

Naturali o antropiche? Misura e visualizzazione delle cavità murarie in cerchie urbiche

Adriana Rossi
Sara Gonizzi Barsanti
Silvia Bertacchi

Abstract

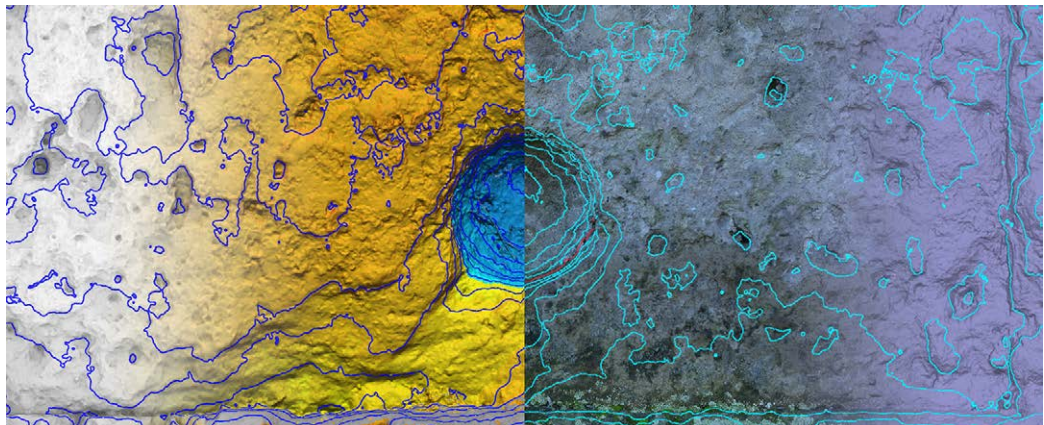
La conoscenza di un manufatto è basata sulla sua misura. Le misure sono attendibili in funzione dello scopo delle analisi. Per indirizzare le azioni di restauro sulle cerchie urbiche, prodromica è la discussione sulle cause del degrado della muratura. Le analisi di rilievo contribuiscono alla scelta delle azioni da intraprendere. Il contributo discute questioni di metodo: illustra le fasi sperimentali del rilievo fotogrammetrico, mettendo in luce, per i fini premessi, alcune delle potenzialità offerte dalla tecnica *Structure from motion (SfM)*.

Distinguere le tracce naturali da quelle antropiche appare una priorità per il caso esaminato onde evitare di nascondere testimonianze dirimenti per la storia del manufatto. Si propongono pertanto possibili operazioni di misura *reality-based* all'interno di software dedicati alla gestione e alla visualizzazione digitale dei calchi virtuali 3D acquisiti. I modelli derivati, mediante procedura di modellazione inversa, hanno permesso di riconoscere la natura antropica dei dissesti. Si tratta di impronte balistiche che vanno studiate e contestualizzate per comunicare, in modo semplice e coinvolgente, l'autenticità di una testimonianza, premessa indispensabile a qualunque progetto di restauro del manufatto.

Parole chiave

calchi virtuali, modelli da reale, *Structure from Motion*, modellazione inversa, geometria del degrado

Visualizzazioni a confronto. Modello digitale 3D di una cavità muraria in cerchia urbica ottenuto mediante fotogrammetria. Le mappe adottate enfatizzano l'andamento superficiale, la deviazione in falsi colori rispetto ad un piano di riferimento, la texture del colore apparente applicata alla mesh poligonale e le curve di livello.



Introduzione

Verificare quante volte un'unità di misura è compresa nella grandezza da rilevare è un'azione volta a immergere l'oggetto di studio nel campo della confrontabilità. Ogni configurazione fisica può essere misurata con strumenti manuali, meccanici, ottici, elettronici. L'impiego dei sensori, attivi e passivi, consente di trasformare la grandezza d'ingresso in punti-immagini, identificati nelle caratteristiche matematiche e radiometriche.

Conseguono restituzioni fotorealistiche, precise e accurate, da cui ricavare viste bidimensionali di forme complesse quali sono quelle pertinenti il degrado della muratura e quindi funzionali alle questioni messe a tema.

Di seguito si discutono questioni di metodo: il caso studio è infatti un pretesto intercambiabile con altri analoghi (fig.1). Il restauro delle cerchie urbane necessita di un modello di rilievo generato come strumento di appoggio per le scelte di progetto; il modello, come in tutti gli altri casi si pone quale collettore delle caratteristiche geometriche-matematiche-radiometriche e informative. Imprescindibili per lo studio delle cinte murarie sono le stratificazioni ermeneutiche e critiche a cui l'opera ha dato luogo e da cui le successive trasformazioni traggono motivazione, direzione e controllo. Trattandosi di superfici lapidee stratificate nei secoli, prodromica è la discussione sulle cause degli eventuali degradi sulle murature. Discernere la tipologia dei danni, se naturali o antropici, è una necessità dirimente per evitare di cancellare testimonianze di considerevole rilievo. Prezioso è inoltre il monitoraggio nel tempo: le informazioni morfometriche e superficiali si configurano infatti come un simulacro di valore da conservare adeguatamente [UNESCO 2019].

Danneggiano la materia e indeboliscono la struttura, catastrofi naturali, come terremoti, alluvioni, frane, eruzioni, o la costante erosione dovuta agli agenti atmosferici, alla crescita di vegetazione infestante e allo sviluppo di muschi e licheni. A queste si devono aggiungere i

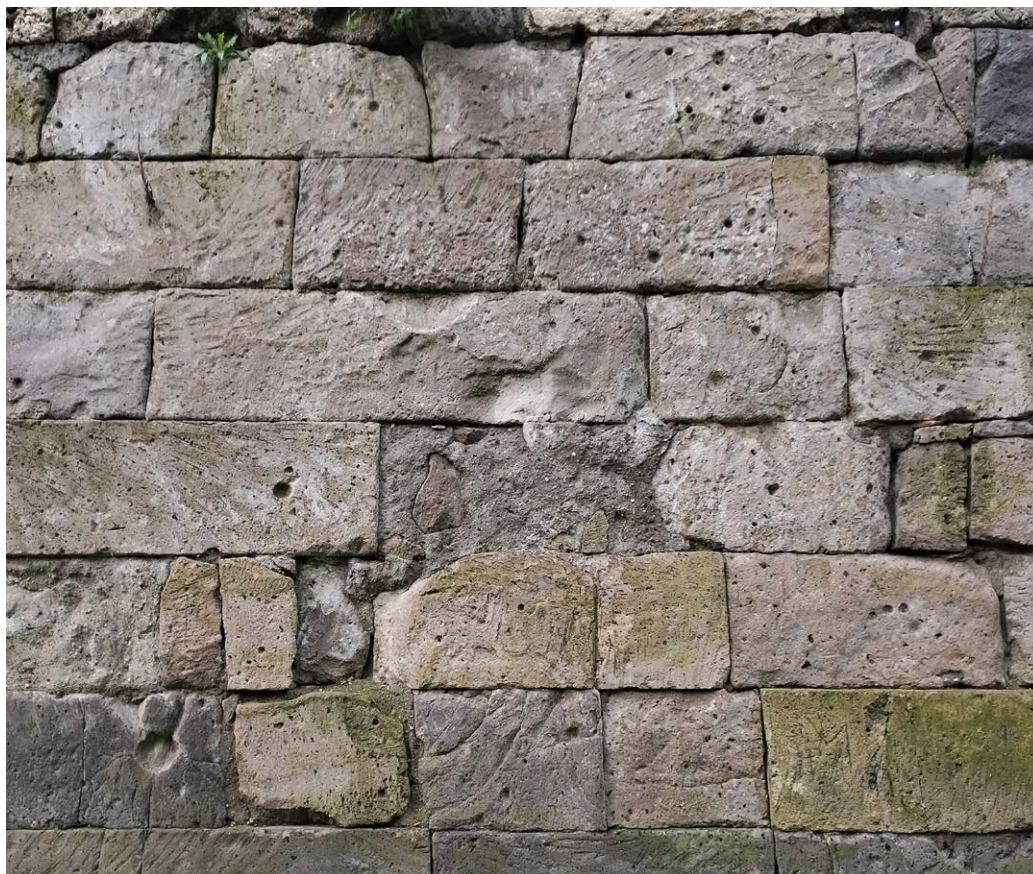


Fig. 1. Tratto della cerchia urbana antica eletta ad emblema della metodologia. Immagine degli autori.

danni procurati nei secoli da assedi ed espoliazioni, e non da ultimo restauri incauti e vandalismi di ogni sorta. Conseguono l'opportunità di "riconoscere per dimostrare", di "documentare per conservare", di "divulgare per tutelare" la natura dei danneggiamenti riscontrati.

Il valore archeologico di cui sono portatrici tutte le antiche cerchie urbane, impone l'utilizzo di strumentazioni e metodologie senza contatto.

La campagna di rilievo, effettuata ad inizio anno, ha consentito di porre ad origine del sistema informativo modelli *reality-based* 3D. L'organizzazione del flusso di lavoro si propone di ricavare, mediante processi di modellazione inversa, modelli mesh di quelle cicatrici che, alla luce di riflessioni di polemologia e di oplotologia, si propongono come impronte balistiche. I calchi virtuali serviranno nella fase successiva a quantificare i parametri di tiro e, attraverso questi, a risalire al tipo di arma ovvero alla datazione del danno presunto.

Adeguate allo scopo, e per questo prescelte, sono le tecnologie digitali di rilievo fotogrammetrico. In particolare, gli algoritmi di image matching (*Structure from Motion*, SfM) permettono di catturare la superficie con accuratezza e flessibilità. La procedura, parzialmente automatizzata, è funzionale all'elaborazione delle mesh 3D da impiegare nei processi di ingegneria inversa [Dawkins et al. 2018].

Tali metodologie, consentono alle rappresentazioni ottenute, sempre che siano il frutto di processi ed elaborazioni corretti, di organizzare flussi di lavoro finalizzati alla costruzione di un gemello digitale. S'intende per tale, nel concetto e nella definizione originale espressa da Michael Grieves: "Un costruito informativo digitale su un sistema fisico potrebbe essere creato come un'entità a sé stante.

Questa informazione digitale sarebbe un "gemello" dell'informazione incorporata nel sistema fisico stesso e sarebbe collegata a quel sistema fisico attraverso l'intero ciclo di vita del sistema" [Grieves 2011].



Fig. 2. Fotocamera e illuminatore utilizzati nelle campagne di rilevamento fotogrammetrico. Immagine degli autori.

Il prodotto ottenuto risulta funzionale ad estendere, a studiosi e operatori di varie discipline, i vantaggi di un modello di coordinamento generale di dati e informazioni. Il modello federato, condiviso e interoperabile, potrà essere adeguatamente semplificato per essere accessibile a fruitori diversamente abilitati.

