiche con la compatibilità degli interventi e della eventuale musealizzazione in maniera da assicurare le condizioni per la sopravvivenza della testimonianza storica e del valore patrimoniale che il manufatto da conservare rappresenta per la società.

Le applicazioni e i risultati scientifici maturati in anni di esperienze condotte dal Laboratorio Congiunto Landscape Survey & Design dell'Università di Firenze, anche in siti UNESCO quali, oltre a Firenze, Petra in Giordania, Masada in Israele, l'isola di Kizhi in Russia e molte fortezze spagnole in centro America, hanno consentito di mettere a sistema alcune delle più usate tecnologie remote sensing nel settore del rilievo per la documentazione digitale del patrimonio architettonico e archeologico (BERTOCCI, PARRINELLO 2015). Si presentano in questa sede, a titolo esemplificativo, alcuni dei risultati raggiunti nelle campagne di rilievo per la documentazione del sito archeologico di Villa Adriana, Tivoli (Roma) e per la documentazione del sito di Masada in Israele.

## 2. UNA ESPERIENZA DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA PER LA DOCUMENTAZIONE DEL SITO ARCHEOLOGICO DI VILLA ADRIANA, TIVOLI (ROMA)

Il sito archeologico di Villa Adriana a Tivoli, presso Roma, ricopre un'area di 120 ha e si estende su un pianoro tufaceo in parte precedentemente occupato da una residenza extraurbana di età repubblicana. Anche gli studi recenti propendono per una suddivisione del grande impianto della villa in due fasi di implementazione delle costruzioni a partire dal 118 d.C. La prima comprende la realizzazione della maggior parte degli edifici che vediamo ancor oggi e doveva essere terminata nel 125 d.C. La seconda fase invece si

conclude con la morte dell'imperatore nel 138 d.C. In epoca rinascimentale, artisti e architetti si interessarono e studiarono i monumentali resti della villa di Adriano e, verso la metà del secolo, l'architetto napoletano Pirro Ligorio venne incaricato dal cardinale Ippolito II d'Este di intraprendere scavi nel territorio del grande complesso di Tivoli. Dalle indagini emersero numerosi reperti, sculture e arredi marmorei che, in parte, vennero anche riutilizzati per decorare la splendida villa d'Este presso Tivoli. Durante il XVII secolo i Barberini e i Doria Pamphilj intrapresero numerosi scavi e nel Settecento si ebbero le più sensazionali scoperte, come i due centauri e il mosaico dell'Accademia. Attualmente il sito è per la maggior parte di proprietà pubblica ed è stato dichiarato Patrimonio UNESCO nel 1999<sup>1</sup>.

Nel corso delle campagne di rilevamento svolte dal 2012 al 2016 a Villa Adriana, sotto la sorveglianza della Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio, sono emersi molteplici aspetti che hanno costituito la base di una proficua collaborazione scientifica tra il Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze, il Dipartimento di Ingegneria civile ed Architettura dell'Università di Pavia e il Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna, finalizzata allo studio e alla documentazione del complesso, con campagne di rilevamento digitale a fini didattici e di ricerca. Le campagne hanno interessato alcune delle aree di maggiore interesse del sito archeologico, nelle quali gli studenti hanno potuto sperimentare, assieme a docenti e ricercatori, le tecnologie di rilievo digitale applicate al rilevamento archeologico. Il *corpus* dei materiali prodotti da queste attività ha costituito una utile banca dati per l'analisi delle strutture in elevato ed è stato organizzato secondo una struttura corrispondente alle singole attività condotte (Fig. 1). In particolare la campagna di rilevamento, svolta da ricercatori e studenti delle università di Firenze e Pavia, ha riguardato l'analisi di due zone all'interno del grande complesso della villa, in cui sono state portate a termine alcune sperimentazioni con apparecchiature laser scanner 3D, che costituiscono una base attendibile, passibile di essere convertita in vari elaborati, per la documentazione del sito dalla scala territoriale alla scala del più specifico dettaglio architettonico (BUA, PICCHIO 2013).

Gli sviluppi del progetto potrebbero prevedere la messa a punto di una "mappa intelligente", prodotta seguendo sperimentati criteri metodologici, che permetterebbe di mettere a disposizione degli studiosi dettagli e informazioni e che, con il tempo, potrebbe configurarsi come il "contenitore" della

<sup>1</sup> Fu solo con l'unità d'Italia che iniziarono ricerche sistematiche e nel 1870 lo stato italiano acquisì la maggior parte dell'area occupata dalla antica villa. Nel 1999 la villa venne inserita nella lista del Patrimonio UNESCO con la seguente motivazione «Criterio (iii): Villa Adriana rappresenta un'eccezionale testimonianza materiale della prima età imperiale romana. Il gran numero di edifici e di altre costruzioni al suo interno e la collezione di statue e sculture che decorano gli ambienti interni ed esterni testimoniano il gusto e la cultura di uno dei più grandi Imperatori Romani».

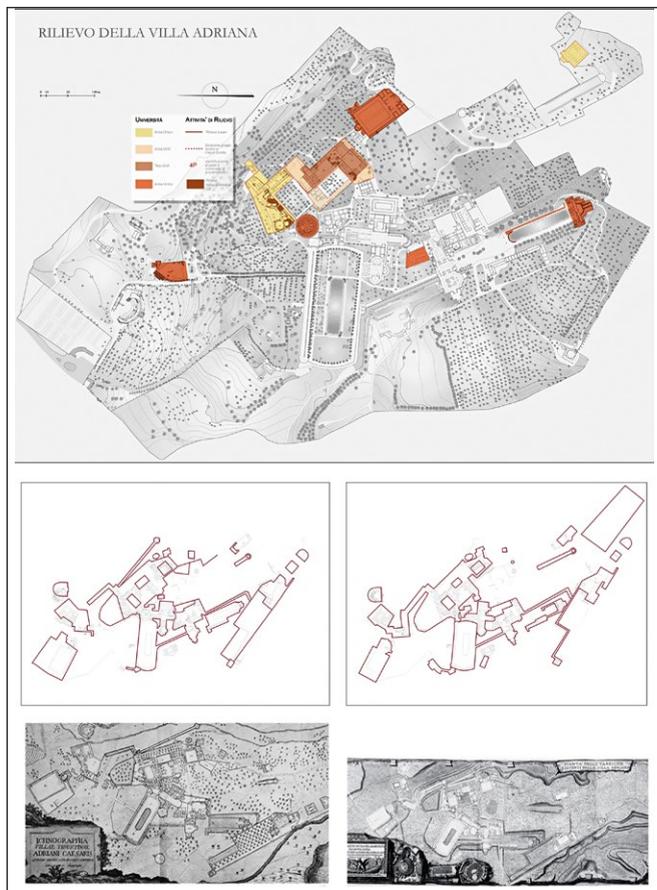


Fig. 1 – Villa Adriana, individuazione delle aree rilevate con metodologie remote sensing. In basso confronti fra la topografia attuale (in evidenza) e le restituzioni delle principali fonti di cartografia storica (dott. arch. F. Greco).

grande mole di studi e di ricerche condotti nel corso degli anni sulla Villa Adriana, che troverebbero una sede appropriata ed una migliore struttura logica, anche rispetto ai possibili utilizzi degli studi contemporanei (Fig. 2). La costruzione di un progetto così concepito, sperimentato durante le prime fasi della nostra ricerca, permetterebbe di rendere fruibili le informazioni a vari livelli di utenza e a scale diverse, sia per studiosi e tecnici esperti che per un pubblico più ampio. Ciò valorizzerebbe percorsi tematici anche a fini turistici, sistematizzando l'informazione secondo strutture cognitive che, rappresentando in maniera ordinata la complessità del sito reale, permetterebbero

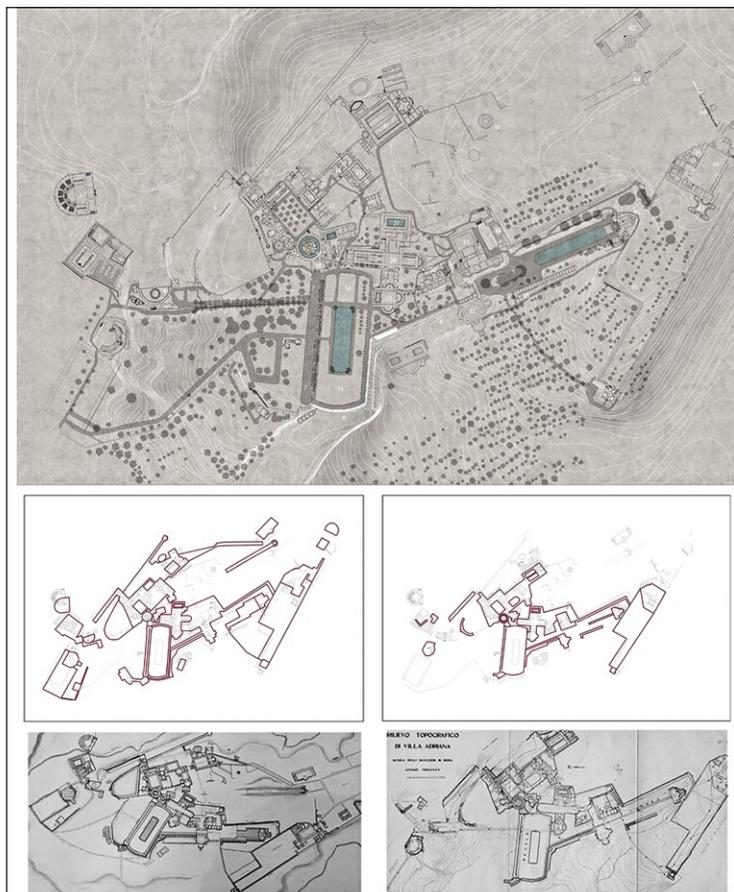


Fig. 2 – Villa Adriana, gli aggiornamenti riportati sulla base topografica generale del 2006 (dott. arch. F. Greco).

inoltre di elaborare sperimentazioni e previsioni di sviluppo congrue con il Management Plan del sito. Per creare questa piattaforma interattiva, basata sulla imprescindibile banca dati della misura (mappe ed elaborazioni affidabili dello stato dei luoghi), le diverse attività di documentazione sono state programmate nell'intento di integrare tra loro dati provenienti da attività di rilievo che si potranno sviluppare nel tempo.

I primi rilevamenti sono stati localizzati nella zona del Ninfeo del Palazzo, in prossimità della Sala dei Pilastri Dorici e negli *Hospitalia* della zona residenziale del Palazzo (Figg. 3, 4). I rilievi topografici di inquadramento dei singoli siti presi in esame sono stati riferiti ad una poligonale chiusa, appositamente

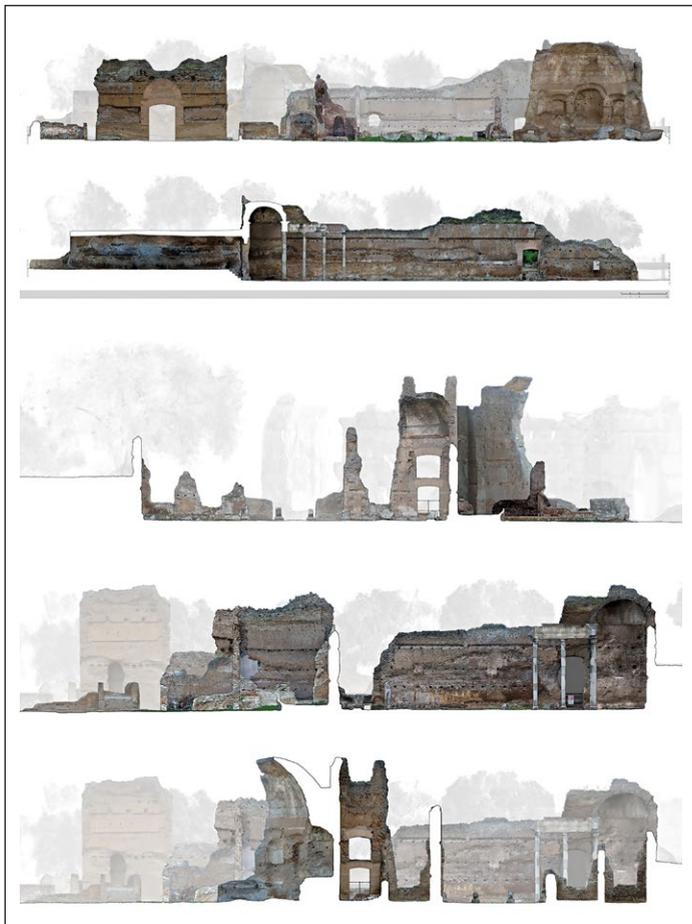


Fig. 3 – Restituzioni dei rilievi dell’area del Ninfeo di Palazzo e della Sala dei Pilastrini Dorici (arch. M. Ventimiglia).

