

Archeologia e Calcolatori
27, 2016, 291-316

MODELLI DIGITALI 3D PER DOCUMENTARE, CONOSCERE ED ANALIZZARE L'ARCHITETTURA E LA COSTRUZIONE NEL MONDO ANTICO: L'ESEMPIO DELLA SALA OTTAGONALE DELLE PICCOLE TERME DI VILLA ADRIANA

1. INTRODUZIONE

La vastità e l'articolazione del complesso monumentale di Villa Adriana, che emerge immediatamente a chi affronti lo studio anche di una parte o di una singola tematica della Villa, ha indotto la Soprintendenza già da alcuni anni, e in particolare a partire dall'inserimento nella Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO (risalente al dicembre 1999), ad intraprendere un percorso nuovo nella ricerca sui diversi aspetti che caratterizzano questa straordinaria residenza imperiale; i nuovi dati e approfondimenti, che concorrono ad acquisire una più ampia conoscenza della Villa, rappresentano d'altra parte uno strumento estremamente utile anche ai fini di una adeguata gestione del sito, che non può prescindere dalla comprensione della struttura originaria e del suo funzionamento. Tale percorso si è esplicitato essenzialmente in due direzioni: – la creazione di gruppi di studio con il coinvolgimento di esperti di vari settori della ricerca, anche afferenti a campi del sapere apparentemente lontani da quelli che sono i referenti tradizionali della ricerca archeologica; – il ricorso alle tecnologie digitali applicate ai beni culturali, a supporto della ricerca tradizionale.

Questo nuovo indirizzo ha portato al raggiungimento di significativi risultati e alla proposta di nuove ipotesi di lavoro che rappresentano un passo in avanti nel quadro delle conoscenze finora acquisite, contribuendo ad arricchire il dibattito scientifico su Villa Adriana, che, nonostante l'ingente mole di letteratura già edita, continua a trovare nuovi spunti e argomenti di interesse.

Le tecnologie digitali sono state impiegate non solo per risolvere – come vedremo – una serie di problematiche scientifiche, ma anche per applicazioni pratiche, ad esempio nello sperimentare copie in 3D print di manufatti scultorei. L'occasione è stata offerta dalla richiesta di un prestito del ritratto marmoreo di Matidia Minore per la mostra *Hadrian. Empire and Conflict* (OPPER 2008), tenutasi al British Museum nel 2008; per poter esporre, durante il periodo di assenza dell'originale, la medesima immagine nell'ambito della mostra prevista nell'Antiquarium del Canopo di Villa Adriana, si è pensato di riprodurre un esemplare identico, ricorrendo, anziché al tradizionale calco diretto, ad un procedimento assolutamente non invasivo, quale la tecnologia laser scanner 3D, in cui – come noto – il fascio di luce proiettato su una superficie ne documenta la morfologia nelle tre dimensioni, garantendo un



Fig. 1 – Ripresa aerea delle Piccole Terme e vista della cupola della Sala Ottagonale dall'interno (foto autori, 2013).