Documentazione fotogrammetrica del caso studio

Le attuali tecnologie di rilevamento fotogrammetrico, per velocità, economicità e accuratezza raggiungibile su superfici otticamente cooperanti, risultano tra le tecniche più competitive per l'analisi dei manufatti [Gonizzi et al. 2013, Russo 2020, Apollonio et al. 2021, Croce et al. 2021]. Seguendo l'ormai noto processamento dei fotogrammi secondo un flusso di lavoro in parte personalizzato ad hoc per le cerchie murarie oggetto di studio, e a fronte di un network di posizionamento dei singoli scatti opportunamente strutturato a priori, la densità e qualità delle nuvole di punti ottenute è paragonabile a quella ottenibile mediante sistemi di rilevamento attivi. Trasformando questi dati in mesh poligonali, con applicata informazione cromatica veicolata tramite mappatura nello spazio parametro della mosaicatura di scatti fotografici, si ottiene un oggetto avanzato 3D dal quale derivare una serie di elaborati [Cipriani et al. 2014]. Tuttavia, l'approccio *image-based* alla documentazione richiede alcuni importanti accorgimenti affinché il modello digitale finale sia congruo con le caratteristiche di completezza e affidabilità metrica e morfologica. In primo luogo, per affrontare il rilevamento di dettaglio risulta necessario determinare a priori i parametri legati alla specifica fotocamera impiegata (fig. 2) [1], considerando la logistica e le possibilità di azione sul tema.

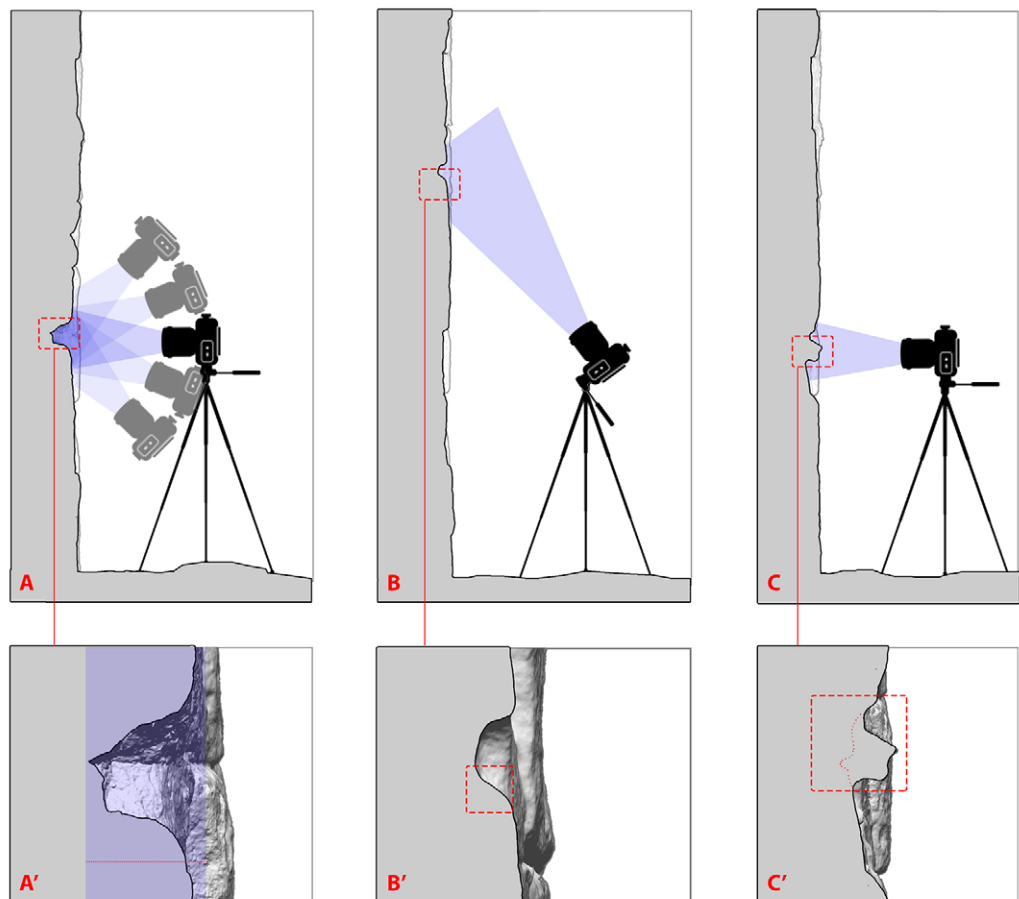


Fig. 3. Accorgimenti seguiti per ottenere una documentazione fotogrammetrica morfologicamente completa e metricamente affidabile dell'oggetto di studio. Elaborazione degli autori.

In particolare, calcolando la *Ground Sample Distance* desiderata per ottenere la risoluzione appropriata e garantire una copertura orizzontale/verticale sufficiente fra foto consecutive, orientando la fotocamera anche in posizione inclinata in modo da catturare eventuali protuberanze/sottosquadri in caso di cavità (fig. 3A); inoltre, stabilendo una *Depth of Field* uguale o superiore alla profondità dell'oggetto da documentare per avere fotogrammi con nitidezza accettabile (condizione necessaria per l'ottenimento della corretta ricostruzione della scena attraverso *Structure from Motion*), soprattutto nel caso di rientranze, per evitare aree fuori fuoco che possano introdurre, una volta processate, mancanza di coerenza con la geometria reale (figg. 3A', 4); infine, prevedere l'inserimento nella scena di un target per il bilanciamento del colore per eliminare dominanti cromatiche e del riferimento metrico per la corretta messa in scala del modello digitale.

Ciò nonostante, esiste il limite di acquisizione quando l'oggetto da rilevare si trova ad altezze non raggiungibili dall'operatore, pertanto la mancanza di copertura totale della superficie rende alcune aree prive di dati che le operazioni di trasformazione in maglia poligonale tendono a completare con geometrie non congruenti con il reale (fig. 3B-B'), come ad esempio in presenza di vegetazione infestante inserita nelle cavità, che impedisce la corretta acquisizione della superficie occlusa, e in presenza di fori molto profondi, per i quali l'occlusione della radiazione luminosa non è superabile nemmeno mediante illuminazione artificiale (fig. 3C-C').

In questi casi la documentazione può essere integrata da scanner a triangolazione o luce strutturata in grado di produrre modelli molto densi, con risoluzione submillimetrica, sebbene da considerare all'interno della loro risoluzione e profondità di campo determinata dalle caratteristiche intrinseche dello strumento.

Il modello poligonale ottenuto completo di texture costituirà il materiale di studio per verificare le tracce di interesse, sia dal punto di vista dimensionale che per comprendere, a scala ravvicinata, i danneggiamenti subiti dalla muratura (fig. 5).

Rappresentazione 3D e visualizzazione grafica

Dalla copia digitale 3D della superficie muraria e delle sue tracce, a seguito di ottimizzazione intelligente per correggerne errori geometrici e anomalie topologiche, il modello poligonale è adatto a molteplici operazioni di indagine, sia all'interno di software, che mediante elaborati bidimensionali finalizzati alle operazioni di restauro.

Nel caso di ambienti virtuali sono consentite diverse opzioni di analisi e di potenziamento percettivo della forma con gli strumenti di visualizzazione sviluppati nell'ambito della rappresentazione digitale [Remondino 2004, Pintus et al. 2016].

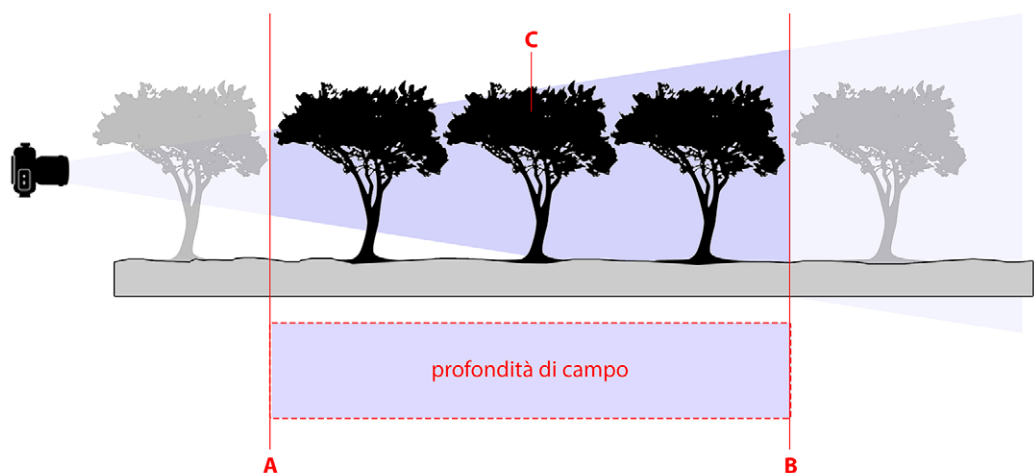


Fig. 4. Schema di calcolo, dove A è il limite più vicino e B più lontano di definizione accettabile, e la zona compresa tra A e B la profondità di campo, C la messa a fuoco alla distanza del soggetto. Elaborazione degli autori.



Fig. 5. Visualizzazione nell'ambiente virtuale della copia digitale di una superficie lapidea degradata (A) e ortoimmagine della vista (B). Elaborazione degli autori

Questi si basano sull'applicazione di mappe specifiche in grado di enfatizzare i fenomeni di chiaroscuro dovuti all'illuminazione ambientale. In altri casi le mappature per il ripristino del dettaglio accentuano la presenza di rilievi e sottosquadri, incrementando la leggibilità all'utente finale del modello digitale per motivi di studio [Fantini et al. 2023].

Segnatamente, le mappe del colore diffuso, che danno informazione sui materiali, e le mappe di occlusione, che contengono informazioni di ombreggiatura pre-calcolate (fig. 6), consentono una prima verifica con software di riconoscimento di feature su immagini ad alta risoluzione (impiegati tanto in ambito medico che militare), ad esempio automatizzando il processo di individuazione di elementi di interesse, evidenziando fori di maggiore profondità, di diametro simile o tracce morfologicamente regolari (fig. 7). Tale flusso di lavoro consente di individuare, classificare e visualizzare la superficie in modo alternativo e irrealistico, ma funzionale allo scopo di distinguere le varie tipologie di tracce rinvenibili sulla pietra ed eliminare i "falsi positivi". Questi ultimi sono dovuti alla natura stessa del materiale impiegato (fori e cavità dovute a porosità e alla costituzione stessa del materiale) e al degrado naturale (come lo sfaldamento del materiale o la caduta di parti), distinguendoli dai segni di lavorazione e da possibili danneggiamenti antropici (eventuali danni volontari inferti alle murature antiche, specialmente se facenti parte di cinte murarie, in occasione di assedi).

