

Il museo fuori dal museo: impatti balistici

Adriana Rossi
Silvia Bertacchi
Claudio Formicola
Sara Gonizzi Barsanti

Abstract

Negli ultimi decenni, il rilevamento tridimensionale e la modellazione digitale, inclusa la stampa 3D, sono diventati strumenti fondamentali per la documentazione e la divulgazione dei Beni Culturali, migliorando l'accessibilità inclusiva, sia sensoriale che cognitiva, per ottenere un pubblico più ampio e diversificato. Specialmente in caso di siti non accessibili per varie motivazioni, o a causa della non abilità fisica dei fruitori a poterne godere appieno, la creazione di una narrazione museale supportata da modelli digitali e artefatti virtuali con contenuti informativi, poi tradotti in prototipi fisici, può aiutare efficacemente a rendere il tema comprensibile a un pubblico eterogeneo. La documentazione delle impronte balistiche nelle mura settentrionali di Pompei, attribuite dagli archeologi agli impatti dell'artiglieria romana di Silla (I sec. a.C.), dimostra l'efficacia dei modelli ad alta risoluzione nel replicare le caratteristiche delle mura e delle cicatrici da impatto. Questi modelli forniscono una base per sviluppare percorsi di conoscenza rivolti anche ai visitatori con diverse capacità sensoriali e motorie. Il contributo presenta quindi alcune riflessioni sull'utilizzo dei modelli digitali 3D in varie forme, anche quella della prototipazione fisica per coadiuvare la disseminazione culturale, dimostrando la validità e l'efficacia dell'integrazione tra documentazione digitale e narrazione museologica.

Parole chiave

Allestimento, accessibilità fisica, accessibilità cognitiva, modellazione digitale 3D, Pompei.

Modello digitale di
Porta Vesuvio e del
Castellum Aquae, Parco
Archeologico di Pompei
(fotogrammetria,
elaborazione e rendering di
S. Bertacchi).



"VII. MARKS OF THE SULLAN BOMBARDMENT. The amount of attention which various features in Pompeii have excited, both among tourists and in the world of scholarship, is not always proportionate to their intrinsic significance. For some reason, a matter which the successive groups of scholars who have visited the site under my guidance have felt to be one of the most impressive memorials of the place's history has remained practically unnoticed: namely, the numerous marks to be seen on the exterior of the town wall and apparently due to the operations of the troops of the Sullan party who, as appears from OROSIUS V, xviii, 22, laid siege to Pompeii in the year 89 B.C."

Van Buren 1925, p. 110

Introduzione

Il contributo intende rendere comunicabili, al più ampio ed eterogeneo pubblico possibile, i risultati iniziali di un progetto il cui obiettivo è quello di documentare e analizzare le impronte balistiche presenti nelle mura settentrionali di Pompei, attribuite dagli archeologi agli impatti delle artiglierie romane (I sec. a.C.). L'area non è attualmente accessibile, in attesa del completamento del progetto di ripristino dei percorsi pedonali e ciclabili e della riorganizzazione della logistica dei flussi di visitatori; perciò, l'esteso tratto delle mura a settentrione risulta temporaneamente chiuso al pubblico.

Distribuiti lungo l'estradosso della perimetrazione compreso fra le due porte di accesso a nord di Pompei [Anniboletti 2016], gli impatti dovuti ai proiettili sono distribuiti in modo solo apparentemente casuale su tutta l'altezza attuale del muro e pertanto possono essere facilmente confusi con le cavità naturali presenti sui conci lapidei in tufo e calcare di Sarno [Kastenmeier et al. 2010]. Oltre all'oggettiva questione dell'accessibilità fisica, esiste la necessità di illustrare e rendere intellegibile un tema importante e poco conosciuto derivato dall'approfondimento storico-militare: i danni procurati da lancia-sassi e lancia-dardi di epoca Repubblicana sono le uniche e inconfutabili

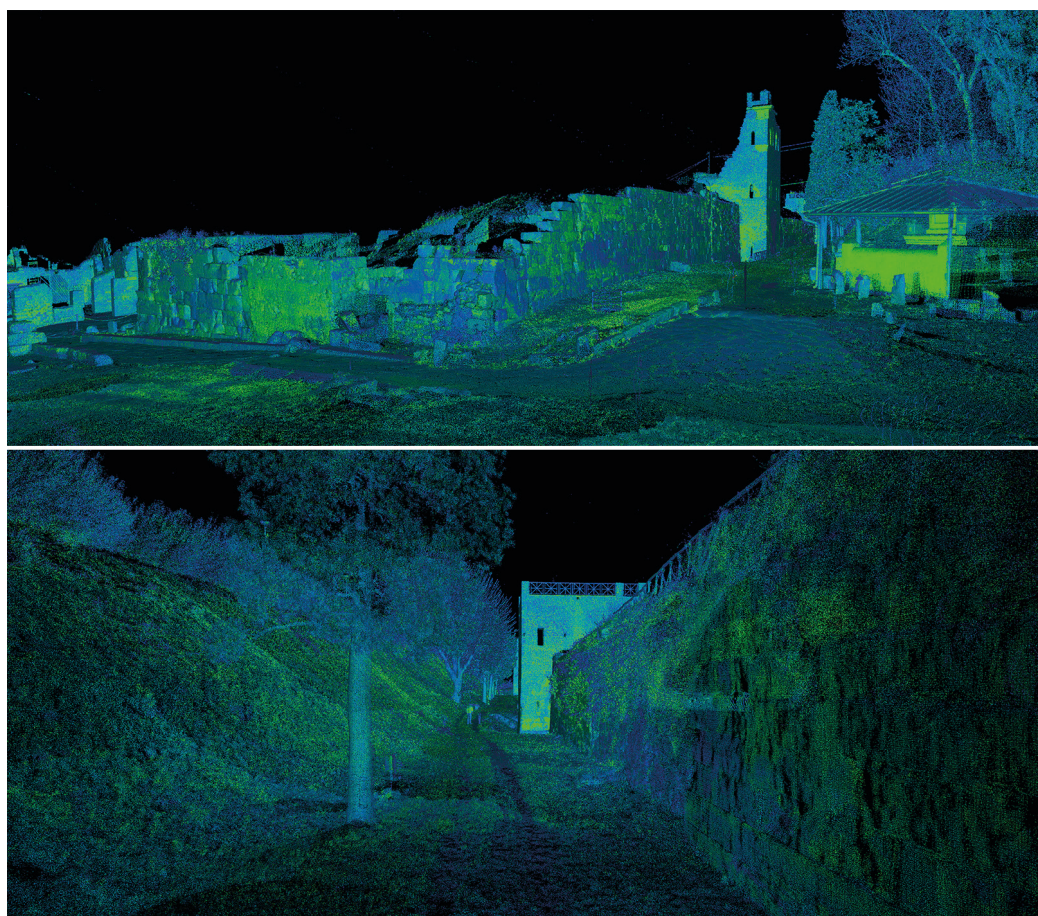


Fig. 1. Viste prospettiche della nuvola di punti acquisita mediante laser scanner terrestre per la documentazione generale: in alto da Porta Vesuvio verso la torre X e in basso da ovest verso la Torre XI, detta di Mercurio (messa a registro ed elaborazioni di S. Bertacchi)..

prove esistenti al mondo della letalità di armi a torsione elastica, oggi ancora rilevabili nonostante i restauri di epoca romana, l'eruzione vulcanica e oltre un secolo di esposizione agli agenti atmosferici e agli interventi di manutenzione successivi. Le impronte balistiche, per essere riconosciute e comprese, necessitano di un'appropriata narrazione affidabile, supportata da tecniche afferenti alla museologia, oltre che di adeguati supporti fisici in grado di ridurre la distanza tra passato e presente, e di avvicinare al tema anche utenti dalle ridotte capacità motorie e visive.

L'obiettivo del presente approfondimento è quello di eseguire una riflessione sull'uso dei modelli digitali quali strumenti di indagine e di supporto alle attività di divulgazione connesse al problema archeologico di questa fondamentale area del sito. La domanda a cui si tenta di rispondere riguarda la possibilità concreta di realizzare artefatti digitali (virtuali) e materiali (attraverso prototipazione) atti a supportare la narrazione scientifica in ambito museologico attraverso un adeguato allestimento percettivo-esibitivo: importante è infatti trasmettere i fondamenti scientifici e l'organizzazione seriale dell'epoca Repubblicana, dimenticati con l'avvento dell'Impero e riscoperti soltanto nel secolo scorso grazie a rari e frammentari reperti archeologici di catapulte e baliste. Entrando nel vivo delle questioni, gli elaborati digitali concernenti le mura e le macchine d'assedio che costituiranno la collezione da esporre, scelti tra gli elaborati più significativi, consentono diverse scale di rappresentazione e modalità di restituzione fisica [Basso Peressut, Caliri 2014], a partire da: i) un inquadramento generale del problema (caratteri tipologici e strutturali delle mura urbane nella loro estensione a nord) (fig. 1); ii) armi del periodo solitamente impiegate per l'assedio (dimensione meccanica assimilabile alla scala dell'oggetto d'uso) (fig. 2); iii) dettaglio più minuto presente sui conci, ovvero le cicatrici da impatto, insieme ai proiettili impiegati, sassi di pietra o dardi metallici (fig. 3).

L'insieme di tali elaborati è in grado di veicolare efficacemente concetti complessi e abilitare esperienze tattili e interattive [Santacana i Mestre, Martín Piñol 2010], in grado di favorire un processo cognitivo appropriato per i visitatori non solo convenzionali. Infatti, le istituzioni preposte alla conservazione e divulgazione di siti di interesse culturale mostrano crescente sensibilità nei confronti delle categorie più deboli, come dimostra anche la recente revisione dei supporti alla visita messi a disposizione da siti archeologici di analoga importanza [Bruciati *et al.* 2023; Bruciati, D'Alessandro 2023].

Nel nostro caso, due sono le principali difficoltà logistiche per raggiungere l'area nord delle mura, compresa fra Porta Vesuvio e Porta Ercolano: da un lato si ha un pronunciato declivio

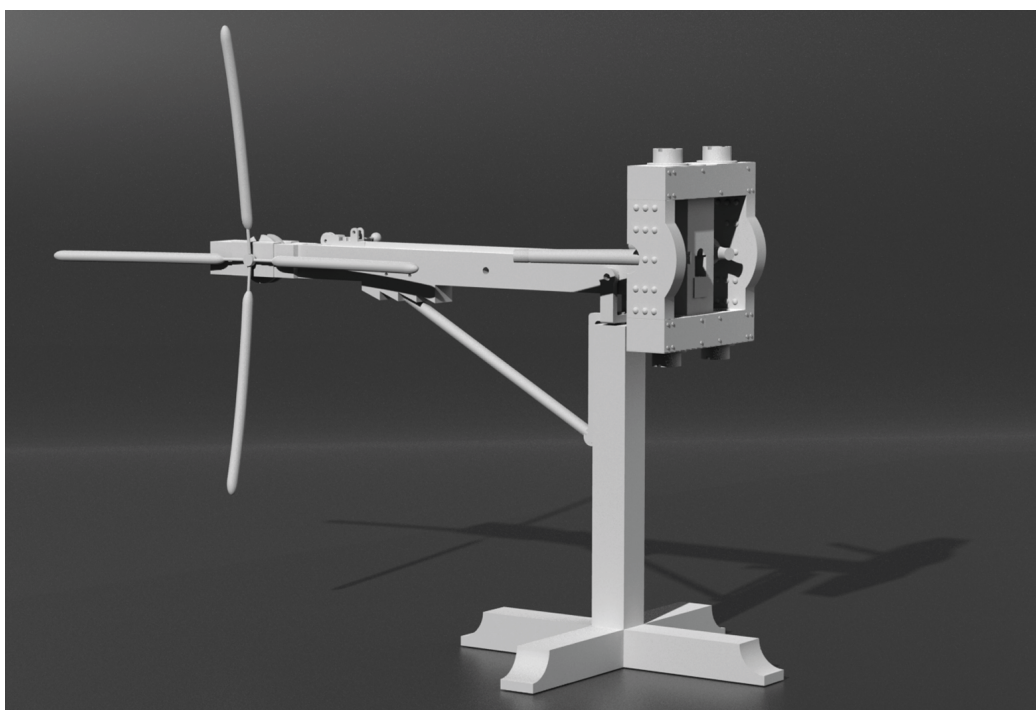


Fig. 2. Modello digitale di ricostruzione dello scorpião romano, arma a torsione elastica, a cura di C. Formicola.