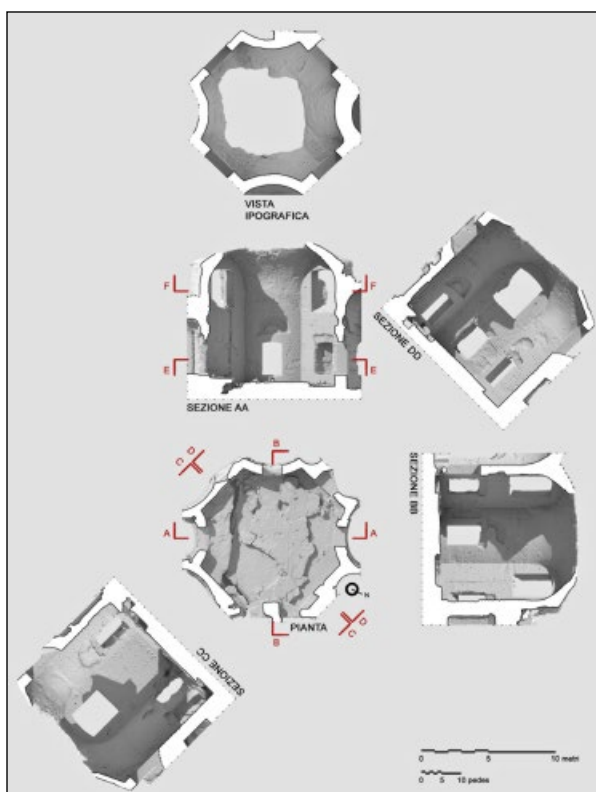


Fig. 2 – Modello digitale 3D ad alto dettaglio della Sala Ottagonale e viste principali (rilievo e modello: L. Cipriani, F. Fantini, S. Bertacchi, campagne di rilievo 2014-2015). Le sezioni AA e BB tagliano l'ambiente in corrispondenza della mezzeria dei quattro lati curvi, mentre CC e DD tagliano i lati rettilinei.

rilievo ad alta definizione; successivamente i dati acquisiti sono stati opportunamente trattati per “stampare” layer by layer, strato su strato, l'oggetto solido costituito da centinaia di sezioni bidimensionali.

Fra le ricerche in corso, un argomento che suscita da sempre un grande interesse è la tipologia delle coperture a volta della Villa, i cui esempi conservati mostrano elementi di unicità e di originalità. L'esecuzione di rilievi ad alta definizione con strumentazione digitale, garantendo un grado di approssimazione elevato delle misure e consentendo la realizzazione di una replica tridimensionale perfettamente esplorabile, permette di ottenere elaborati più accurati e attendibili dei precedenti (eseguiti con tecnica tradizionale) e di avanzare nuove ipotesi sulla forma originaria delle cupole di Villa Adriana e sulla concezione architettonica e strutturale delle coperture adrianee. Trattandosi di sistemi voltati complessi, in assenza di un framework operativo evoluto quali le tecnologie digitali, l'analisi risulterebbe senza dubbio meno accurata ed esaustiva.

L'indagine in questione viene condotta da un gruppo di lavoro interdisciplinare impiegando modelli digitali 3D denominati “reality-based”, che meglio si prestano allo scopo; all'interno dell'articolato e ricco panorama di architetture scenografiche di Villa Adriana, è stata selezionata, a titolo esemplificativo, la suggestiva cupola a base ottagonale delle Piccole Terme (Fig. 1), analizzata attraverso una sua rappresentazione digitale, ovvero un modello mesh ad alto dettaglio ottenuto mediante apposito software di modellazione inversa a partire da un rilievo con sensori attivi (Fig. 2).

B.A.

2. LA CUPOLA DELLA SALA OTTAGONALE NEL CONTESTO DI VILLA ADRIANA

Affrontare un tema di grande interesse come quello delle cupole adrianee non può prescindere dal chiarimento di due questioni di fondo: il ricco ed eclettico contesto culturale di innovazione tipologico-costruttiva comportò, da un lato, una non facile fase di sperimentazione (che come noto comporta ripensamenti ed esiti di alterna fortuna); dall'altro, la difficoltà di conciliare l'introduzione di nuove soluzioni architettoniche, e in particolare delle ardite cupole della Villa, con la tempistica di esecuzione dei vari corpi di fabbrica. Del resto, l'esecuzione accelerata in modo discontinuo potrebbe essere alla base di una occasionale mancanza di accuratezza nel tracciamento planimetrico degli edifici, come si può osservare ad esempio nel Teatro Greco, in cui la cavea policentrica non è simmetrica (HIDALGO PRIETO 2010), o nell'Edificio con Tre Esedre, in cui si notano problemi di parallelismo e ortogonalità fra muri concatenati (CINQUE 2010, 34).

Anche nella Sala Ottagonale delle Piccole Terme è presente una evidente mancanza di regolarità morfologica della planimetria, che probabilmente va letta in maniera analogica: in sintesi, si può affermare che la combinazione tra

la difficoltà di tenere sotto controllo la complessità icnografica dell'intero edificio termale e l'esigenza di concludere la costruzione con estrema rapidità per compiacere l'imperatore portò a creare una serie di asimmetrie, perfettamente quantificabili attraverso il modello digitale.