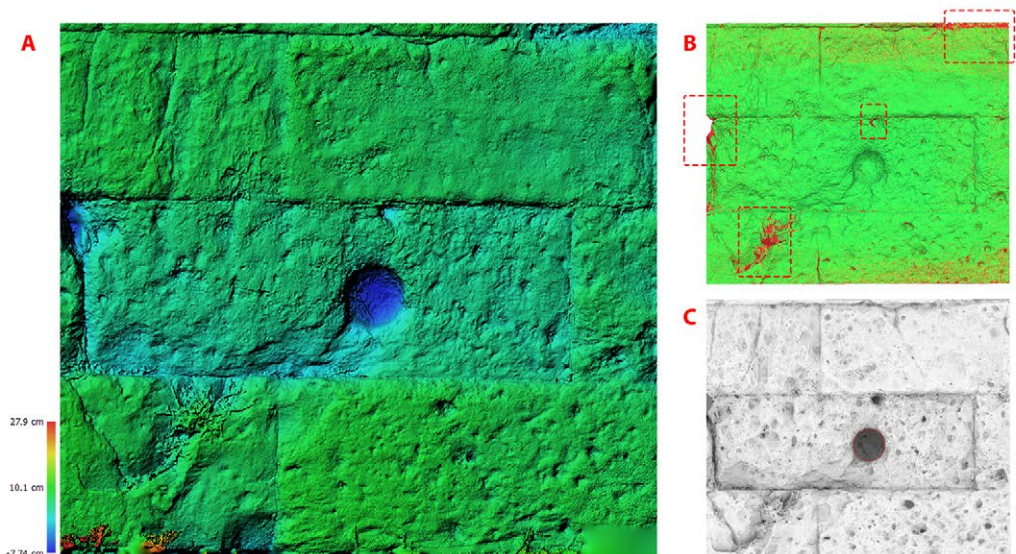


Fig. 6. Visualizzazione in falsi colori dell'andamento superficiale della mesh poligonale; B) rappresentazione grafica della *model confidence* (attendibilità minore nelle parti in rosso, es. fori profondi, vegetazione, documentazione non sufficiente); C) *occlusion map* (in evidenza il foro più regolare). Elaborazione degli autori.

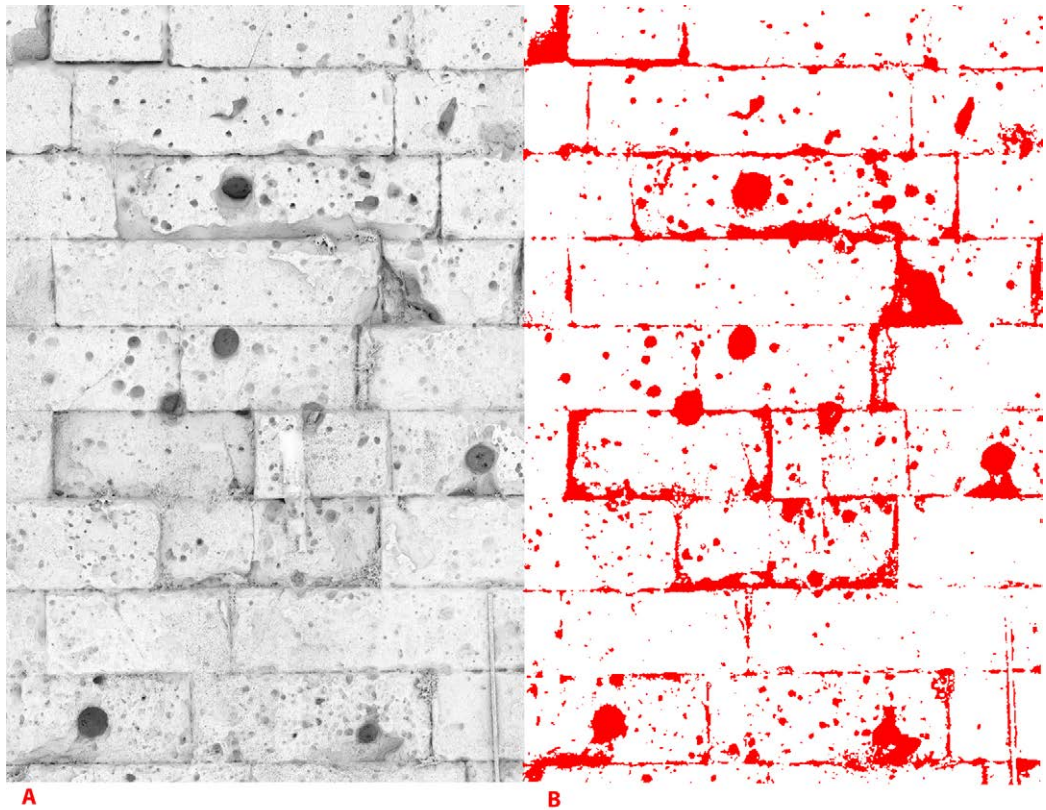


Fig. 7. A) mappa di occlusione di parte del muro, che contiene informazioni di ombreggiatura precalcolate, mettendo in evidenza le cavità in colore più scuro; B) elaborazione dell'immagine mediante software di riconoscimento automatico di feature, per la ricerca per dimensione e tendenza alla circolarità.

Sono molteplici, infatti, le possibilità offerte dai programmi per l'interrogazione e l'elaborazione delle superfici, ad esempio lo scostamento della mesh rispetto a piani virtuali scelti dall'operatore tramite falsi colori per enfatizzare cavità e protuberanze (fig. 8).

A ciò va aggiunta la possibilità di sezionare il modello secondo varie modalità, non ultima quella che porta all'ottenimento di curve di livello, in modo da incrementare le potenzialità espressive tradizionali mostrando in un'unica proiezione l'andamento geometrico globale di un manufatto, e possibilmente distinguendo geometrie irregolari naturali e segni antropici (fig. 9).

Inoltre, il modello sottoposto a elaborazioni di modellazione inversa rende possibile l'ottenimento di calchi virtuali, dai quali estrapolare informazioni dimensionali e geometriche oltre che repliche fisiche dell'oggetto mediante stampa 3D (fig. 10).

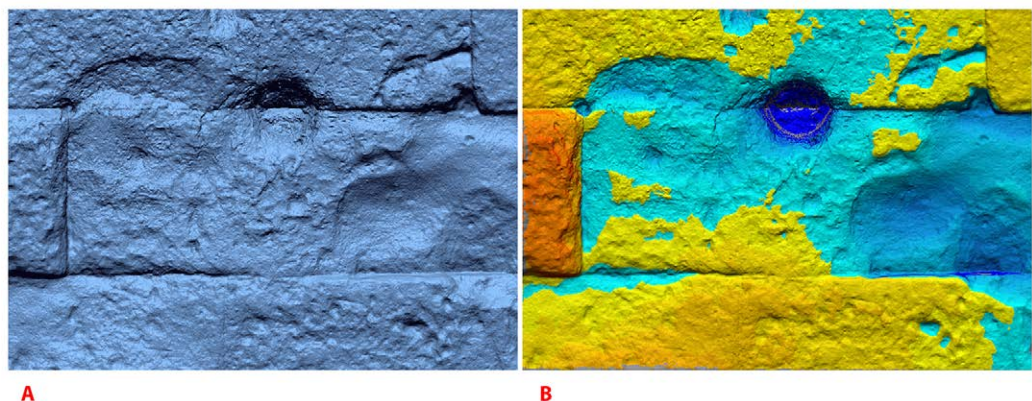


Fig. 8. Verifica dello scostamento della mesh (A) rispetto ad un piano di riferimento e visualizzazione in falsi colori di cavità (verde-blu) e protuberanze (giallo-rosso) (B). Elaborazione degli autori.

Fig. 9. Sezionamento del modello mesh (A) mediante una serie di piani ad intervallo regolare per creare curve di livello che coadiuvano la rappresentazione grafica dell'andamento geometrico e l'interpretazione dimensionale della geometria irregolare delle tracce superficiali. Elaborazione degli autori.

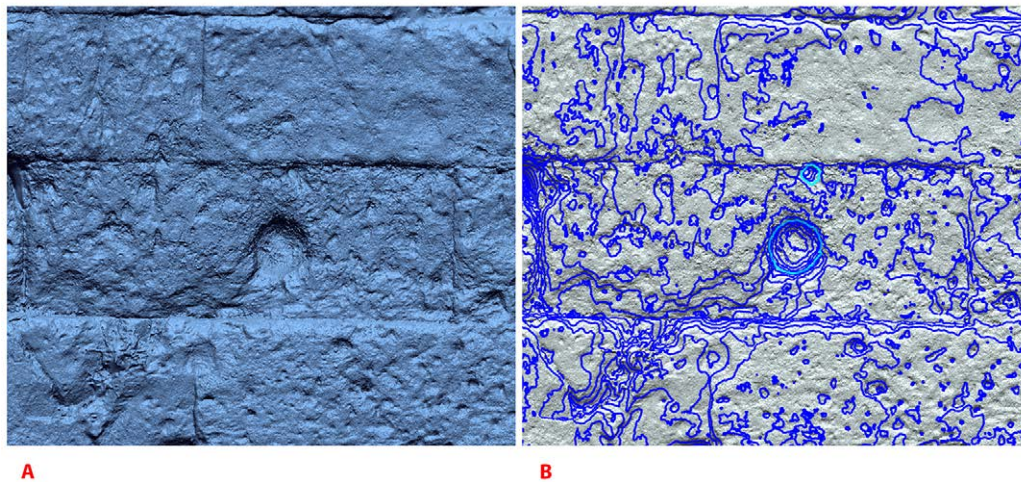
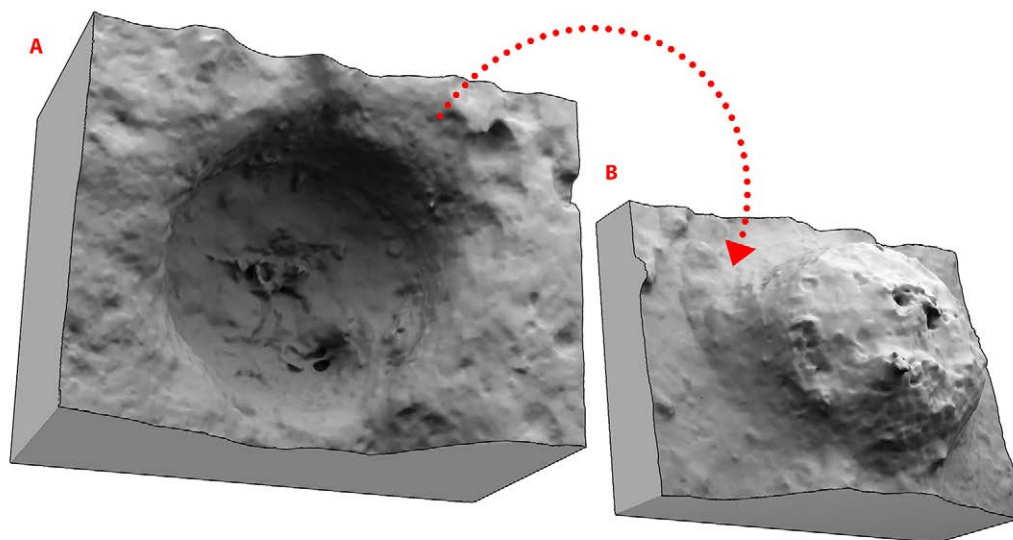


Fig. 10. Calco virtuale ottenuto dalla superficie digitale rilevata che rappresenta il positivo della cavità. L'oggetto digitale, oltre alla semplice portabilità fra operatori, ha il vantaggio risultare indeformabile nel tempo ed essere referenziato rispetto alla muratura da cui è stato "virtualmente" ottenuto. Elaborazione degli autori.