predisposta, la quale è stata successivamente georiferita sulla mappa aggiornata del sito messa a disposizione dall’amministrazione (ADEMBRI, CINQUE 2006). Questo processo è fondamentale per riuscire a concatenare i vari ambienti dell’area con il minore errore possibile e permettere, successivamente, l’unione delle scansioni prodotte dalle varie stazioni laser scanner e dei diversi modelli ottenuti dalle fotografie digitali. La nuvola di punti è stata utilizzata sia per creare disegni bidimensionali, descrittivi dello spazio architettonico e metricamente affidabili, sia per realizzare modelli tridimensionali ad alta densità di mesh con una ottima definizione del dettaglio. Il confronto tra il

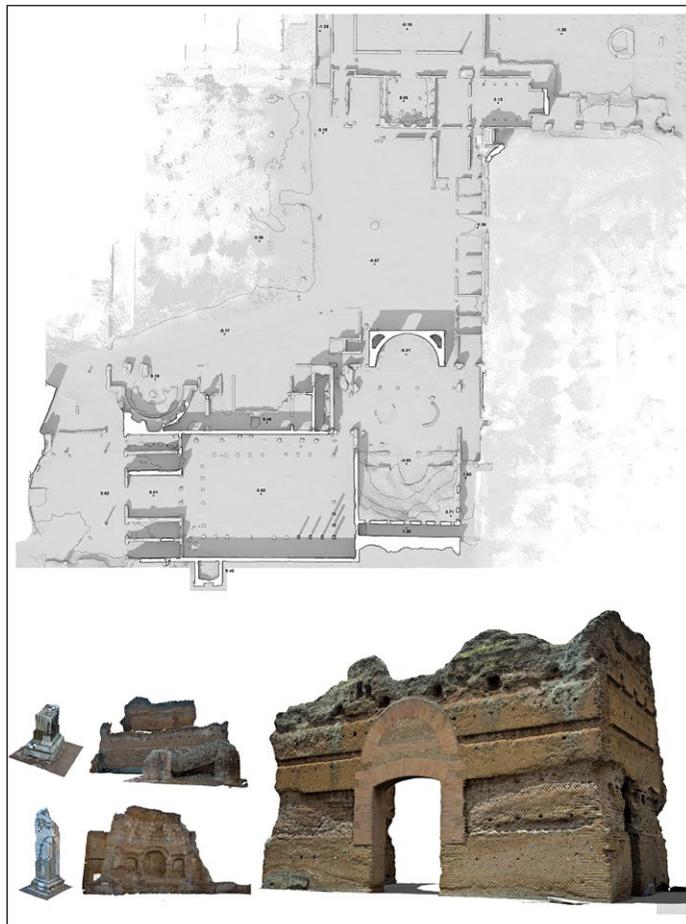


Fig. 4 – Pianta e modello di una zona del Ninfeo di Palazzo (arch. M. Ventimiglia).

modello realizzato direttamente dalla nuvola dei punti (metrico) e il modello ottenuto attraverso il rilevamento fotografico con tecnologia Structure from Motion (SfM) risulta necessario per determinare il grado relativo di affidabilità dei processi di elaborazione dei dati messi in atto dai rispettivi programmi, evidenziando, attraverso la sovrapposizione e calibratura delle rispettive mesh, le eventuali criticità di copertura del dato e di affidabilità relativa (BENEDETTI *et al.* 2010; ADEMBRI *et al.* 2012).

Sulla base topografica si è proceduto ai rilevamenti laser scanner 3D utilizzando strumentazione basata su tecnologia a variazione di fase (phase shift),

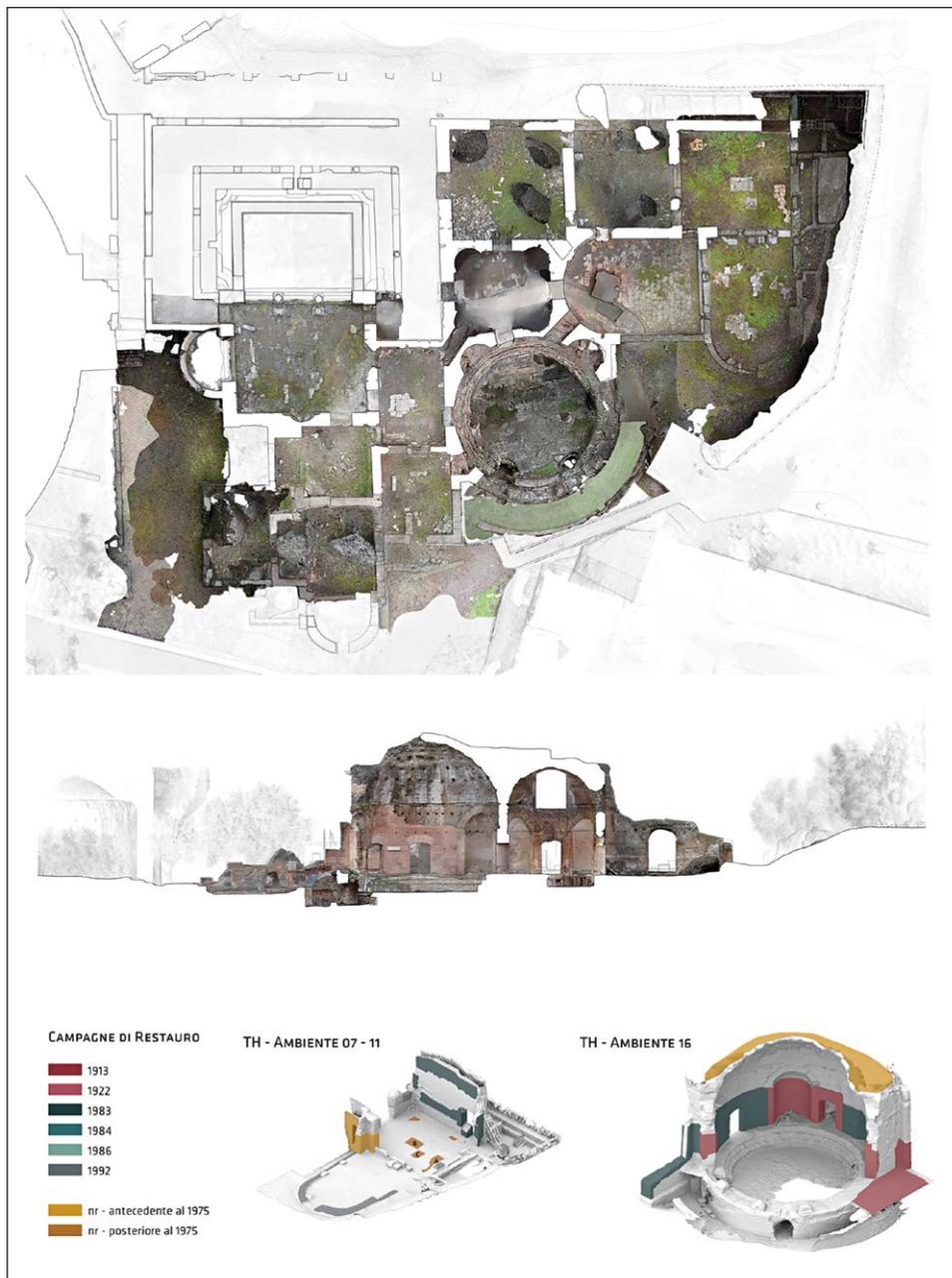


Fig. 5 – Restituzioni di dettaglio delle Terme con eliocamino (dott. arch. F. Greco).

che ha permesso di coprire l'intera area con tempi relativamente contenuti. Il dato metrico rilevato con lo strumento a scansione è stato integrato, nelle parti occluse o difficilmente raggiungibili, con alcune attività di rilevamento diretto per ottenere il completamento della copertura e produrre degli elaborati grafici 2D (piante, sezioni e prospetti utili per la documentazione e la conservazione del sito).

I rilevamenti fotografici SfM, sia terrestri che da drone, hanno portato alla realizzazione di affidabili modelli 3D, calibrati sui dati delle nuvole di punti generati dalle precedenti operazioni laser scanner, mediante i quali sono state restituite le elaborazioni grafiche utili per le successive letture archeologiche e per la documentazione dello stato di conservazione delle murature in elevato (FANTINI *et al.* 2012). La metodologia di progetto ha previsto, nella fase di post produzione dei dati, l'estrazione di elaborazioni 2D e 3D delle nuvole di punti realizzate, al fine di generare un affidabile apparato critico documentario costituito da disegni vettoriali (piante, sezioni e prospetti), rendering 3D e dettagli in 2D e 3D per lo studio di dettagli architettonici e particolari di interesse (Fig. 5).

Queste elaborazioni digitali sono state messe a disposizione dell'amministrazione e costituiranno, lo auspichiamo, la base documentaria per la conservazione del sito; potranno venire facilmente sfruttate anche per una migliore fruizione museale, pensando alle possibilità di simulazione, anche a scopi didattici, di eventuali ricostruzioni virtuali o proposte di interventi di restauro e valorizzazione (BUA, PICCHIO 2013).

La possibilità della creazione di modelli digitali leggeri ma al contempo affidabili, affiancata alla rappresentazione convenzionale del rilievo archeologico e dell'architettura, permette di ottenere prodotti fruibili anche attraverso dispositivi informatici di utilizzo comune, come pc, smartphone e tablet, forniti di connessione online. Le tecnologie in grado di restituire visualizzazioni 3D in real-time danno nuove possibilità di raccolta dei dati in database facilmente consultabili da operatori più o meno esperti e ampliano il concetto di visita virtuale rendendo la fruizione delle ricostruzioni digitali più immediata e diretta, coinvolgendo gli utenti mediante interfacce web con livelli di complessità adeguati al livello dell'utenza. Le sperimentazioni effettuate in questo caso hanno fornito incoraggianti risultati che sono stati raccolti in una serie di video tutt'ora in corso di elaborazione.

### 3. IL PROGETTO PER IL RILIEVO DIGITALE DEL SITO ARCHEOLOGICO DI MASADA IN ISRAELE

Il progetto per il rilievo digitale del sito archeologico di Masada in Israele (BERTOCCI *et al.* 2013, 2014) nasce da un accordo di cooperazione culturale interuniversitaria fra Italia e Israele, sviluppato a partire dal 2011

per sperimentare metodologie di rilievo laser scanner 3D integrate con le applicazioni SfM sul sito della fortezza di Erode a Masada<sup>2</sup>.

Il programma per la documentazione del sito archeologico di Masada, conosciuto come la più estesa fra le fortezze e residenze realizzate durante l'ambizioso programma di Erode a partire dal 4 a.C., comprende una serie di campagne di indagine organizzate attraverso quattro anni a partire dal 2012. Ogni missione mirava a raggiungere una migliore comprensione del sito, caratterizzato da una grande complessità morfologica, che raccoglie una serie di grandi edifici di diverse epoche e funzioni. La programmazione di indagini che si occupano di grandi aree e complessi archeologici, anche a livello urbano, come il sito di Masada è quella di documentare le evidenze di tutti i periodi testimoniati dalla stratificazione archeologica: nessun tipo di monumento, nessuna attività e nessun periodo risulta prioritario, poiché l'indagine conoscitiva che si prevede di mettere in atto parte, in primo luogo, dalla conoscenza del territorio in tutte le sue forme e i suoi aspetti (GUIDI *et al.* 2009).

Il sito di Masada, individuato da un viaggiatore nel 1828 sugli aspri rilievi che si innalzano ad E del Mar Morto, nella Giudea sud-orientale, si trova attualmente in territorio israeliano a circa 100 km a SE di Gerusalemme e fu oggetto di studi da parte di A. Schülten nel 1933 (SCHULTEN *et al.* 1933; AVI-YONAH *et al.* 1957; YADIN 1965, 1966). La grande fortezza venne meglio identificata e studiata dopo i primi scavi, realizzati dal 1963 al 1965 sotto la guida di Nahal Hever, dalla missione guidata dall'archeologo israeliano Yigael Yadin che, insieme a William F. Albright, fu il principale rappresentante di quella che viene chiamata "Archeologia biblica". Dal 1966 Masada e il suo territorio divennero un'area protetta dal Ministero delle Antichità e dal 1998 parte dei National Parks, Nature Reserves, National Sites and Memorial Sites. Divenuta sito Patrimonio dell'UNESCO nel 2000, oggi è un grande parco archeologico aperto ai visitatori, uno dei più visitati di Israele, dotato di un ampio Visitors Center e di una funivia per il rapido collegamento con il sito principale dell'area, la fortezza, che occupa l'ampio pianoro sulla sommità della montagna.

