

# Metodi di dimensionamento e schemi geometrici nell'architettura adrianea: il caso del Tempio di Venere a Baia

Enrico Gallocchio, Elena Eramo, Silvia Bertacchi, Filippo Fantini

## Abstract

*Il cosiddetto Tempio di Venere a Baia (II sec. d.C.) è una delle più complesse architetture voltate di età adrianea oggi conservate. Sebbene tradizionalmente identificato come tempio, l'edificio era parte del complesso termale di Baia. La sua articolazione spaziale riflette il carattere sperimentale tipico della progettazione adrianea.*

*Il presente studio, basato su un rilievo integrato dell'edificio, investiga le logiche geometriche che ne hanno governato il progetto. L'indagine è rivolta a verificare se la composizione sia stata governata da uno schema modulare, con diametri multipli di sette, e articolata secondo uno schema ad quadratum. Tali ipotesi sono state provate sfruttando protocolli di reverse modeling e algoritmi di best-fitting nell'analisi del modello poligonale del monumento. I risultati confermano un diametro di progetto di 91 pedes, suddiviso in moduli di 13 pedes, coerentemente con altre volte adrianee. In alzato, la copertura si configura come una volta composta, ottenuta dall'alternanza di segmenti cilindrici e trikentron. L'audacia strutturale del progetto è confermata da proporzioni eccezionalmente snelle, con un rapporto tra luce libera e spessore della muratura di 1:8,86. La ricerca mostra come nella progettazione adrianea si impiegassero strumenti geometrici flessibili e efficaci –multipli di sette, ad quadratum e griglie modulari– per generare soluzioni spaziali innovative e ottimizzate. I risultati contribuiscono alla più ampia comprensione della sperimentazione progettuale dell'epoca.*

*Parole chiave: volte adriane, griglie modulari di progetto, trikentron, reverse modeling, strutture voltate romane.*

## Introduzione

Il cosiddetto Tempio di Venere a Baia (Napoli) è una delle architetture di età adrianea (II sec. d.C.) fra le più innovative e ardite sotto il profilo strutturale, sebbene oggi sia solo parzialmente intuibile l'originale grandiosità del sistema voltato a copertura dell'aula circolare maggiore del complesso. L'edificio è dominato dall'imponente volume di tale sala [De Angelis d'Ossat 1977; Rakob 1988], coperta da una monumentale volta composta (figg. 1, 2). Intorno a questo nucleo, una serie di ambienti subordinati, di piccole dimensioni, definisce un basamento pressoché quadrato, oggi in larga parte interrato. Sul lato occidentale di tale basamento si innestano due volumi minori rispetto al corpo principale. La funzione e configurazione di questi ambienti restano incerte e la loro leggibilità è compromessa, oltre che dal

cattivo stato di conservazione, anche dal passaggio di una strada moderna che ha obliterato parte dell'impianto originario (fig. 3).

Benché tradizionalmente identificato come "tempio", l'edificio aveva in realtà una funzione termale. L'impropria denominazione risulta fuorviante, in quanto la sua composizione architettonica riflette il carattere sperimentale proprio di molte costruzioni commissionate dall'imperatore Adriano e in parte forse progettate dallo stesso, nelle quali le tipologie convenzionali erano costante oggetto di reinterpretazione. Il presente studio si basa sull'acquisizione di dati eseguita tramite rilevamento integrato, finalizzata alla produzione di un modello tridimensionale ad alta risoluzione da impiegare come base per l'analisi del progetto.

La ricerca presentata si inserisce in un più ampio progetto rivolto alla comprensione delle peculiarità architettoniche e strutturali delle volte di età adrianea [Cipriani et al. 2020; Eramo & Fantini 2024; Roca et al. 2024]. In questo contesto, gli autori hanno sviluppato un metodo di interpretazione che muove dall'analisi della composizione planimetrica dell'edificio e procede attraverso indagini progressivamente più approfondite degli alzati. Oltre all'impiego di applicativi indirizzati alla lettura formale dei resti, il metodo prevede l'integrazione dell'apparato teorico derivante dall'esegesi

Fig. 1. Il complesso monumentale del Tempio di Venere, visto dall'ingresso ovest (fotografia di S. Bertacchi).

Fig. 2. Vista della porzione conservata della volta e delle aperture nel tamburo (fotografia di S. Bertacchi).



vitruviana con i principi matematici formulati da Erone di Alessandria [Heiberg 1914a; 1914b], offrendo strumenti interpretativi per affrontare questioni archeologiche inerenti alle logiche progettuali e alla ricostruzione di elementi architettonici perduti o frammentari.

Oltre alle analisi condotte per interpretare e "ricostruire" i passaggi che dal progetto planimetrico permettono di giungere all'alzato e alla definizione dell'intradosso del sistema voltato, è stato possibile integrare nelle analisi l'esito dei recenti carotaggi effettuati al centro dell'aula maggiore (fig. 4). Tali evidenze hanno fornito elementi per una più accurata comprensione dell'elevazione e del livello di calpestio originali. Gli studi sull'alzato indicano, infatti, la presenza di un sistema voltato articolato, composto da otto segmenti cilindrici principali, impostati sul tamburo esternamente ottagonale, e da otto *trikentron* [1], superfici a doppia curvatura collocate al di sopra delle finestre.

Più nello specifico, la volta oggetto di indagine è tra le più ampie del mondo antico [Sanpaolesi 1971], con un diametro libero di 26,57 metri e uno spessore murario approssimativamente di 3 metri, in corrispondenza dei piloni ai vertici del perimetro ottagonale esterno. Il rapporto diametro-spessore che ne risulta è di circa 1:8,86, notevolmente snello se confrontato con la cupola del Pantheon di Roma, la cui luce di 43,56 metri è sorretta da muri spessi 6,2 metri, ossia in rapporto di circa 1:7,03. Tali proporzioni mettono in evidenza l'audacia tecnica della struttura di Baia e rinforzano il suo ruolo di esempio paradigmatico di innovazione architettonica.

Infine, le analisi dell'edificio e dei resti della volta contribuiscono a collocare il cosiddetto Tempio di Venere nel più vasto complesso archeologico sviluppato sul pendio retrostante, di cui costituisce un ampliamento successivo, non allineato alle adiacenti strutture preesistenti.

I risultati di seguito discussi pongono le basi per future indagini sull'articolazione complessiva del sito e sulla sua logica volumetrica e progettuale, la cui lettura è complicata dalla parziale rovina delle strutture e dai fenomeni bradisismici in atto, aprendo nuove prospettive di riflessione sulla sperimentazione architettonica adrianea.