Dal modello della muratura infatti (copia negativa da cui ottenere profondità e diametro), è possibile ricavare il calco positivo mediante una superficie aderente al modello con normali invertite rispetto alla superficie rilevata.

La morfologia a disposizione, se regionalizzata, permette di riconoscere e ipotizzare primitive geometriche che potrebbero coincidere con le forme solide dell'oggetto che ha provocato l'impatto (utensili, punte, proiettili).

Il miglioramento della forma acquisita tramite lisciatura selettiva di morfologie non pertinenti, necessaria per ottenere una corretta regionalizzazione delle cavità dalla quale deriva una più significativa interpretazione morfologica [Grilli et al. 2018] (fig. 11), permette più agilmente di riconoscere automaticamente forme cilindriche, sferiche e coniche facilitando la formulazione di ipotesi così come lo studio metrico del calco positivo (fig. 12).

Le caratteristiche dimensionali al momento del rilevamento verranno registrate e confrontate con il materiale edito, consentendo l'individuazione di eventuali cadute di materiale dovuto a rottura da impatto e non solo per l'azione degli agenti atmosferici.

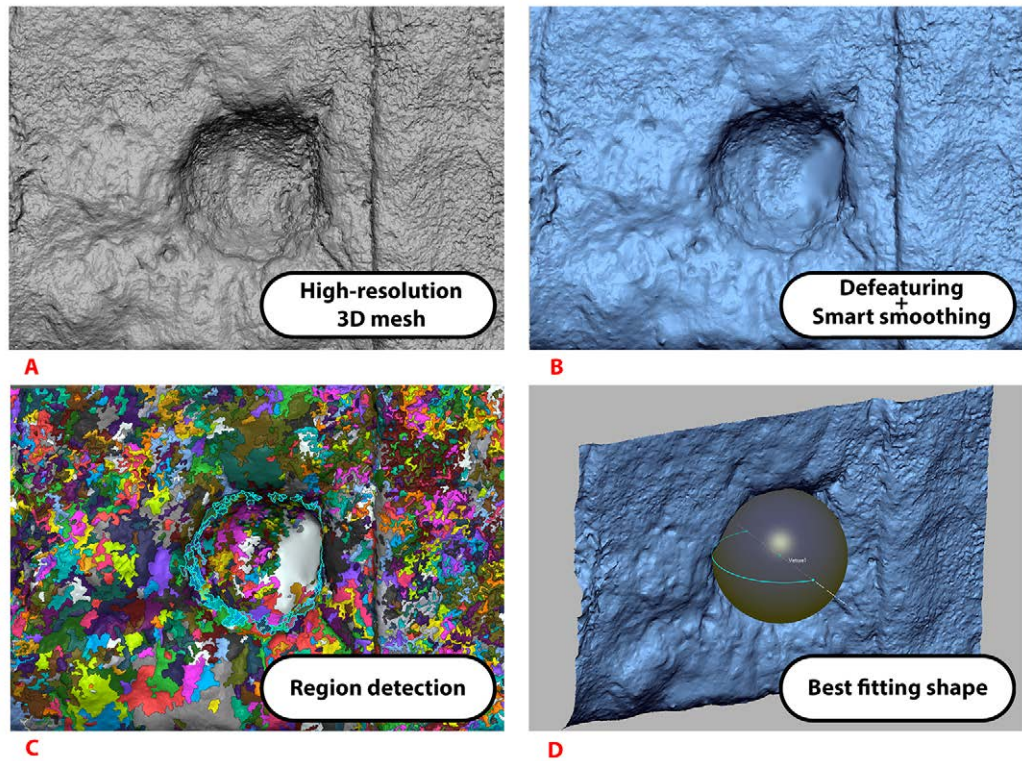


Fig. 11: A-B) Estrapolazione automatica di forme geometriche a partire da mesh ad alta risoluzione dopo alcuni passaggi di ottimizzazione e lisciatura della mesh per eliminare le peculiarità geometriche non pertinenti; C-D) regionalizzazione per la definizione di possibili solidi geometrici mediante best fitting. Elaborazione degli autori.

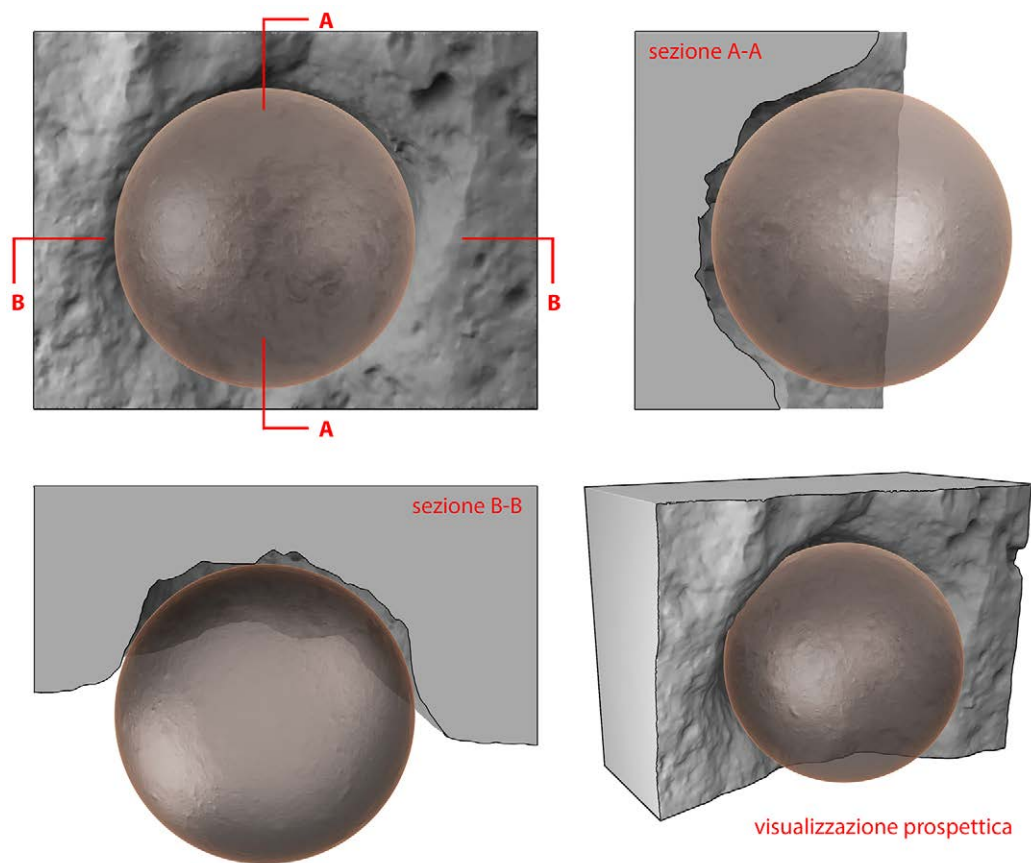


Fig. 12: Il modello digitale ad alta risoluzione costituisce la copia virtuale della superficie muraria esistente (calco negativo virtuale). Dalle dimensioni del foro (calco positivo) è possibile ipotizzare forme solide che potrebbero coincidere con l'oggetto impattante che ha provocato cavità e perdita di materiale. Elaborazione degli autori.

Conclusioni

La procedura adottata, applicabile a diversi casi di cerchie murarie, persiste nel tentativo di utilizzare strumenti e metodi in modo critico. Preceduto dai tempi del pensare e sostenuto da un impianto teorico e ideologico, il documento di rilievo, scientificamente derivato, guida le analisi e indirizza le scelte. Le riflessioni traggono, come ricorda l'etimologia della parola, da ciò che a primo acchito sembra liscio e indistinto (*laevo*) verso ciò che si impone per essere dirimente (*re-laevo*) in funzione dell'obiettivo specifico [Masiero 1991].

Comprendere la natura delle cicatrici presenti in gran numero sulla cinta muraria, è un aspetto dirimente che precede ogni programma di manutenzione e/o restauro. Le tecniche fotogrammetriche sono risultate ottimali per risalire alle cause dei danni riscontrati nel tratto di muratura eletta ad emblema della procedura. La forma assimilabile a quella sferoidale delle cavità e le dimensioni variabili entro un preciso intervallo di diametro, fanno ipotizzare che la causa di molte delle cavità osservate siano imputabili all'impatto di proiettili lapidei scagliati da baliste romane [Rossi 2024, Bertacchi et al. 2024]. Tale possibilità deve essere studiata e approfondita avendo il potenziale di scrivere o riscrivere, la storia degli assedi nel luogo e per analogia ad altri.

I mezzi digitali, diversamente dalle tecniche tradizionali per contatto, permettono l'acquisizione di informazioni geometriche e radiometriche con una qualità e quantità impensabile nel recente passato; i programmi di gestione di maglie poligonali mettono a disposizione di team multidisciplinari una serie di strumenti in grado di migliorare la percezione, oltre che la visualizzazione, di mappe salienti ai fini di diversa natura. Viene inoltre facilitato il confronto fra oggetti e forme ricorrenti, accomunate da dimensioni e compatibilità assimilabili a forme geometriche regolari. Le procedure, in parte anche automatizzate, possono portare a forme di graficizzazione corrette e più facilmente divulgabili rispetto a ortofotografie relative all'oggetto di studio. In modo semplice e coinvolgente si potrà quindi pensare di comunicare l'autenticità di una testimonianza, premessa indispensabile a qualunque progetto di restauro del manufatto.