La parte principale del sito si trova sul pianoro ad una altezza di circa 400 m al di sopra della depressione del Mar Morto e si estende su una superficie di circa una decina di ettari. Il pianoro sommitale appare recinto dai

<sup>2</sup> L'Università di Firenze e l'Università di Pavia, con Shenkar College ed il sostegno del Masada National Park per la parte israeliana, hanno realizzato il rilevamento digitale del sito archeologico UNESCO di Masada. La partnership del progetto è la seguente: Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze; Dipartimento di Architettura e Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Pavia; Dipartimento di Interni Costruzione e Environment Design del Shenkar College of Engineering and Design di Ramat Gan, Israele, Israel Nature and Parks Authority. Partenariato per il supporto tecnologico: Autodesk, Leica Geosystems, Mabat 3D Technologies Ltd.

resti di una cortina muraria che si sviluppa per un perimetro di circa 1300 m ed è costituita dai resti di strutture composte dalla cinta esterna con torri di rinforzo e da un muro interno; fra le due mura, collegate da murature trasversali disposte in maniera tale da formare una serie di vani comunicanti (sistema definito casamatta), erano ospitati depositi, arsenali e anche abitazioni. Fra questi vani si distingue anche una sinagoga (ritenuta una delle più antiche della Palestina) e alcune costruzioni destinate a colombari. All'interno del recinto fortificato appare ben evidente, nella zona settentrionale, un articolato complesso di costruzioni: i complessi dei magazzini, costituiti da due serie di fabbricati composti da lunghi vani (lunghi dai 20 ai 27 m) articolati secondo una semplice viabilità interna, completati da grandi residenze realizzate attorno a cortili, fra i quali emerge il palazzo residenziale di Erode, risalente al I secolo a.C.<sup>3</sup>, un singolare complesso monumentale composta da tre terrazze del banco roccioso, sospese sul deserto con una incomparabile veduta del Mar Morto.

All'interno del grande complesso vi è anche un edificio termale articolato in vari ambienti (oggi in buona parte restaurati) aperti su di una corte, con piscina e cisterne. Un ulteriore complesso palaziale suddiviso in varie zone residenziali occupa la parte SO del recinto fortificato e appare composto da vari ambienti articolati attorno a cortili con lunghi atrii di ingresso. Appartengono alla prima fase (35 a.C. ca.) il nucleo principale del Western Palace, tre strutture palaziali più piccole, uno dei cosiddetti edifici amministrativi, le colombaie e le grandi cisterne. Nella parte centrale dell'area vi sono i resti di un edificio di epoca bizantina con una chiesa che testimonia l'occupazione del sito perlomeno fino a tale periodo<sup>4</sup>. Molto interessanti e sufficientemente ben conservati appaiono anche i resti del grandioso apparato di assedio realizzato dai Romani fra il 72 e il 73 d.C.: quello che possiamo vedere è un muro (circonvallazione) che circonda alla base tutto il rilievo di Masada per uno sviluppo di circa 7 km, rafforzato dalla presenza di otto campi militari fortificati con il tradizionale impianto quadrilatero. Fra le opere di assedio il resto più impressionante è costituito dalla rampa artificiale, realizzata in terra e armata con strutture lignee (delle quali ancora rimangono tracce), che funzionava da piano inclinato per raggiungere le mura sulla cima del rilievo roccioso con una gigantesca torre d'assedio, resa famosa dagli scritti di Giuseppe Flavio.

<sup>3</sup> La storia di Masada è conosciuta principalmente dal lavoro di Flavio Giuseppe. Per la descrizione della fortezza e degli apprestamenti di assedio dei Romani cfr. *Ios., bell. Iud.* 7, 8.

<sup>4</sup> All'inizio della rivolta ebraica nel 66 d.C. un gruppo di zeloti, guidato da Menahem, occupò la fortezza di Masada e molti ebrei si rifugiarono lì dopo la caduta di Gerusalemme e la distruzione del Tempio da parte di Tito nel 70 d.C. Due anni dopo Flavio Silva, il governatore romano, decise di conquistare questo ultimo centro della resistenza ebraica. Cfr. *Ios., bell. Iud.* 7, 8.

Lo straordinario stato di conservazione dell'intero complesso costituito dalla fortezza e dal territorio circostante con i resti delle opere di assedio ha fatto sì che tutta l'area venisse ritenuta di grande interesse e venisse dichiarata Patrimonio dell'umanità dall'UNESCO<sup>5</sup>. La fortezza erodiana e tutta l'area di rispetto che include i resti degli otto campi d'assedio romani sono di proprietà dello Stato di Israele e, come siti archeologici, sono protetti dalla legge del 1978 relativa alle Antichità. Dal 1966 l'intero sito di Masada è divenuto un Parco Nazionale ed è protetto dalle norme della Legge sui Parchi Nazionali, Riserve naturali, Siti nazionali e siti della Memoria del 1998. Il Parco Nazionale è inoltre ricompreso nella Riserva Naturale del Deserto di Giudea, istituita sempre con la legge del 1998. Un nuovo centro visitatori è stato aperto nel 2000 nella pianura, prossima al Mar Morto, sotto il lato orientale di Masada. La funivia, originariamente installata nel 1970, è stata sostituita da un nuovo impianto che costituisce il collegamento con l'ingresso del parco e il centro visitatori, anche se è ancora possibile intraprendere l'ardua salita alla vetta attraverso i due percorsi storici di accesso alla fortezza.

Il Parco di Masada è gestito oggi dall'Israel Nature and Parks Authority, in cooperazione con la Israel Antiquities Authority. Un aspetto importante del piano di gestione vigente è la decisione di procedere senza ulteriori scavi di ricerca sul sito principale, limitando soltanto questo tipo di attività alla finalizzazione di progetti di conservazione, manutenzione o restauro. Il sito appare oggi soggetto a rischi di vario tipo: rischio sismico (il sito si trova sulla linea di faglia dei continenti afro-eurasiatico); rischio idraulico (il terreno è molto asciutto tutto l'anno e le tempeste occasionali sono in grado di creare forti correnti di acque piovane); pressione turistica (il sito, dal 2000, ha la previsione di 1,25 milioni di visitatori all'anno ed è fruito da migliaia di turisti ogni giorno nella bella stagione); esposizione solare (la maggior parte del sito è esposta al sole diretto e alle alte temperature); guerra/terrorismo (l'instabilità della situazione politica in Medio Oriente espone il sito a episodi di terrorismo o di guerra). Il progetto è stato pertanto finalizzato alla creazione della documentazione digitale completa del sito archeologico di Masada in funzione della normale gestione del parco archeologico (geolocalizzazione e interpretazione dei dati di scavo esistenti, attività di restauro conservativo e aspetti gestionali) e alla conservazione della memoria e dell'immagine del sito, visto l'elevato grado di rischio, quale base per ulteriori attività di studio e interpretazione.

<sup>5</sup> UNESCO Declaration of Authenticity (2010): «This is a site that remained untouched for more than thirteen centuries. The buildings and other evidence of human settlement gradually collapsed and were covered over until they were revealed in the 1960s. There have been no additions or reconstruction, beyond an acceptable level of anastylosis, and inappropriate materials used in early conservation projects are being replaced. Limited restoration works have been carried out to aid visitor interpretation with original archaeological levels being clearly defined by a prominent black line set in the new mortar joints. Certain significant archaeological elements, such as the Roman camps and siegeworks, remain virtually untouched. The authenticity is therefore of a very high level».

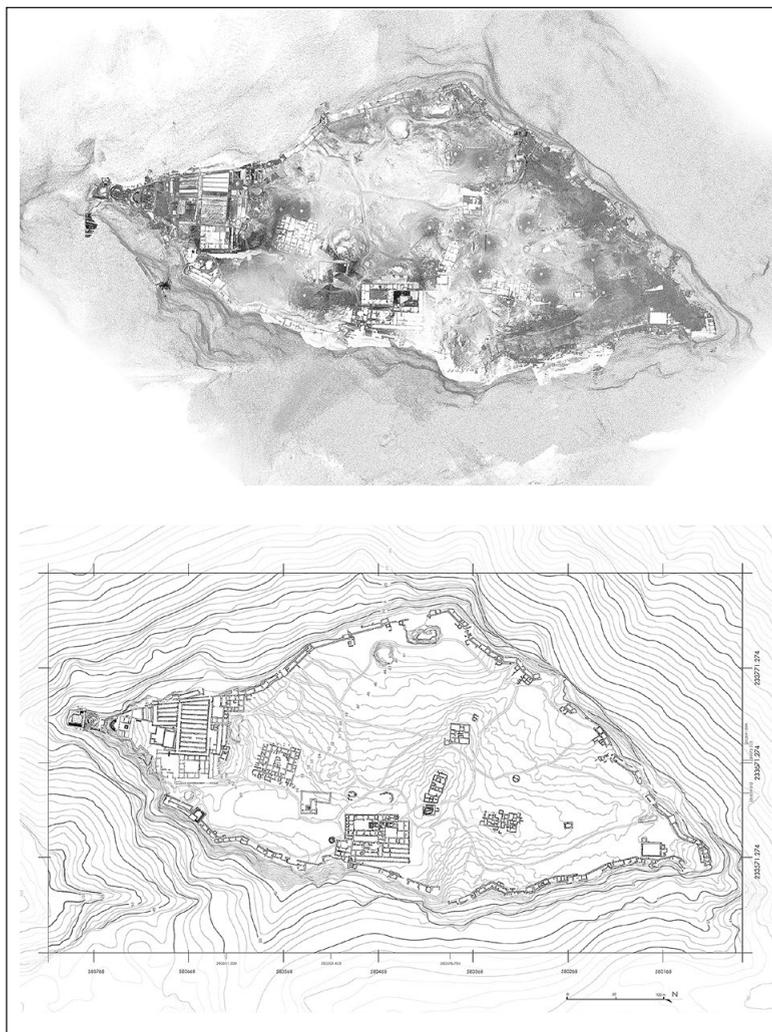


Fig. 6 – Masada, vista ortografica della nuvola dei punti complessiva della fortezza e la relativa restituzione topografica (dott. F. Picchio, dott. M. Bercigli).

La documentazione del territorio, sia come ricerca preliminare per individuare la presenza di resti archeologici, sia per acquisire dati metrici generali e dati sulla caratterizzazione dei reperti storici del territorio e del sito stesso, ha reso necessaria una metodologia di rilevamento basata su un rilievo laser scanner 3D con strumentazioni dotate di elevata affidabilità anche alla scala urbana e territoriale, integrato con le applicazioni SfM oltre che





Fig. 8 – Masada, restituzione della planimetria dell'area del palazzo occidentale (arch. A. Scalbrelli).

dalle tradizionali metodologie di indagine topografica e GPS per costruire una adeguata rete di dati in collegamento con la cartografia nazionale dello stato di Israele. La nuvola di punti che è stata prodotta dal montaggio delle singole scansioni del rilievo costituisce la parte fondamentale del database della documentazione digitale del sito (Figg. 6, 7). Le nuvole di punti prodotte nelle varie fasi di acquisizione durante le annuali campagne di studio sono state integrate e successivamente elaborate sulla base di nostri protocolli metodologici per l'estrazione di elaborati 2D, disegni CAD di piante, sezioni e prospetti (Fig. 8) e modelli 3D, con vari tipi di visualizzazioni di dettagli e di elementi costruttivi e con letture di interesse archeologico.

La metodologia generale del progetto sulla quale si fonda la documentazione digitale completa del sito si basa sull'acquisizione di dati metricamente

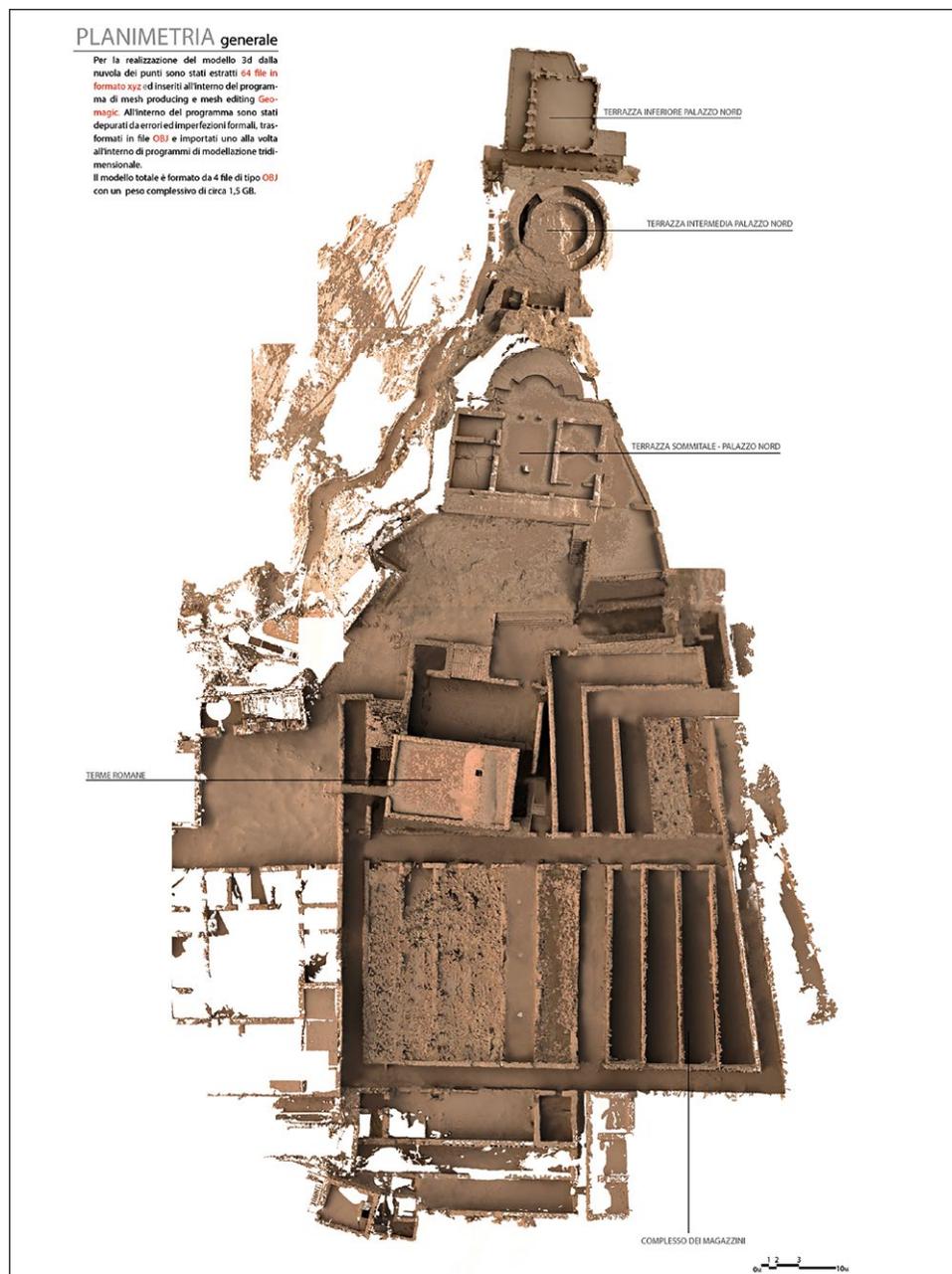


Fig. 9 – Masada, vista ortografica del modello elaborato dal rilievo dell'area del palazzo orientale o Palazzo di Erode (arch. M. Benedetti).