Fig. 3. Esempi di tracce balistiche documentate nel tratto di mura in prossimità di Porta Vesuvio e relativi proiettili impattanti (modelli di S. Bertacchi).



prodotto dall'accumulo di materiale piroclastico, solo in parte rimosso per liberare la cinta muraria; dall'altro vi è l'assenza di sentieri appositamente studiati, come avviene in altre aree del sito [Picone 2014], che possano facilitare il superamento della strada basolata e l'attraversamento del sentiero in terra battuta al livello delle mura.

Tralasciando per il momento queste difficoltà logistiche, l'articolo si focalizza sul supporto percettivo che possono fornire i modelli tattili per coinvolgere un pubblico decisamente più ampio. La questione da affrontare è quindi quella riguardante le modalità di adattamento e trasformazione dei risultati delle operazioni di documentazione digitale in artefatti funzionali all'allestimento fisico. Tra i supporti a disposizione, va menzionata la *maquette*. In ambito architettonico, questi modelli in scala ridotta, realizzati con materiali diversi rispetto all'edificio vero e proprio, venivano utilizzati con più scopi: dalla prefigurazione progettuale alla trasmissione dell'idea [Scolari 2005, pp. 131-163].

Il divario esistente tra concezioni astratte e scelte esecutive è oggi in parte superato grazie al ricorso ai modelli digitali. Integrando saperi, questi strumenti, come i tradizionali, migliorano tanto la comprensione quanto la comunicazione; essi supportano attività di tipo speculativo nell'ambito della progettazione, quanto la registrazione diacronica dello stato di fatto (da cui la dicitura *reality-based*), inoltre aiutano a moltiplicare esponenzialmente la possibile diffusione di contenuti e significati. Nella sperimentazione effettuata sul tratto nord delle mura di Pompei, il modello generale è stato organizzato grazie e in virtù della sensoristica attiva e passiva. Al ruolo primario di documentazione tridimensionale, attraverso protocolli di *reverse modelling*, si è proceduto a realizzare modelli multiscala, dell'intero o parziali, in grado di circoscrivere e indirizzare la percezione del fruitore verso obiettivi pre-programmati. La trattazione intende privilegiare e discutere principalmente quelle istanze museologiche a carattere inclusivo.

Caratterizzazione dei modelli

I simulacri digitali tridimensionali completi, ottenuti da fotogrammetria e laser scanner, sono stati sottoposti a diverse procedure di elaborazione, come operazioni di filtro selettivo e ottimizzazione, affinché risultassero idonei a supportare operazioni booleane in grado di circoscrivere e sagomare calchi virtuali per poi collocarli all'interno di supporti fisici idonei tanto alla visione che alla manipolazione.

La validazione dell'adeguatezza dei modelli nella trasmissione delle informazioni fisiche utili

a far comprendere forma e dimensioni delle indentazioni sul palinsesto murario deriva da flussi di lavoro consolidati e tecniche sviluppate *ad hoc* per il progetto di documentazione. L'integrazione di sensori passivi e attivi per acquisire forma e colore senza contatto, sebbene sia frutto di una filiera complessa di applicativi e tecnologie, è oggi una pratica consolidata, pur continuando a richiedere un elevato livello di preparazione da parte dei professionisti incaricati della gestione dei dati, al fine di convertire i rilievi in modelli digitali realmente adatti a diventare supporti percettivi per l'allestimento.

Di conseguenza l'aderenza della digitalizzazione alla realtà, ovvero l'affidabilità metrica di modelli 3D ad alto dettaglio – oltre che l'attendibilità del colore apparente –, rappresentano temi ampiamente dibattuti negli ultimi anni, soprattutto a seguito dell'introduzione e dell'utilizzo sistematico di metodologie integrate per l'acquisizione della scena 3D da reale a diverse scale [Apollonio, Gaiani, Benedetti, 2012; Ramos, Remondino 2015; Remondino *et al.* 2018].

In particolare, la crescente diffusione degli applicativi fotogrammetrici SfM/MVS, flessibili e dai costi più contenuti rispetto al panorama della sensoristica attiva, ha comportato significativi ripensamenti e riorganizzazioni nei flussi operativi consolidati, nonché rapide e rilevanti ricadute non solo a livello software, ma anche hardware.

La fotogrammetria basata su *workflow* derivati dalla *Computer Vision* ha trovato applicazione in numerosi ambiti, rispondendo a finalità diversificate e multiscala che, attraverso l'integrazione con *pipeline* consolidate, ha contribuito a un evidente avanzamento anche nel settore architettonico e archeologico [Benedetti, Gaiani, Remondino 2010; Apollonio *et al.* 2021].

Il modello digitale che replica fedelmente un'entità fisica può essere utilizzato come base per un *Digital Twin* (DT), ovvero un gemello digitale inteso come rappresentazione virtuale statica del prodotto fisico in un momento specifico nel tempo, oppure dinamicamente connessa per diventare un quadro di riferimento per l'intero ciclo di vita delle entità stesse (creazione, costruzione, gestione/manutenzione e smaltimento), stabilendo così una connessione tra lo spazio fisico e quello digitale, in special modo nel campo dei Beni Culturali [Bevilacqua *et al.* 2022; Gabellone 2022; Grieves 2023].

La modellazione digitale in architettura e archeologia ha quindi conosciuto un notevole avanzamento anche sotto il profilo dell'accessibilità, concetto ampio e articolato, che spazia dall'utilizzo dei modelli a favore dell'inclusione nel sistema cultura delle persone con disabilità visiva, motoria o sensoriale. Questo è reso possibile grazie a modelli tattili avanzati o impiegati per audiodescrizioni, volti a migliorare la traduzione fisica della complessità e profondità del reale, come anche VR/AR o *virtual tour* in aree non praticabili per i non deambulanti. Ugualmente importante è l'implementazione delle informazioni e della conoscenza, considerate forme di accessibilità cognitiva e percettiva, al fine di meglio comprendere concetti o spazialità complesse e siti non aperti alle visite, attraverso simulazioni o modelli digitali evoluti [Bertacchi, Adembris 2024; Russo 2021; Sdegno, Riavis 2023]. Non meno rilevante è l'abbattimento dei limiti materiali di fruibilità e la democratizzazione dell'accesso alla cultura, favorita anche alla diffusione online di contenuti pensati per la disseminazione allargata di patrimoni tangibile, intangibili o non più esistenti [Inglese, Docci, Ippolito 2019; Juan-Vidal *et al.* 2024].

Da tali premesse si intende mostrare, con un caso studio specifico, come il modello digitale 3D, ottenuto con l'integrazione di varie tecnologie di acquisizione, possa costituire il materiale di base per lo sviluppo di un percorso di conoscenza di manufatti che, sebbene oggetto di numerosi e qualificati studi, grazie al passaggio al digitale riescono a meglio esprimere e approfondire la funzione di quei dettagli solo apparentemente secondari, ma in realtà portatori di numerose evidenze storiche di primaria importanza.

Il caso studio

Il tema di ricerca, localizzato nel Parco Archeologico di Pompei, si incentra sulle impronte balistiche identificate dagli archeologi nella tratta settentrionale delle mura antiche, tra Porta Vesuvio e Porta Ercolano, che sono oggetto di studio recente e ancora in corso da parte del team della UniVanvitelli [Rossi 2024; Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2025], a partire dalla documentazione digitale della cinta muraria interessata dai segni dell'assedio sillano – avvenuto nell'89 a.C. [Russo, Russo 2005] – e dalla ricostruzione virtuale dei modelli delle

armi romane a torsione elastica (fig. 4), che potrebbero aver generato tali tracce visibili sulla struttura muraria [Russo 2004]. Per la documentazione digitale e l'analisi dei casi studio è stato implementato un flusso di lavoro specifico, che ha previsto l'integrazione di nuvole di punti acquisite da laser scanner terrestre e fotogrammetria *close-range*: le scansioni si sono rese necessarie per fornire un riferimento generale considerando l'estensione di diverse centinaia di metri della cinta muraria nell'area interessata, caratterizzata da altezze variabili e dalla presenza di due torri a cavaliere, oltre alle vestigia di una terza (fig. 5).

La fotogrammetria ha invece fornito focus dettagliati di alcuni elementi della muratura, che si presentano sotto forma di cavità circolari (fig. 6), già identificati dagli archeologi che studiarono l'area nel secolo scorso quali impatti balistici da palle in pietra lanciate dalle armi degli assediati romani [Van Buren 1925; Maiuri 1929; Van Buren 1932; Maiuri 1943].

A tali evidenze si aggiungono interessanti casi inediti, di dimensioni minori, rintracciati durante i sopralluoghi condotti dagli autori nell'ambito del progetto SCORPiò-NIDI, ipotizzabili quali tracce di dardi con punta metallica [Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2024a] (fig. 7).

Il risultato dell'integrazione dei dati è un modello 3D completo, con informazioni associate sul

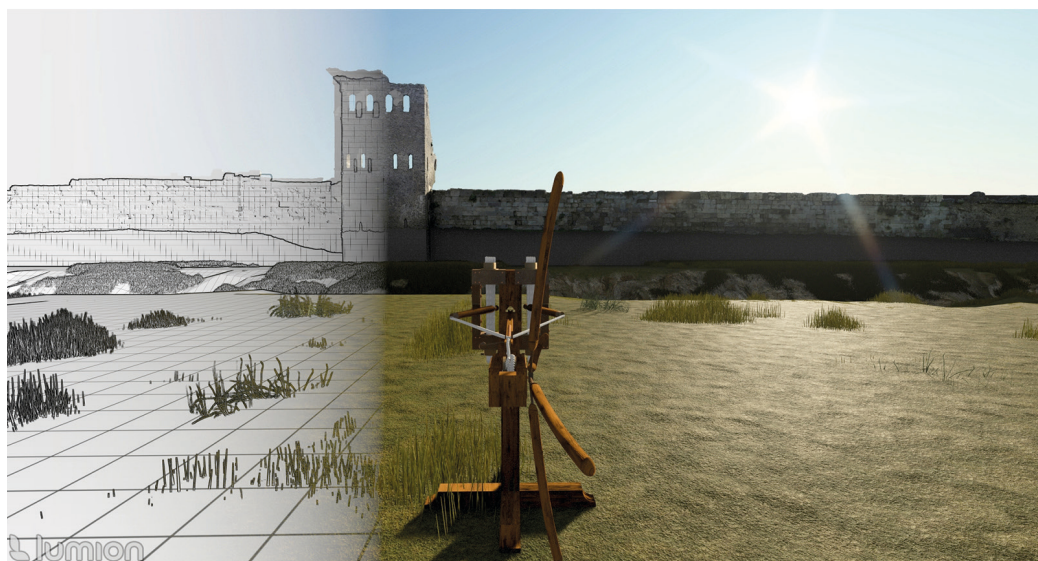
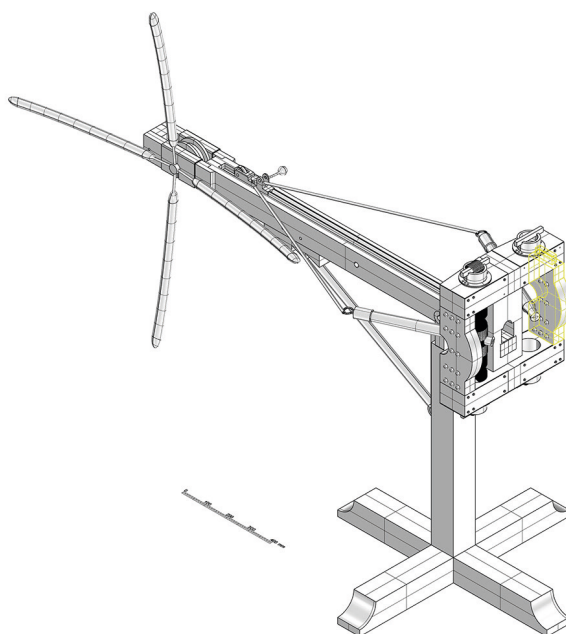


Fig. 4. In alto, vista assonometrica di uno scorpione romano; modello ricostruttivo di C. Formicola. In basso, vista comparativa di un disegno tecnico e del corrispondente rendering, creato in Lumion 2024 Student, per migliorare la comunicazione visiva (rendering di V. Casadei).