## Obiettivi e metodologia

Scopo del presente studio è porre in evidenza i sistemi di dimensionamento adottati dagli antichi architetti come insieme di regole e vincoli progettuali, sia nella planimetria sia

nell'alzato del complesso del Tempio di Venere a Baia. Attraverso l'analisi dei dati di rilevamento e delle fonti storiche, si intendono appurare le possibili relazioni con edifici caratterizzati da forme e soluzioni strutturali analoghe a quelle del Tempio. In particolare, si vuole verificare la presenza di una griglia modulare alla base dell'intera composizione e se il diametro dello spazio coperto sia un multiplo di 7, in linea con gli studi di Svenshon [Svenshon 2009] e Fuchs [Fuchs 2023]. Un ulteriore obiettivo dell'indagine è la formulazione di un'ipotesi sull'altezza originaria complessiva dell'aula circolare, allo scopo di verificare il rapporto proporzionale tra l'impianto planimetrico e lo sviluppo verticale dell'edificio. In diversi complessi coevi già analizzati – come le Piccole Terme [Cipriani et al. 2017], il Triclinio Orientale della Piazza d'Oro e il Serapeo [Eramo, Fantini 2024] di Villa Adriana – è stato costantemente osservato un rapporto 1:1 tra pianta e alzato. Tuttavia, in altri casi, lo sviluppo verticale supera la luce libera per diverse ragioni, spesso di natura strutturale, come nel Vestibolo di accesso alla Piazza d'Oro, dove l'altezza maggiorata risponde a specifiche esigenze di carattere ingegneristico e spaziale [Adembri et al. 2018].

La forma dei resti delle diverse porzioni che compongono la volta è, quindi, oggetto di uno studio quantitativo, finalizzato a ipotizzare la geometria complessiva che ne ha governato il progetto. A tal fine, dai dati di rilevamento acquisiti nel febbraio 2024, è stato prodotto un modello digitale ad alta risoluzione. La campagna di rilievo del monumento è stata condotta allo scopo di definire una base di dati completa e affidabile per le analisi geometriche e le successive interpretazioni. Nel rilievo sono state incluse anche le aree circostanti, al fine di "ricucire" il Tempio di Venere con i resti archeologici posti al livello superiore del sito, oggi separati dal passaggio della strada carrabile. Le attività di rilevamento hanno previsto una documentazione integrata, ossia: i) un'acquisizione con Terrestrial Laser Scanner (TLS), eseguita con una Leica ScanStation C5 basata su tecnologia Time-of-Flight (ToF), (80 scansioni a risoluzione media) per la generazione di un modello digitale tridimensionale dettagliato, ottenuto attraverso procedure standard di *meshing* e ottimizzazione; ii) un'acquisizione fotogrammetrica, specificamente dedicata al monumento oggetto di indagine, composta da 986 fotografie scattate con fotocamera Nikon D5200 (equipaggiata con obiettivo Nikon AF-P 18-55mm f/3.5-5.6 DX VR) e target X-Rite ColorChecker, allo scopo di ottenere una mappatura del colore apparente corretta da dominanti cromatiche presenti al momento del rilevamento (fig. 5).

I dati acquisiti sono stati elaborati utilizzando un'applicazione di *Reverse Modeling* (RM), che rappresenta lo stato dell'arte nel settore [2]. Se opportunamente impiegati, questi strumenti risultano pienamente coerenti con gli obiettivi dell'analisi del progetto architettonico. Il protocollo adottato prevede la conversione del modello a nuvola di punti in una *mesh* ad alta risoluzione, impiegata come base per le analisi successive. La *mesh* risultante è caratterizzata da una lunghezza media degli spigoli di circa 4 mm, valore che consente un'elaborazione efficiente e un'interpretazione accurata dei modelli derivati dalle nuvole di punti, secondo le fasi descritte di seguito:

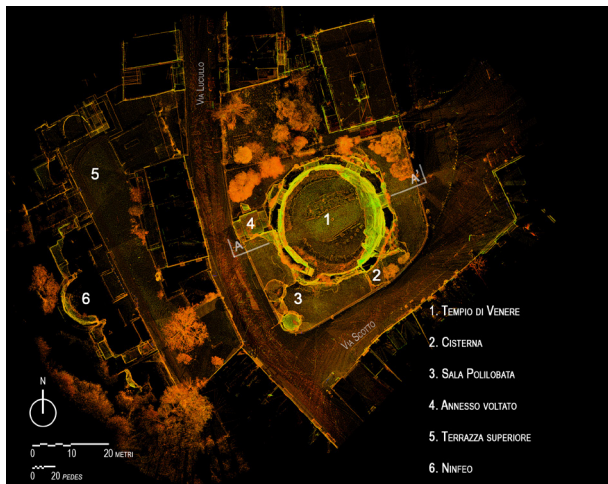
- sono definiti interattivamente piani, vettori e punti diriferimento, necessari alla creazione di schemi bidimensionali. Questi riferimenti vengono posizionati in modo strategico per riconoscere gli elementi architettonici originali e distinguerli dagli interventi di restauro successivi o dalle alterazioni dovute a cause antropiche o naturali;
- gli elementi geometrici, in particolare i piani, sono impiegati in diverse operazioni di analisi:
  - estrazione di sezioni utili per un'accurata documentazione della struttura costruita;
  - generazione di profili bidimensionali di *best-fitting*, impiegati come base per le letture interpretative del progetto architettonico;
  - ottenimento di curve di livello, che rivelino le tracce del le superfici voltate originarie, specialmente nelle aree in cui l'intradosso è maggiormente interessato da fenomeni di degrado, offrendo così preziose indicazioni per la ricostruzione della configurazione spaziale iniziale;
- da collezioni attentamente selezionate di punti o regioni, definite manualmente dall'operatore o estratte automaticamente, vengono derivate primitive geometriche, come solidi o superfici, in grado di approssimare il sistema voltato originario. Queste forme idealizzate fungono da modelli di riferimento analitico, consentendo una lettura più rigorosa dei resti conservati;
- le forme idealizzate, definite mediante superfici o solidi NURBS, possono essere confrontate con la corrispondente *mesh* originale, al fine di migliorare l'accuratezza e l'affidabilità complessiva del processo di ricostruzione e interpretazione.

Inoltre, per alcune delle analisi di maggiore approfondimento è stato sviluppato un processo *ad hoc*, basato su algoritmi di *best-fitting* per curve e superfici quadriche.

I dati ottenuti attraverso i protocolli di *reverse modeling* sono stati impiegati per verificare l'ipotesi secondo cui gli antichi architetti possano aver adottato un approccio codificato alle strutture voltate, come delineato in alcuni testi attribuiti a Erone di Alessandria, in particolare negli *Stereometrica I*, *Stereometrica II* e nel *De Mensuris*. Benché il trattato originale di Erone sulle volte "*ta kamarika*" [Conti, Martines 2010] sia andato perduto, studi recenti di Roca, Juan-Vidal, Cipriani, Fantini [Roca et al. 2023] suggeriscono che parte dei suoi contenuti possa rintracciarsi nelle edizioni di Heiberg [Heiberg 1914a; 1914b]. Erone basa i propri studi sui più noti testi di Archimede, semplificandoli con un taglio tecnico e applicativo. Ridotte alle loro espressioni matematiche essenziali, le formule e i metodi relativi al calcolo del volume (ovvero della quantità di materiale da costruzione) di archi, cupole e spazi voltati possono essere sintetizzati come segue:

- sottrazione di volumi (intradosso meno estradosso): l'intradosso di cupole e archi è spesso descritto con un diametro di sette unità o loro multipli;
- uso di superfici "medie", posizionate in mezzzeria tra intradosso ed estradosso, che vengono poi moltiplicate per uno spessore costante al fine di stimare il volume

Fig. 3. Vista planimetrica della nuvola di punti da TLS dei principali resti archeologici del complesso del Parco Archeologico delle Terme di Baia con i principali resti archeologici. (registrazione e processing della nuvola di punti di S. Bertacchi).