Da quest'ultimo, attraverso l'individuazione di appositi piani, è possibile eseguire le sezioni utili per sviluppare ipotesi sul progetto del volume originario di un determinato manufatto, ma è importante sottolineare come sia fondamentale un approccio multi- e interdisciplinare. In effetti, nel campo dell'architettura romana di età imperiale, l'analisi geometrica deve tenere necessariamente conto di alcuni aspetti della tecnica edilizia antica, senza la cui conoscenza si può essere indotti ad un'errata interpretazione dei dati metrologici e di conseguenza delle proporzioni morfologiche del manufatto originario, pur utilizzando una metodologia operativa digitale sofisticata. La muratura, ad esempio, che nella Sala Ottagonale delle Piccole Terme è in *opus mixtum*, massivamente usato nella maggior parte degli edifici di Villa Adriana, era infatti sempre rivestita da uno strato di malta, che variava degli 8 ai 10 cm, sul quale era fissato il rivestimento parietale, in questo caso costituito da lastre marmoree, che si doveva raccordare alla superficie interna della cupola. Anch'essa era ricoperta di abbondante malta, per omogeneizzare l'eventuale presenza di irregolarità della struttura in pozzolana e tufelli, e nascosta da altro materiale di rivestimento. Con il passare dei secoli, oltre al rivestimento, si è a poco a poco distaccato in modo irregolare anche lo strato di malta, lasciando ampiamente visibile la superficie della muratura; data la rilevanza di spessore di tale elemento, è importante distinguere, anche nelle sezioni 2D (orizzontali, verticali, curve di livello), le parti che conservano anche lo strato con malta rispetto a quelle che documentano la struttura grezza dell'ambiente.

Appare dunque cruciale sapere dove eseguire questi tagli sul modello reality-based e come classificarli nell'ambito del progetto costruttivo, per evitare che le analisi geometriche possano portare ad informazioni erranee. Ad esempio in un precedente studio, sempre basato su rilievi laser scanner, sulla Sala Ottagonale delle Piccole Terme (VERDIANI, PUCCI, BLANCO 2009; cfr. anche PUCCI, BLANCO 2010, in cui peraltro non si fa alcun riferimento al fatto che la progettazione della cupola è riconducibile ad una costruzione geometrica rigorosa; cfr. invece ADEMBRI et al. 2014; CIPRIANI et al. 2014), il disegno dell'estradosso, che sembra una sorta di offset dell'intradosso, non risulta corretto, come dimostrano i rilievi presentati in questa sede.

Per risolvere questo insieme di problemi relativi ad un uso concreto e corretto dei dati da sensori, è quindi determinante – come già accennato – l'interdisciplinarietà: da un lato per collocare la Sala Ottagonale all'interno di un contesto culturale di forte cambiamento ed innovazione sia estetici che tecnologici, dall'altro per identificare i requisiti, che oggi potremmo definire prestazionali e funzionali, che governavano il rigoroso metodo progettuale

classico (basato su griglie modulari in pianta e alzati, sulla presenza di relazioni proporzionali determinate sia di misure lineari che di aree e così via). Esempi di un approccio integrato di questo tipo sono presenti in recenti studi sulle architetture voltate (CONTI, MARTINES 2010; cfr. anche SVENSHON 2010, sull'architettura bizantina) e sui teatri classici (BIANCHINI, FANTINI 2015).

Nel caso delle Piccole Terme, fra gli aspetti che devono entrare in gioco nelle collaborazioni fra archeologi, architetti ed esperti di informatica grafica e rilevamento digitale, per ottenere una conoscenza piena del manufatto architettonico, vi sono l'esame delle fonti antiche e inoltre delle fonti antiquarie, soprattutto disegni e incisioni del XVIII e XIX secolo, che ci restituiscono lo stato di conservazione prima degli interventi di restauro. Un altro aspetto è costituito dalla ricerca di modelli ed elementi dell'architettura romana, che abbiano avuto un ruolo nello sviluppo di tipologie di volte come quella della Sala Ottagonale delle Piccole Terme o del vestibolo di accesso alla Piazza d'Oro; è vero che possono essere considerati veri e propri prototipi, ampiamente ripresi nel corso dei secoli successivi, tuttavia se ne possono rintracciare i precedenti nelle testimonianze architettoniche della prima età imperiale: si pensi agli spazi a pianta centrale delle lussuose ville di *otium* campane (WARD-PERKINS 1974, 63-66), che troveranno la massima espressione nella grande (e sottile) cupola della Sala Ottagonale della *Domus Aurea* o nella volta a padiglione ottagonale in *opus caementicium* della *Domus Augustana* di Domiziano.