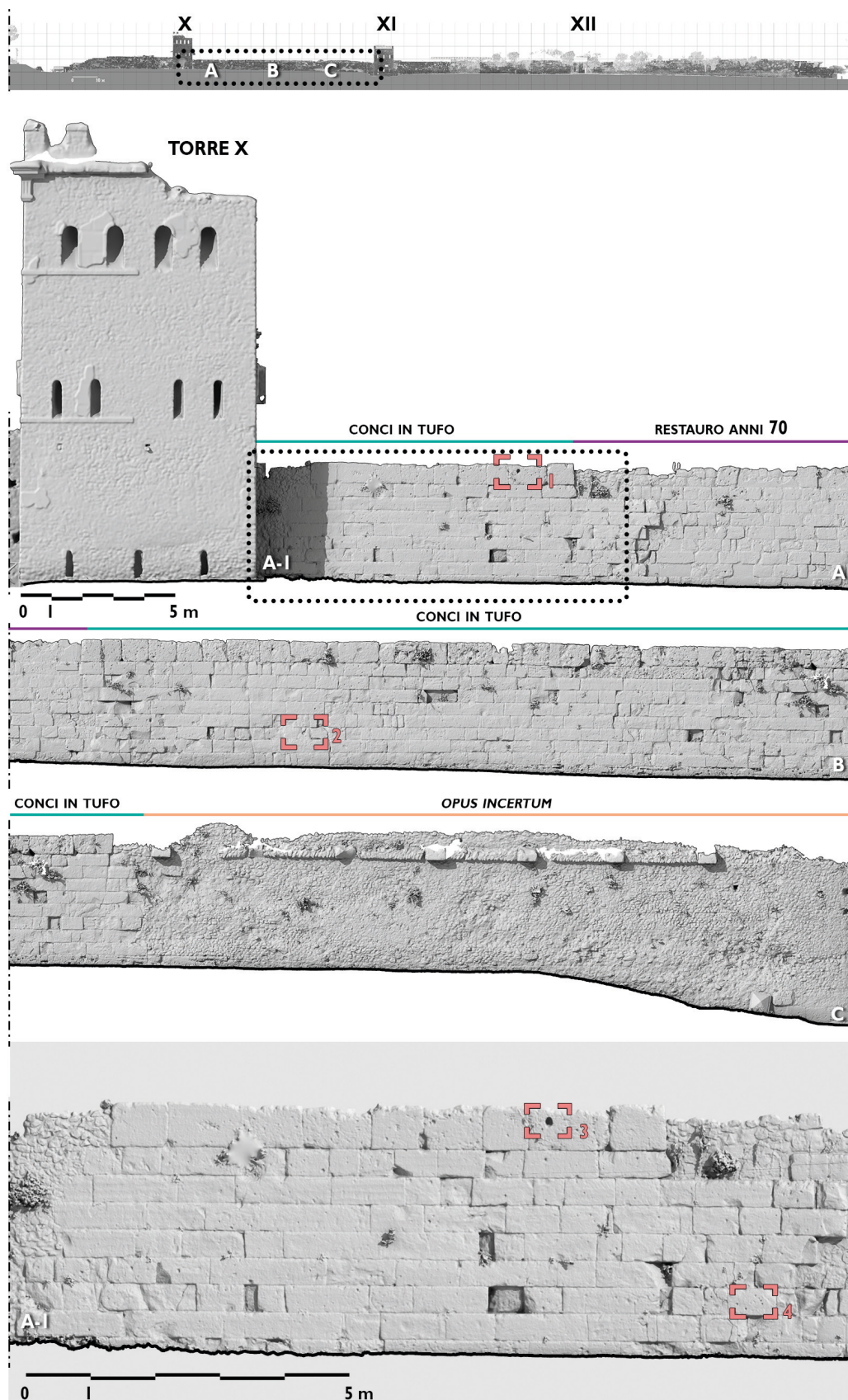
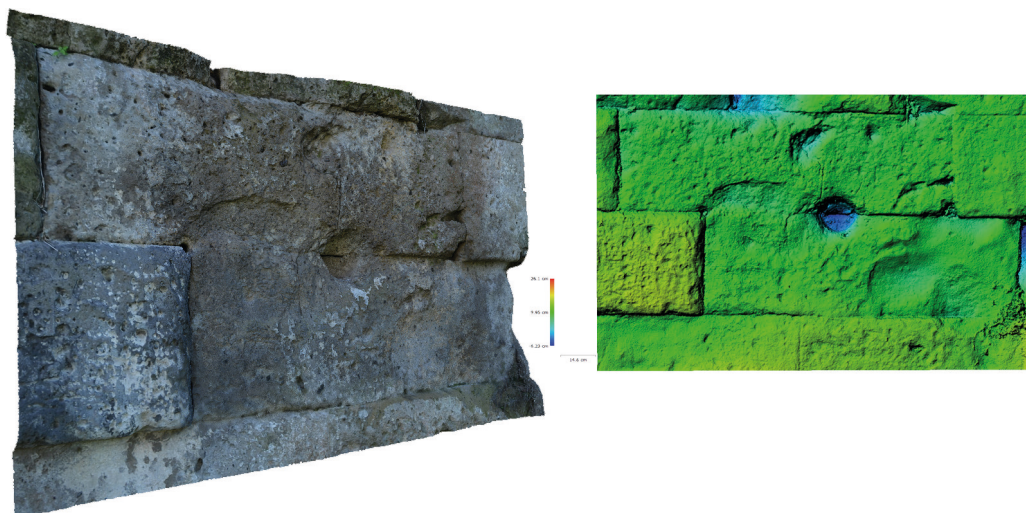


Fig. 5. Modello digitale del tratto di mura rilevato e processato per la classificazione delle differenti tipologie di tracce. In alto, localizzazione generale tra le Porte Vesuvio ed Ercolano; in mezzo, cinta muraria tra le torri X e XI con specifiche dell'apparecchiatura; in basso, dettaglio (modelli di S. Bertacchi).

Fig. 6. Esempio di documentazione fotogrammetrica di dettaglio di un caso studio. Foto di S. Gonizzi Barsanti (modelli di S. Bertacchi).



colore apparente, ad alta risoluzione, metrico, orientato e in scala, riferibile quindi alle coordinate spaziali relative alle mura, inclusi parametri come altezza, inclinazione del concio e della cavità d'impatto. Questi dati lo rendono idoneo per la prosecuzione del progetto, che prevede una seconda fase di indagini meccaniche per la verifica della potenza di tiro delle armi a torsione elastica [Rossi, Formicola, Gonizzi Barsanti 2024].

I modelli costituiti da *mesh* poligonali risultano ampiamente utilizzabili una volta che i dati di partenza sono stati sottoposti a operazioni di *post-processing* e ottimizzazione, per ottenere una rappresentazione 3D priva di lacune e difetti topologici.

Un tema di grande importanza è quello della progettazione della campagna di rilievo con il fine di acquisire modelli in grado di rappresentare la superficie catturata con la risoluzione più idonea agli scopi di progetto, permettendo al contempo una molteplicità di impieghi [Bertacchi, Adem-bri 2024]. Tra i più interessanti si annovera l'ottenimento di calchi virtuali perfettamente aderenti alla superficie muraria, funzionali all'estrazione di informazioni dimensionali e geometriche, come forma e profondità, e per rappresentare efficacemente le cavità – senza tralasciare il fondamentale rapporto tra scala locale e globale che connette i diversi livelli della restituzione [Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2024b]. Queste tracce sono quindi descritte da modelli digitali coerenti con le capacità di riproduzione dei dispositivi di stampa 3D, e al tempo stesso con la possibilità di comprensione della forma dovute al processo manipolazione delle repliche fisiche da modelli

Fig. 7. Studio di tracce ripetute e in serie disposte a ventaglio e modellazione iniziale dei possibili oggetti contundenti (dardi metallici) (modelli di S. Bertacchi).

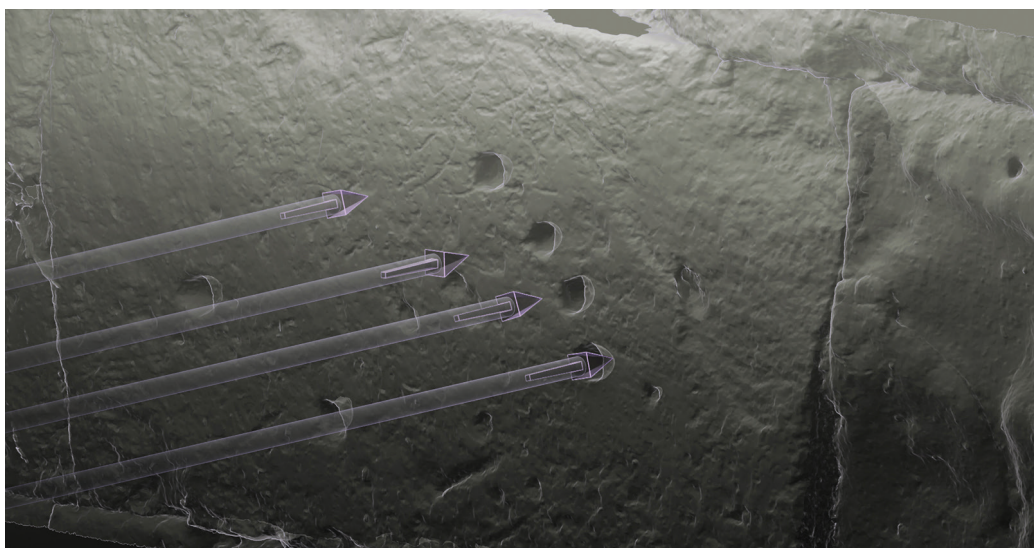
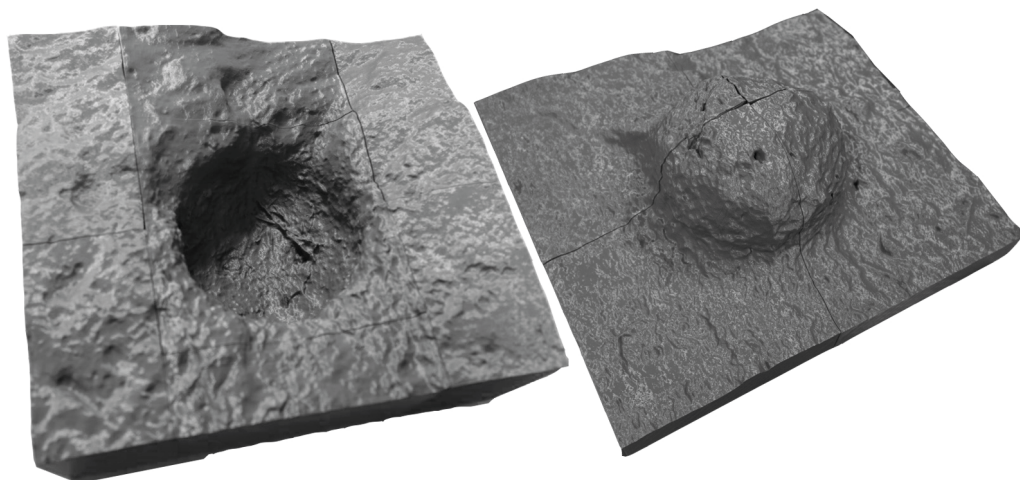


Fig. 8. Prototipi stampati in scala 1:1 in più parti. A sinistra la copia della cavità balistica nelle mura e a destra il calco negativo (stampe 3D a cura di C. Formicola).



virtuali (fig. 8). Con scelte tecniche adeguate sulla risoluzione di stampa necessaria per la corretta percezione e distinzione dei dettagli, e mediante diversi accorgimenti di post-lavorazione volti a migliorare l'esperienza e la leggibilità per l'utente [Busana, Farroni Gallo 2021], queste repliche, già sperimentate in diverse realtà museali, possono essere sviluppate con intenti di fruizione inclusiva, attivando percorsi tattili arricchiti da informazioni aggiuntive (fig. 9).

Il metodo adottato prevede lo sviluppo di modelli a rilievo e dettaglio differenziato a partire da modelli *mesh* derivanti da tecniche di acquisizione integrate. Il fine è quello di stabilire una priorità percettiva nella superficie da stampare in 3D e da sottoporre a esperienza tattile. Il criterio utilizzato è quello di ridurre l'incidenza dei dettagli più minuti (considerati come rumore di sottofondo ad alta frequenza), preservando le rientranze principali delle indentazioni dovute agli impatti balistici, intesi come elementi significativi dell'esperienza cognitiva delle tecniche di assedio. La tecnica impiegata per la realizzazione di questi modelli si basa sulle cosiddette *displaced subdivision surface* [Lee, Moreton, Hoppe 2000], e prevede di eseguire una compressione sotto forma di bitmap in formato *OpenEXR* dei dettagli della *mesh* ad alto dettaglio di una porzione

Fig. 9. Studio di fattibilità per un modello tattile in scala 1:50 di una sezione delle mura nei pressi della Torre di Mercurio, sviluppato a partire dal modello digitale integrato per favorire la comprensione dell'articolazione dello spazio che dalle mura nord degrada verso Pompei (modello di S. Bertacchi).