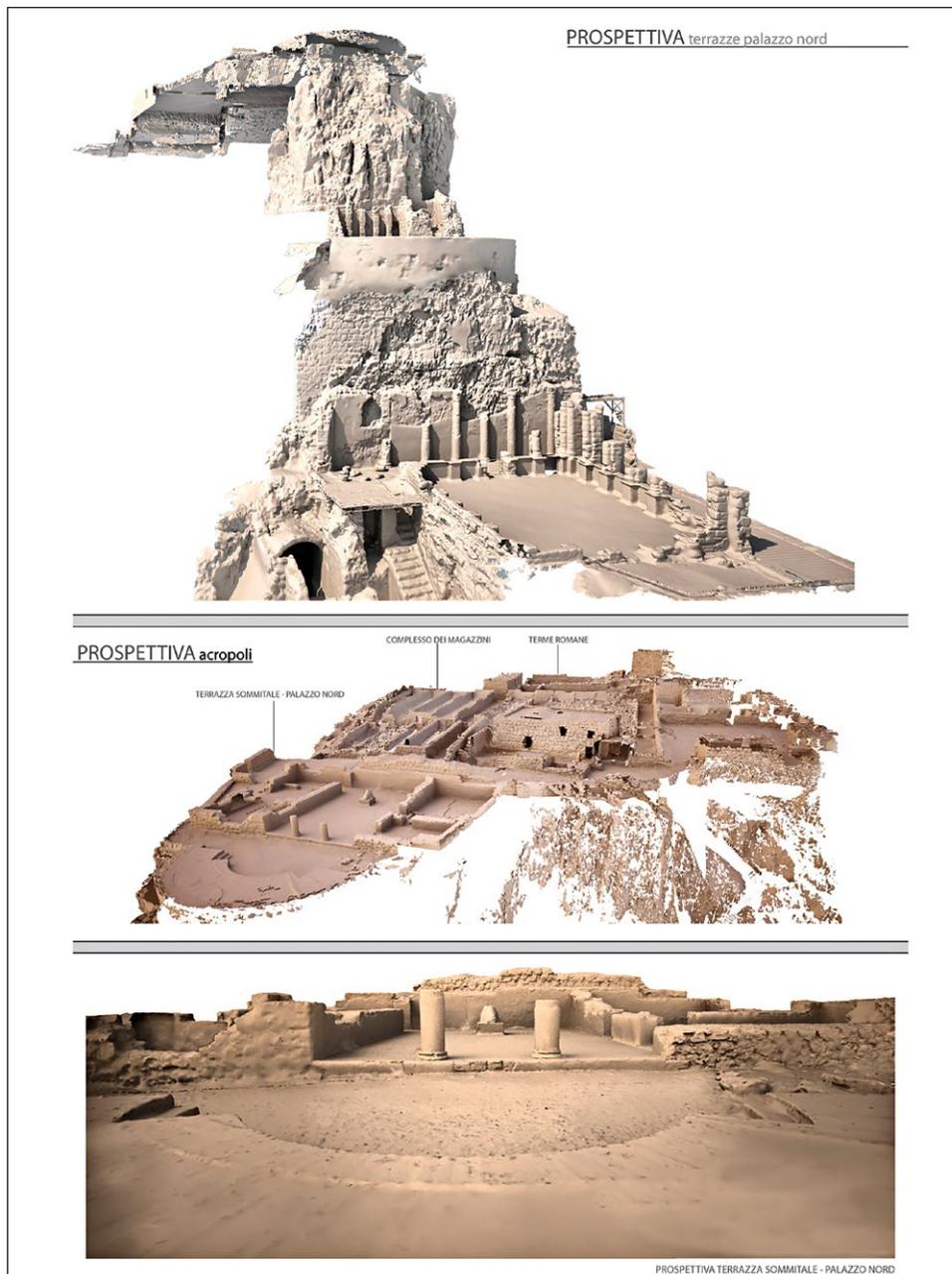


Fig. 10 – Masada, viste del modello elaborato dal rilievo dell'area del palazzo orientale o Palazzo di Erode (arch. M. Benedetti).

affidabili, attraverso la scansione laser 3D e la fotogrammetria digitale terrestre e aerea a bassa quota, riferiti sulle locali reti geografiche mediante strumentazione GPS, per la realizzazione di un apparato documentario, fruibile anche attraverso web dedicato, con vari livelli di interfaccia profilati sui vari tipi di utenze, dalla turistica alla scientifica. I modelli tridimensionali realizzati possono rappresentare il sito “così come è”, ma possono anche servire come base per una ricostruzione digitale in grado di illustrare lo stato delle conoscenze del sito e le diverse trasformazioni cui è stato sottoposto nel corso della storia (Figg. 9, 10). Le elaborazioni relative a Masada sono ancora a livello sperimentale. In particolare è stata realizzata una tesi di Dottorato, discussa nel 2018, da Monica Bercigli, con relatore il Prof. Stefano Bertocci (BERCIGLI 2018, cfr. anche PARRINELLO *et al.* 2017).

#### 4. CONCLUSIONI

Le tecnologie e gli strumenti per la conoscenza, la documentazione e la comunicazione del patrimonio rivestono oggi un importante aspetto del nostro lavoro per comunicare, con ogni mezzo e con ogni tecnica disponibile, il valore della ricerca non solo al pubblico degli specialisti, ma anche e soprattutto alla società contemporanea. Alla luce delle recenti acquisizioni del mondo digitale sembra che le barriere della comunicazione siano effettivamente superate e questo pone nuovi problemi e anche ulteriori interrogativi. Questa è la realtà con la quale dobbiamo confrontarci o quantomeno a cui dobbiamo tendere quando si parla di sviluppo della ricerca e del valore della comunicazione e divulgazione dei contenuti scientifici. La scommessa più intrigante è proprio questa: utilizzare le più aggiornate tecniche digitali per la gestione delle banche dati della conoscenza e per la comunicazione impiegando al meglio gli strumenti offerti dal mondo digitale per costruire una nuova percezione e una rinnovata attenzione per la fruizione intelligente del bene di interesse patrimoniale.

È così che nascono importanti progetti di comunicazione, dove con l’ausilio delle più avvincenti tecnologie informatiche si costruiscono percorsi di visita ed esperienze culturali in grado di attrarre anche il visitatore e il turista, consentendo un tuffo nel passato che rende accessibile la comprensione del valore del bene, ma anche interessanti e innovativi archivi della conoscenza digitale utilissimi per lo specialista nella gestione della complessità della ricerca e del cantiere. Il nostro lavoro deve avere importanti punti di forza: la conoscenza come momento imprescindibile di acquisizione dei dati da utilizzare per un avanzamento della cultura stessa; la valorizzazione come sistema strutturato in grado di elaborare e diffondere messaggi appropriati al livello scientifico della ricerca; l’innovazione, come modello “mentale” capace di generare sviluppo, prassi operative, metodologie e approcci nuovi

nei confronti del patrimonio culturale e della sua fruibilità. Una terna di elementi che, insieme a molti altri, possono costituire strumenti necessari per alimentare e sostenere quel vitale rapporto tra ricerca scientifica, sviluppo tecnologico, sostenibilità e divulgazione delle conoscenze.

STEFANO BERTOCCI

Dipartimento di Architettura DIDA  
Università degli Studi di Firenze  
stefano.bertocci@unifi.it

## BIBLIOGRAFIA

- ADEMBRI B., CINQUE G.E. (eds.) 2006, *Villa Adriana: la pianta del centenario 1906-2006*, Firenze, Centro Di.
- ADEMBRI B., DI TONDO S., FANTINI F. 2012, *New advancing of the research on the architecture with concave and convex rhythms at Hadrian's Villa: Reconstruction hypothesis on the southern nymphaeum of the Piazza d'Oro*, in *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2011)*, Wien, Museen der Stadt Wien-Stadtarchäologie, 125-139.
- AVI-YONAH M., AVIGAD N., AHARONI Y., DUNAYEVKY I., GUTMAN S. 1957, *The archaeological survey of Masada, 1955-1956*, «Israel Exploration Journal», 7, 1-60.
- BENEDETTI B., GAIANI M., REMONDINO F. 2010, *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa, Edizioni della Normale.
- BERCIGLI M. 2018, *Sistemi di fruizione virtuale e serious game per la valorizzazione e la divulgazione del Patrimonio. Masada: la fortezza del deserto*, PhD Thesis, Università degli Studi di Firenze.
- BERTOCCI S., PARRINELLO S. 2015, *Digital Survey and Documentation of the Archaeological and Architectural Sites: UNESCO World Heritage List*, Firenze, Edifir.
- BERTOCCI S., PARRINELLO S., VITAL R. (eds.), 2013, *Masada Notebooks. Report of the Research Project 2013*, Digital Survey in Archaeology 1, Firenze, Edifir.
- BERTOCCI S., PARRINELLO S., VITAL R. (eds.) 2014, *Masada Notebooks. Report of the Research Project 2014*, Digital Survey in Archaeology 2, Firenze, Edifir.
- BUA S., PICCHIO F. 2013, *Esperienze di rilievo integrato per la documentazione del Ninfeo di Palazzo a Villa Adriana mediante laser scanner e fotogrammetria*, «Forma Urbis», 8, 50-51.
- FANTINI F., RODRIGUEZ-NAVARRO P., DI TONDO S. 2012, *Il problema della mappatura del colore nei modelli digitali 3D a displaced subdivision surface da rilevamento laser scanner in ambito archeologico*, in M. ROSSI, A. SINISCALCO (eds.), *Colore e Colorimetria. Contributi Multidisciplinari. Atti della VIII Conferenza del colore (Bologna 2012)*, VIII A, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 31-38.
- GUIDI G., RUSSO M., ERCOLI S., REMONDINO F., RIZZI A., MENNA F. 2009, *A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas*, «International Journal of Architectural Computing», 7, 39-55 (<https://doi.org/10.1260/147807709788549439>).
- NANETTI A. 2018, *Transcultural endeavors an imperative of research internationalization for twenty-first century universities*, in S. BERTOCCI (ed.), *Programmi multidisciplinari per l'internazionalizzazione della ricerca. Patrimonio Culturale, Architettura, Paesaggio. Conference Proceedings of Symposium of Representation Scientific Area for Development of Multidisciplinary International Programs*, Firenze, Didapress, 23-28.
- PARRINELLO S., BERCIGLI M., BURSICH D. 2017, *From survey to 3D model and from 3D model to "videogame". The virtual reconstruction of a Roman Camp in Masada, Israel*, «DISEGNARECON», 10, 1-19.

SCHULTEN A., LAMMERER A., PAULSEN R., REGLING K., SCHRAMM E. 1933, *Masada die Burg des Herodes und die römischen Lager mit einem Anhang: Beth-Ter*, «Zeitschrift des Deutschen Palästina-Vereins (1878-1945)», 56, 1-185.

YADIN Y. 1965, *The excavation of Masada - 1963/64: Preliminary Report*, «Israel Exploration Journal», 15, 1-120.

YADIN Y. 1966, *Masada: Herod's Fortress and the Zealot's Last Stand*, New York, Random House.

#### ABSTRACT

Today we are able to produce a considerable amount of information in relation to heritage documentation thanks to the opportunities offered by remote sensing in all its aspects, from 3D laser scanner survey to the latest generation of photogrammetry. However, the remarkable ability to acquire data is not matched by methods of management, conservation and the possibility of using the generated databases at various levels. In the scientific area, not only visual techniques are experimented but also multisensory applications aimed at creating 'intelligent' digital models. In this work, some recent experiences carried out in the specific field of 3D digital survey documentation on sites of great archaeological interest are presented, such as Hadrian's Villa in Tivoli, near Rome, and the Masada fortress in Israel.