Note

[1] La campagna fotogrammetrica è stata acquisita in più campagne a partire da dicembre 2023 con fotocamera Canon EOS 5D e 60D. Le elaborazioni sono state effettuate con il software Agisoft Metashape Professional vers. 1.8.2.

Riferimenti bibliografici

Apollonio F. et al. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, vol. 13, n. 3. <<https://doi.org/10.3390/rs13030486>>.

Bertacchi S., Gonizzi Barsanti S., Rossi A. (2024). Geometry of wall degradation: measuring and visualising impact craters in the northern walls of Pompeii. In *Scires-it Scientific REsearch and Information Technology*, vol. 14, n. 1. In corso di pubblicazione.

Cipriani L., Fantini F., Bertacchi S. (2014). 3D Models Mapping Optimization through an Integrated Parameterization Approach: Cases Studies from Ravenna. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XL-5, pp.173-80. <<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-173-2014>>.

Croce V. et al. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. In *Remote Sensing*, vol. 13, n. 3. <<https://doi.org/10.3390/rs13030461>>.

Dawkins O., Dennett A., Hudson-Smith A. P. (2018). Living with a Digital Twin: Operational Management and Engagement Using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park. In *Proceedings of the 26th annual GIScience Research UK conference: GISRUK 2018*. Leicester, UK, 17-20 April 2018. University of Leicester, UK: GISRUK.

Fantini F., Gaiani M., Garagnani S. (2023). Knowledge and documentation of Renaissance works of art: the replica of the "Annunciation" by Beato Angelico. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLVIII-M-2-2023, pp. 527-534. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-527-2023>>.

Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini, D. (2013). 3D surveying and modeling of archaeological sites – Some critical issues. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5-VI1, pp. 145–150. <<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-VI1-145-2013>>.

Grieves M. (2011). *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Cocoa Beach, FL: Space Coast Press.

Grilli E. et al. (2018). From 2D to 3D Supervised Segmentation and Classification for Cultural Heritage Applications. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLII-2, pp. 399-406. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-399-2018>>.

Masiero R. (1991). Tavola Rotonda. Il rilievo tra storia e scienza. In *XY digitale*, n. 11-12, pp. 114-116.

Pintus R. et al. (2016). A Survey of Geometric Analysis in Cultural Heritage. In *Computer Graphics Forum*, n. 35 (1), pp. 4-31. <<https://doi.org/10.1111/cgf.12668>>.

Remondino F. (2004). From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 34. <<https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/5-W10/>>.

Rossi A. (2024). The Survey of the Ballistic Imprints for a Renewed Image of Unearthed Pompeii. In *Nexus Network Journal*, n. 26, 307-324. <<https://doi.org/10.1007/s00004-023-00762-9>>.

Russo M. (2020). La fotomodellazione in ambito archeologico: potenzialità, limiti e prospettive. In Asciutti M. (a cura di). *Storia-Restaurato. Ricerche a Roma e nel Lazio*, pp. 133-149. Roma: GB Editoria.

UNESCO Concept of Digital Heritage. <<https://en.unesco.org/themes/information-preservation/digital-heritage/concept-digital-heritage>> (consultato il 12 agosto 2024).

Autori | Authors

Adriana Rossi, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", adriana.rossi@unicampania.it

Sara Gonizzi Barsanti, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", sara.gonizzibarsanti@unicampania.it

Silvia Bertacchi, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", silvia.bertacchi@unicampania.it

Per citare questo capitolo: Adriana Rossi, Sara Gonizzi Barsanti, Silvia Bertacchi (2024). Naturali o antropiche? Misura e visualizzazione delle cavità murarie in cerchie urbane/ Natural or anthropic? Measurement and visualisation of wall cavities in city walls. In Bergamo F., Calandriello A., Cianna M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 1957-1978.

Natural or anthropic? Measurement and visualisation of wall cavities in city walls

Adriana Rossi
Sara Gonizzi Barsanti
Silvia Bertacchi

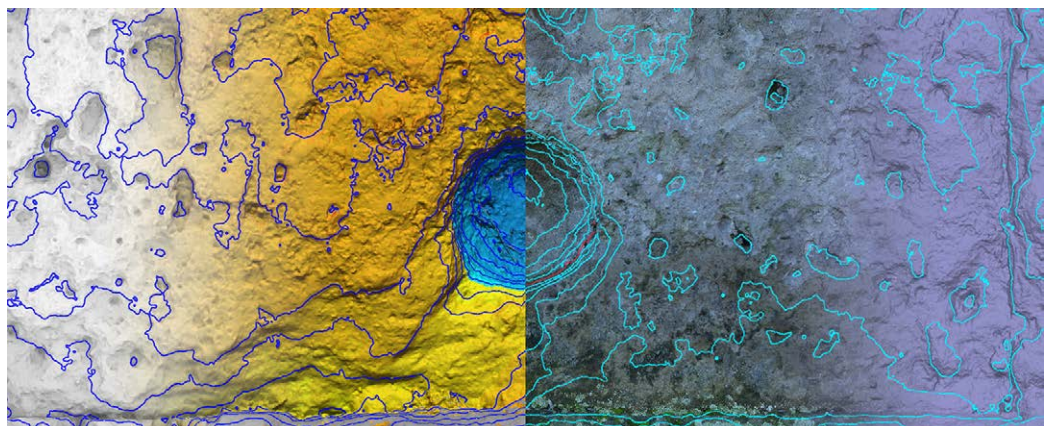
Abstract

The knowledge of any object is based on its measurements. The reliability of measurements depends on the purpose of the analysis. In the case of city walls, the discussion on the causes of the degradation of the stone surface is prodromal to restoration actions. Survey analyses then help to select the necessary measures. The paper discusses methodological issues: it illustrates the experimental phases of the photogrammetric survey, highlighting, for the purposes mentioned, some of the possibilities offered by the Structure from Motion technique. The identification of the natural traces from the anthropic ones seems to be a priority for the case study, in order to avoid erasing traces that are crucial for the history of the artefact. Therefore, possible reality-based measurement operations are illustrated within a software dedicated to the management and digital visualisation of the 3D virtual moulds obtained. The models created by means of a reverse modelling process allow to identify the anthropic nature of the impacts. These are ballistic marks that need to be studied and contextualised so as to disseminate, in a simple and attractive way, the authenticity of a trace that is an indispensable prerequisite for any restoration project.

Keywords

virtual moulds, reality-based models, structure from motion, reverse modelling, superficial degradation

Comparison of visualisation modes. 3D digital model of a cavity in a city wall obtained using photogrammetric techniques. The maps used highlight the surface texture, the deviation (in false colour) from a reference plane, the apparent colour texture applied to the polygonal mesh and the contour lines. Elaboration by the authors.



Introduction

Checking how many times a unit of measurement is included in the quantity to be measured is an action aimed at including the object of study in the field of comparability. Any physical configuration can be measured using manual, mechanical, optical or electronic instruments. The use of active and passive sensors makes it possible to transform the input quantity into point images identified by mathematical and radiometric characteristics.

The result is photorealistic, precise and accurate representations from which two-dimensional views of complex shapes, such as those associated with surface degradation, can be obtained. Methodological issues are discussed below. In fact, the case study is interchangeable with other similar ones (fig. 1). The restoration of city walls requires the creation of a survey model as a tool to support the design choices; as in all other cases, it is a collector of geometric-mathematical-radiometric, and informative characteristics. The hermeneutic and critical stratifications generate by the artefact, from which the subsequent transformations derive their motivation, direction and control, are indispensable in the study of the city walls. As we are dealing with stone surfaces that have been stratified over the centuries, the discussion of the causes of any surface deterioration is prodromal. Identifying the nature of the damage, whether natural or anthropic, is an essential requirement in order to avoid erasing the traces of remarkable importance. Moreover, monitoring over time is valuable: morphometric and surface information is in fact a useful simulacrum that should be properly preserved [UNESCO 2019].

Not only natural disasters such as earthquakes, floods, landslides and eruptions, but also constant erosion due to weathering, weed growth and the development of mosses and lichens erode the material and weaken the structure. In addition, the damages caused over the centuries by sieges and plundering, not to mention careless restoration and vandalism



Fig. 1. Section of the ancient city walls chosen to demonstrate the methodology. Image by the authors

of all kinds. Hence the opportunity to “identify in order to demonstrate”, to “document in order to preserve”, to “disseminate in order to protect” the nature of the damage observed. The archaeological value of all ancient city walls requires the use of non-contact instruments and methods.

The survey campaign, carried out at the beginning of the year, allowed the 3D reality-based models to be used as the starting point of the information system. The organisation of the workflow is aimed at deriving, by means of reverse modelling processes, mesh models of those marks which, in the light of polemology and hoplology considerations, are determined to be ballistic traces. In the next phase, the virtual casts will be used to quantify the shooting parameters and thus determine the type of weapon, i.e. the dating of the presumed damage. Digital photogrammetric surveying technologies are suitable for this purpose and are therefore the first choice. In particular, image matching algorithms (Structure from Motion, SfM) make it possible to capture the surface with accuracy and flexibility.

The partially automated procedure is functional for the processing of 3D meshes to be used in reverse modelling processes [Dawkins et al. 2018]. Such methods allow the obtained representations, provided they are the result of correct processes and elaborations, to organise workflows aimed at the construction of a digital twin.

This is defined in the original concept and definition by Michael Grieves: “A digital informational construct about a physical system could be created as an entity on its own. This digital information would be a “twin” of the information that was embedded within the physical system itself and be linked with that physical system through the entire lifecycle of the system” [Grieves 2011]. The resulting outcome is functional in extending the advantages of a general data and information coordination structure to scholars and professionals of various disciplines. The federated model, shared and interoperable, could be suitably simplified to make it accessible to differently qualified users.



Fig. 2. Camera and illuminator used during the photogrammetric survey campaigns. Section of the ancient city walls chosen to demonstrate the methodology. Image by the authors

Photogrammetric documentation of the case study

The current photogrammetric survey technologies are among the most competitive techniques for the analysis of artefacts due to their speed, cost-effectiveness and achievable accuracy on optically co-operating surfaces [Gonizzi et al. 2013, Russo 2020, Apollonio et al. 2021, Croce et al. 2021]. By following the well-known image processing workflow, that has been partially customised on the city walls under study, and with a positioning network of the individual shots appropriately structured a priori, the density and quality of the point clouds obtained are comparable to those obtained by means of active survey systems. The transformation of these data into polygonal meshes, with chromatic information conveyed through mapping in the parameter space of the blending of photographic shots, results in the generation of an advanced 3D object from which a series of elaborations can be derived [Cipriani et al. 2014].