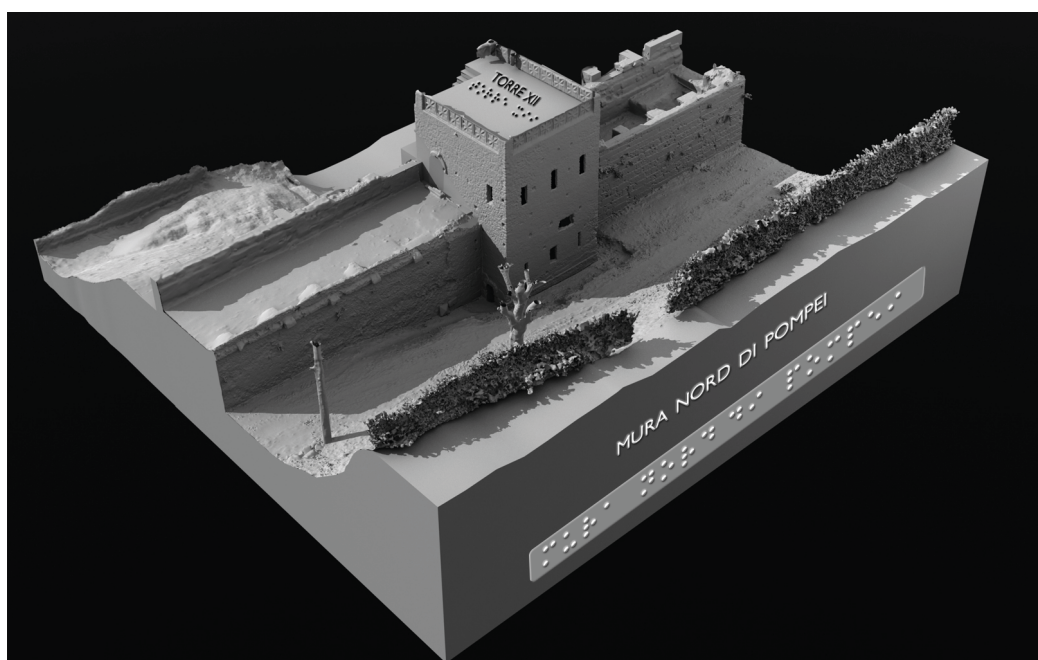


Fig. 10. Modello di fig. 9 in una sezione significativa che mostra l'andamento dei dislivelli del terreno con spiegazioni semplici degli elementi costituenti, anche nel sistema di scrittura tattile a rilievo Braille per non vedenti e ipovedenti e sistemazione del modello su supporto per la fruizione in uno spazio museale a cura di S. Bertacchi.



di muratura. La *bitmap* registra lo scostamento fra il modello *master* o *high-poly* e la sua semplificazione a dominante quadrata, convertita in superficie di suddivisione [Guidi, Angheleddu 2016; Lai, Kobbelt, Hu 2010]. Questa rappresentazione a livello di dettaglio variabile (*LOD*) consente di personalizzare la *mesh* di partenza sulla base delle esigenze specifiche dell'utente. Nel caso specifico al modello *LOD-displacement map* si aggiunge un'immagine in scala di grigi che consente di segmentare il modello in modo da enfatizzare i fori principali dovuti all'assedio rispetto al resto dei micro-dettagli presenti sul tessuto murario circostante. Questi ultimi vengono ridotti di profondità poiché si configurano per l'esperienza tattile come un inutile rumore che confonde l'utente; al contrario la mappa introdotta per la segmentazione permette di mantenere tutto il dettaglio dei fori principali, che rappresentano l'elemento informativo prioritario dell'intero processo.



Fig. 11. Rendering di un possibile allestimento museale informativo relativo alle mura settentrionali, l'analisi condotta sulle diverse tipologie di cavità e di palle in pietra esistenti, e i calchi virtuali e in 3D print (rendering e allestimento a cura di S. Bertacchi).

Conclusioni

Negli ultimi decenni, il rilevamento 3D da reale e la modellazione digitale, compresi i prodotti correlati come la stampa 3D, sono diventati di uso comune non solo per la documentazione dei Beni Culturali, ma soprattutto per promuovere la conoscenza della cultura e, non ultimo, la divulgazione con finalità formative presso un pubblico non esperto. Le applicazioni virtuali sono divenute strumenti utili per migliorare, e in alcuni casi per rendere possibile, l'accessibilità sensoriale e cognitiva, rappresentando una soluzione concreta e sostenibile. Nel caso esposto, i modelli prodotti mediante una *pipeline* integrata di fotogrammetria e laser scanner presentano caratteristiche idonee a consentire una comprensione semplificata ma accurata di forme complesse, attraverso l'impiego

congiunto di calchi positivi e negativi delle impronte balistiche, affiancati da modelli complessivi del sito che forniscano un contesto adeguato, anche a un pubblico ipovedente o non vedente. La disposizione delle prototipazioni fisiche su apposite interfacce, sia in loco che virtuali e accessibili online, consente al fruitore di interagire intuitivamente con l'allestimento, e quindi di comprendere il tema dell'assedio e dei suoi effetti su più scale e da prospettive differenti. In tal senso, fattori ergonomici guidano le scelte progettuali relative ai modelli fisici, che dovranno presentare gradi di dettaglio differenziati, integrando spiegazioni testuali ed etichette in formato Braille, con lo scopo di rendere maggiormente inclusivo ed efficace il processo cognitivo (fig. 10).

Infatti, i modelli virtuali e le stampe 3D dei relativi calchi possono rappresentare un valido ausilio alla comprensione, soprattutto nel caso di Beni Culturali poco accessibili sia fisicamente che dal punto di vista della complessità del tema, come accade per le impronte balistiche, la cui lettura è resa difficile principalmente a causa dell'altezza delle stesse e della variabilità stagionale della vegetazione circostante delle stagioni e della vegetazione presente, che le rende non chiaramente identificabili, soprattutto a un occhio poco esperto. Tali supporti potrebbero essere integrati anche in situ, per dare un ulteriore contributo all'articolato processo di comprensione e diffusione del patrimonio culturale, agevolando una visualizzazione diretta dei prototipi nel contesto di appartenenza, oppure arricchendo esperienze espositive corredate da informazioni storiche divulgative sulle armi antiche, con la possibilità aggiuntiva di simularne gli effetti distruttivi anche attraverso piattaforme immersive virtuali (fig. 11).

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata sostenuta dal progetto "SCORPiò-NIDI", CUP B53D23022100006 (DD n. 1012/2023), finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dell'iniziativa PRIN (bando DD n. 104/2022). Claudio Formicola ha beneficiato di una borsa di studio cofinanziata dal DM 118/23 PNRR (M4C1 – Inv. 3.4 TDA).

Riferimenti bibliografici

- Anniboletti, L. (2016). Le fasi delle fortificazioni di Pompei. Stato della conoscenza. In *SIRIS Studi e Ricerche della Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici di Matera*, vol. 2015, 15, pp. 49-70. <http://dx.doi.org/10.4475/782>.
- Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, vol. 13, 3, 486, pp. 1-39. <https://doi.org/10.3390/rs13030486>.
- Apollonio, F. I., Gaiani, M., Benedetti, B. (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: A framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. In *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, n. 5, pp. 1271-1287. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.034>.
- Basso Peressut, L., Calari, P. (a cura di). (2014). *Architettura per l'Archeologia. Museografia e Allestimento*. Roma: Prospettive Edizioni.
- Benedetti, B., Gaiani, M., Remondino, F. (a cura di). (2010). *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale.
- Bertacchi, S., Adembri, B. (2024). Entering the Emperor's Villa: An integrated methodology to enrich cognitive accessibility of an archaeological site. In *DisegnareCon*, vol. 17, 32, pp. 3.1-3.14. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.3>.
- Bevilacqua, M. G., Russo, M., Giordano, A., Spallone, R. (2022). 3D Reconstruction, Digital Twinning, and Virtual Reality: Architectural Heritage Applications. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. Christchurch, New Zealand, March 12-16, 2022, pp. 92-96. <https://doi.org/10.1109/VRW55335.2022.00031>.
- Bruciati, A., D'Alessandro, L. (2023). Passepartout. Il museo di tutti per tutti. Un progetto di accessibilità delle VILLÆ. In A. Anguissola, C. Tarantino (a cura di). *Aree archeologiche e accessibilità. Riflessioni ed esperienze*. Pisa: Pisa University Press, pp. 127-137.
- Bruciati, A., D'Alessandro, L., Empler, T., Fusinetti, A. (2023). VILLÆ (Tivoli, MiC). Percorsi di inclusione museale e accessibilità. In A. Sdegno, V. Riavis (a cura di). *DAI - Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione*. Atti del II convegno DAI. Udine, 1-2 dicembre 2023, pp. 508-521. Alghero: PUBLICA.
- Busana, M. S., Farroni Gallo, F. (2021). Il progetto TEMART: metodologie e tecnologie per la stampa 3D di riproduzioni tattili. In *Aisthesis. Scoprire l'arte in tutti i sensi*, vol. 17. <https://www.museoomero.it/servizi/pubblicazioni/rivista-aisthesis-scoprire-larte-con-tutti-i-sensi/aisthesis-numero-17-settembre-2021/il-progetto-temart-metodologie-e-tecnologie-per-la-stampa-3d-di-riproduzioni-tattili-di-maria-stella-busana-e-francesca-farroni-gallo/>.
- Gabellone, F. (2022). Digital Twin: A new perspective for cultural heritage management and fruition. In *Acta IMEKO*, vol. 11, 1, pp. 1-7. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i1.1085.
- Grieves, M.W. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. In N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva (Eds.). *The Digital Twin*. Cham: Springer International Publishing, pp. 97-121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4.
- Guidi, G., Angeleddu, D. (2016). Displacement Mapping as a Metric Tool for Optimizing Mesh Models Originated by 3D Digitization. In *J. Comput. Cult. Herit.*, vol. 9, 2, pp. 9:1-9:23. <https://doi.org/10.1145/2843947>.

Inglese, C., Docci, M., Ippolito, A. (2019). Archaeological Heritage: Representation Between Material and Immaterial. In C. Inglese, A. Ippolito (Eds.). *Analysis, Conservation, and Restoration of Tangible and Intangible Cultural Heritage*, Ch. 1, pp. 1-22. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-6936-7.ch001>.

Juan-Vidal, F., Díaz-Maiquez, J., Bertacchi, G., Ibáñez-Vila, A., López, G. B. (2024). The fruition of Intangible Heritage through gamification: Accessibility, inclusiveness, and transmission of values in the Heriverso project. In *DISEGNARECON*, vol. 17, 32, pp. 7.1-7.12. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.7>.

Kastenmeier, P., Di Maio, G., Balassone, G., Boni, M., Joachimski, M., Mondillo, N. (2010). The source of stone building materials from the Pompeii archaeological area and its surroundings. In *Periodico Di Mineralogia*, vol. 87, n. 4, pp. 38-58. <https://dx.doi.org/10.2451/2010PM0020>.

Lai, Y.-K., Kobbelt, L., Hu, S.-M. (2010). Feature aligned quad dominant remeshing using iterative local updates. In *Computer-Aided Design*, vol. 42, n. 2, pp. 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.02.017>.

Lee, A., Moreton, H., Hoppe, H. (2000). Displaced subdivision surfaces. In *SIGGRAPH '00 Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New Orleans, Louisiana USA, July 23-28, 2000, pp. 85-94.

Maiuri, A. (1929). *Studi e ricerche sulla fortificazione di Pompei*, vol. 33. Milano: Hoepli.

Maiuri, A. (1943). Pompei. Isolamento della cinta murale tra la Porta Vesuvio e la Porta Ercolano. In *Notizie degli scavi di antichità*, vol. VII, pp. 275-314.

Picone, R. (a cura di). (2014). *Pompei accessibile. Per una fruizione ampliata del sito archeologico*. Roma: L'Erma di Bretschneider.