Le numerose cupole in concreto di varia forma presenti a Villa Adriana, da quelle più ardite a quelle più aderenti alla tradizione, testimoniano il particolare interesse dell'imperatore verso tale tipologia di copertura, e in particolare per le forme più originali; al di là delle più convenzionali cupole emisferiche (Roccabruna, *Calidarium* delle Piccole Terme) o dei semi-catini (Triclinio Estivo, Sala dei Filosofi, *Natatio* delle Grandi Terme), sono le cupole ad ombrello (o simili) a caratterizzare alcuni specifici spazi che dovevano avere un ruolo significativo nella volontà dell'imperatore di esibire la magnificenza della villa e sorprendere gli ospiti: in effetti, si tratta di soluzioni architettoniche impiegate sempre in ambienti di destinazione imperiale particolarmente lussuosi con funzione distributiva (Sala Ottagonale delle Piccole Terme, vestibolo di Piazza d'Oro) o come terminazione di cannocchiale prospettico/*promenade architecturale* (ad esempio nel Serapeo).

Come dimostra la Sala Ottagonale delle Piccole Terme, in cui le superfici si intersecano e si confondono l'una nell'altra in un gioco di elementi mistilinei, i progettisti erano senza dubbio esperti di tecniche costruttive, di questioni impiantistiche e, naturalmente, geometrico/matematiche, come del resto emerge dall'analisi del modello digitale dell'intradosso e di parte dell'estradosso della Sala Ottagonale, che sembra sviluppare in modo originale precedenti soluzioni di epoca neroniana, solo recentemente comprese nella loro essenza geometrica e costruttiva; modello di riferimento immediato degli

architetti delle Piccole Terme è sicuramente l'operato degli autori del famoso padiglione della *Domus Aurea*, dei quali – fatto assai inconsueto per il mondo antico – è giunto fino a noi anche il nome, Severo e Celere; dal punto di vista concettuale, c'è chi ritiene (CALANDRA 1996) che le volte a ombrello di Villa Adriana possano essersi ispirate ai lussuosi baldacchini e tende da campo realizzati in legno e tessuti pregiati di origine asiatica e ne rappresentassero quasi una sorta di conversione in *opus caementicium*.

Far emergere da un modello digitale la complessa stratificazione di concetti ed eventi fin qui descritta comporta una serie di competenze interdisciplinari, ma anche la capacità di saper interrogare correttamente i dati raccolti con la campagna di rilievo. Il modello 3D deve essere quindi ridotto ad un telaio (un modello wireframe o a fil di ferro), che sintetizzi gli elementi “portanti” dal punto di vista geometrico e quindi progettuale e costruttivo. Appare pertanto necessario individuare una serie di curve direttrici e generatrici (idealizzate) che ripercorrono esattamente la sequenza di operazioni geometriche di estrusione, intersezione, rivoluzione e raccordo messe in campo dall'architetto antico (cfr. Fig. 4).

F.F.

3. LA SALA OTTAGONALE DELLE PICCOLE TERME

La Sala Ottagonale delle Piccole Terme, la cui funzione principale era di carattere distributivo all'interno dell'articolato complesso termale (Fig. 1), presenta sette aperture, disposte in modo irregolare lungo uno spazio di pianta ottagonale, i cui lati sono alternativamente rettilinei e leggermente convessi. Alcuni autori hanno attribuito a questo spazio la funzione di *apodyterium*; tuttavia, la difficoltà di sistemare i vani per riporre gli indumenti durante l'attività termale, a causa delle molte aperture e della curvatura dei lati, che rende di fatto poco plausibile questa ipotesi, ha indotto, più recentemente, a preferire per questo ambiente una funzione distributiva.