## LA DIGITALIZZAZIONE PER LA DOCUMENTAZIONE, LO STUDIO E LA FRUIZIONE DI UN SITO ARCHEOLOGICO. LA VR EXPERIENCE DEL TEATRO DI *RICINA*

### 1. INTRODUZIONE

La rappresentazione digitale del Patrimonio Culturale (Cultural Heritage, CH) trova sempre maggiore diffusione tanto in ambito scientifico, quanto come strumento divulgativo dedicato ad un pubblico di non esperti. Le prime sperimentazioni in tal senso si fanno risalire già agli anni '70, con un ruolo divenuto via via sempre più cruciale e determinante ai fini della salvaguardia del CH (STONE 1999). In particolare, uno dei primi campi di applicazione dove le nuove tecnologie e la computer grafica sono state sperimentate risulta essere quello archeologico. Risale infatti all'inizio degli anni '90 il termine "Virtual Archaeology" coniato da Paul REILLY (1991) per indicare la sperimentazione della computer grafica e della realtà virtuale (Virtual Reality, VR) per la simulazione di scavi archeologici. Nei decenni successivi il forte incremento nell'utilizzo di queste soluzioni tecnologiche è stato supportato dall'abbattimento dei costi e dal contemporaneo aumento delle prestazioni hardware, che hanno permesso lo sviluppo di soluzioni visive più complesse e di indagarne le relazioni con i processi cognitivi (CARD, MACKINLAY 1999; WARE 2012).

La diffusione del ricorso alla rappresentazione digitale ha quindi portato la comunità scientifica ad interrogarsi sulla validità effettiva di questo strumento e in particolare sulla necessità di renderne rigoroso il processo di creazione. Al fine di stabilire principi cardine riguardo l'utilizzo scientifico di queste risorse, si è così redatta nel 2006 la Carta di Londra (NICCOLUCCI *et al.* 2006), seguita nel 2009 dalla Carta di Siviglia dell'International Forum of Virtual Archaeology, un documento fondato su 8 principi tramite cui rendere esecutiva la Carta di Londra nella gestione del Patrimonio Archeologico (BRUSAPORCI, TRIZIO 2013). Grazie anche alle riflessioni sviluppatesi attorno alla stesura di tali documenti, numerose sono le esperienze di VR legate al mondo dell'archeologia rese disponibili da diverse istituzioni culturali, come ad esempio "Virtual Archaeology. Re-creating Ancient Worlds", una raccolta di oltre 50 siti archeologici accomunati dall'uso del digitale (BROUCKE *et al.* 1999); "The Flamina project", un museo virtuale legato alla via Flaminia (FORTE *et al.* 2006); "Rome Reborn", un progetto mirato a creare una rappresentazione visiva della Roma imperiale, presentando il risultato di una ricerca decennale circa i suoi più avanzati studi di ricostruzione topografica e urbanistica (GUIDI *et al.* 2007).

Negli ultimi anni notevole è stato poi lo sviluppo di esperienze VR immersive, basate sull'utilizzo di visori che permettono all'utente di essere trasportato in un ambiente completamente virtuale, in cui il coinvolgimento emotivo è amplificato dall'immersività e dal grado di fotorealismo. Vari sono gli esempi: il progetto "i-MARECULTURE", dove l'utente può effettuare una visita virtuale subacquea nel sito del naufragio di Mazotos (LIAROKAPIS *et al.* 2017); il progetto "CIVITAS", con l'esperienza VR dello Studiolo del Duca di Urbino, che l'utente può esplorare richiamando informazioni testuali e audio relativi non solo alla struttura architettonica, ma anche alle allegorie rappresentate nelle tarsie lignee e ai ritratti degli Uomini Illustri (CLINI *et al.* 2020); il progetto "Ipogei etruschi di Volterra in 3D", che ha prodotto lo sviluppo di un'applicazione per la visita delle tombe etrusche ipogee nel territorio del Comune di Volterra, fruibile tramite touchscreen così come in modalità VR (TACCOLA *et al.* 2021). Risulta dunque evidente l'esponenziale aumento di applicazioni digitali per musei e siti archeologici in grado di produrre esperienze sempre più efficaci grazie all'avanzamento tecnologico, ma anche alla grande attenzione posta verso la drammatizzazione e lo storytelling (PALOMBINI, FANINI 2019), elementi imprescindibili per amplificare le potenzialità divulgative grazie al coinvolgimento emotivo (FERDANI *et al.* 2020).

Il presente contributo si inserisce così in questo panorama e nell'ambito specifico delle ricostruzioni virtuali di teatri antichi – tra le quali possiamo annoverare quella del teatro di Catania (MALFITANA *et al.* 2016) e del teatro romano di Taormina (GABELLONE *et al.* 2017) – e delle ricostruzioni virtuali di teatri romani finalizzate alla sperimentazione di esperienze non solo visive ma anche uditive, proponendone simulazioni dell'acustica (MANZETTI, PAPA-DOPOULOS 2021). Il caso di studio qui indagato è quello del teatro romano di *Ricina*, situato a Macerata (MC), di cui attualmente rimangono presenti solo alcuni resti delle costruzioni murarie e della scena. Lo scopo è quello di mostrare un processo di lavoro specifico, caratterizzato dall'esecuzione di acquisizioni laser scanner e fotogrammetriche integrate con l'analisi filologica della documentazione archeologica e delle fonti storiche, al fine di ottenere un modello ricostruttivo digitale del teatro, non solo scientificamente valido, ma anche ingegneristicamente corretto, grazie alla stretta collaborazione tra figure professionali differenti come l'archeologo, l'ingegnere e l'architetto.

## 2. CONTESTO STORICO-ARCHEOLOGICO: IL TEATRO DI *RICINA*

La città romana di *Ricina* (VERMEULEN *et al.* 2017, 96-99), nella frazione di Villa Potenza di Macerata, sorge sulla sponda settentrionale del fiume Potenza. La sua organizzazione urbanistica è fatta risalire alla seconda metà del I secolo a.C. all'atto dell'istituzione del *municipium*. Si sviluppa nella vallata alluvionale all'incrocio di due importanti strade, un diverticolo della

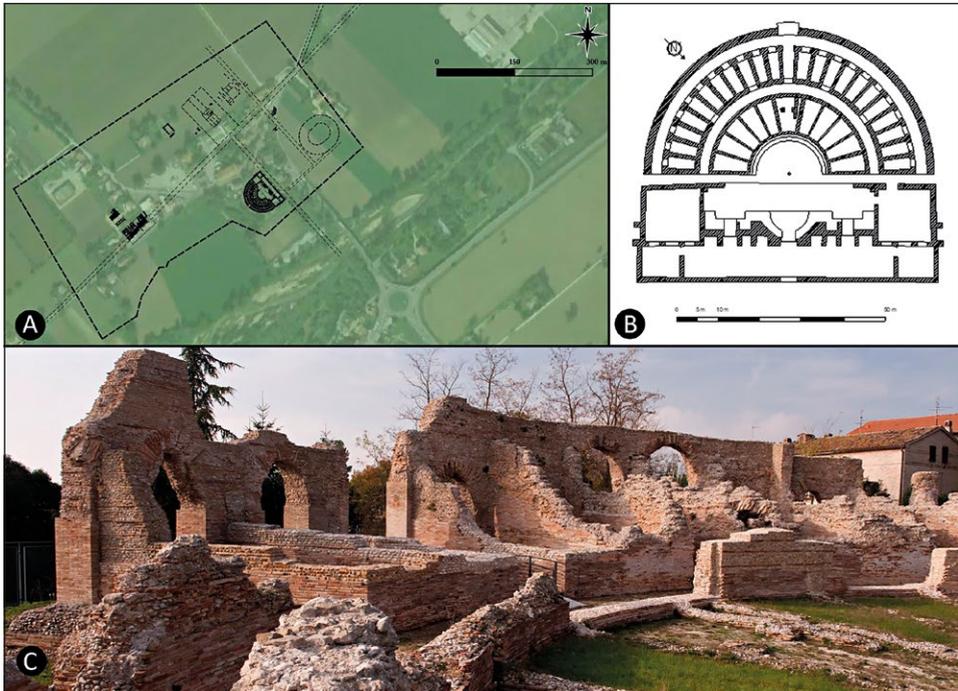


Fig. 1 – A) Ricostruzione della planimetria archeologica dell'area urbana di Ricina; B) Planimetria del teatro di Ricina; C) Foto dei resti del teatro di Ricina.

via Flaminia, la Flaminia Prolaquense, e la Salaria Gallica (PERNA 2018). L'impianto sembra avere un perimetro pressoché rettangolare che occupa una superficie di 20 ha e si sviluppa sull'asse generatore del diverticolo Prolaquense, ricalcato dall'attuale provinciale settempedana, che la taglia in diagonale fungendo da principale asse EO (Fig. 1). Un'evidente zampa d'oca, dove la viabilità si sviluppa verso le due direzioni di *Potentia* e *Auximum*, segna anche la collocazione della porta E e il limite NE della città stessa.

Il teatro è l'unico edificio attualmente visibile ed era già completo e funzionale a partire dalla prima metà del I secolo d.C. In seguito all'istituzione in età severiana della colonia di *Helvia Ricina Pertinax*, esso subì una serie di rifacimenti, come testimoniano alcuni elementi architettonici in marmo, in parte esposti. Le successive vicende che hanno interessato l'edificio nel corso dei secoli, dovute in parte all'azione distruttiva dell'uomo, in parte ai fenomeni atmosferici, hanno comportato la perdita di dati fondamentali per la comprensione della sua struttura. Il teatro è largo m 75,45 e lungo m

62,55, presenta una cavea elevata artificialmente su terreno pianeggiante e con molta probabilità doveva avere un'altezza intorno ai 17 m.

L'edificio è stato realizzato utilizzando l'*opus testaceum* con mattoni che fanno da paramento all'anima in cementizio del muro. Nella cavea gli ingressi ai *vomitoria* e alle botteghe erano costituiti da piattebande e archi di scarico fatti con mattoni *bipedales*; la stessa soluzione veniva usata nelle arcate della facciata e nelle nicchie della *scaena*. La cavea presenta due ordini di gradinate su cui si aprono undici forniche, che immettevano nell'ambulacro, e dodici porte con architrave, che davano accesso agli ambienti di servizio. I due ordini di gradinate erano divisi da una *praecinatio*, alla quale si accedeva da scalinate, i *vomitoria*, dei quali si conservano parzialmente sul lato sinistro le volte di sostegno. In corrispondenza del fornice centrale si apriva un corridoio coperto, attualmente ricalcato dalla attuale passerella, che introduceva dall'esterno direttamente all'orchestra, tagliando a metà la cavea del teatro e alcuni radiali delle gradinate. All'interno della cavea e sotto la *praecinatio* corre un corridoio semicircolare che collegava i due *aditus* all'ingresso centrale. L'orchestra, lo spazio semicircolare compreso tra la cavea e il palcoscenico, ha un diametro di ca. m 18; ad essa si accede tramite i due *aditus* laterali e dall'ingresso centrale. Sopra gli *aditus* avevano sede i due *tribunalia*; un terzo poteva essere collocato sopra l'ingresso centrale. L'edificio scenico, molto danneggiato, è lungo m 40,40 e presenta una pianta rettangolare. I *parascaenia*, i due ambienti laterali che racchiudevano l'edificio scenico, erano a pianta rettangolare e comunicavano con il *proscenium* per mezzo di due porte, le *versurae*. Il palcoscenico, che aveva una larghezza di m 6, era diviso dalla cavea dal *pulpitum*, largo m 1,20 e munito di una decorazione di rivestimento.

Nei due *parascaenia* laterali alla *scaena* si vedono ancora gli incassi per le travi che venivano messe per reggere il pavimento in legno del palco. Tra la *frons pulpiti* e il *proscenium* si aprono dei pozzi quadrangolari in laterizio che dovevano ospitare le antenne destinate a sorreggere l'*aulaeum* (il sipario o telone). La *scaenae frons* si conserva per un'altezza di m 9 nel lato destro dell'edera centrale; questa, a pianta semicircolare, aveva una parete articolata nella parte alta da una serie di nicchie rettangolari coperte a volta, di cui due conservate sul lato destro. Il *postscaenium* chiude posteriormente la *scaenae frons* composta da due piani o ordini di colonne, entrambi decorati in stile corinzio per il quale Vitruvio, III (GROS 1997) dice che il rapporto tra base e fusto deve essere 1 a 10. Rientranze rettangolari nel muro di fondo della *frons scaena* inquadravano i due *hospitales* e l'edera semicircolare davanti alla porta regia. Della decorazione della scena abbiamo conservati diversi elementi architettonici che evidenziano ancora bene le modanature e che permettono di essere utilizzati al fine della ricostruzione architettonica. Il *postscaenium* era anch'esso formato da enormi nicchie, dodici in totale, distribuite in due piani; ai lati si trovano i *parascaenia* e le due basiliche.