Ramos, M. M., Remondino, F. (2015). Data fusion in Cultural Heritage – A Review. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5-W7, pp. 359-363.

Remondino, F., Georgopoulos, A., Gonzalez-Aguilera, D., Agrafiotis, P. (Eds.). (2018). *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-685-1>.

Rossi, A. (2024). The Survey of the Ballistic Imprints for a Renewed Image of Unearthed Pompeii. In *Nexus Network Journal*, vol. 26, n. 2, pp. 307-324. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00762-9>.

Rossi, A., Formicola, C., Gonizzi Barsanti, S. (2024). Ingegna Romana. Dalle fonti ai modelli, dai reperti alle ricostruzioni. In *disegno*, n. 14, pp. 229-238. <https://doi.org/10.26375/disegno.14.2024.21>.

Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2024a). Use of Polybolos on the City Walls of Ancient Pompeii: Assessment on the Anthropic Cavities. In *Nexus Network Journal*. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00803-x>.

Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2024b). Naturali o antropiche? Misura e visualizzazione delle cavità murarie in cerchie urbane. In F. Bergamo, A. Calandriello, M. Ciammaichella, I. Friso, F. Gay, G. Liva, C. Monteleone (a cura di). *Misura / Dismisura, Ideare Conoscere Narrare*. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Padova e Venezia, 12-14 settembre 2024, pp. 1957-1978. Milano: FrancoAngeli. <https://doi.org/10.3280/oa-1180-c569>.

Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2025). *Conoscere Pompei. Testimonianze balistiche sillane*. *Calchi digitali*, vol. 6. Limena, Padova: libreriauniversitaria.it.

Russo, F. (2004). *L'artiglieria delle legioni romane. Le macchine da guerra che resero invincibile l'esercito romano*. Roma: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

Russo, F., Russo, F. (2005). *89 a.C. assedio a Pompei: la dinamica e le tecnologie belliche della conquista sillana di Pompei*. Pompei: edizioni Flavius.

Russo, M. (2021). AR in the Architecture Domain: State of the Art. In *Applied Sciences*, vol. 11, n. 15, pp. 1-38.

Santacana i Mestre, J., Martín Piñol, C. (Eds.). (2010). *Manual de museología interactiva*. Gijón, España: Ediciones Trea.

Scolari, M. (2005). *Il disegno obliquo. Una storia dell'antiprospectiva*. Venezia: Marsilio Editori.

Sdegno, A., Riavis, V. (a cura di). (2023). *DAI - Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione*. Atti del II convegno DAI. Udine, 1-2 dicembre 2023. Alghero: PUBLICA.

Van Buren, A. W. (1925). Further Studies in Pompeian Archaeology. In *Memoirs of the American Academy in Rome*, vol. 5, pp. 103-113.

Van Buren, A. W. (1932). Further Pompeian Studies. In *Memoirs of the American Academy in Rome*, vol. 10, pp. 7-54.

Autori

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

Per citare questo capitolo: Adriana Rossi, Silvia Bertacchi, Claudio Formicola, Sara Gonizzi Barsanti. (2025). Il museo fuori dal museo: impatti balistici. In L. Carlevaris et al. (a cura di). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 3259-3282. DOI: 10.3280/oa-1430-c924.

The Museum Outside the Museum: Ballistic Impacts

Adriana Rossi
Silvia Bertacchi
Claudio Formicola
Sara Gonizzi Barsanti

Abstract

In recent decades, three-dimensional surveying and digital modelling, including 3D printing, have become fundamental tools for the documentation and dissemination of Cultural Heritage, improving inclusive accessibility, both sensory and cognitive, for a wider and more diverse audience. Especially for sites that are inaccessible for various reasons, or due to the physical inability of visitors to fully enjoy them, the creation of a museum narrative supported by digital models and virtual artefacts with informative content, then translated into physical prototypes, can effectively help make the subject matter understandable to a heterogeneous audience. The documentation of ballistic impacts on the northern walls of Pompeii, attributed by archaeologists to the impact of Sulla's Roman artillery (1st century BC), demonstrates the effectiveness of high-resolution models in replicating the characteristics of the walls and impact marks. These models provide a basis for the development of knowledge pathways aimed also at visitors with different sensory and motor abilities. The paper thus presents some reflections on the use of 3D digital models in various forms, including physical prototyping, to support cultural dissemination, demonstrating the validity and effectiveness of integrating digital documentation with museological narrative.

Keywords

Exhibit design, physical accessibility, cognitive accessibility, 3D digital modelling, Pompeii.

Digital model of Vesuvio Gate and the *Castellum Aquae*, Archaeological Park of Pompeii (photogrammetry, processing, and rendering by S. Bertacchi).



"VII. MARKS OF THE SULLAN BOMBARDMENT. The amount of attention which various features in Pompeii have excited, both among tourists and in the world of scholarship, is not always proportionate to their intrinsic significance. For some reason, a matter which the successive groups of scholars who have visited the site under my guidance have felt to be one of the most impressive memorials of the place's history has remained practically unnoticed: namely, the numerous marks to be seen on the exterior of the town wall and apparently due to the operations of the troops of the Sullan party who, as appears from OROSIVS V, xviii, 22, laid siege to Pompeii in the year 89 B.C."

Van Buren 1925, p. 110].

Introduction

This paper aims to make accessible to the widest and most diverse possible audience the initial results of a project whose objective is to document and analyse the ballistic imprints found on the northern city walls of Pompeii, which archaeologists attribute to the impact of Roman artillery (1st century BC). The area is currently not accessible, pending the completion of the project to restore pedestrian and cycling paths and reorganize visitor flow logistics; as a result, the extensive northern stretch of the city walls is temporarily closed to the public.

Distributed along the extrados of the perimeter between the two northern gates of Pompeii [Anniboletti 2016], the projectile impacts are arranged in a seemingly random pattern along the current height of the wall and can therefore be easily confused with the natural cavities found on the tuff and Sarno limestone blocks [Kastenmeier *et al.* 2010].

Beyond the objective issue of physical accessibility, there is a need to illustrate and make understandable an important and little-known topic that has emerged from military-historical detailed study: the damage caused by stone-throwing and dart-throwing machines from the

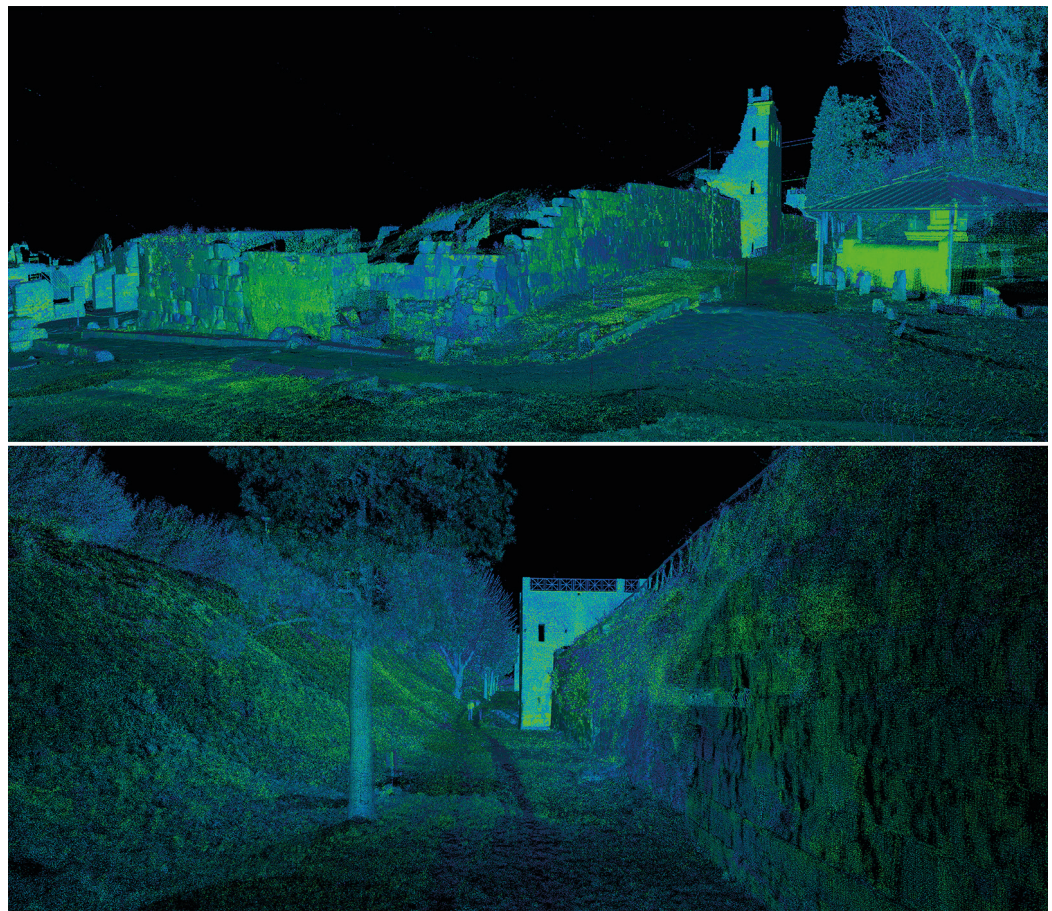


Fig. 1. Perspective views of the point cloud acquired via terrestrial laser scanning for general documentation: above, from Vesuvio Gate toward Tower X; below, from the west toward Tower XI, known as the Tower of Mercurio (registration and processing by S. Bertacchi).

Republican era constitutes the only existing and undeniable evidence of the lethality of elastic torsion weapons, still visible today despite Roman-era restorations, the volcanic eruption, and more than a century of exposure to weathering and maintenance interventions.

In order to be identified and understood, the ballistic marks require a reliable and appropriate narrative, supported by museological techniques as well as suitable physical support capable of bridging the gap between past and present, and of making the topic accessible even to users with limited motor or visual abilities.

The aim of this investigation is to reflect on the use of digital models as tools for research and support for dissemination activities related to the archaeological questions of this crucial area of the site. The question we seek to answer concerns the actual possibility of producing digital (virtual) and material (through prototyping) artefacts capable of supporting scientific narration in a museological context through an appropriate perceptive-exhibitive layout.

It is, in fact, essential to convey the scientific principles and serial organization of the Republican era, which were forgotten with the rise of the Empire and rediscovered only in the last century thanks to rare and fragmentary archaeological finds of catapults and ballistae.

Focusing on the core aspects, the digital models relating to the walls and siege weapons – selected among the most significant developments – will form the ‘collection’ to be exhibited and allow for different scales of representation and methods of physical reproduction [Basso Peressut, Caliarì 2014], starting from: i) a general overview of the issue (typological and structural features of the northern city walls) (fig. 1); ii) weapons from the period commonly used during sieges (with mechanical dimensions matching the scale of actual use) (fig. 2); iii) finer details visible on the ashlar, such as the impact marks, together with the projectiles used, whether stone balls or metal darts (fig. 3).