Nevertheless, the image-based approach to documentation requires the implementation of certain crucial precautions for the final digital model to be congruent with the characteristics of metric and morphological completeness and reliability. Primarily, in order to carry out a detailed survey, it is essential to determine the specific camera parameters in advance (Fig. 2) [1], taking into account the logistical considerations. In particular, it is also important that the desired ground sample distance is calculated correctly in order to achieve the appropriate resolution and it is also necessary to guarantee sufficient horizontal and vertical overlap between consecutive photos, orienting the camera in a tilted position in order to capture any protrusion or indentation in the case of cavities (fig. 3A). Moreover, a depth of field equal to or greater than the depth of the object to be documented should be established to have

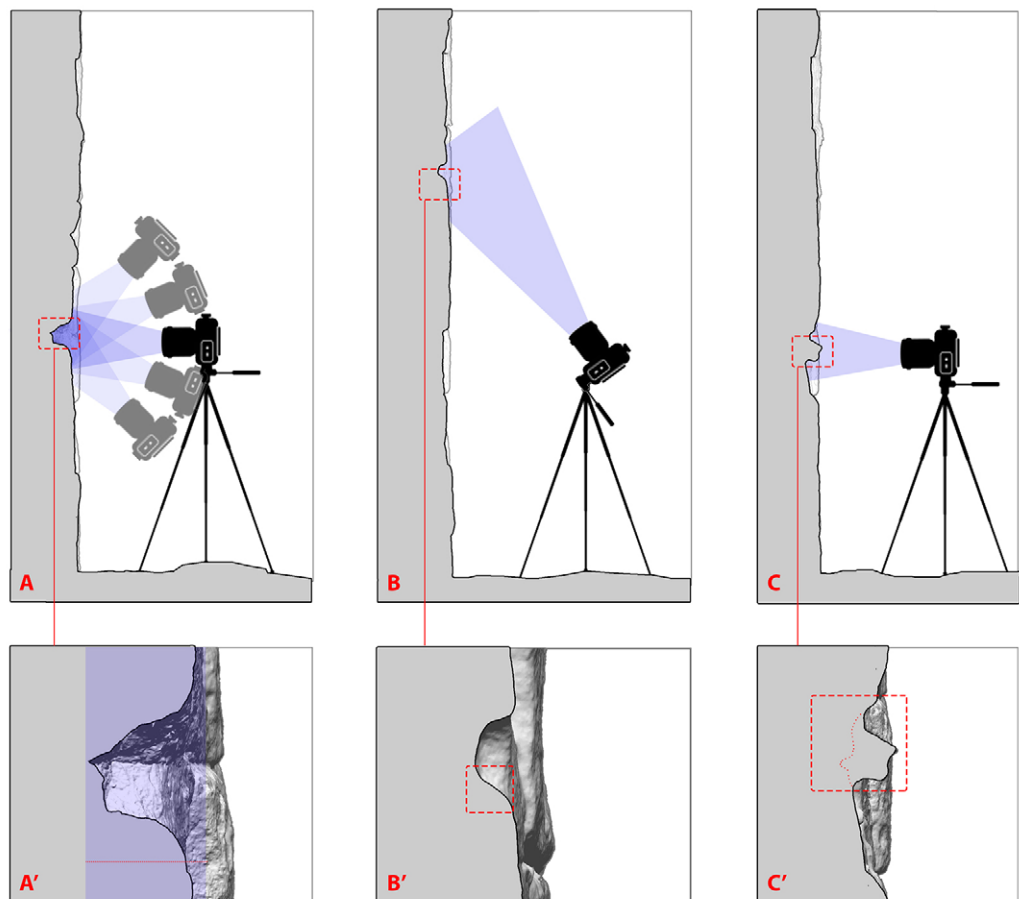


Fig. 3. Steps taken to obtain a morphologically complete and metrically reliable photogrammetric documentation of the object under study. Elaboration by the authors.

frames with acceptable sharpness (necessary condition for the correct reconstruction of the scene through Structure from Motion), especially in the case of indentations, in order to avoid blurred areas which, after processing, could cause inconsistencies with the real geometry (figg. 3A', 4). Finally, it is essential to provide for the inclusion in the scene of a colour reference target to balance chromatic dominants, and the metric reference, for the correct scaling of the digital model.

Despite this, the acquisition is limited when the object to be surveyed is located at heights that cannot be reached by the operator; therefore, the lack of total overlap documenting the surface causes some areas without data, which the polygonal mesh transformation operations tend to complete with geometries that are not congruent with the real geometry (fig. 3B-B''), such as in the presence of weed vegetation in the cavities, which prevents the correct acquisition of the occluded surface, and in the presence of very deep holes, for which the occlusion of light radiation cannot be overcome even by means of artificial lighting (fig. 3C-C'). In these cases, the documentation can be integrated with triangulation or structured light scanners capable of producing very dense models with sub-millimetric resolution, although this must be taken into account within the limits of their resolution and depth of field, which are determined by the intrinsic characteristics of the instrument.

The polygonal model obtained, complete with texture, will constitute the study material for verifying the traces of interest, both from a dimensional point of view and for understanding, at a closer scale, the damage suffered by the ashlars (fig. 5).

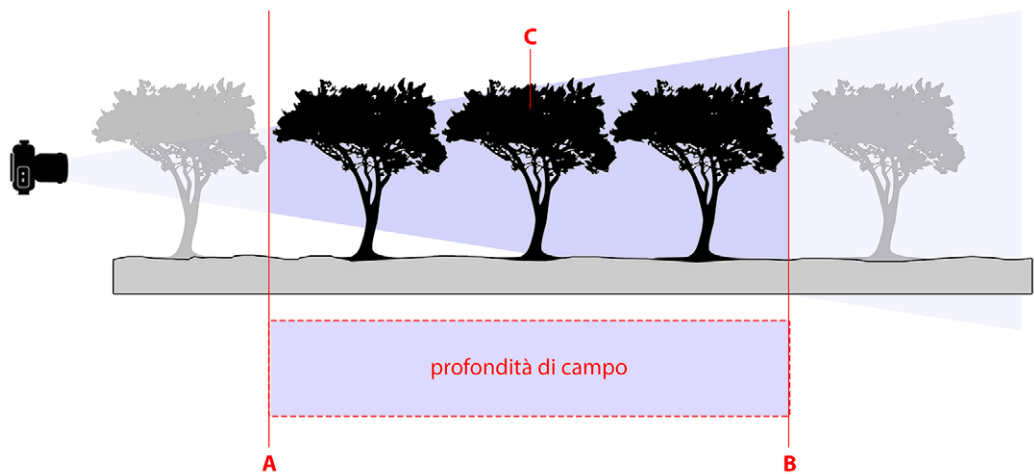


Fig. 4. Calculation scheme, where A is the nearest and B the farthest limit of acceptable definition, and the area between A and B is the depth of field, C is the focus at the subject distance. Elaboration by the authors.



Fig. 5. Visualisation in the virtual environment of the digital copy of a degraded stone surface (A) and ortho-image of the view (B). Elaboration by the authors.

3D representation and graphic visualisation

From the 3D digital copy of the wall surface and its marks, after intelligent optimisation to correct geometric errors and topological anomalies, the polygonal model is suitable for multiple study operations, both within the software and by means of two-dimensional elaborations aimed at restoration operations.

In the case of virtual environments, visualisation tools developed in the field of digital representation [Remondino 2004, Pintus et al. 2016] offer various options for the analysis and perceptual enhancement of the shape. These are based on the application of specific maps that are able to highlight dark and light areas due to ambient lighting. In other cases, maps used for detail retrieval highlight the presence of areas in relief and depressions, thus improving the readability of the digital model for the end user for study purposes [Fantini et al. 2023]. Especially diffuse colour maps, which provide information on materials, and occlusion maps, which contain pre-calculated shading information (fig. 6), allow initial verification with feature recognition software on high-resolution images (used in both medical and military settings), e.g. by automating the process of identifying elements of interest, highlighting holes of greater depth, similar diameter or morphologically regular traces (fig. 7).

This workflow enables to identify, classify and visualise the surface in an alternative and unrealistic way, but functional for the purpose of distinguishing the different types of marks found on the stone and discarding “false positive” cases. The latter are due to the nature of the material (holes and cavities due to the porosity and composition of the stone material itself) and to natural degradation (such as flaking of material or falling of parts) and should be discerned from traces of working techniques and possible anthropic damage (any voluntary damage inflicted on ancient masonry, especially if it is part of a city wall, during sieges).

In fact, there are many ways in which the software can be used to inspect and process surfaces, such as checking the mesh deviation in relation to virtual planes selected by the operator; using false colours to highlight cavities and protrusions (fig. 8). In addition to this, the model can be sectioned in various ways, not least by obtaining contour lines, in order to enhance the traditional expressive potential by showing the complex geometric outline of the model in a single projection and possibly identifying irregular natural geometries and anthropic marks (fig. 9).

Furthermore, the reverse modelling process on the digital model can be used to create virtual casts from which dimensional and geometric information can be extrapolated, as well as physical replicas of the object by means of 3D printing (fig. 10).

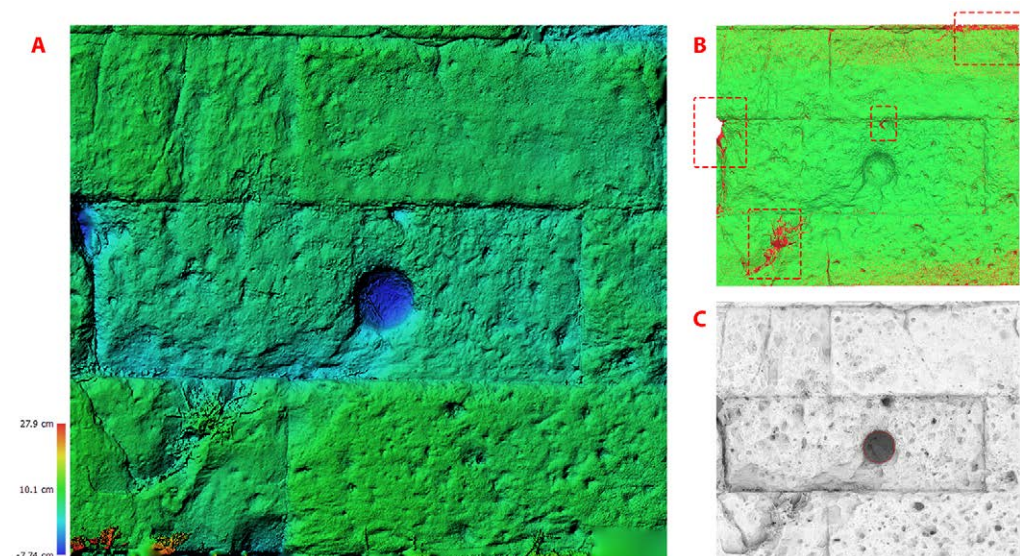


Fig. 6. Visualisation in false colour of the surface of the polygonal mesh; B) graphical representation of the model confidence (lower confidence in red areas, e.g. deep holes, vegetation, poor documentation); C) occlusion map (highlighting the most regular hole). Elaboration by the authors.