L'edificio trova i suoi confronti più diretti con il teatro di Ostia (CALZA 1927; GRECO, BATTISTELLI 2002), che presenta una pianta molto simile ed è costruito con la stessa tecnica e soluzioni ingegneristiche, differendo solo nelle dimensioni (molto più piccole quelle di *Ricina*) e nell'assenza della *porticus* retrostante. Ciò conferma complessivamente la tendenza locale all'applicazione di modelli direttamente mutuati da Roma e dal mondo italico, ma declinati in forma originale e autonoma.

### 3. LA DOCUMENTAZIONE DIGITALE DELLO STATO DI FATTO

L'intento del lavoro condotto su tale caso di studio è stato quindi quello di indagarne la rappresentazione digitale come strumento centrale in un processo di documentazione, studio e fruizione dell'area archeologica, perseguendo la scientificità del dato, la ricerca del coinvolgimento emotivo mediante la libera esplorazione e il fotorealismo, la sperimentazione di un prototipo di Virtual Museum VR e il confronto diretto tra presente e passato, tra reale e ricostruzione virtuale.

L'efficacia di un'acquisizione digitale per il rilievo di architetture e scavi archeologici è comprovata da numerosi studi (BIANCONI, FILIPPUCCI 2019; BRANDOLINI *et al.* 2020; GIORGI *et al.* 2021). Tale soluzione permette infatti un'approfondita documentazione geometrica e morfologica dell'oggetto indagato, fondamentale tanto per un adeguato studio dello stato di fatto, quanto per la formulazione di ipotesi ricostruttive (D'EREDITÀ 2021). Da tale punto di vista, il teatro romano di *Helvia Ricina* si presenta come caso esemplare di applicazione, caratterizzandosi per porzioni di costruzioni murarie difficilmente accessibili e parti in quota non visibili da terra. Per ottenerne una documentazione completa si è quindi proceduto all'integrazione di acquisizioni GNSS, scansioni laser terrestri (Terrestrial Laser Scanner, TLS) e fotogrammetria aerea da drone (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), seguendo una metodologia di lavoro strutturata in 3 fasi: acquisizione, elaborazione e integrazione dati (Fig. 2).

La fase di acquisizione è stata progettata e realizzata in modo da ottenere una copertura completa del teatro. Sul terreno sono stati disposti 12 target con funzione di Ground Control Point (GCP), rilevati in maniera specifica mediante strumentazione GNSS-RTK e presenti nelle scansioni TLS così come nelle foto scattate da UAV. Al fine di garantire un adeguato livello di dettaglio e al contempo la speditività della fase di acquisizione, le scansioni laser sono state eseguite imponendo una risoluzione pari a 6,3 mm a 10 m, mentre le immagini da UAV sono state acquisite con un Ground Sampling Distance pari a 5 mm.

L'elaborazione dei dati grezzi è stata quindi realizzata in maniera distinta: le 34 scansioni TLS sono state importate nel software Leica Cyclone, dove, si

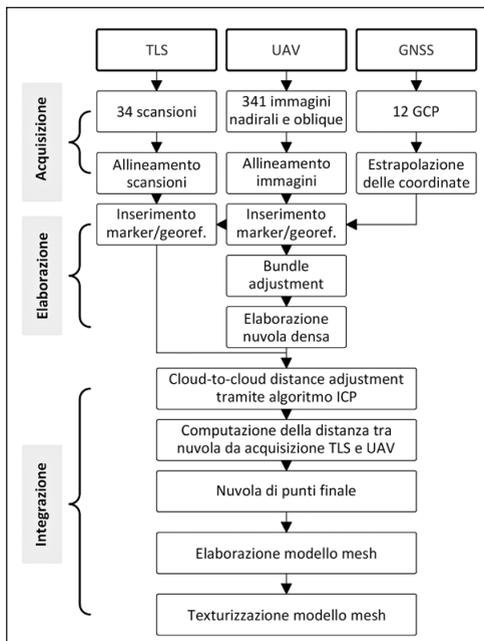


Fig. 2 – Schema della metodologia di acquisizione applicata.



Fig. 3 – Immagine del modello reality-based ottenuto mediante integrazione dei diversi dati acquisiti.

è ottenuta, grazie al loro allineamento, una nuvola unica costituita da circa 115 milioni di punti. Le 341 immagini da UAV, opportunamente editate tramite il plugin Adobe CameraRaw, sono state invece allineate all'interno del software Agisoft Metashape. In questa stessa fase i GCP sono stati individuati sia nella nuvola di punti ottenuta dall'unione delle singole scansioni TLS che nelle foto aeree e quindi associati alle coordinate rilevate da GNSS-RTK. Tale operazione ha permesso di riferire entrambe le acquisizioni al comune sistema globale WGS84/UTM zone 33N, di ottimizzare l'allineamento fotogrammetrico e scalare correttamente la nuvola di punti elaborata tramite tale processo.

L'integrazione delle due nuvole di punti è stata infine realizzata nel software CloudCompare. Essendo già riferite al medesimo sistema di riferimento globale, si è eseguita un'ottimizzazione di tale allineamento e quindi computata la distanza tra i loro punti, in modo da escludere quelli derivanti da fotogrammetria, meno affidabili dal punto di vista metrico, riferiti a porzioni di struttura già presenti nelle scansioni TLS. In questo modo si è ottenuta una nuvola di punti completa, descrivente l'intero sito archeologico. Tale nuvola di punti è stata quindi importata in MeshLab, dove si è elaborata una mesh tridimensionale, successivamente texturizzata in AgiSoft Metashape (Fig. 3).

Oltre che per la struttura del teatro, acquisizioni fotogrammetriche con fotocamera montata su treppiede sono state eseguite per la documentazione di alcuni elementi di dettaglio oggi esposti all'ingresso dell'area archeologica di *Ricina*. Le immagini sono state pre-processate e allineate, seguendo la medesima procedura applicata a quelle acquisite da UAV. La nuvola di punti ottenuta è stata quindi scalata grazie ai riferimenti metrici inseriti durante la ripresa e da essa si è ottenuto un modello mesh successivamente texturizzato.

#### 4. LO STUDIO E LA DEFINIZIONE DI UN'IPOTESI RICOSTRUTTIVA

La fase di lavoro successiva all'elaborazione del modello digitale dello stato di fatto ha visto la definizione di una ricostruzione storico-filologica scientificamente basata su un'ampia raccolta e analisi di dati di differente natura, messi a sistema mediante una stringente logica gerarchica legata alla loro attendibilità. Il primo passo ha dunque riguardato l'analisi delle fonti tangibili, quali i resti ritrovati *in situ*. Di conseguenza sono state studiate tutte le costruzioni murarie ancora oggi presenti, sfruttando i dati derivanti dall'integrazione del rilievo laser scanner e fotogrammetrico. Grazie a tale documentazione digitale tridimensionale, è stato possibile individuare le informazioni geometriche necessarie nella ricostruzione dei macro-elementi del teatro: la cavea, gli ingressi, la forma e le dimensioni del primo ordine del fronte scenico.

Si è quindi passati all'analisi di elementi decorativi parziali rinvenuti in sito; molti sono i conci lapidei e marmorei, come i resti di colonne, capitelli,

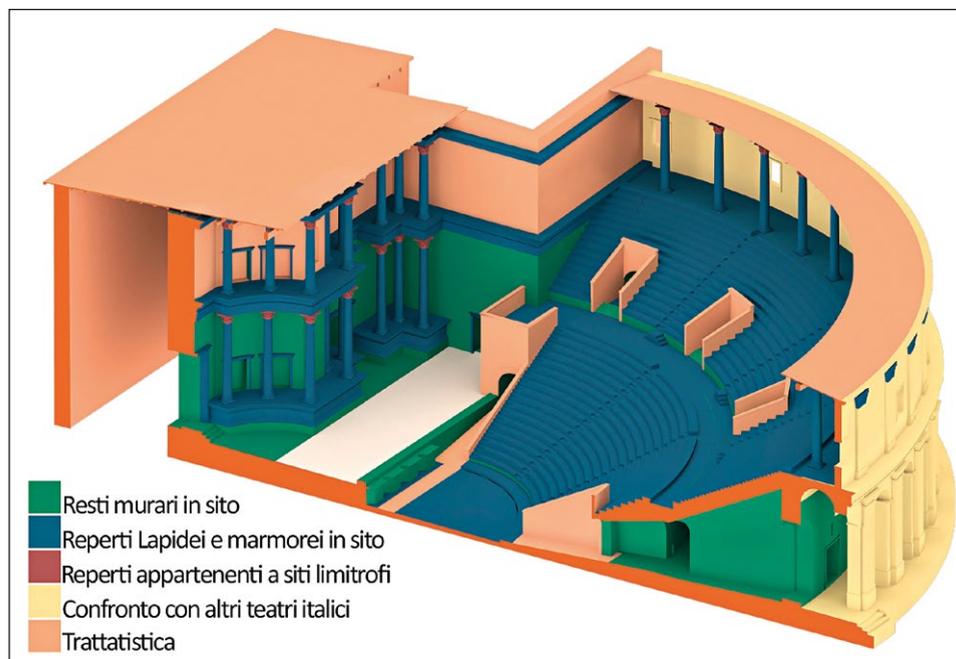


Fig. 4 – Schema del grado d’attendibilità delle fonti.

trabeazioni e cornici, grazie ai quali è stato possibile ricostruire e proporzionare i microelementi di dettaglio tramite giustapposizione e anastilosi.

Nell’ambito del processo collaborativo avviatosi, il ruolo dell’archeologo si è reso fattivo nella fase successiva ed è stato prioritariamente quello dello studio del monumento finalizzato alla ricostruzione del modello, studio che si è avvalso delle comuni metodologie di ricerca. L’analisi dei frammenti architettonici ancora *in situ*, singolarmente documentati anche con il tradizionale rilievo diretto, e il confronto con i teatri italici coevi (MODONA 1961; TOSI BACCELLE 2003; SEAR 2006) hanno infatti consentito di riproporre gli elementi oggi non più visibili. Particolarmente utile si è rilevato il confronto con le descrizioni di autori locali del XIX e XX secolo (SANTONI 1877; INGLIERI 1939), che hanno avuto la possibilità di vedere il monumento in un migliore stato di conservazione. Il modello così ricostruito è stato anche confrontato con la trattatistica antica (GROS 1997), che ha consentito di confermare o smentire alcune ipotesi ricostruttive. La scelta finale, tenuto conto dell’obiettivo generale del progetto, è stata quella di presentare la ricostruzione senza esaltare in forma eccessiva le parti ricostruite rispetto ai pochi elementi originali che sono stati invece evidenziati nell’ambito del percorso virtuale (Fig. 4).

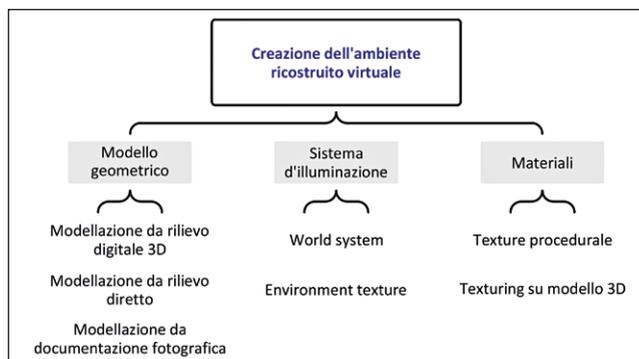


Fig. 5 – Schema generale del processo di generazione del modello ricostruttivo.

Ultimato lo studio si è quindi passati alla generazione virtuale della ricostruzione, eseguita principalmente all'interno di Blender 2.83, un software open source per la modellazione tridimensionale, animazione, rendering e editing. Come già specificato, uno dei temi fondanti di questo lavoro è la ricerca di fotorealismo, perseguita mediante lo sviluppo concreto di tre elementi fondamentali: modello geometrico, sistema d'illuminazione e comparto texture (Fig. 5).

Riguardo al modello geometrico ricostruttivo, è importante sottolineare le diverse metodiche intraprese, influenzate non solo dalla ricerca di realismo, ma anche dalla tipologia di reference utilizzata. Seguendo questa logica, sono state individuate tre metodiche differenti: modellazione da rilievo digitale 3D, da rilievo diretto e da documentazione fotografica. Come primo passo, si è proceduto alla modellazione delle strutture murarie, utilizzando piante e sezioni realizzate tramite il modello prodotto da rilievo digitale. La modellazione è stata quindi eseguita manualmente tramite estrusioni e operazioni booleane. In seguito all'acquisizione di diversi reperti tramite tecnica SfM, sono stati generati modelli caratterizzati da un elevato numero di poligoni, in grado di rappresentare perfettamente l'oggetto reale, ma con parti mancanti caratterizzate dall'usura normale del tempo. Al fine di produrre un modello ricostruttivo completo, essi sono stati utilizzati come reference ottenendo modelli completi, ricostruiti per anastilosi nelle loro parti mancanti, caratterizzati anche da una tessitura geometrica meno complessa e facilmente ottimizzabile. Secondo questa metodica sono stati realizzati i capitelli corinzi del secondo ordine del porticato esterno e le modanature della trabeazione del primo ordine del colonnato appartenente al fronte scenico.