These materials are capable of effectively conveying complex concepts and enabling tactile, interactive experiences [Santacana i Mestre, Martín Piñol 2010], facilitating an appropriate cognitive process for both conventional and non-conventional visitors. Indeed, institutions responsible for the preservation and dissemination of Cultural Heritage sites have shown increasing sensitivity toward more vulnerable groups, as evidenced by recent updates to visitor support systems in archaeological sites of comparable significance [Bruciati *et al.* 2023; Bruciati, D’Alessandro 2023]. In this case, two main logistical challenges hinder access to the northern section of the walls, between Vesuvio Gate and Ercolano Gate: on one hand, a steep

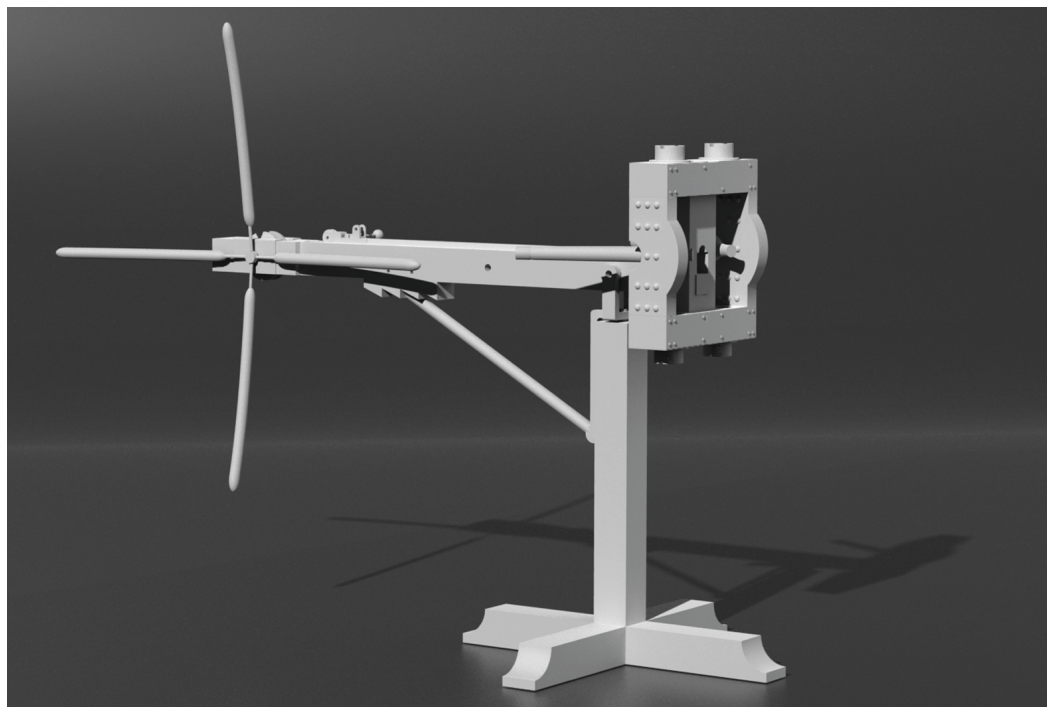


Fig. 2. Digital reconstruction model of a Roman *scorpio*, an elastic torsion siege weapon, by C. Formicola.

Fig. 3. Examples of ballistic marks documented on the stretch of the city walls near Vesuvio Gate and the corresponding impacting projectiles (models by S. Bertacchi).



slope caused by the accumulation of pyroclastic material – only partially removed to expose the fortification; on the other, the absence of purpose-built paths, as seen in other areas of the site [Picone 2014], to facilitate passage over the cobblestone paved road and the dirt road running alongside the walls.

Leaving aside these logistical difficulties for the moment, the paper focuses on the perceptive support that tactile models can offer in engaging a significantly broader audience.

The issue to be addressed is therefore how to adapt and transform the results of digital documentation operations into physical artefacts functional for exhibition design.

Among the available supports, the maquette deserves mention. In architectural practice, these scaled-down models –made from materials different from those used in the actual building– were employed for various purposes: from design prefiguration to the communication of conceptual ideas [Scolari 2005, pp. 131-163].

The gap between abstract concepts and executive choices is now partly bridged through the use of digital models. By integrating multiple disciplines, these tools –like traditional ones– enhance both the understanding and the communication of complex information; they support speculative activities in the design phase as well as the diachronic recording of the existing condition (hence the term ‘reality-based’), and help exponentially expand the potential dissemination of content and meaning.

In the experimental work conducted on the northern stretch of Pompeii’s walls, the general model was structured using both active and passive sensor systems. Beyond its primary function as a 3D documentation tool, the model was developed through reverse modelling protocols to create multiscale –either complete or partial– representations capable of guiding and focusing the user’s perception toward predefined objectives.

This discussion aims to highlight and explore primarily those museological issues with an inclusive character.

Model Characterisation

Complete three-dimensional digital models, obtained through photogrammetry and laser scanning, underwent several processing steps, including selective filtering and optimisation operations, to ensure their suitability for Boolean operations aimed at isolating and shaping virtual casts, later integrated into physical supports suitable for both viewing and tactile exploration.

The validation of the models' suitability in conveying physical information –necessary to understand the shape and size of the indentations on the wall surface– is based on established workflows and techniques developed specifically for the documentation project. The integration of passive and active sensors for non-contact acquisition of shape and colour, while involving a complex workflow of software and technologies, is now standard practice, though it still demands a high level of expertise from the professionals managing the data in order to convert surveys into digital models that can accurately serve as perceptual tools for exhibition design.

As a result, the fidelity of digitization to reality –meaning the metric reliability of high-detail 3D models, as well as the accuracy of apparent colour– has become a widely debated topic in recent years, particularly following the systematic adoption of integrated methodologies for 3D scene acquisition at multiple scales [Apollonio, Gaiani, Benedetti 2012; Ramos, Remondino 2015; Remondino *et al.* 2018]. In particular, the widespread use of photogrammetric SfM/MVS applications –more flexible and cost-effective than most active sensing technologies– has led to significant rethinking and reorganisation of established workflows, with rapid and remarkable consequences in both software and hardware domains.

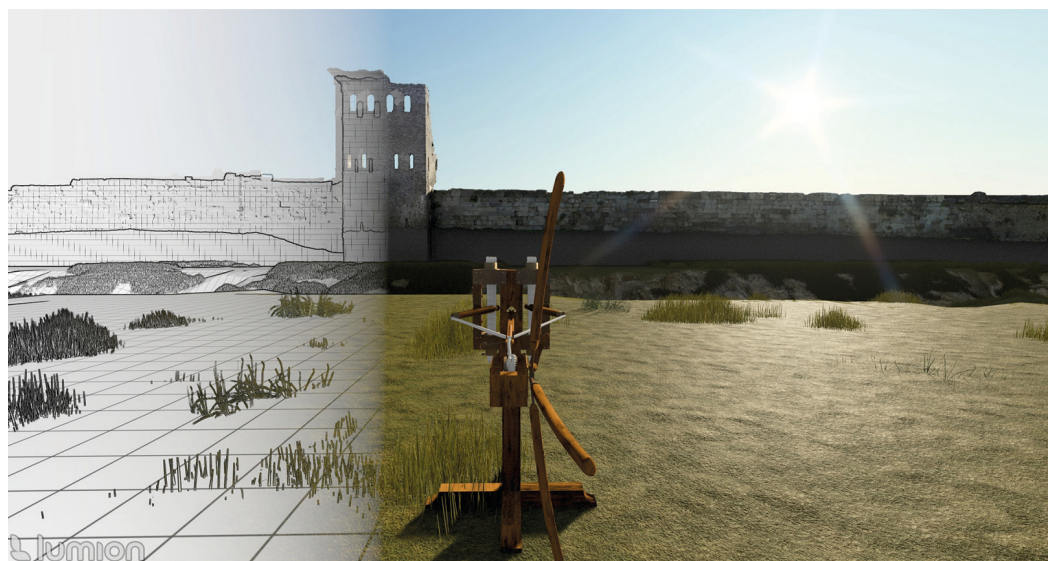
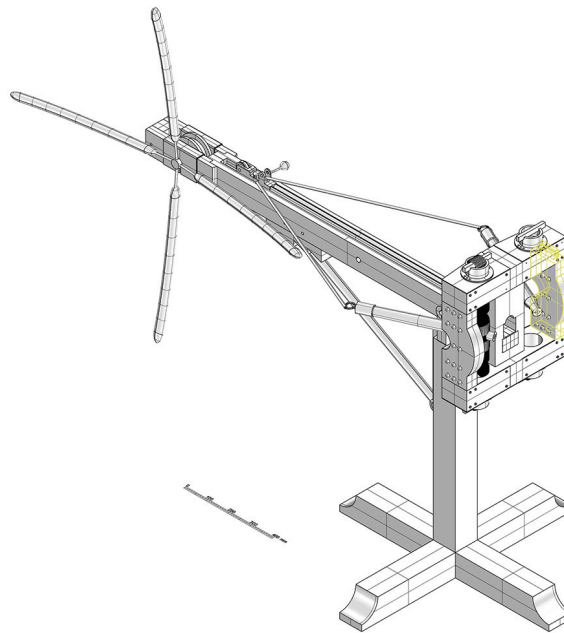


Fig. 4. Above, axonometric view of a Roman scorpio; reconstruction model by C. Formicola. Below, comparative view of a technical drawing and the corresponding rendering, created in Lumion 2024 Student to enhance visual communication; rendering by V. Casadei.

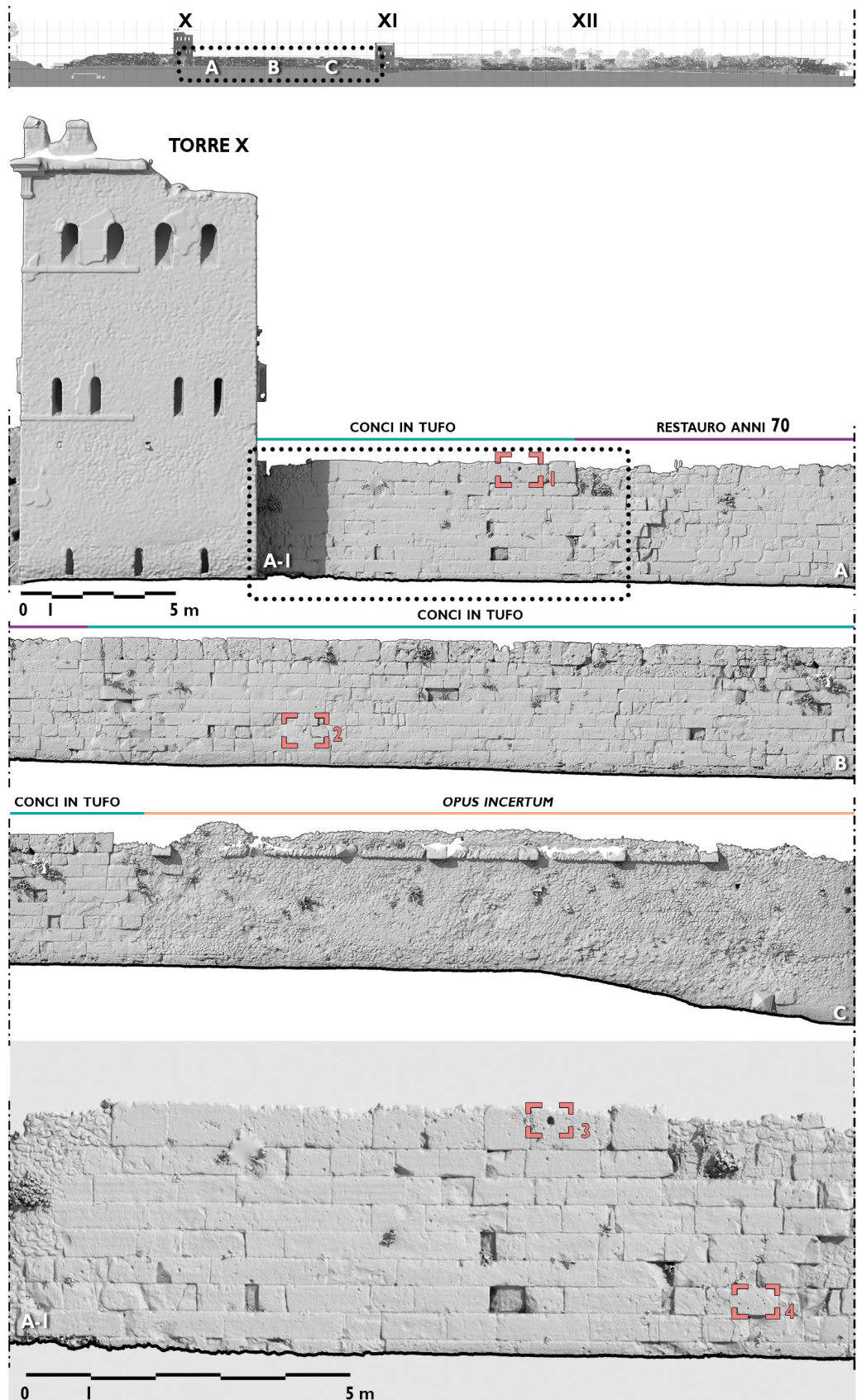
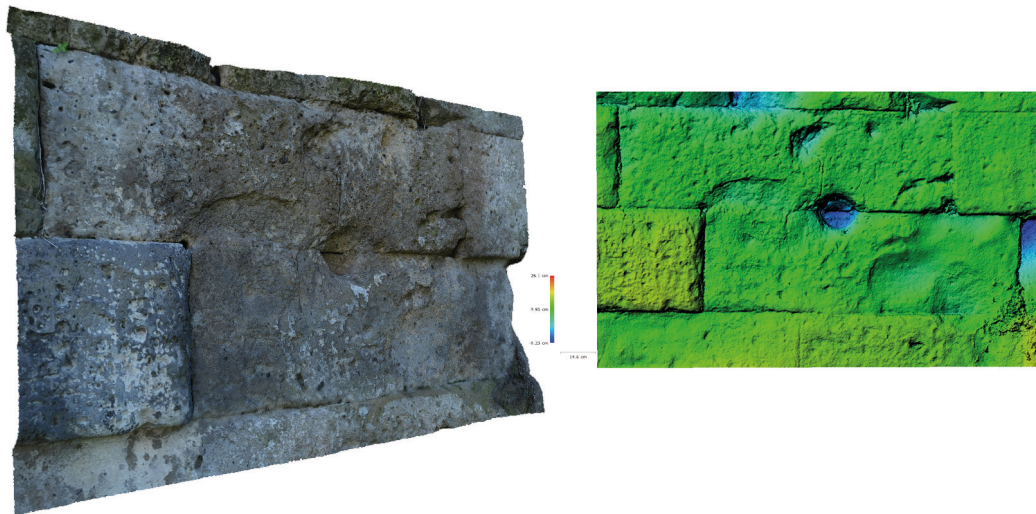


Fig. 5. Digital model of the surveyed wall segment processed for the classification of different types of traces. Above, general location between Vesuvio and Ercolano Gates; center, city wall between Towers X and XI with masonry details; below, close-up (models by S. Bertacchi).