Come nel caso della *Domus Aurea*, anche qui la vera geometria della cupola non è facilmente identificabile, in quanto sembra che l'ottagono di base, al progredire in altezza, si trasformi in un'altra figura geometrica, una sorta di rombo, costituito da lati rettilinei, a giudicare dall'aspetto attuale della superficie conservata (cfr. figure del § 5). Il fatto che non si comprenda esattamente la forma geometrica della cupola è una caratteristica presente in un altro edificio termale, le cosiddette Terme di Nerone a Pisa (PUMA 2013), nelle quali il prisma ottagonale del tamburo si converte dolcemente, ma in modo indistinto, in una volta a padiglione, fino a diventare un *oculus* circolare.

È molto probabile che un fenomeno analogo caratterizzasse anche la copertura della Sala Ottagonale delle Piccole Terme, sebbene l'attuale stato di conservazione permetta di formulare solo delle supposizioni basate

sull'interpolazione mediante apposite procedure di modellazione inversa lungo sezioni longitudinali e trasversali. Ad esempio, non è dato sapere con certezza se fosse presente un *oculus* circolare neanche tentando di osservare o “ricomporre” virtualmente i frammenti *in situ*, dal momento che ne resta soltanto uno: un blocco di *opus caementicium*, peraltro non in giacitura primaria, dislocato, in un periodo non precisabile, lungo l'accesso all'edificio da E, nell'area del peristilio che doveva appartenere alla palestra annessa al complesso termale.

Dall'esame delle curve di livello eseguite sul modello digitale della sala sembra emergere una relazione geometrica fra Piccole Terme e *Domus Aurea*; la chiave di lettura per comprendere la forma della celebre sala di forma ottagonale presente in quest'ultima è stata fornita da LANCASTER (2005, 43) sulla base di precedenti intuizioni di CONTI e MARTINES (2010), che per lungo tempo poterono osservare da vicino la superficie dell'intradosso di questa sottilissima volta – aspetto che ricorre anche nel caso delle terme di Villa Adriana (spessore di circa 30 cm su una luce di circa 10 m). La Lancaster interpreta mediante modelli 3D idealizzati (non da scanner laser) il lavoro di centinatura eseguito dagli architetti Severo e Celere, che ad una determinata altezza decisero di introdurre delle superfici triangolari nella volta a padiglione ottagonale; il vertice più basso di questi otto triangoli coincide con le curve di intersezione fra i cilindri dei vari segmenti di volta a botte che costituiscono il padiglione. Con questo sistema si riuscì a raddoppiare gli otto lati del tamburo, in modo tale che l'*oculus* divenisse un poligono a 16 lati, praticamente indistinguibile da un cerchio una volta messo in opera tramite laterizio e *opus caementicium*.

Stupisce il fatto che questi edifici, tanto studiati e rilevati, solo in anni recenti siano stati correttamente interpretati da un punto di vista progettuale/costruttivo; talvolta si è preferito sostenere che certe forme complesse fossero il prodotto non intenzionale di raccordi privi di un reale rigore geometrico. VISCOGLIOSI (2006, 332) nel commentare la complessa superficie intradossale della Sala Ottagonale delle Piccole Terme afferma che «non è possibile definire le cupole della Villa da un punto di vista geometrico, ed in particolare il così detto Apodyterium delle Piccole Terme tiburtine». DE ANGELIS D'OSSAT (1936, 16) considera simili volte come dei paradossi statici di miracolosa eleganza; BLAKE (1973, 248) afferma che il costruttore «non ebbe paura che il suo cemento, una volta consolidato, non si dimostrasse stabile». MACDONALD e BOYLE (1980, 23) puntualizzarono che, piuttosto che di un “paradosso statico”, si tratta di un “paradosso visivo”, dal momento che sotto il profilo statico la struttura si dimostra convenzionale: è la sua forma ad essere “paradossale”. Tale ultima affermazione potrebbe essere considerata contraddittoria, dato che intradosso ed estradosso appartengono ad un unico solido monolitico realizzato in *opus caementicium* e tufi di alleggerimento; in sostanza, la forma percepita e la struttura portante coincidono, diversamente da quanto avviene in epoca tardo-antica, in cui si registra la tendenza a “staccare” l'intradosso