(anche in questo caso, il diametro corrisponde a sette unità o loro multipli). Un metodo analogo è descritto da Erone per il calcolo del numero di spettatori di un teatro [Bianchini, Fantini 2015];

- un ulteriore metodo contempla l'applicazione di pezze di tessuto di forma rettangolare, su superfici complesse, successivamente disposti su di un piano per misurarli. Sebbene tale approccio fornisca un mezzo pratico per stimare le aree di forme irregolari, sembra essere più appropriato per sculture che per l'analisi di sistemi voltati complessi.

Uno degli aspetti chiave dei metodi di progettazione antica risiede nel riconciliare una componente strettamente quantitativa – che potremmo definire computazionale (*distributio*) – con un criterio modulare che permea l'intero edificio (*ordinatio*), e con costruzioni grafiche a riga e compasso di provata efficacia e agevole esecuzione, come lo schema *ad quadratum* o quello dodecagono del teatro latino [3].

Un'ultima osservazione riguarda il valore di  $\pi$ , che nei calcoli è sistematicamente approssimato con il rapporto 22/7. Per questa ragione, i diametri venivano spesso impostati come multipli di sette, al fine di agevolare i calcoli dei perimetri e, successivamente, di tutte le quantità correlate, come le aree delle superfici e i volumi.

## Analisi della pianta

In merito all'interpretazione del progetto in pianta (*ichnographia*), la rotonda sembra essere generata dalla sua circonferenza interna, che segue la stessa logica progettuale di altri edifici del tempo di Adriano, ossia l'uso di un diametro multiplo del numero sette. Ciò si osserva in ben noti complessi di Villa Adriana, in particolare in due cupole ancora in buono stato di conservazione, nel cosiddetto complesso della Piazza d'Oro. Nel caso del Triclinio Orientale, l'intradosso della semicupola emisferica presenta un diametro di sette moduli di 5,5 *pedes*. Il secondo esempio, sempre all'interno del medesimo complesso, è quello del vestibolo che dà accesso al vasto portico (fig. 6). Qui, la ricorrenza del numero sette è meno esplicita: mentre nel triclinio si manifesta attraverso il numero dei moduli, il vestibolo misura 6 moduli di 5,5 *pedes* (33 *pedes*), ai quali si devono sommare 2 *pedes* – corrispondenti alla distanza tra l'intradosso e l'estradosso – raggiungendo così un totale di 35 *pedes*. Una ricorrenza analoga si riscontra nella volta del Serapeo, in cui la pianta è impostata su otto moduli di 7 *pedes*, suggerendo

nuovamente una logica compositiva basata su multipli di sette (fig. 7).

Una volta determinato il diametro dello spazio interno (26,57 m alla quota di +9 m dal livello del terreno attuale) mediante strumenti di reverse *modeling*, questo è stato diviso per il *pes* standard ( $1 \text{ pes} = 0,2956 \text{ m}$ ), ottenendo una misura di approssimativamente 90 *pedes* (89,88 *pedes*) per il diametro di *best-fitting* ( $D_{BF}$ ) (fig. 8A). Assumendo tale arrotondamento, e considerando  $\pi = 22/7$ , si ricava il seguente modulo (M):

$$M = 90/7 = 12,86 \text{ pedes} \approx 13 \text{ pedes (1)}$$

Non deve stupire che il risultato non restituisca un numero intero, verosimilmente a causa di principi precauzionali che gli ingegneri romani adottavano sistematicamente nel progetto di strutture innovative, come il grande spazio voltato del Tempio di Venere. In effetti, il calcolo per la determinazione del diametro di progetto ( $D_D$  - *Design Diameter*), condotto nelle fasi iniziali di dimensionamento, potrebbe essere stato quello qui di seguito espresso (fig. 9B), dove la circonferenza di progetto (in rosso) può essere suddivisa in sette moduli di 13 *pedes* ciascuno:

$$D_D = 7 \times 13 = 91 \text{ pedes (2)}$$

Tale valore può essere stato ridotto a 90 *pedes* per fornire maggiore spessore murario. Considerando la muratura intorno ai lati dell'ottagono, lo spessore varia di pochi centimetri; ciononostante, il suo valore si adatti alla griglia modulare, essendo pari a mezzo modulo ( $M/2 = 1,921 \text{ m} = 6,5 \text{ pedes}$ ). L'impianto planimetrico dell'edificio è basato anche sullo schema *ad quadratum*, all'interno del quale è inscritta una circonferenza di otto moduli: il tamburo è definito da una lunghezza del lato pari a  $S_{AO} = 104 \text{ pedes}$  (8 moduli di 13 *pedes*) (fig. 8B). Come osservato in precedenza da Rakob [Rakob 1988], alla maglia modulare di 13 *pedes* che governa il dimensionamento dell'edificio è rapportato anche lo spessore dei piloni. Inoltre, le facce piane della struttura ottagonale esterna, poste tra i piloni, misurano in media 26 *pedes* di larghezza, mentre le finestre misurano 13 *pedes*, fornendo ulteriore conferma della logica modulare (fig. 8C).

I vertici dell'ottagono sono rinforzati da masse angolari (ampiezza ca.  $17^\circ$ ), che aumentano lo spessore resistente fino a circa 10 *pedes* (fig. 8D). La loro *silhouette* curvilinea accentua ulteriormente il ruolo strutturale di questi rinforzi, se confrontata con i 6,5 *pedes* di spessore delle pareti, coerenti con lo schema modulare.

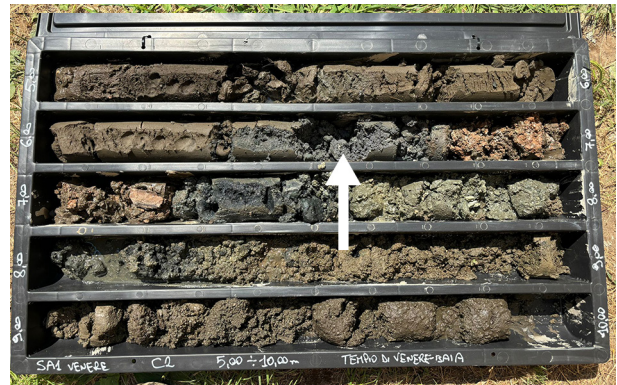
## Analisi dell'elevato

Per quanto concerne il progetto dell'elevazione, la volta presenta caratteristiche strettamente confrontabili con quelle di altri esempi adrianei concepiti a partire da piante circolari, in particolare il Serapeo di Villa Adriana e gli *Horti Sallustiani* a Roma [Eramo, Cinque 2024; Eramo, Fantini 2024]. In tali complessi, l'impostazione progettuale è fondata sulla definizione di una primitiva generale, coincidente con i segmenti di volta più semplici – qui genericamente indicati come fusi – successivamente integrata con elementi a *trikentron*. Le analisi, di seguito discusse, sono pertanto rivolte alla comprensione della forma generatrice del complesso qui indagato. Occorre sottolineare come la struttura superstite, specialmente la sua superficie di intradosso, sia fortemente degradata e levigata da fenomeni erosivi, rendendo una ricostruzione della sua forma originale, benché fondata su evidenze misurabili, soggetta a un inevitabile margine di interpretazione (fig. 9).