Fig. 6. Example of detailed photogrammetric documentation of a case study. Photos by S. Gonizzi Barsanti (models by S. Bertacchi).



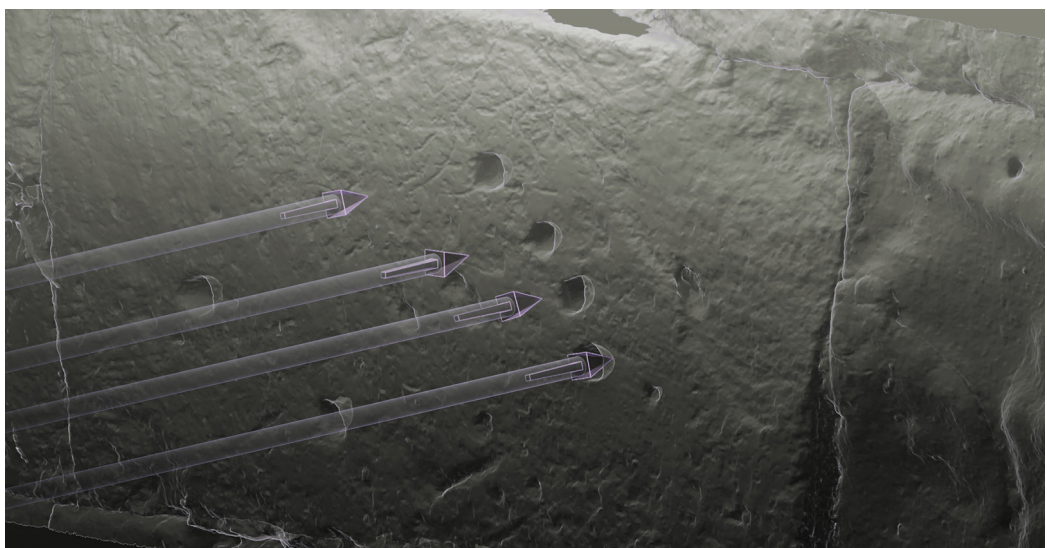
Photogrammetry based on workflows derived from Computer Vision has been applied in numerous fields, addressing diverse and multiscale objectives. Through integration with established pipelines, it has significantly advanced practices even in the architectural and archaeological sectors [Benedetti, Gaiani, Remondino 2010; Apollonio *et al.* 2021].

A digital model that faithfully replicates a physical entity can serve as the basis for a Digital Twin (DT), intended either as a static virtual representation of a physical object at a specific point in time, or as a dynamically connected model used as a reference throughout the entity's entire life cycle (creation, construction, management/maintenance, and disposal).

This establishes a connection between the physical and digital spaces, especially within the field of Cultural Heritage [Bevilacqua *et al.* 2022; Gabellone 2022; Grieves 2023].

Digital modelling in architecture and archaeology has therefore seen significant progress also in terms of accessibility –an expansive and multifaceted concept– ranging from the use of models to support the inclusion of individuals with visual, motor or sensory disabilities within the cultural system. This is made possible through the use of advanced tactile models or models employed for audio descriptions, aimed at enhancing the physical translation of the complexity and depth of the real world. Other solutions include VR/AR applications or virtual tours in areas inaccessible to people with limited mobility. Equally important is the implementation of information and knowledge, regarded as forms of cognitive and perceptual

Fig. 7. Study of the repeated fan-shaped traces and initial modeling of possible impacting objects (metallic darts) (models by S. Bertacchi).



accessibility, to facilitate understanding of complex concepts or spatial arrangements and sites closed to visitors, through simulations or advanced digital models [Bertacchi, Adembri 2024; Russo 2021; Sdegno, Riavis 2023]. No less significant is the reduction of material barriers to accessibility and the democratisation of access to culture, also promoted through the online dissemination of content designed to extend the reach of tangible, intangible, or no longer existing heritage [Inglese, Docci, Ippolito 2019; Juan-Vidal *et al.* 2024].

Starting from these premises, the aim is to show, through a specific case study, how the 3D digital model –created through the integration of various acquisition technologies– can form the foundational material for developing a knowledge pathway about artefacts which, although already the subject of extensive research, can, through digitisation, better express and explore the role of seemingly secondary details that actually contain numerous pieces of historically significant evidence.

Case study

The research object focuses on the ballistic marks identified by archaeologists on the northern stretch of the ancient walls in the Archaeological Park of Pompeii, between Vesuvio Gate and Ercolano Gate. These are the subject of recent and ongoing investigation by the Uni-Vanvitelli team [Rossi 2024; Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2025], starting with the digital documentation of the wall segment showing traces of the Sullan siege –which took place in 89 BC [Russo, Russo 2005]– and the virtual reconstruction of Roman elastic torsion weapon models (fig. 4), which may have produced the visible marks on the wall surface [Russo 2004]. A specific workflow was implemented for digital documentation and case study analysis, involving the integration of point clouds acquired via terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry. The scans were essential to provide a general reference due to the several hundred metres of the wall in the research area, characterised by variable heights and the presence of two overhanging towers, besides the remains of a third (fig. 5).

Photogrammetry instead provided detailed focus of certain wall features appearing as circular cavities (fig. 6), which had already been identified by archaeologists in the last century as ballistic impacts caused by stone projectiles launched by Roman siege engines [Van Buren 1925; Maiuri 1929; Van Buren 1932; Maiuri 1943]. Additional evidence includes previously undocumented cases of smaller dimensions, discovered during on-site inspections carried out by the authors as part of the SCORPiò-NIDI project. These may represent traces left by metal-tipped darts [Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2024a] (fig. 7).

The result of this data integration is a complete 3D model, enriched with apparent colour information, in high resolution, metric, oriented, and to scale –thus spatially referable to the wall system, including parameters such as the height, the inclination of the ashlar, and the impact cavity. These data make the model suitable for the subsequent steps of the project, which involves a second phase of mechanical testing to assess the firing power of elastic torsion weapons [Rossi, Formicola, Gonizzi Barsanti 2024].

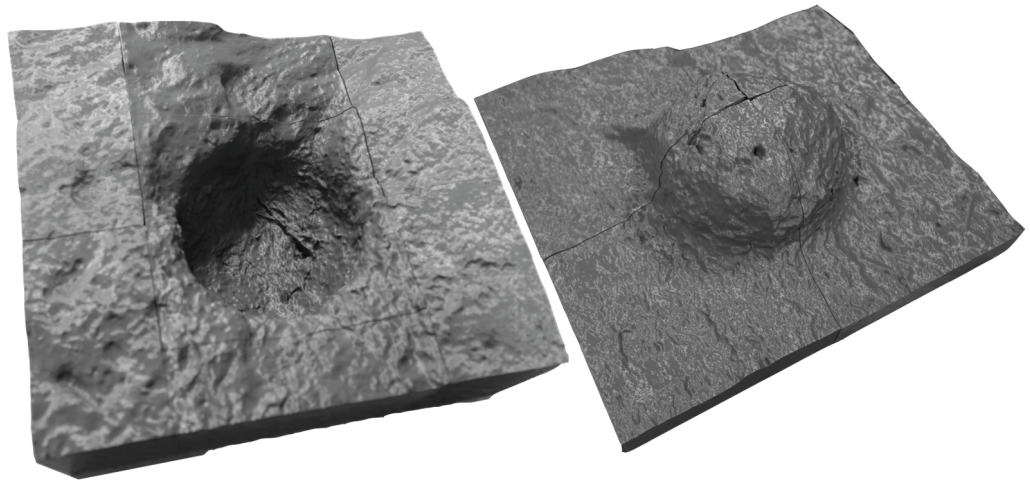
Models composed of polygonal meshes become broadly usable once the initial data have undergone post-processing and optimisation procedures, in order to obtain a 3D representation free from gaps and topological defects.

A key issue is the design of the survey campaign aimed at acquiring models capable of capturing surfaces at a resolution most suitable for the project's objectives, while also enabling a wide range of applications [Bertacchi, Adembri 2024].

Among the most valuable outcomes is the creation of virtual casts perfectly adhering to the surface of the wall, used for extracting dimensional and geometric data –such as shape and depth– and for effectively representing the cavities, while also preserving the crucial relationship between local and global scales that links the various levels of the digital output [Rossi, Gonizzi Barsanti, Bertacchi 2024b].

These traces are therefore documented through digital models that are compatible both with 3D printing reproduction and with tactile interpretation, thanks to the manipulation of physical replicas generated from virtual models (fig. 8). By making appropriate technical decisions regarding the printing resolution required to correctly perceive and discern details, and through several

Fig. 8. Full-scale 1:1 printed prototypes in multiple parts. Left, replica of the ballistic cavity from the city walls; right, its negative mold (3D prints by C. Formicola).



post-processing strategies aimed at improving user experience and legibility [Busana, Farroni Gallo 2021], these replicas –already tested in various museum contexts– can be developed with an inclusive approach, activating tactile pathways enriched with supplementary information (fig. 9). The adopted method involves developing relief and differentially detailed models based on mesh models obtained through integrated acquisition techniques. The aim is to establish a perceptual hierarchy on the 3D-printed surface to be experienced through touch. The guiding criterion is to reduce the prominence of the finer details –considered high-frequency tactile noise– while preserving the main indentations caused by ballistic impacts, which are understood as key elements in the cognitive experience of siege techniques. The technique used to create these models is based on so-called displaced subdivision surfaces [Lee, Moreton, Hoppe 2000], and involves compressing the details of a high-resolution mesh of a wall portion into a bitmap in OpenEXR format. This bitmap records the displacement between the high-poly master model and its square-dominant simplification, which is then converted into a subdivision surface [Guidi, Angeleddu 2016; Lai *et al.* 2010].

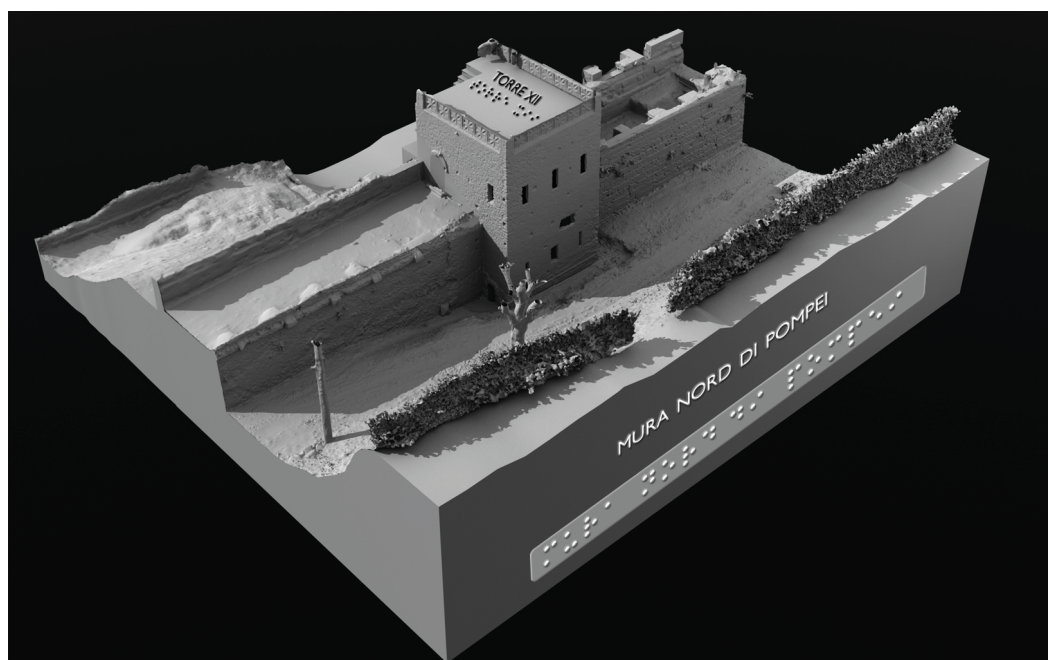


Fig. 9. Feasibility study for a tactile 1:50 scale model of a wall section near the Tower of Mercurio, developed from the integrated digital model to support spatial comprehension of the slope from the northern walls toward ancient Pompeii (model by S. Bertacchi).