dall'estradosso rendendo le due superfici autonomamente modellabili in quanto sorrette da muri perimetrali e da castelli di travi. Evidenziare il tema del paradosso visuale è comunque opportuno: MACDONALD e BOYLE (1980) fanno slittare la discussione non tanto e non solo su temi più banalmente statici o formalisti, al contrario intravedono nella forma apparentemente vaga e indefinita un'intenzionalità progettuale tipicamente classica. Una nota interpretazione del primo libro sull'Architettura di Vitruvio vede nella tecnica della *scaenographia* (una delle tre figure della *dispositio* insieme con *ichnographia* e *orthographia*) una forma concreta di espressione delle idee alla base del progetto; idee che, in questo caso, hanno la funzione di creare un'alterazione della forma percepita della cupola (ADEMBRI et al. 2015, 22-23).

L.C.

4. USO E INTEGRAZIONE DEI MODELLI REALITY-BASED A FINI INTERPRETATIVI E DI VERIFICA STRUTTURALE

Per affrontare lo studio, la ricostruzione virtuale e l'analisi strutturale della cupola della Sala Ottagonale è necessario impiegare una sorta di doppia chiave di lettura: una culturale, l'altra tecnica.

La prima consiste nel considerare un'accurata restituzione 3D come una "banca dati" da tradurre in una serie di passaggi volti a ripercorrere le fasi essenziali della metodologia impiegata dall'architetto antico per dare risposta alle esigenze della committenza, compresa l'evidenziazione di quanto di originale è ancora presente nelle strutture e di ciò che invece ha subito forti alterazioni (restauri e manutenzioni, non sempre eseguiti con il dovuto rispetto della forma originaria delle strutture). Il modello digitale, che nell'attuale framework operativo è il prodotto combinato di sensori attivi e passivi, una volta completato in tutte le sue parti (comprendendo cioè anche gli estradossi delle numerose volte e cupole formanti le Piccole Terme), incamera i dati necessari per comprendere requisiti e prestazioni che erano oggetto di specifici computi eseguiti dall'architetto antico e che andavano di pari passo con questioni estetiche, funzionali ed economiche.

L'importanza di avere a disposizione un modello digitale completo dell'edificio analizzato è quindi una caratteristica della massima importanza per poter avviare uno studio scientificamente fondato, dal momento che l'architettura non può essere analizzata per singole parti, ma nel suo insieme, per poi, una volta compresa la cornice generale del progetto architettonico, addentrarsi nell'analisi degli elementi di dettaglio attraverso letture e caratterizzazioni semantiche del modello (GAIANI, BENEDETTI, REMONDINO 2010). In sostanza il modello deve racchiudere e veicolare le informazioni morfologiche e cromatiche sull'oggetto e abilitarne analisi in grado di migliorare il livello di conoscenza dell'edificio, inteso come risultato di un progetto e della sua

esecuzione – due aspetti mai perfettamente conciliabili e assimilabili – ma anche del processo materiale che ha portato l'edificio a prendere la configurazione attuale, dalle spoliazioni ai restauri.

Il secondo aspetto riguarda l'uso appropriato delle nuove tecnologie sia in fase di acquisizione che di estrazione e trattamento dei dati, nonché di verifica di ipotesi ricostruttive. Come già accennato, la sinergia permessa da sensori attivi e fotogrammetria non convenzionale basata sui recenti sviluppi nel settore della computer vision (GAIANI 2015) permette di affrontare la campagna di rilievo con strategie diverse – per costo, caratteristiche logistiche, range operativo – ma che in definitiva conducono alla realizzazione di punti che restituiscono gli oggetti con elevata accuratezza. Nel caso delle Piccole Terme è stato necessario eseguire un rilievo generale mediante laser scanner di tutti gli ambienti, un rilievo fotogrammetrico con palo telescopico per l'estradosso delle coperture e un rilievo fotogrammetrico mediante fotocamera reflex per tutti i paramenti murari.

Oltre al software specifico per il trattamento dati (programmi di point-cloud processing, SfM-MVS), un ruolo essenziale come collettore dei dati e relativa analisi è fornito dai programmi di reverse modelling (RM) che, oltre ad integrare nuvole di punti e mesh, sono dotati degli strumenti capaci di determinare gli elementi geometrici “chiave” alla base del processo di progettazione degli architetti antichi. L'impiego di tali applicativi nel settore dell'archeologia e più in generale dei Beni Culturali è tuttavia spesso relegato al ruolo di creazione, gestione e ottimizzazione dei modelli reality-based, al fine di renderli congrui con sistemi di esplorazione/visualizzazione interattiva con scopo divulgativo e di catalogazione, oppure prevalentemente illustrativo come avviene con animazioni e immagini di rendering.