Una fase preliminare delle analisi ha pertanto previsto la segmentazione manuale del modello poligonale, per isolare le porzioni meglio conservate, potenzialmente corrispondenti alla superficie di intradosso originale.

Il modello è stato quindi analizzato attraverso tre metodi complementari. Il primo ha riguardato l'esame di sezioni verticali dei fusi, tracciate secondo piani radiali significativi rispetto alla simmetria del disegno planimetrico (fig. 9A), per le

Fig. 4. Carotaggi estratti al centro del tempio, rivelano la presenza di un pavimento antico a circa -6,6 m dal piano di calpestio attuale (carotaggi di E. Gallochio).



quali sono state valutate le circonferenze di *best-fitting* ( $C_{BF}V$ ). Tali circonferenze mostrano un'elevata variabilità sia nei raggi (compresi tra 13,93 m e 15,52 m) sia nello scostamento dei loro centri dal centro del tamburo (tra 0,6 m e 1,2 m). Ciononostante, condividono alcune rilevanti caratteristiche: sono sistematicamente tangenti alla circonferenza di *best-fitting* dell'imposta ( $C_{BF}H$ ) e presentano raggi sempre maggiori di quest'ultima (fig. 9B).

Parallelemente, le medesime porzioni del modello sono state analizzate nel loro complesso, mediante uno strumento di riconoscimento automatico della forma appositamente sviluppato, basato su una funzione Matlab per il *best-fitting* di superfici quadriche generiche [Petrov 2015]. La superficie risultante è un ellissoide ( $E_{BF}$ ), i cui raggi principali, sebbene leggermente ruotati rispetto agli assi di simmetria del complesso, risultano confrontabili con essi. Tale rotazione può

Fig. 5. A. Modello poligonale del tempio (elaborazione digitale di S. Bertacchi); B. Modello fotogrammetrico con texture (elaborazione digitale di E. Eramo).

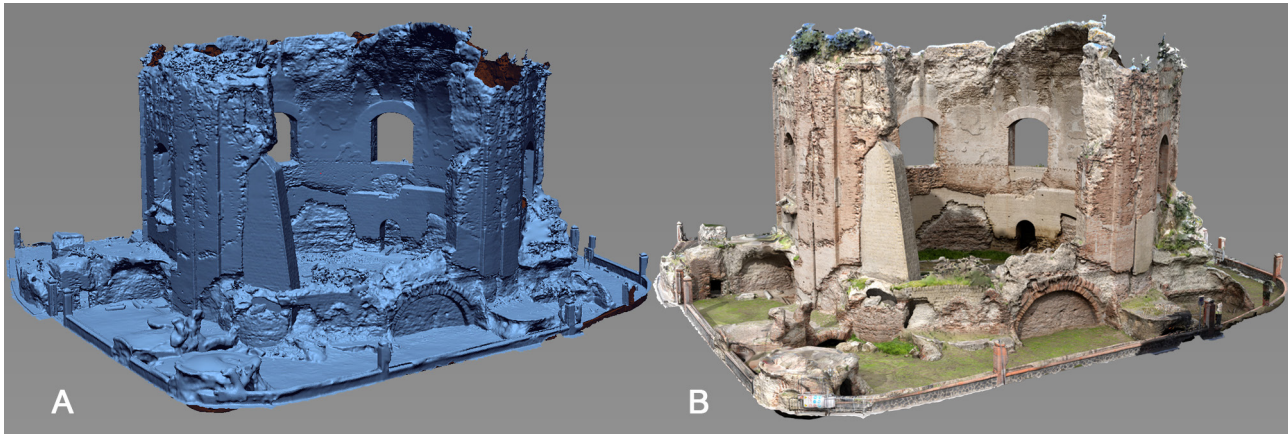
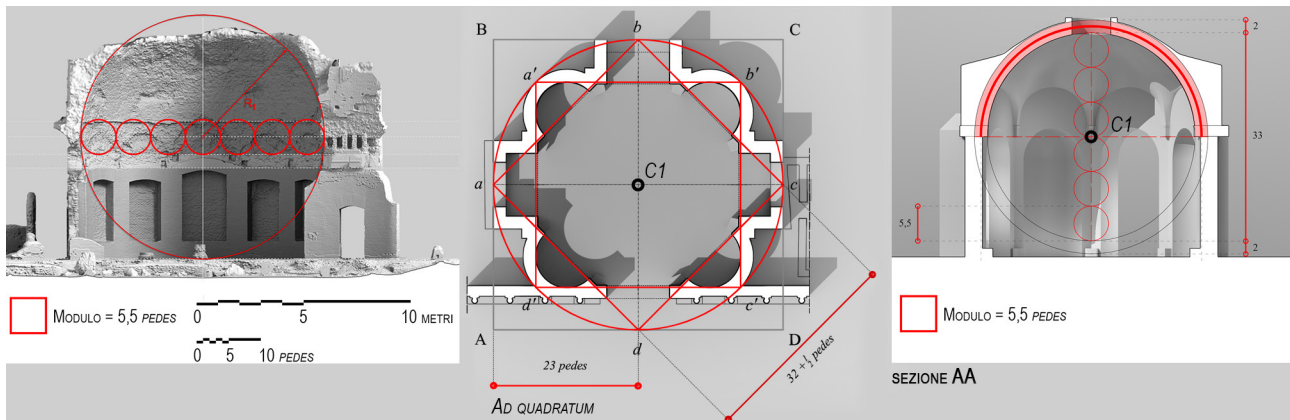


Fig. 6. A sinistra, alzato del Triclinio Orientale della Piazza d'Oro a Villa Adriana: intradosso della cupola emisferica con modularità di sette unità (modulo = 5,5 pedes). Al centro e a destra Vestibolo della Piazza d'Oro: il diametro di 35 pedes è misurato in mezzera tra l'intradosso e l'estradosso (elaborazione grafica F. Fantini).



essere attribuita all'asimmetrica conservazione dei fusi tra il lato occidentale e quello orientale del complesso (fig. 3). I raggi dell'ellissoide pressoché orizzontali misurano 13,31 m e 13,38 m, valori assai prossimi a quello della circonferenza di imposta della copertura (13,28 m), mentre il raggio all'incirca verticale risulta di dimensione maggiore, pari a 13,69 m (fig. 9C).

I risultati delle prime due analisi indicano che la geometria complessiva della volta si discosta chiaramente da una forma sferica, quale quella degli *Horti Sallustiani*. Inoltre, il risultato del *fitting* attraverso superfici quadriche necessita di una interpretazione differente rispetto al caso del Serapeo di Villa Adriana, dove la geometria generatrice coincide esattamente con quella di un ellissoide. Per il Tempio di Venere, la procedura di *best-fitting* non ha restituito una forma perfettamente coerente con quella dei fusi della volta. Nondimeno, il risultato fornisce un'evidenza qualitativa della maggiore elongazione verticale della struttura rispetto a una superficie sferica.