Per quanto riguarda la ricostruzione dei reperti non rilevati tridimensionalmente, sono stati utilizzati come riferimento i disegni su carta millimetrata

eseguiti in sede del rilievo diretto. In questo caso sono stati ridisegnati vettorialmente i profili rilevati, regolarizzati secondo trattatistica al fine di eliminare l'usura dovuta al tempo e in seguito estrusi al fine di ottenere un oggetto 3D. Questa metodica è stata utilizzata prevalentemente per le cornici, le trabeazioni e gli architravi lapidei appartenenti al fronte scenico.

Laddove non è stato possibile avere una reference rilevabile si è proceduto analizzando fonti fotografiche di reperti non rilevabili. Sono state estrapolate le caratteristiche geometriche caratterizzanti, modellate manualmente e infine proporzionate nel loro contesto tramite studio della manualistica e trattatistica storica. Peculiare è il caso del basamento e capitello delle colonne corinzie, elementi collocati sul fronte scenico e nel porticato interno del teatro. Infine, per la modellazione dei conci lapidei delle gradinate, non essendoci pervenuti resti riconducibili direttamente al teatro di *Ricina*, si è fatto ricorso al confronto con altri teatri, quali quello di Ostia Antica e di Fiesole. Al fine di rendere speditiva la ricostruzione, è stata eseguita una modellazione parametrica grazie all'utilizzo dell'Add-On Array tool. Come primo passo è stata definita la dimensione media del conco, in seguito esso è stato copiato, disposto con il giusto angolo, prevedendo una minima variazione random delle dimensioni e nelle caratteristiche materiche dei gruppi di conci in modo da conferire grande varietà, fondamentale al fine del fotorealismo.

Completato il modello geometrico, si è passati a definire il sistema d'illuminazione. Nello specifico è stato scelto l'utilizzo del World System, con HDRI (High Dynamic Range Image), utilizzato come environment texture, grazie al quale è possibile simulare l'esposizione reale di un luogo fisico in diverse condizioni di illuminazione.

Ultimo passo per la realizzazione del modello è stata la creazione e applicazione dei materiali. Questo passaggio gioca un ruolo fondamentale per il raggiungimento del fotorealismo; infatti, grazie all'applicazione delle giuste

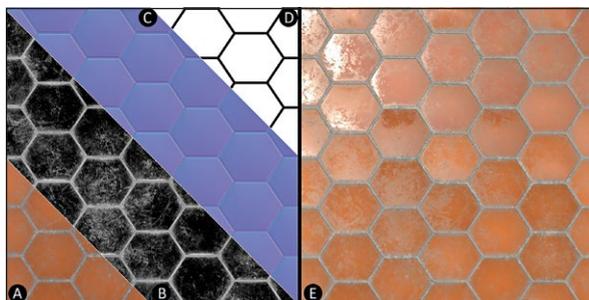


Fig. 6 – Output della generazione delle texture procedurali del marmo giallo: A) Base color map; B) Roughness map; C) Normal map; D) Height map; E) Risultato renderizzato.

texture è possibile conferire al modello tutti quei dettagli che caratterizzano gli oggetti nella realtà fisica, come l'usura lungo i bordi o le sfumature cromatiche in corrispondenza di cavità dovute allo sporco. La realizzazione delle mappe necessarie a tale scopo è stata eseguita mediante l'utilizzo di due software differenti: Substance Painter e Substance Designers. Il primo programma è stato scelto per la texturizzazione di oggetti singoli, come colonne, trabeazioni e basamenti. Nello specifico, ogni modello, eseguito l'unwrapping in Blender, è stato importato all'interno di Substance Painter. Anzitutto è stato scelto un materiale base dalla ricca libreria che il software possiede; tramite la generazione automatica di maschere di livello è stato possibile gestire direttamente sul modello i dettagli necessari al realismo, quali cavità, usura lungo i bordi e sporco. Raggiunto il risultato desiderato, sono state esportate le mappe necessarie: BaseColor, Roughness, Normal e Height map.

L'utilizzo di Substance Designer è stato invece necessario nella generazione di quei materiali legati ad oggetti 3D estesi quali paramenti murari e pavimentazioni. Si tratta infatti di un programma di texturing procedurale a nodi, ossia per la generazione di texture tramite algoritmi; ciò ha reso possibile variare in modo speditivo i dettagli dei singoli materiali, evitando l'irrealistica ripetizione della stessa immagine (Fig. 6).

## 5. LA PROPOSTA DI FRUIZIONE VR

Negli ultimi decenni grazie ai progressi nell'acquisizione di dati e modellazione 3D è stato possibile sviluppare, in modo sempre più speditivo e a costi inferiori, sistemi di gestione e fruizione del dato tridimensionale. In particolare, oggi siamo in grado di fornire all'utente un'esperienza completamente immersiva capace di incuriosire ed emozionare, specialmente grazie all'utilizzo delle tecnologie HMD (Head Mounted Display), ossia visori di realtà virtuale che conferiscono la capacità di esplorare e interagire fisicamente con il dato digitale. Con la finalità di creare l'esperienza più realistica e immersiva possibile, è stato scelto il dispositivo HTC Vive Pro che, grazie ad una risoluzione di 2880×1600 pixel e al suo funzionamento wireless, consente di avere un'esperienza dettagliata e libera.

L'ultima fase di lavoro ha quindi visto la realizzazione dell'applicazione di realtà virtuale tramite la Game Engine Unity 3D, un software open source multipiattaforma specifico per lo sviluppo di applicazioni come videogiochi, visualizzazioni architettoniche e animazioni 3D in tempo reale. La creazione dell'esperienza VR si è così strutturata: ottimizzazione dei modelli 3D, creazione del sistema atmosferico e ambientale, creazione delle interazioni VR.

Il primo passo ha quindi preceduto l'importazione all'interno della game engine dei due modelli precedentemente realizzati. Al fine di ottenere un funzionamento ottimale dell'applicazione finale, si è infatti reso necessario

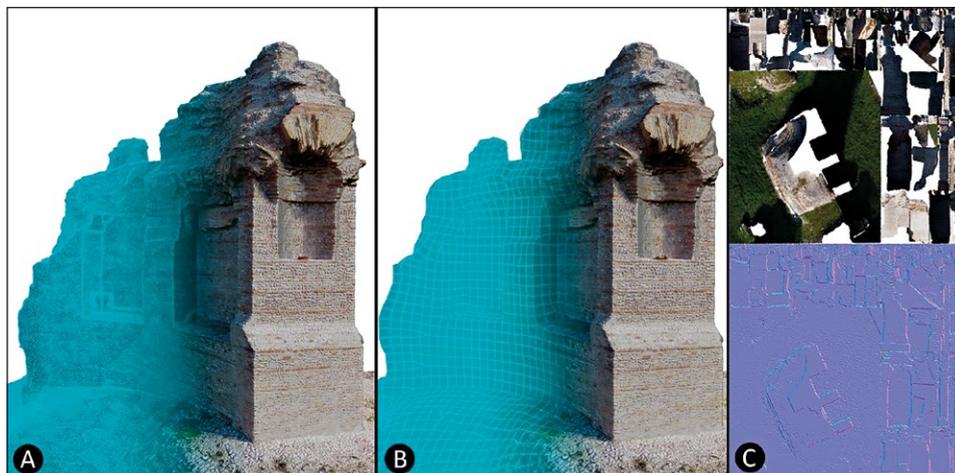


Fig. 7 – Passaggi salienti della retopology: A) Modello mesh highpoly texturizzato; B) Modello mesh lowpoly ottimizzato a mesh quadrate; C) Texture baked: diffuse e normale map.

compiere un’ottimizzazione delle loro geometrie, riducendone la complessità pur mantenendone la stessa resa visiva ricca di dettagli. Il processo di “retopology”, utilizzato prevalentemente nel mondo del gaming, permette di rimodellare un oggetto 3D complesso per ottenerne una geometria corrispondente, ma descritta da un numero minore di poligoni. Questa riduzione può essere effettuata sia eseguendo una modellazione manuale, sia tramite software o plug-in dedicati; in questo lavoro è stata eseguita tramite il software open source Instant Meshes, specifico per convertire oggetti 3D complessi in oggetti a mesh quadrate (GARCIA-LEON *et al.* 2018) (Fig. 7).

Per compensare la perdita di informazione dovuta alla riduzione dei poligoni, è stato eseguito il baking delle principali texture, una tecnica che consente di trasferire informazioni caratterizzanti di un modello ad alta risoluzione, come cavità o piccole imperfezioni, su di uno corrispondente ma a più bassa risoluzione, tramite la renderizzazione di nuove texture applicabili come materiale all’oggetto semplificato. In questo modo si è potuti passare da un modello highpoly del teatro costituito da un numero totale di 4.679.260 triangoli a uno lowpoly descritto da soli 269.989 quadrati (Fig. 8). Ultima l’ottimizzazione dell’intera scena, essa è stata quindi esportata in FBX e finalmente importata nella game engine, formato scelto poiché consente di importare ogni oggetto corredato delle sue texture, mantenendo anche la suddivisione in multimateriali.

Il primo elemento determinato in Unity 3D è stato il sistema d’illuminazione e atmosferico della scena. Grazie al lavoro di ottimizzazione eseguito,



Fig. 8 – Vista del modello ricostruttivo: il fronte scenico.

è stato possibile utilizzare un sistema di illuminazione real-time, in cui la luce diretta del sole viene simulata da una *directional light*, mentre il cielo è simulato da uno *sky box/procedural*, tramite il quale è possibile modificare le caratteristiche atmosferiche, come colore, esposizione e spessore atmosferico. Infine, per rendere la scena dinamica e realistica è stato inserito un sistema di simulazione atmosferico per l’inserimento e l’animazione delle nuvole, gestendo direzione e intensità del vento tramite *Terrain e Wind Zone*. Definito in modo completo l’ambiente virtuale, si è passati a quanto necessario per la fruizione tramite visore e controller, valutando in particolare la modalità di locomozione e le possibilità di interazione, con l’intento di creare uno spazio digitale attivo dove l’utente possa interagire, esplorare, scoprire ed essere incuriosito dal sito archeologico in cui si trova immerso.

Riguardo al sistema di locomozione, è stata conferita all’utente la possibilità di muoversi liberamente nello spazio camminando; ciò è reso possibile dalle caratteristiche hardware del visore scelto, poiché ogni spostamento del visore nell’ambiente reale, essendo tracciato spazialmente da due camere, viene riportato nell’ambiente virtuale, simulando il movimento. In aggiunta a questa modalità, è stata inserita la possibilità di muovere la propria posizione tramite un puntatore, grazie al quale l’utente è teletrasportato nel punto indicato. Al fine di evitare che l’utente finisca a ridosso di muri o all’esterno del teatro, è stata eseguita una lista di target, individuati tramite tag, sui quali è consentito effettuare questo teletrasporto.

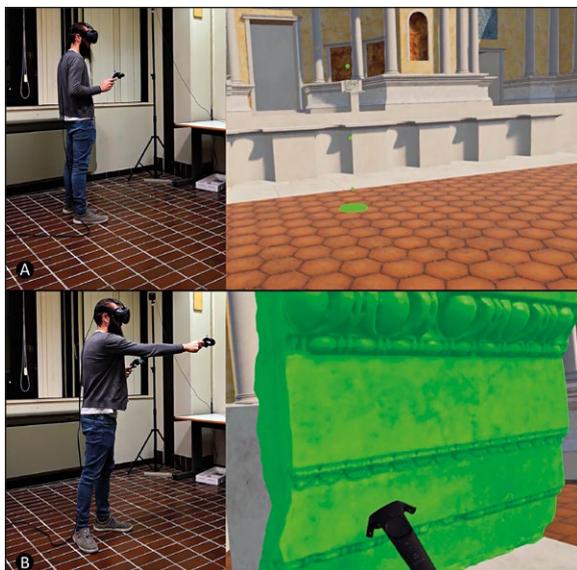


Fig. 9 – Funzionamento dell'applicazione VR: A) Funzionamento del sistema di teletrasporto a parabola; B) Interazione con oggetto reperto archeologico.

Per quanto riguarda l'interazione, si è reso possibile manipolare tramite controller alcuni oggetti 3D inseriti nella scena virtuale. Avvicinando il controller all'oggetto, l'utente potrà vincolarlo ad esso e quindi spostarlo, farlo ruotare, osservarne da vicino i dettagli e ascoltarne una descrizione. Questa interazione è stata concepita con l'intento di sperimentare un prototipo di Virtual Museum, dove il teatro funge da contenitore e i reperti archeologici digitalizzati giocano il ruolo di contenuto (Fig. 9).

Nella definizione dell'esperienza virtuale è poi fondamentale la generazione di un collegamento diretto tra ricostruzione virtuale e stato di fatto. Si è così voluto rendere possibile all'utente tramite l'utilizzo dei controller di passare dalla visualizzazione della ricostruzione a quella dei resti archeologici oggi visibili, permettendo un confronto diretto tra i due modelli.