Per questo motivo la Sala Ottagonale è un ottimo caso di studio per effettuare dei test che consentano di mostrare un approccio maturo verso applicativi che altrimenti sembrerebbero rivestire un ruolo esclusivamente subalterno e di mero supporto all'indagine architettonica ed archeologica. Al contrario, questo genere di programmi permette di estrarre, attraverso vari metodi e soluzioni, informazioni bidimensionali difficilmente ottenibili con il rilevamento convenzionale. In accordo con le teorie progettuali antiche (Vitruvio, I, 2, 1-9) è possibile suddividere – all'interno del framework operativo della “modellazione inversa” – la ricerca sulle origini formali dell'edificio oggetto di analisi in una serie di passaggi mutuamente connessi. Tali passaggi corrispondono alle tre *species* della *dispositio* – *ichnographia*, *orthographia* e *scaenographia*: in particolare le prime due coincidono con la serie di elaborazioni eseguite dall'architetto con squadra e compasso per l'ottenimento del disegno planimetrico e degli alzati. Si trattava quindi di complesse e ben strutturate costruzioni grafiche, probabilmente applicabili a contesti, tipologie costruttive e scale differenti, che portavano all'ottenimento

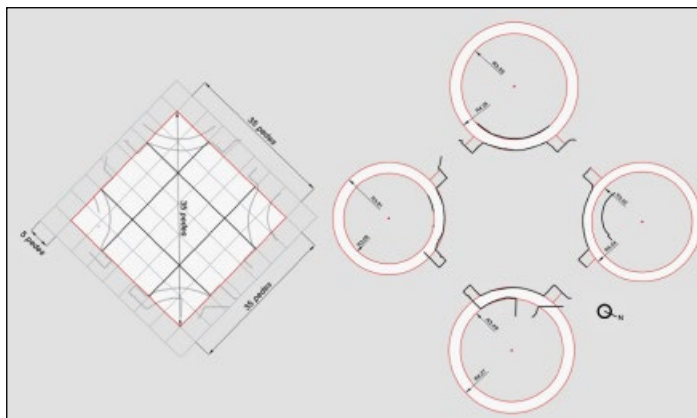


Fig. 3 – Ipotesi sul tracciamento planimetrico della Sala Ottagonale con relativa griglia modulare e raggi di curvatura.

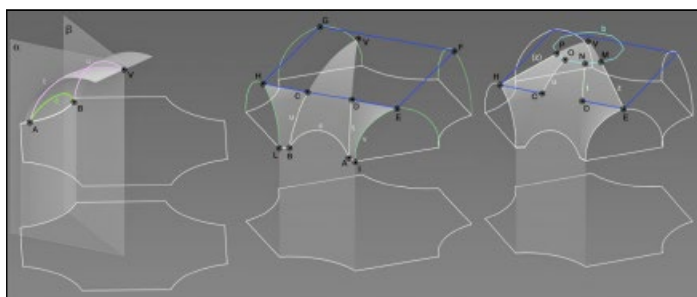


Fig. 4 – Ipotesi di genesi geometrica della cupola e delle curve direttrici e generatrici.

del disegno complessivo dell'edificio; questi “disegni” sono nascosti all'interno delle murature che sono sopravvissute alle azioni combinate del tempo e dell'uomo, ma, grazie ai modelli mesh ad alto dettaglio impiegati all'interno dei programmi di RM, possono essere rintracciati, completati (come nel caso della copertura della Sala Ottagonale) e sottoposti a verifica.