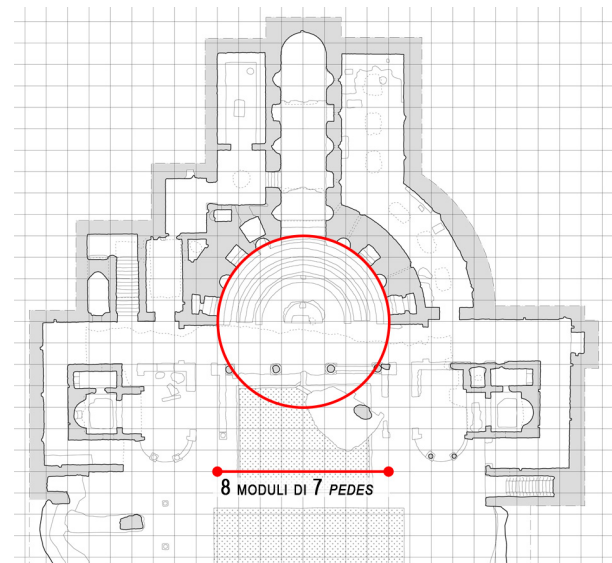
Infine, i risultati delle precedenti analisi sono stati considerati alla luce dello studio delle isoipse. Per l'intero modello della volta, sono state estratte curve di livello a intervalli di 0,5 m. Come mostrato in figura 9A, le sezioni orizzontali, nei settori circolari corrispondenti ai fusi, presentano un andamento pressoché rettilineo, con pendenza decrescente lungo la direzione radiale. Nei settori corrispondenti alle aperture delle finestre all'imposta si riconoscono, invece, l'andamento marcatamente curvilineo e la maggior pendenza dei *trikentron*. Inoltre, tra i due insiemi di elementi si osservano delle strette fasce in cui le curve di livello hanno andamento lineare e inclinazione orizzontale variabile. Tali fasce, la cui larghezza si restringe verso la sommità della struttura, denotano chiaramente una funzione di raccordo tra i due gruppi principali.

Questi risultati confermano, come già proposto da Rakob [Rakob 1988], che la copertura del Tempio di Venere fu concepita come una grande volta a ombrello. La struttura è infatti formata da otto segmenti cilindrici, con raggio di curvatura maggiore rispetto a quello del tamburo di imposta, spingenti sui rinforzi angolari. I segmenti collocati al di sopra delle finestre, modellati dalle superfici a doppia curvatura dei *trikentron*, sono raccordati a quelli cilindrici tramite superfici di transizione che sfumano gli spigoli di intersezione. Tali evidenze sottolineano la raffinatezza della soluzione progettuale. A differenza dei casi di confronto sopra menzionati, nei quali alla geometria circolare della pianta corrisponde una geometria definita da una superficie convessa

a doppia curvatura, la copertura del Tempio di Venere fu concepita attraverso segmenti geometricamente più semplici. In virtù dell'ampio raggio di imposta, tali segmenti approssimano con sufficiente precisione la curvatura del tamburo; sono connessi attraverso adeguamenti localizzati al tamburo e si alternano ai *trikentron*, il cui disegno originario resta ancora da chiarire. Tra i due gruppi di elementi, superfici di raccordo – generate da elementi rettilinei che seguono le curve di contorno delle porzioni adiacenti – risolvono le intersezioni e smussano l'intradosso, rendendo continua e sinuosa la sua superficie.

I risultati delle analisi sono stati confrontati con lo schema modulare identificato per la pianta, allo scopo di verificare se questo trovi corrispondenza anche nel progetto dell'alzato, consentendo di interpretare i dati in un quadro progettuale unitario e coerente. A tal fine, sono stati presi in considerazione i dati dei carotaggi (fig. 4), che indicano un possibile livello del pavimento originario alla quota di circa -6,6 m (fig. 10), valore inferiore all'attuale livello del mare e coerente con quello di alcune strutture archeologiche sommerse prossime al Tempio.

Fig. 7. Pianta del complesso del cosiddetto Serapeo-Canopo. L'intradosso misura 56 pedes, confermando la logica modulare fondata sui multipli di numero sette (elaborazione grafica di F. Fantini).



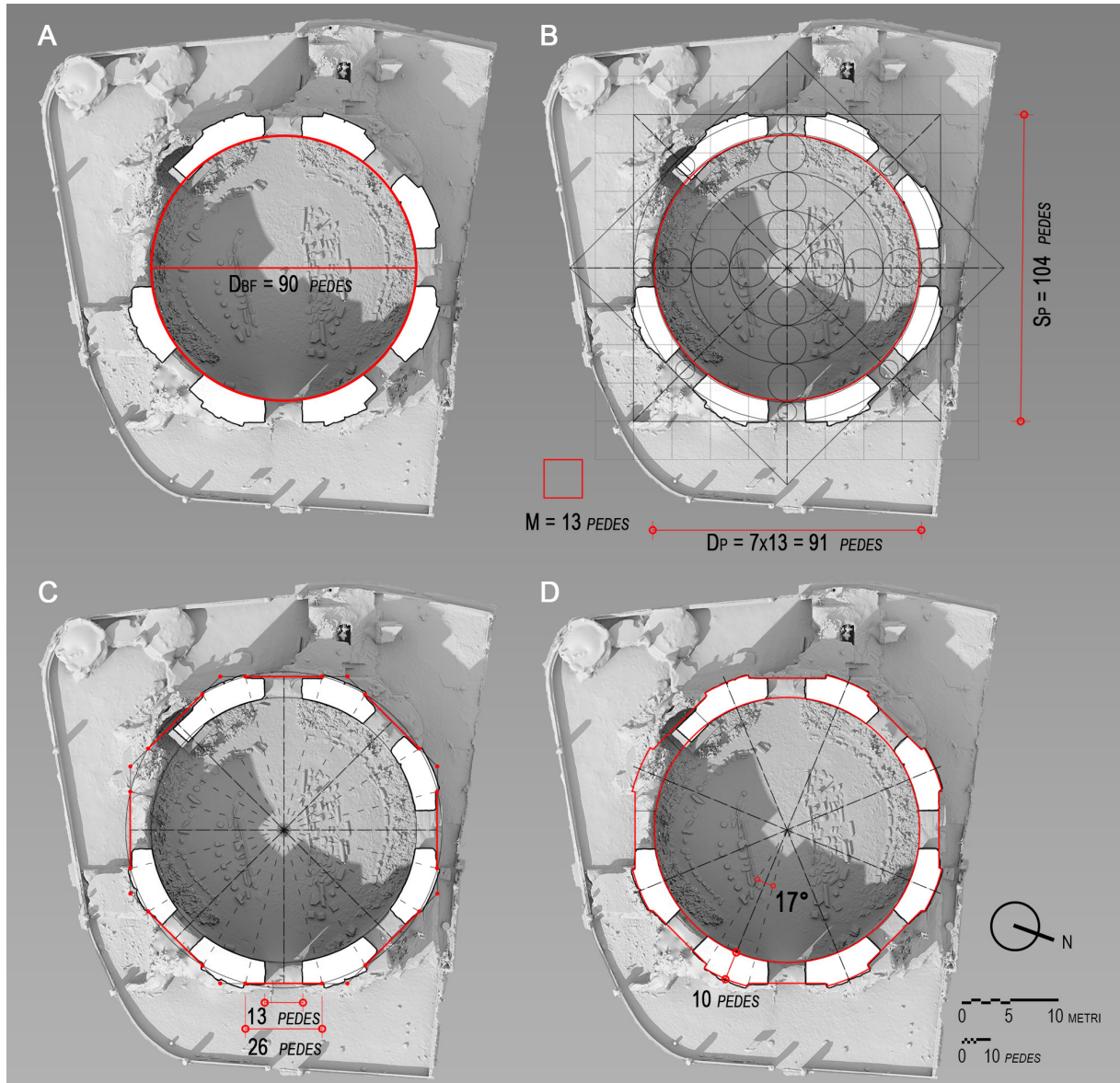


Fig. 8. Analisi geometrica della pianta. A. Circonferenza DBF, ca. 90 pedes; B. Circonferenza di progetto pari a 91 pedes con schema ad quadratum; C. Schema dimensionale dell'ottagono esterno della rotonda; D. Rinforzi angolari ai vertici (analisi geometriche di F. Fantini e S. Bertacchi).