## 6. CONCLUSIONI

La lettura dei ruderi archeologici è un'operazione non immediata, che richiede l'applicazione di categorie interpretative specifiche, fatto che rende estremamente complessi i processi di valorizzazione del patrimonio edilizio archeologico. Obiettivo della ricerca è stato dunque anche quello di definire e proporre un processo di lavoro, volto alla individuazione di nuovi e più

efficaci metodi per documentare, rappresentare e fruire il patrimonio culturale e archeologico. Il processo coinvolge ambiti scientifici, conoscenze e competenze diversi che devono essere necessariamente collegati in forma collaborativa. Nello specifico, il rilievo digitale integrato ha permesso di ottenere dati precisi e accurati, producendo una perfetta copia digitale dei resti del teatro, fornendo dati essenziali per lo studio di natura archeologica e architettonica prima e per la creazione dell'ambiente virtuale ricostruttivo dopo.

Di pari importanza è stata la modellazione 3D. Grazie ad una metodica iterativa, è stato possibile usufruire di un vero e proprio strumento di ricerca collaborativo, finalizzato ad ottenere un prodotto finale il più possibile completo, realistico e soprattutto corretto dal punto di vista scientifico. Infine, lo sviluppo dell'applicazione di VR ha permesso di divulgare, in maniera coinvolgente, il lavoro scientifico svolto. L'attenzione al fotorealismo ha fatto sì che l'utente fosse immerso nell'ambiente virtuale in modo completo, suscitando un coinvolgimento emotivo in grado di stimolare curiosità e volontà di conoscenza.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, numerose sono le linee di ricerca che si sono aperte: la prima riguarda la necessità di continuare lo sviluppo di quest'applicazione mediante l'introduzione di nuove interazioni e nuovi contenuti multimediali, come audio e video in grado di descrivere al meglio l'iter ricostruttivo oltre che la storia del teatro, andando a creare un più complesso e completo Virtual Museum VR. In secondo luogo, vanno sperimentate le possibilità di utilizzare e integrare il modello con altre informazioni, relative ad esempio allo stato di conservazione del bene, ai fini del monitoraggio dei processi di gestione dell'area archeologica attraverso le ICT. Se la lettura del patrimonio archeologico allo stato di rudere è un processo complesso, la sfida è anche quella di inserire il singolo oggetto nel paesaggio antico archeologicamente ricostruito, e non solo in quello urbano secondo modelli comuni e diffusi, ma nel più ampio contesto territoriale (PERNA 2019).

Un altro nodo cruciale legato alle implementazioni future riguarda infine lo sviluppo di uno studio sull'esperienza utente per comprendere in maniera rigorosa come il visitatore si rapporta con queste tecnologie, sia al fine di migliorare le interfacce e le interazioni, sia per comprendere come queste tecnologie influiscono dal punto di vista cognitivo.

PAOLO CLINI, RENATO ANGELONI, MIRCO D'ALESSIO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura  
Università Politecnica delle Marche

p.clini@univpm.it, r.angeloni@staff.univpm.it, m.dalessio@pm.univpm.it

ROBERTO PERNA, DAVID SFORZINI

Dipartimento di Studi Umanistici – Lingue, Mediazione, Storia, Lettere, Filosofia  
Università degli Studi di Macerata

roberto.perna@unimc.it, sforzinidavid@gmail.com

## BIBLIOGRAFIA

- BIANCONI F., FILIPPUCCI M. 2019, *La fotomodellazione per il rilievo archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 205-228 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.13>).
- BRANDOLINI F., CREMASCHI M., ZERBONI A., DEGLI ESPOSTI M., MARIANI G.S., LISCHI S. 2020, *SfM-photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas*, in G. BAGNASCO GIANNI, S. BORTOLOTTO, A. GARZULINO, M. MARZULLO (eds.), *Milano internazionale: la fragilità territoriale dei contesti archeologici. Atti del Convegno Internazionale (Milano 2019)*, «Archeologia e Calcolatori», 31.2, 33-45 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.2.2020.04>).
- BROUCKE P., FORTE M., SILIOTTI A., BOMMELAER J.F. 1999, *Virtual Archaeology: Re-creating ancient worlds*, «American Journal of Archaeology» (<https://doi.org/10.2307/506978>).
- BRUSAPORCI S., TRIZIO I. 2013, *La 'Carta di Londra' e il patrimonio architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione*, «SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology», 3, 2, 55-68 (<https://doi.org/10.2423/i22394303v3n2p55>).
- CALZA G. 1927, *Il teatro romano di Ostia*, Roma, Società Editrice d'Arte Illustrata.
- CARD S.K., MACKINLAY J.D. 1999, *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, Durham, Morgan Kaufmann (<https://www.researchgate.net/publication/220691172>).
- CLINI P., QUATTRINI R., ANGELONI R., D'ALESSIO M., CAPPUCCI R. 2020, *Realtà virtuale e potenzialità dei facsimili digitali per i musei. Il caso dello Studiolo del duca di Urbino*, «Disegnare Idee Immagini», 61, 56-67.
- D'EREDITÀ A. 2020, *Il rilievo fotogrammetrico di Doclea*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 213-230 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.10>).
- FERDANI D., FANINI B., PICCIOLI M.C., CARBONI F., VIGLIAROLO P. 2020, *3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome*, «Journal of Cultural Heritage», 43, 129-143 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.004>).
- FORTE M., PESCARIN S., PIETRONI E., RUFA C. 2006, *Multiuser interaction in an archaeological landscape: The Flaminia Project*, in S. CAMPANA, M. FORTE (eds.), *From Space to Place, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Remote Sensing in Archaeology (Roma 2006)*, Oxford, BAR International Series 1568, Archaeopress, 189-196. ([https://www.ark.lu.se/media/utbildning/dokument/kurser/ARKN06/20102/archaeological\\_landscape\\_flaminia.pdf](https://www.ark.lu.se/media/utbildning/dokument/kurser/ARKN06/20102/archaeological_landscape_flaminia.pdf)).
- GABELLONE F., FERRARI I., GIURI F. 2017, *A new contribution for the reconstructive study of the theatre of Taormina*, in IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology. *Proceedings of the International Conference (Lecce 2017)*, Red Hook, Curran Associates, 595-600 (<https://www.researchgate.net/publication/320651265>).
- GARCÍA-LEÓN J., SÁNCHEZ-ALLEGUE P., PEÑA-VELASCO C., CIPRIANI L., FANTINI F. 2018, *Interactive dissemination of the 3D model of a baroque altarpiece: A pipeline from digital survey to game engines*, «SCIRES-IT», 8, 2, 59-76 (<https://doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59>).
- GIORGI E., LUPPINO L., LAPACCIANA N., SCOZ J. 2021, *Accurata, ma sostenibile: soluzioni operative per la documentazione grafica e fotografica dello scavo sul sito di Vignale*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 155-174 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.09>).
- GRECO G., BATTISTELLI P. 2002, *Lo sviluppo architettonico del complesso del teatro di Ostia alla luce delle recenti indagini nell'edificio scenico*, «Mélanges de l'École française de Rome: Antiquité», 114.1, 391-420 (<http://digital.casalini.it/10.1400/13533>).
- GROS P. 1997, *Vitruvio de Architectura*, Torino, Einaudi.
- GUIDI G., FRISCHER B., LUCENTI I. 2007, *Rome Reborn. Virtualizing the ancient imperial Rome*, in F. REMONDINO, S. EL-HAKIM (eds.), *3D-ARCH 2007, Atti del Convegno Internazionale Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (Zurigo 2007)*, ISPRS Archives-XXXVI-5/W47 ([https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/5-W47/pdf/guidi\\_etal.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/5-W47/pdf/guidi_etal.pdf)).

- INGLIERI R.U. 1939, *Il teatro romano di Ricina*, Siracusa, Società Tip. di Siracusa.
- LIAROKAPIS F., KOUŘIL P., AGRAFIOTIS P., DEMESTICHA S., CHMELÍK J., SKARLATOS D. 2017, *3D modelling and mapping for virtual exploration of underwater archaeology assets*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 425-431 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-425-2017>).
- MALFITANA D., GABELLONE F., CACCIAGUERRA G., FERRARI I., GIURI F., PANTELLARO C. 2016, *Critical reading of surviving structures starting from old studies for new reconstructive proposal of the Roman theatre of Catania*, in J.L. LERMA, M. CABRELLES (eds.), *ARQUEOLÓGICA 2.0, Proceedings of the the 8<sup>th</sup> International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation (Valencia 2016)*, València, Editorial Universitat Politècnica de València, 155-161 (<https://doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.3556>).
- MANZETTI M.C., PAPADOPOULOS N.T. 2021, *Being a spectator in a Roman theatre: A VR APP*, in A. BELLIA (ed.), *From Digitalisation and Virtual Reconstruction of Ancient Musical Instruments to Sound Heritage Simulation and Preservation*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 457-468 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.25>).
- MODONA A.N. 1961, *Gli edifici teatrali greci e romani*, Firenze, L. Olschki Editore.
- NICCOLUCCI F., BEACHAM R., DENARD H. 2006, *An introduction to the London Charter*, in M. IOANNIDES, D.B. ARNOLD, F. NICOLUCCI, K. MANIA (eds.), *The E-volution of ICTechnology in Cultural Heritage: Where Hi-Tech Touches the Past: Risks and Challenges for the 21<sup>st</sup> century, Proceedings of the Joint Event CIPA/VAST/EG/EuroMed Event (Cipro 2006)*, Budapest, Archeolingua ([https://www.academia.edu/1229183/An\\_introduction\\_to\\_the\\_london\\_charter?auto=citations&from=cover\\_page](https://www.academia.edu/1229183/An_introduction_to_the_london_charter?auto=citations&from=cover_page)).
- PALOMBINI A., FANINI B. 2019, *Il museo virtuale della Valle del Calore*, in P. GROSSI, A. CARAVALE, P. BASSO (eds.), *ArcheoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica, Atti del XII Workshop (Roma 2018)*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 487-490 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.36>).
- PERNA R. 2018, *Problemi di viabilità romana nelle valli del Potenza e del Chienti: per un approccio pluridisciplinare*, «Agri Centuriati: An International Journal of Landscape Archaeology», 15, 83-98.
- PERNA R. 2019, *Comunicare il paesaggio archeologico: dallo studio del territorio al plastico virtuale interattivo per la ricostruzione del catasto della città romana di Urbs Salvia*, in A. ANDREOLI (ed.), *Ambiente e società antica. Temi e problemi di geografia storica padano-adriatica. Atti della giornata di studi in ricordo di Nereo Alfieri (Ferrara 2015)*, Ferrara, Edizioni Cartografica, 171-198.
- REILLY P. 1991, *Towards a Virtual Archaeology*, in CAA90. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*, BAR International Series 565, Oxford, Tempus Reparatum, 132-139.
- SANTONI M. 1877, *Il teatro dell'antica Recina*, Camerino, Borgarelli.
- SEAR F. 2006, *Roman Theatres: An Architectural Study*, Oxford, University Press.
- STONE R.J. 1999, *Virtual Heritage*, «UNESCO's World Heritage Magazine», 18-20.
- TACCOLA E., ROSSELLI L., ALBERTINI N., MARTINO M. 2021, *Etruscan hypogea in 3D: A proposal for an immersive and interactive visualization of Volterra's funerary contexts*, in V. BALDONI (ed.), *From Pottery to Context. Archaeology and Virtual Modelling*, «Archeologia e Calcolatori», 32.2, 135-152 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.12>).
- TOSI G., BACCELLE L. 2003, *Gli edifici per spettacoli nell'Italia romana*, Roma, Quasar.
- VERMEULEN F., VAN LIMBERGEN D., MONSIEUR P., TAELEMAN D. 2017, *The Potenza Valley Survey (Marche, Italy): Settlement Dynamics and Changing Material Culture in an Adriatic Valley between Iron Age and Late Antiquity*, Roma, ESS Editorial Service System Srl.
- WARE C. 2012, *Information Visualization, Third Edition: Perception for Design*, Durham, Morgan Kaufmann.

## ABSTRACT

This paper presents a workflow developed thanks to the collaboration between archaeologists and engineers, aimed at the documentation, representation and virtual fruition of an archaeological site. The purpose is to exploit the data acquired through digital solutions and the consequent elaboration of a reality 3D model to support archaeological studies and to effectively disseminate their results. The presented case study is the Roman Theatre of *Ricina* (Villa Potenza, MC). The building has preserved much of its masonry, but it is very different from that which could be appreciated by the audience of theatrical performances in Roman times. The work has been developed according to three steps: 1) digital documentation of the site and elaboration of a reality-based 3D model; 2) study of the archaeological finds thanks to the reality-based 3D model and design of a possible reconstruction, represented through a second 3D model elaborated by anastylosis; 3) development of a Virtual Reality environment for the fruition and the interaction with the two 3D models. The final output is therefore an immersive VR application that offers the possibility to access to the theatre both in its current form and in the original one. An experience that is not limited to a simple visualization rather presenting itself as a guided tour across the centuries.

33.1  
2022

€ 40,00

ISSN 1120-6861

e-ISSN 2385-1953

ISBN 978-88-9285-122-1

e-ISBN 978-88-9285-123-8

AC-33-1



ARCHEOLOGIA  
E CALCOLATORI