Fig. 10. Section of the model from Fig. 9 showing terrain elevation changes, with simplified explanations of architectural elements, including Braille labels for blind and visually impaired users and the installation of the model on a display support for use in a museum space (elaboration by S. Bertacchi).



This variable level of detail (LOD) representation makes it possible to customise the base mesh according to the user's specific needs. In this specific case, a greyscale image is added to the LOD-displacement map, allowing the model to be segmented in such a way that the main impact craters are emphasised in contrast to the surrounding micro-details on the masonry surface. The latter are reduced in depth as they constitute unnecessary noise in the tactile experience, potentially confusing the user; by contrast, the segmentation map enables the preservation of all the details of the main holes, which represent the primary informative element of the entire process.

Fig. 11. Rendering of a possible museum exhibit on the northern walls, including the analysis of different types of cavities and stone ball projectiles, and both virtual and 3D printed casts (rendering and exhibit design by S. Bertacchi).



Conclusions

In recent decades, reality-based 3D surveying and digital modelling –including related outputs such as 3D printing– have become common tools not only for the documentation of Cultural Heritage, but more importantly for promoting cultural knowledge and, crucially, aimed at non-expert audiences for educational dissemination. Virtual applications have proven to be valuable tools for improving –and in some cases even enabling– sensory and cognitive accessibility, representing a concrete and sustainable solution. In the case study presented, the models produced through an integrated photogrammetry and laser scanning pipeline offer characteristics suitable for facilitating a simplified yet accurate understanding of complex forms. This is achieved through the combined use of positive casts and negative moulds of ballistic marks, alongside comprehensive models of the site that provide appropriate contextual information, including for visually impaired or blind audiences.

The use of physical prototypes on dedicated interfaces –both on-site and virtual, accessible online– allows users to interact intuitively with the exhibition layout, thereby grasping the topic of the siege and its effects across different scales and from various perspectives. In this regard, ergonomic considerations guide the design of physical models, which must present varying levels of detail and incorporate textual explanations and Braille labels, with the aim of making the cognitive process more inclusive and effective (fig. 10).

Indeed, virtual models and 3D-printed casts can serve as valuable tools for understanding, particularly in the case of Cultural Heritage assets that are difficult to access either physically or conceptually, as in the case of the ballistic marks. These are often difficult to identify due to their height and the seasonal variability of surrounding vegetation, which can obscure them – especially to the untrained eye. Such supports could also be integrated in situ to further contribute to the complex process of understanding and disseminating Cultural Heritage, facilitating a direct visualisation of prototypes within their original context, or enriching exhibition experiences with historical and educational information on ancient weapons, including the additional possibility of simulating their destructive effects through immersive virtual platforms (fig. 11).

Acknowledgements

This research was supported by the project "SCORPiò-NIDI", CUP B53D23022100006 (DD n. 1012/2023), funded by the Italian Ministry of Research under the PRIN (call DD n. 104/2022) funding initiative. Claudio Formicola was supported by a scholarship co-financed by DM 118/23 PNRR (M4C1 – Inv. 3.4 TDA).

Reference List

- Anniboletti, L. (2016). Le fasi delle fortificazioni di Pompei. Stato della conoscenza. In *SIRIS Studi e Ricerche della Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici di Matera*, vol. 2015, 15, pp. 49-70. <http://dx.doi.org/10.4475/782>.
- Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, vol. 13, 3, 486, pp. 1-39. <https://doi.org/10.3390/rs13030486>.
- Apollonio, F. I., Gaiani, M., Benedetti, B. (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: A framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. In *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, n. 5, pp. 1271-1287. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.034>.
- Basso Peressut, L., Calari, P. (a cura di). (2014). *Architettura per l'Archeologia. Museografia e Allestimento*. Roma: Prospettive Edizioni.
- Benedetti, B., Gaiani, M., Remondino, F. (a cura di). (2010). *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale.
- Bertacchi, S., Adembri, B. (2024). Entering the Emperor's Villa: An integrated methodology to enrich cognitive accessibility of an archaeological site. In *DisegnareCon*, vol. 17, 32, pp. 3.1-3.14. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.3>.
- Bevilacqua, M. G., Russo, M., Giordano, A., Spallone, R. (2022). 3D Reconstruction, Digital Twinning, and Virtual Reality: Architectural Heritage Applications. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. Christchurch, New Zealand, March 12-16, 2022, pp. 92-96. <https://doi.org/10.1109/VRW55335.2022.00031>.
- Bruciati, A., D'Alessandro, L. (2023). Passepartout. Il museo di tutti per tutti. Un progetto di accessibilità delle VILLÆ. In A. Anguissola, C. Tarantino (a cura di). *Aree archeologiche e accessibilità. Riflessioni ed esperienze*. Pisa: Pisa University Press, pp. 127-137.
- Bruciati, A., D'Alessandro, L., Empler, T., Fusinetti, A. (2023). VILLÆ (Tivoli, MiC). Percorsi di inclusione museale e accessibilità. In A. Sdegno, V. Riavis (a cura di). *DAI - Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione*. Atti del II convegno DAI. Udine, 1-2 dicembre 2023, pp. 508-521. Alghero: PUBLICA.
- Busana, M. S., Farroni Gallo, F. (2021). Il progetto TEMART: metodologie e tecnologie per la stampa 3D di riproduzioni tattili. In *Aisthesis. Scoprire l'arte in tutti i sensi*, vol. 17. <https://www.museoomero.it/servizi/pubblicazioni/rivista-aisthesis-scoprire-larte-con-tutti-i-sensi/aisthesis-numero-17-settembre-2021/il-progetto-temart-metodologie-e-tecnologie-per-la-stampa-3d-di-riproduzioni-tattili-di-maria-stella-busana-e-francesca-farroni-gallo/>.
- Gabellone, F. (2022). Digital Twin: A new perspective for cultural heritage management and fruition. In *Acta IMEKO*, vol. 11, 1, pp. 1-7. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i1.1085.
- Grieves, M.W. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. In N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva (Eds.). *The Digital Twin*. Cham: Springer International Publishing, pp. 97-121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4.
- Guidi, G., Angheluddu, D. (2016). Displacement Mapping as a Metric Tool for Optimizing Mesh Models Originated by 3D Digitization. In *J. Comput. Cult. Herit.*, vol. 9, 2, pp. 9:1-9:23. <https://doi.org/10.1145/2843947>.
- Inglese, C., Docci, M., Ippolito, A. (2019). Archaeological Heritage: Representation Between Material and Immaterial. In C. Inglese, A. Ippolito (Eds.). *Analysis, Conservation, and Restoration of Tangible and Intangible Cultural Heritage*, Ch. 1, pp. 1-22. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-6936-7.ch001>.

- Juan-Vidal, F., Díaz-Maiquez, J., Bertacchi, G., Ibáñez-Vila, A., López, G. B. (2024). The fruition of Intangible Heritage through gamification: Accessibility, inclusiveness, and transmission of values in the Heriverso project. In *DISEGNARECON*, vol. 17, 32, pp. 7.1-7.12. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.7>.
- Kastenmeier, P., Di Maio, G., Balassone, G., Boni, M., Joachimski, M., Mondillo, N. (2010). The source of stone building materials from the Pompeii archaeological area and its surroundings. In *Periodico Di Mineralogia*, vol. 87, n. 4, pp. 38-58. <https://dx.doi.org/10.2451/2010PM0020>.
- Lai, Y.-K., Kobbelt, L., Hu, S.-M. (2010). Feature aligned quad dominant remeshing using iterative local updates. In *Computer-Aided Design*, vol. 42, n. 2, pp. 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.02.017>.
- Lee, A., Moreton, H., Hoppe, H. (2000). Displaced subdivision surfaces. In *SIGGRAPH '00. Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New Orleans, Louisiana USA, July 23-28, 2000, pp. 85-94.
- Maiuri, A. (1929). *Studi e ricerche sulla fortificazione di Pompei*, vol. 33. Milano: Hoepli.
- Maiuri, A. (1943). Pompei. Isolamento della cinta murale tra la Porta Vesuvio e la Porta Ercolano. In *Notizie degli scavi di antichità*, vol. VII, pp. 275-314.
- Picone, R. (a cura di). (2014). *Pompei accessibile. Per una fruizione ampliata del sito archeologico*. Roma: L'Erma di Bretschneider.
- Ramos, M. M., Remondino, F. (2015). Data fusion in Cultural Heritage – A Review. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5-W7, pp. 359-363.
- Remondino, F., Georgopoulos, A., Gonzalez-Aguilera, D., Agrafiotis, P. (Eds.). (2018). *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-685-1>.
- Rossi, A. (2024). The Survey of the Ballistic Imprints for a Renewed Image of Unearthed Pompeii. In *Nexus Network Journal*, vol. 26, n. 2, pp. 307-324. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00762-9>.
- Rossi, A., Formicola, C., Gonizzi Barsanti, S. (2024). Ingegna Romana. Dalle fonti ai modelli, dai reperti alle ricostruzioni. In *disegno*, n. 14, pp. 229-238. <https://doi.org/10.26375/disegno.14.2024.21>.
- Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2024a). Use of Polybolos on the City Walls of Ancient Pompeii: Assessment on the Anthropic Cavities. In *Nexus Network Journal*. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00803-x>.
- Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2024b). Naturali o antropiche? Misura e visualizzazione delle cavità murarie in cerchie urbane. In F. Bergamo, A. Calandriello, M. Ciammaichella, I. Friso, F. Gay, G. Liva, C. Monteleone (a cura di). *Misura / Dismisura, Ideare Conoscere Narrare*. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Padova e Venezia, 12-14 settembre 2024, pp. 1957-1978. Milano: FrancoAngeli. <https://doi.org/10.3280/oa-1180-c569>.
- Rossi, A., Gonizzi Barsanti, S., Bertacchi, S. (2025). *Conoscere Pompei. Testimonianze balistiche sillane*. *Calchi digitali*, vol. 6. Limena, Padova: libreriauniversitaria.it.
- Russo, F. (2004). *L'artiglieria delle legioni romane. Le macchine da guerra che resero invincibile l'esercito romano*. Roma: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.
- Russo, F., Russo, F. (2005). *89 a.C. assedio a Pompei: la dinamica e le tecnologie belliche della conquista sillana di Pompei*. Pompei: edizioni Flavius.
- Russo, M. (2021). AR in the Architecture Domain: State of the Art. In *Applied Sciences*, vol. 11, n. 15, pp. 1-38.
- Santacana i Mestre, J., Martín Piñol, C. (Eds.). (2010). *Manual de museología interactiva*. Gijón, España: Ediciones Trea.
- Scolari, M. (2005). *Il disegno obliquo. Una storia dell'antiprospektiva*. Venezia: Marsilio Editori.
- Sdegno, A., Riavis, V. (a cura di). (2023). *DAI - Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione*. Atti del II convegno DAI. Udine, 1-2 dicembre 2023. Alghero: PUBLICA.
- Van Buren, A. W. (1925). Further Studies in Pompeian Archaeology. In *Memoirs of the American Academy in Rome*, vol. 5, pp. 103-113.
- Van Buren, A. W. (1932). Further Pompeian Studies. In *Memoirs of the American Academy in Rome*, vol. 10, pp. 7-54.

Authors

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

To cite this chapter: Adriana Rossi, Silvia Bertacchi, Claudio Formicola, Sara Gonizzi Barsanti. (2025). The museum outside the museum: ballistic impacts. In L. Carlevaris et al. (Eds.). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 3259-3282. DOI: 10.3280/oa-1430-c924.