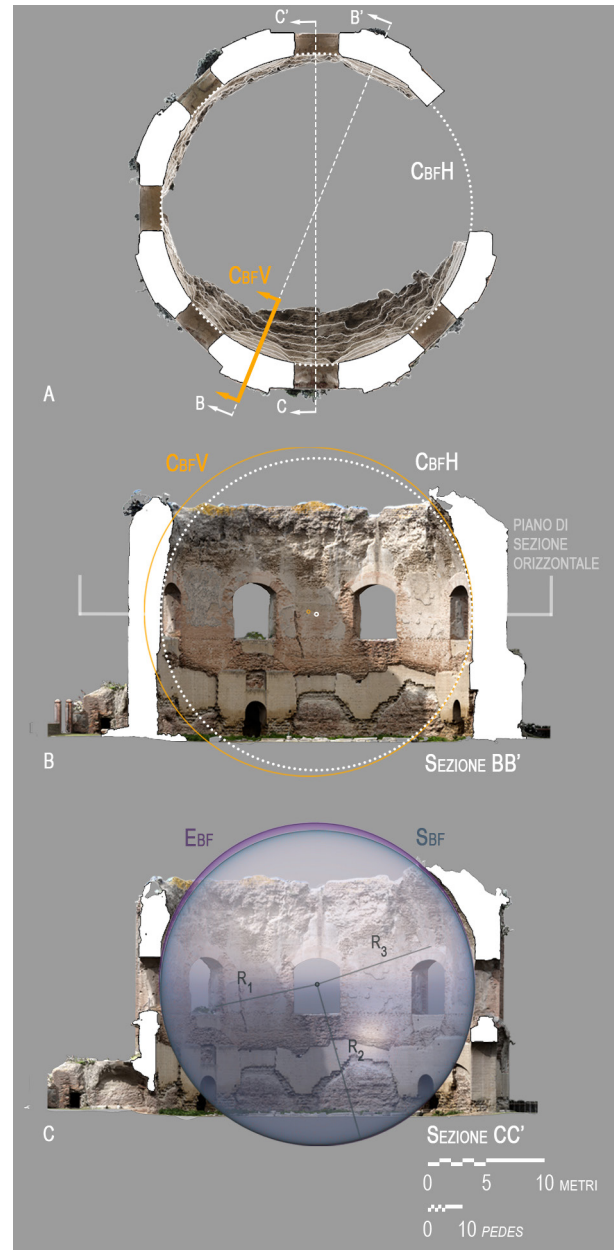
Noto che la larghezza delle finestre corrisponde a un modulo  $M$  (13 *pedes*), si è osservato che l'altezza dei loro piedritti coincide con tale misura. Inoltre, il centro della circonferenza inscritta nelle finestre coincide con il piano di imposta dei segmenti cilindrici della volta che, pertanto, è stato assunto come centro compositivo dell'intero elevato (fig. 11A). Tale scelta ha fornito riscontri preliminari coerenti: il presunto pavimento antico sarebbe posizionato a circa -4,5 moduli dal centro individuato, mentre le facciate esterne, dal pavimento fino all'inizio dell'estradosso della volta, avrebbero un'altezza di 7 moduli.

Per quanto concerne l'altezza massima all'intradosso, in assenza di evidenze dirette, le analisi quantitative suggeriscono una maggiore elongazione verticale, non coerente con la maglia di 8x8 moduli adottata per l'impianto planimetrico. Una possibile interpretazione di tale elongazione rispetto allo schema modulare è stata sviluppata ipotizzando una costruzione modulare degli archi generatori dei segmenti cilindrici della volta. Una circonferenza di diametro pari a metà modulo – la stessa che definisce lo spessore della muratura del tamburo – tracciata dal centro della griglia, permette di identificare, lungo la direzione radiale, due punti eccentrici ( $C_1, C_2$ ), (fig. 11A). Adottando tali punti quali centri, sono stati tracciati archi tangenti al tamburo dal lato opposto rispetto al centro della griglia, in accordo con i risultati del *best-fitting* di tali segmenti. Tale costruzione, se confrontata con l'ellissoide di *best-fitting*  $E_{BP}$  restituisce un'altezza massima coerente con i risultati delle analisi. Ulteriori riscontri quantitativi ne confermano la coerenza: gli archi presentano infatti un raggio di  $3\frac{3}{4}$  di modulo e uno scostamento di  $\frac{1}{4}$  di modulo dal centro (ossia circa 14,40 m e 0,95 m), valori pressoché intermedi rispetto a quelli individuati dalle analisi. Per il segmento cilindrico meglio conservato, sul lato nord-orientale, tale arco teorico fornisce un'approssimazione affidabile della circonferenza di *best-fitting* della sua sezione (fig. 11B).

## Conclusioni

Nel complesso, il Tempio di Venere richiama temi ricorrenti riscontrati in altri esempi; in particolare, l'alternanza dei fusi

Fig. 9. A. Vista ipografica, curve di livello e circonferenza di *best-fitting* dell'imposta ( $C_{BFH}$ ). B. Circonferenza di *best-fitting* ( $C_{BFV}$ ) per la sezione mediana del fuso NE. C. Ellissoide e sfera di *best-fitting* ( $E_{BF}$ ,  $S_{BF}$ ) dell'intradosso dei fusi (analisi geometriche di E. Eramo).



e dei *trikentron* stabilisce un evidente parallelismo tra la sua volta (diametro 26,57 m) e quelle, già menzionate, degli *Horti Sallustiani*, di dimensioni minori (diametro 11,20 m), nonché con quella del Serapeo (diametro 16,55 m), che tuttavia manca di simmetria polare, essendo proiettata verso il fronte dell'edificio [Eramo, Fantini 2024].

È possibile rilevare due significativi parallelismi tra il progetto planimetrico della rotonda principale del Tempio e la sala ottagonata delle Piccole Terme di Villa Adriana. Il primo riguarda, nel dimensionamento degli spazi interni, l'impiego di un diametro corrispondente a sette moduli (pari a 5 *pedes* nel caso delle Piccole Terme e 13 *pedes* nell'edificio

Fig. 10. Sezione AA' (cfr. fig. 3), che mostra la relazione tra il terrazzamento superiore, il Tempio di Venere e il livello di calpestio antico (-6,6 m), (elaborazione digitale di S. Bertacchi).