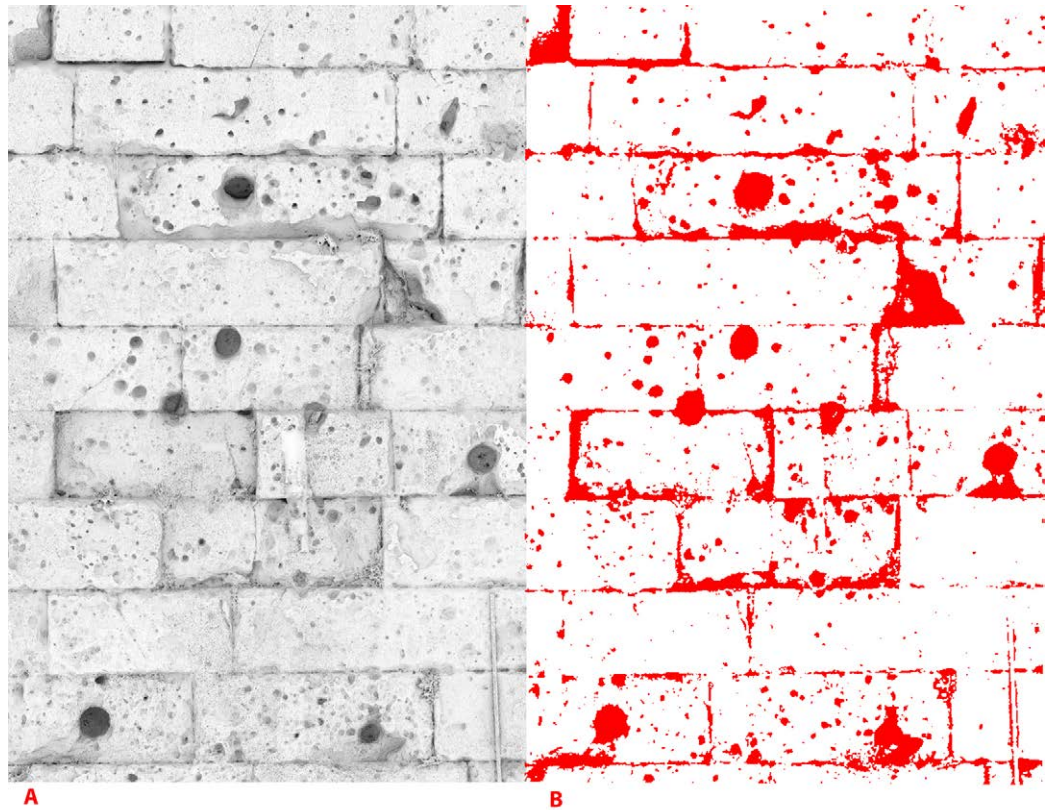


Fig. 7. A) Occlusion map of part of the wall with pre-calculated shading information, highlighting the cavities in darker colour; B) Image processing using automatic feature recognition software to search for size and circularity. Elaboration by the authors.

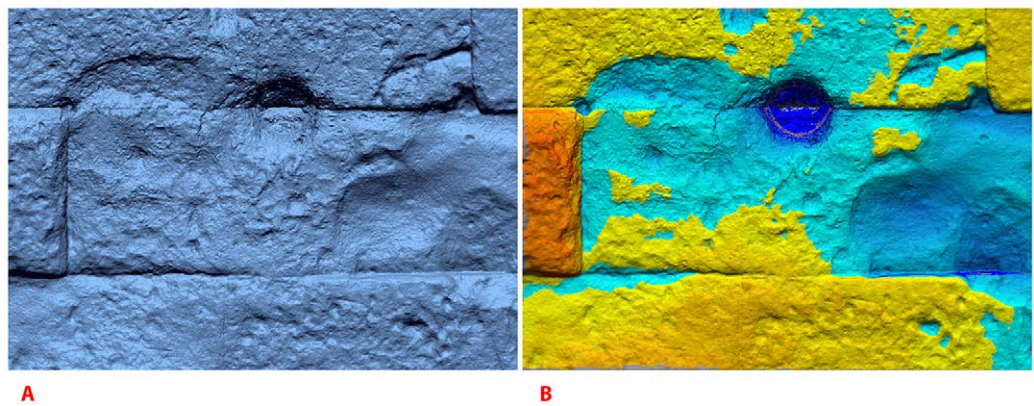


Fig. 8. Mesh deviation (A) with respect to a reference plane and false colour visualisation of cavities (green-blue) and protrusions (yellow-red) (B). Elaboration by the authors.

From the actual digital model of the city wall (a negative copy from which the depth and diameter can be obtained), it is possible to obtain the positive cast by flipping the normals with respect to the measured surface. The available morphology, if regionalised, allows the identification and hypothesis of geometric primitives that could coincide with the solid shape of the object that caused the impact (tools, points, projectiles).

The enhancement of the shape by selective smoothing of non-relevant features, necessary to obtain a correct regionalisation of the cavities, from which a more reliable morphological interpretation can be derived [Grilli et al. 2018] (fig. 11), allows an easier automatic identification of cylindrical, spherical and conical shapes, facilitating the formulation of hypotheses as well as the metric study of the positive cast (fig. 12). The dimensional characteristics existing at the time of the survey are recorded and compared with the published sources, allowing the identification of any material loss due to impact fracture rather than just weathering.

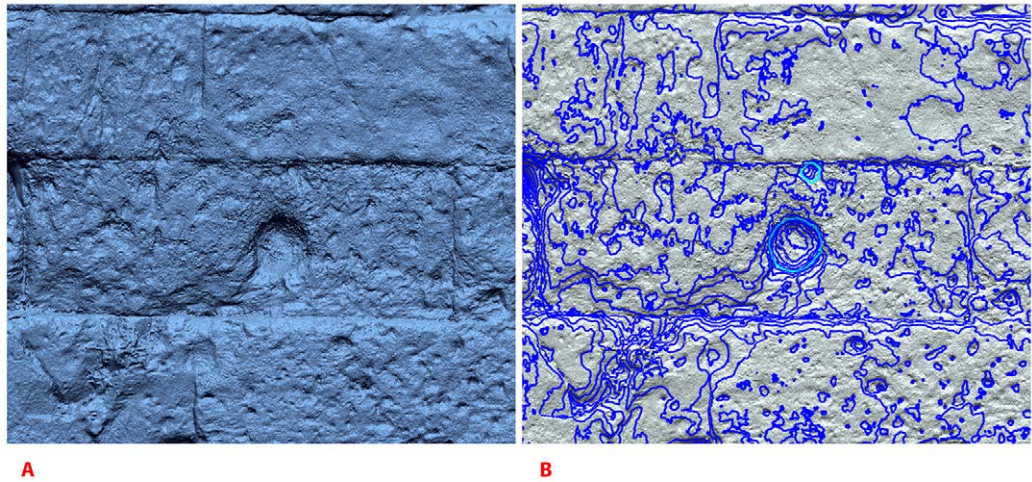


Fig. 9. Contour lines of the mesh model (A) through a series of planes at regular intervals to generate contour lines that help to graphically represent the geometric trend and dimensionally interpret the irregular geometry of the surface traces. Elaboration by the authors.

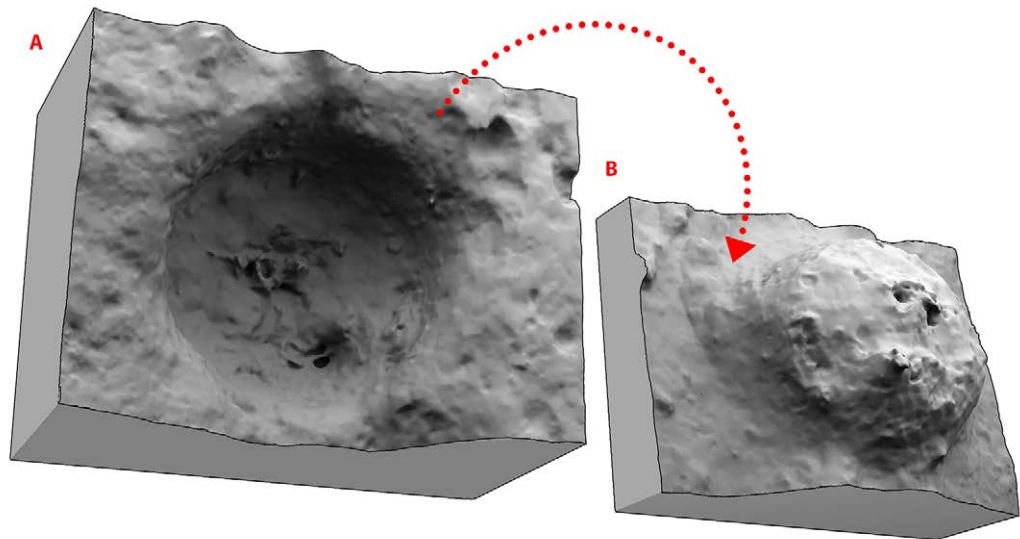


Fig. 10. Virtual cast obtained from the surveyed digital surface, representing the positive surface of the cavity. The digital object, in addition to being easily portable between operators, has the advantage of not deforming over time and of being referenced with respect to the city walls from which it was “virtually” obtained. Elaboration by the authors.

Conclusions

The approach adopted, which has been applied to various cases of city walls, is an attempt to use tools and methods critically. Preceded by periods of reflection and supported by a theoretical and ideological framework, the survey document – scientifically derived – guides the analyses and directs the choices. Ongoing considerations, as the etymology of the word reminds us, lead from what at first glance appears smooth and indistinct (*laevo*) to what becomes diriment (*re-laevo*) in function of the specific objective [Masiero 1991]. Understanding the nature of the marks, which are present in large numbers on the surface of the wall, is a crucial aspect prior to any maintenance and/or restoration work. Photogrammetric techniques have proved to be the best way of tracing the causes of the damage identified in the stretch of city walls chosen to illustrate the process. The spheroidal shape of the cavities and their variable dimensions within a precise diameter range lead to the hypothesis that the cause of many of the cavities observed may be due to the impact of stone projectiles hurled by Roman ballistae [Rossi 2024, Bertacchi et al. 2024]. This possibility needs to be explored and further investigated, as it has the potential to write or rewrite the history of sieges at this site and, by analogy, at others.