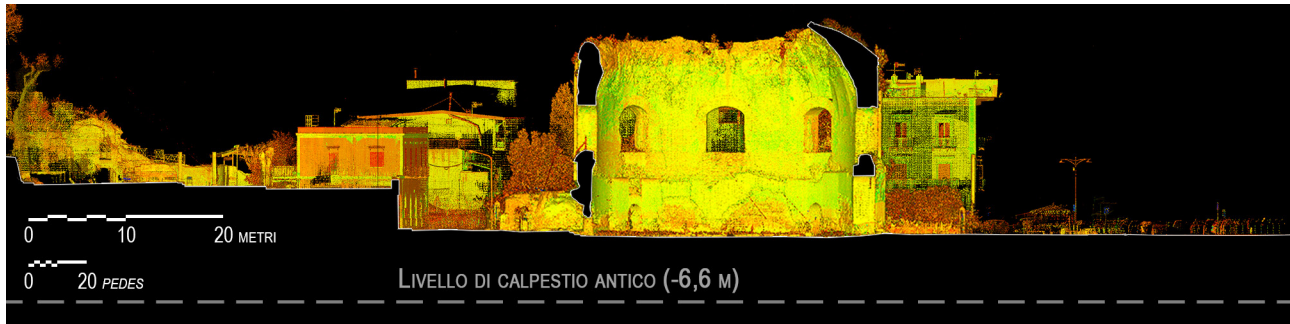
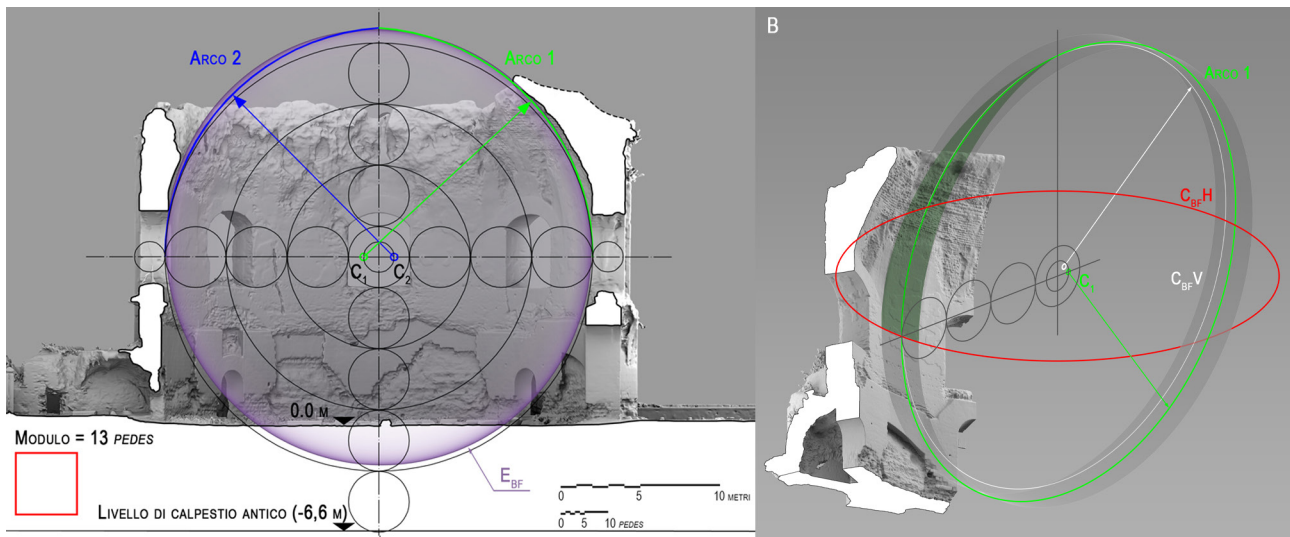


Fig. 11. Analisi geometriche dell'alzato. A. Sezione AA' con griglia modulare, ipotesi di tracciamento dei segmenti cilindrici (in blu e verde), ed ellissoide di best-fitting. B. Vista assometrica del fuso NE con la circonferenza di progetto comparata a quella di best-fitting (analisi geometrica di E. Eramo).



di Baia); il secondo concerne lo spessore murario che, in entrambi i casi, è pari a metà del modulo. In entrambe le strutture è evidente l'uso dello schema *ad quadratum*, che appare come una caratteristica ricorrente degli spazi voltati nella progettazione architettonica adrianea [Fletcher 2019], siano essi impostati su piante ottagonali o circolari, nonostante le chiare differenze tipologiche e costruttive tra le due configurazioni [De Angelis d'Ossat 1936].

Tali schemi geometrici possono essere pensati come strumenti polivalenti – scalabili e flessibili – concepiti per facilitare i calcoli, in particolare quando relativi alle aree circolari. I diametri espressi come multipli del numero sette semplificano la determinazione delle misure delle superfici circolari, mentre lo schema *ad quadratum* consente di raddoppiare agevolmente la loro estensione. Considerazioni analoghe, seppure basate su differenti schemi per l'*ichnographia*, sono alla base della definizione delle piante dei teatri greci e latini (*De Architectura*, V, 5, 7) e, come dimostrato da Lara Ortega [1992], possono essere adattate tanto a nuove costruzioni che alla modifica di edifici esistenti. Al di là di questo approccio, fondato sull'analisi filologica applicata ai monumenti rilevati, le più recenti evidenze archeologiche hanno offerto contributi rilevanti alla comprensione della storia della progettazione architettonica, come nel caso

della lastra sulla quale è inciso il disegno dell'Ottagono di Galerio a Salonicco [Sawides 2021]. Tale "progetto", rinvenuto nelle vicinanze del noto edificio costruito intorno alla fine del III sec. d.C., dimostra inequivocabilmente l'impiego dello schema *ad quadratum* e attesta, inoltre, la ricezione e l'uso continuativo di strumenti grafici analoghi a quelli impiegati nell'architettura adrianea anche in fasi storiche più tarde.

I risultati ottenuti con il presente lavoro aprono nuove prospettive di indagine. In particolare, merita un'analisi più approfondita la piccola estensione occidentale a pianta mistilinea del Tempio di Venere, che rappresenta un ulteriore esempio significativo di sperimentazione architettonica nel contesto degli edifici adrianei, come le Piccole Terme, l'Attrio Mistilineo della cosiddetta Accademia [Ottati 2022] e l'aula meridionale della Piazza d'Oro [Adembri et al. 2014] a Villa Adriana. Il complesso di Baia, inoltre, non era limitato al solo Tempio di Venere, ma si estendeva lungo il pendio retrostante [De Angelis d'Ossat 1977], articolato in una serie di terrazzamenti successivi, e fino all'area prospiciente il mare. Ulteriori sviluppi della ricerca saranno rivolti all'estensione dell'analisi alla griglia modulare sottesa all'intero complesso archeologico, al fine di indagare il suo progetto in un'ottica unitaria.

#### Attribuzioni e ringraziamenti

Tutti gli autori hanno contribuito allo studio e approvato la redazione del manoscritto finale. La ricerca è stata condotta sotto il coordinamento scientifico di FF e EG. Gli autori delle sezioni sono: *Introduzione* (FF);

*Obiettivi e metodologia* (SB), *Analisi della pianta* (SB); *Analisi dell'elevato* (EE); *Conclusioni* (FF e EE). Gli autori ringraziano il Parco Archeologico dei Campi Flegrei.

#### Note

[1] Il termine *trikentron*, utilizzato da Erone di Alessandria (*Stereometrica* I, 96), è riferibile a una porzione di superficie definita da tre archi i cui centri giacciono su piani distinti. Può essere interpretato come una superficie, topologicamente analoga a un triangolo, proiettato su una superficie curva, la cui area è calcolata determinando dapprima quella di un triangolo piano e aggiungendo a questa un valore supplementare per approssimarne la curvatura tridimensionale [Roca et al. 2023].

[2] Il software di RM impiegato è 3D System Geomagic Design X.

[3] Un aspetto cruciale del progetto planimetrico del teatro latino –e, per estensione, di altri edifici con pianta circolare– consiste nell'identificare un cerchio principale (perimetro *imi*), il cui diametro deve essere diviso in moduli. Da questa geometria di base, si sviluppa quindi una costruzione basata su poligoni inscritti o circoscritti [Salvatore 2007].

#### Autori

Enrico Gallocchio, Parco Archeologico dei Campi Flegrei, Pozzuoli (NA), enrico.gallocchio@cultura.gov.it

Elena Eramo, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, eramo@ing.uniroma2.it

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

Filippo Fantini, Dipartimento di Architettura, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, filippo.fantini2@unibo.it

## Riferimenti bibliografici

- Adembri, B., Cipriani, L., Ristori, F., Fantini, F. (2018). Rilievi e analisi geometriche sulle cupole adrianee. In G.E. Cinque, N. Marconi (a cura di). *Adriano: l'architettura al potere. Working Paper Series. Atti del Convegno Internazionale di studi di architettura Adventus Hadriani - l'architettura di Adriano*, Roma, 3-6 luglio 2018, pp. 8-11. Roma: Universitalia.
- Adembri, B., Di Tondo, S., Fantini, F., Ristori, F. (2014). Nuove prospettive di ricerca su Piazza d'Oro e gli ambienti mistilinei a pianta centrale: confronti tipologici e ipotesi ricostruttive. In E. Calandra, B. Adembri (a cura di). *Adriano e la Grecia. Villa Adriana tra classicità ed ellenismo*, pp. 81-90. Milano: Electa.
- Bianchini, C., Fantini, F. (2015). Dimensioning of ancient buildings for spectacles through Stereometrica and De mensuris by Heron of Alexandria. In *Nexus Network Journal*, No. 17, pp. 23-54. DOI:10.1007/s00004-014-0230-8.
- Cipriani, L., Fantini, F., Bertacchi, S. (2020). Composition and shape of Hadrianic domes. In *Nexus Network Journal*, Vol. 22, pp. 1041-1061. <<https://doi.org/10.1007/s00004-020-00514-z>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Cipriani, L., Fantini, F., Bertacchi, S. (2017). The geometric enigma of Small Baths at Hadrian's Villa: mixtilinear plan design and complex roofing conception. In *Nexus Network Journal*, Vol. 19, pp. 427-453. <<https://doi.org/10.1007/s00004-017-0344-x>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- De Angelis d'Ossat, G. (1936). Sugli edifici ottagonali a cupola nell'antichità e nel Medioevo. In AA.VV. *Atti del I Congresso Nazionale di Storia dell'Architettura*, Firenze, 29-31 ottobre 1936, pp. 13-24. Firenze: Sansoni.
- De Angelis d'Ossat, G. (1977). L'architettura delle "Terme" di Baia. In AA.VV. *I Campi Flegrei nell'archeologia e nella storia. Atti del Convegno Internazionale*, Roma, 4-7 maggio 1976, pp. 227-274. Roma: Accademia Nazionale dei Lincei.
- Eramo, E., Cinque, G. E. (2024). The vault of the so-called Serapeum: an ellipsoidal geometry at Hadrian's Villa. In L. Hermida González, J. P. Xavier, I. Pernas Alonso, C. Losada Pérez (Eds.). *Graphic horizons. EGA 2024. Proceedings of the International Conference of Architectural Graphic Expression*, Oporto, 22-24 May 2024. Vol. 3, pp. 51-58. Cham: Springer.
- Eramo, E., & Fantini, F. (2024). An integrated approach for investigating roman cupolas: from segmented models to triketron analysis. In *DisegnareCon*, No. 17, pp. 5.1-5.12. <<https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.5>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Fletcher, R. (2019). Geometric proportions in measured plans of the Pantheon of Rome. In *Nexus Network Journal*, Vol. 21, pp. 329-345. <<https://doi.org/10.1007/s00004-018-00423-2>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Fuchs, W. (2023). The new theory of the metrological framework of the Pantheon. In *Nexus Network Journal*, Vol. 25 (Suppl. 1), pp. 103-110. DOI:10.1007/s00004-023-00679-3.
- Heiberg, J.L. (1914a). *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia. Volumen IV: Heronis definitiones cum variis collectionibus. Heronis quae feruntur geometrica* (1976 reprint). Stuttgart: Teubner.
- Heiberg, J.L. (1914b). *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia. Volumen V: Heronis quae feruntur stereometrica et de mensuris*. Stuttgart: Teubner (ristampa 1976).
- Lara Ortega, S. (1992). El trazado Vitruviano como mecanismo abierto de implantación y ampliación de los Teatros Romanos. In *Archivo Español de Arqueología*, Vol. 65 (Nos. 165-166), pp. 151-179. <<https://doi.org/10.3989/aespa.1992.v65.475>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Ottati, A. (2022). *Accademia di Villa Adriana. Tecniche, processi di costruzione ed evoluzione architettonica del cd. piccolo palazzo*. Roma: Quasar.
- Petrov, Y. (2015). *Ellipsoid fit [MATLAB Central File Exchange* <<https://www.math-works.com/matlabcentral/fileexchange/24693-ellipsoid-fit>> (consultato il 25 luglio 2025).
- Rakob, F. (1988). Römische Kuppelbauten in Baiae. In *Römische Mitteilungen*, No. 95, pp. 257-301.
- Roca, A., Juan-Vidal, F., Cipriani, L., Fantini, F. (2023) Heron's legacy: An example of ancient calculations applied to Roman imperial architecture. In *Nexus Network Journal*, Vol. 25 (Suppl. 1), pp. 185-192. <<https://doi.org/10.1007/s00004-023-00704-5>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Roca, A., Juan-Vidal, F., Cipriani, L., Fantini, F. (2024). On vaulting: Heron's manuals and their role in Roman dome design. In *Nexus Network Journal*, Vol. 26, pp. 571-592. <<https://doi.org/10.1007/s00004-024-00771-2>> (consultato il 16 dicembre 2025).
- Salvatore, M. (2007). Le geometrie del Teatro Latino di Vitruvio. Interpretazioni e sviluppi nella trattatistica rinascimentale. In E. Mandelli (a cura di). *Dalla didattica alla ricerca, esperienze di studio nell'ambito del dottorato*, pp. 63-74. Firenze: Alinea.
- Sanpaolesi, P. (1971). Strutture a cupola autoportanti. In *Palladio*, ser. 3, Vol. 21, pp. 3-64.
- Svenshon, H. (2009). Heron of Alexandria and the dome of Hagia Sophia in Istanbul. In *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Brandenburg University of Technology Cottbus, 20-24 May 2009, pp. 1387-1394. Berlin: NEUNPLUS1.
- Savvides, D. (2021). The conceptual design of the Octagon at Thessaloniki. In *Nexus Network Journal*, Vol. 23, pp. 395-432. <<https://doi.org/10.1007/s00004-020-00506-z>> (consultato il 16 dicembre 2025).