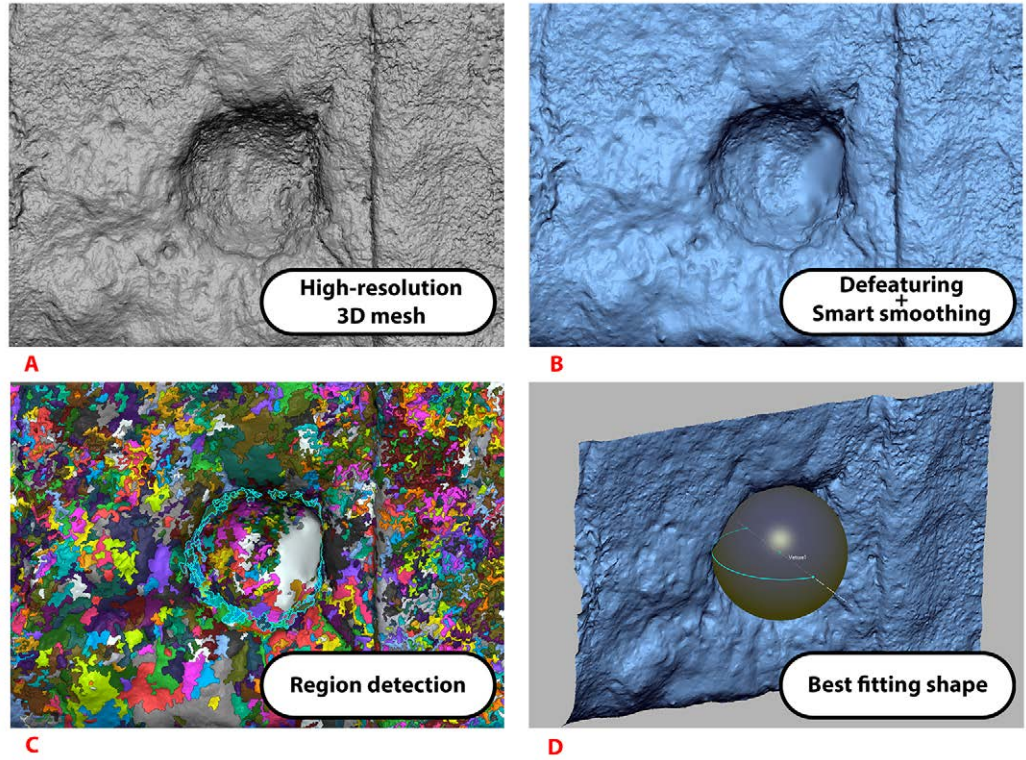


Fig. 11: A-B) Automatic extrapolation of geometric surfaces from high-resolution meshes after several steps of optimisation and mesh smoothing to eliminate non relevant geometric peculiarities; C-D) Regionalisation to define possible geometric solids by best fitting. Elaboration by the authors.

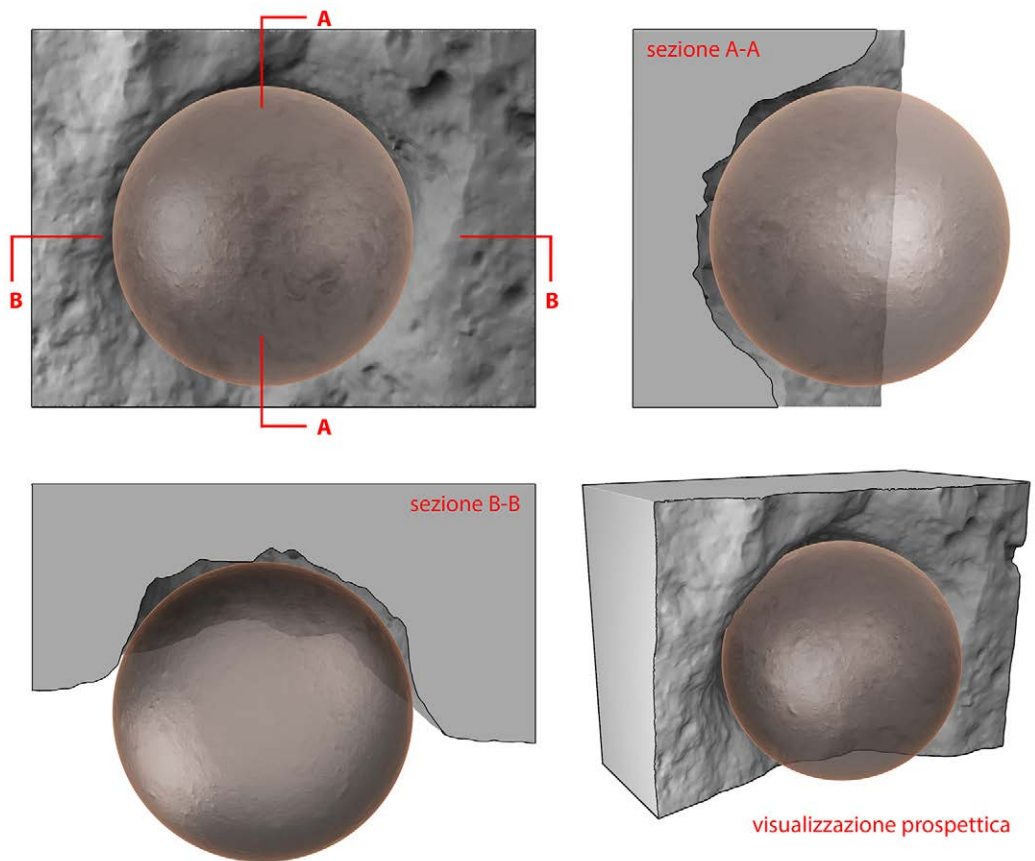


Fig. 12: The high-resolution digital model represents the virtual copy of the existing wall surface (negative virtual cast). From the dimensions of the hole (positive cast), it is possible to hypothesise solid shapes that could coincide with the impacting object, causing cavities and material loss. Elaboration by the authors.

Digital media, as opposed to traditional contact techniques, allow the acquisition of geometric and radiometric information of high quality and with a volume of data unimaginable in the recent past; polygonal mesh management software provides multidisciplinary teams with a set of tools that can improve the perception and visualisation of essential maps for the purposes of various kinds.

It also facilitates the comparison of recurring objects and shapes, which are united by their sizes and compatibility with regular geometric shapes.

Procedures, some of which can be partially automated, can thus lead to and more easily disseminated forms of graphics than orthoimages related to the object of study. With a simple and engaging approach, we can then think about communicating the authenticity of the traces, an indispensable requirement for any restoration project of the artefact.

Notes

[1] The photogrammetric campaign was carried out in several campaigns from December 2023 with Canon EOS 5D and 60D cameras. The processing was carried out with the Agisoft Metashape Professional software, vers. 1.8.2

References

- Apollonio F.I. et al. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, vol. 13, n. 3. <<https://doi.org/10.3390/rs13030486>>.
- Bertacchi S., Gonizzi Barsanti S., Rossi A. (2024). Geometry of wall degradation: measuring and visualising impact craters in the northern walls of Pompeii. In *Scires-it Scientific REsearch and Information Technology*, vol. 14, n. 1. In corso di pubblicazione.
- Cipriani L., Fantini F., Bertacchi S. (2014). 3D Models Mapping Optimization through an Integrated Parameterization Approach: Cases Studies from Ravenna. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XL-5, pp.173-80. <<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-173-2014>>.
- Croce V. et al. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. In *Remote Sensing*, vol. 13, n. 3. <<https://doi.org/10.3390/rs13030461>>.
- Dawkins O., Dennett A., Hudson-Smith A. P. (2018). Living with a Digital Twin: Operational Management and Engagement Using IoT and Mixed Realities at UCLs Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park. In *Proceedings of the 26th annual GIScience Research UK conference: GISRUUK 2018*. Leicester, UK, 17-20 April 2018. University of Leicester, UK: GISRUUK.
- Fantini F., Gaiani M., Garagnani S. (2023). Knowledge and documentation of Renaissance works of art: the replica of the "Annunciation" by Beato Angelico. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLVIII-M-2-2023, pp. 527-534. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-527-2023>>.
- Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini, D. (2013). 3D surveying and modeling of archaeological sites – Some critical issues. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5-W11, pp. 145–150. <<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W11-145-2013>>.
- Grieves M. (2011). *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Cocoa Beach, FL: Space Coast Press.
- Grilli E. et al. (2018). From 2D to 3D Supervised Segmentation and Classification for Cultural Heritage Applications. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLII-2, pp. 399-406. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-399-2018>>.
- Masiero R. (1991). Tavola Rotonda. Il rilievo tra storia e scienza. Il rilievo tra storia e scienza. In *XY digitale*, n. 11-12, pp. 114-116.
- Pintus R. et al. (2016). A Survey of Geometric Analysis in Cultural Heritage. In *Computer Graphics Forum*, n. 35 (1), pp. 4-31. <<https://doi.org/10.1111/cgf.12668>>.
- Remondino F. (2004). From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 34. <<https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/5-W10/>>.
- Rossi A. (2024). The Survey of the Ballistic Imprints for a Renewed Image of Unearthed Pompeii. In *Nexus Network Journal*, n. 26, 307–324. <<https://doi.org/10.1007/s00004-023-00762-9>>.
- Russo M. (2020). La fotomodellazione in ambito archeologico: potenzialità, limiti e prospettive. In Asciutti M. (Ed.). *Storia-Restaurato. Ricerche a Roma e nel Lazio*, pp. 133-149. Roma: GB Editoria.
- UNESCO Concept of Digital Heritage. <<https://en.unesco.org/themes/information-preservation/digital-heritage/concept-digital-heritage>> (consultato il 12 agosto 2024).

Authors

Adriana Rossi, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", adriana.rossi@unicampania.it
Sara Gonizzi Barsanti, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", sara.gonizzibarsanti@unicampania.it
Silvia Bertacchi, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", silvia.bertacchi@unicampania.it

To cite this chapter: Adriana Rossi, Sara Gonizzi Barsanti, Silvia Bertacchi (2024). Naturali o antropiche? Misura e visualizzazione delle cavità murarie in cerchie urbane/ Natural or anthropic? Measurement and visualisation of wall cavities in city walls. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 1957-1978.