Un ambiente di lavoro unico, basato su tecnologie di visualizzazione 3D, costituisce un serio avanzamento metodologico in quanto rende le classiche analisi geometriche e metriche (ad esempio il confronto con unità di misura antiche) assai più accurate rispetto al passato, in particolare per gli alzati. In sostanza, la procedura impiegata nell'analisi della Sala Ottagonale delle Piccole Terme è esemplificativa del metodo applicabile ad altre situazioni di pari complessità morfologica: si definiscono inizialmente dei piani di taglio

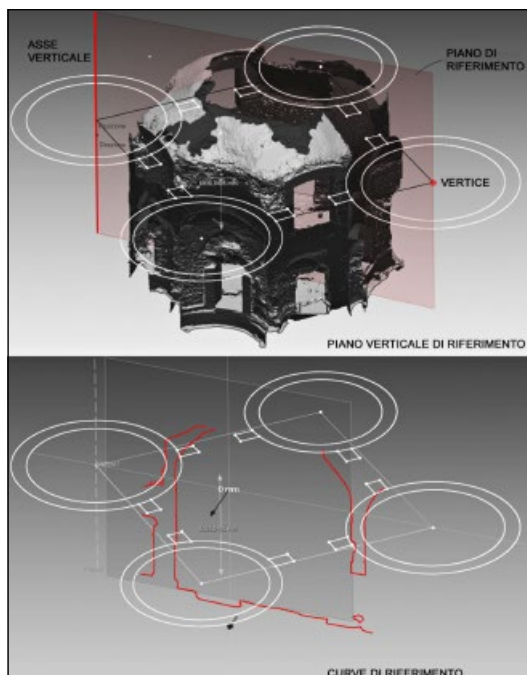


Fig. 5 – Piano verticale di riferimento per l’ottenimento della sezione lungo i lati curvi.

che permettano di intercettare gli elementi più significativi della planimetria; grazie a questi vengono determinate le feature planimetriche, ossia gli elementi più caratterizzanti della forma dell’edificio (Fig. 3).

Grazie a questi piani è poi possibile estrarre due tipologie di informazioni: le prime coincidono con delle curve spline ad alto dettaglio, cioè formate da un’elevata quantità di nodi, le seconde sono costituite da linee e curve (cioè archi di cerchio) che possono essere assimilate – ma solo dopo attenta analisi – con gli elementi alla base del disegno eseguito dall’architetto antico (Fig. 4). In particolare a Villa Adriana, dove esiste una decisa tendenza all’uso alternato di elementi rettilinei e curvi, risulta particolarmente importante ottenere informazioni certe sulla posizione dei centri degli elementi curvilinei, al fine di comprendere che tipo di costruzione grafica fosse stata impiegata al momento della costruzione per definire sia la planimetria (*ichnographia*) che gli alzati, ugualmente caratterizzati da andamento mistilineo. L’automazione del processo finalizzato alla determinazione di tali elementi “di progetto” è uno dei punti di forza degli applicativi di RM, in quanto questi ultimi portano a limitare l’impiego empirico da parte degli utenti di programmi di disegno

assistito per eseguire le interpolazioni necessarie a definire gli elementi grafici appena menzionati, e sono inoltre in grado di stabilire una gerarchia costruttiva fra elementi della planimetria e degli alzati, in modo tale da abilitare la possibilità di revisione del risultato finale dell'interpretazione (spesso si tratta di un modello a fil di ferro) anche in fasi successive di elaborazione (Fig. 5). Le posizioni dei centri dei cerchi, in particolare in planimetria, servono anche a definire, coerentemente con progetto ed esecuzione, da dove far passare i piani verticali necessari per determinare le sezioni longitudinali e trasversali. A partire da questi elementi grafici di "ridisegno" o "ricalco" semplificato rispetto all'andamento irregolare delle murature – dovuto in parte al degrado, ma anche talvolta alla mancanza di perizia delle maestranze in fase esecutiva – è possibile avanzare ipotesi sulle ragioni che hanno determinato una particolare configurazione geometrica, che molto spesso è ottenuta mediante l'impiego di specifici algoritmi grafici derivati dalla geometria euclidea.

Nella Sala Ottagonale delle Piccole Terme è possibile rintracciare un'elevata competenza degli architetti antichi rispetto a questi aspetti di fondo del progetto, che in questo caso dimostrano una provata dimestichezza con l'impiego delle proprietà geometriche di cerchi inscritti e circoscritti rispetto al quadrato, come ad altri poligoni regolari anch'essi inscritti. La disamina fra spline ad alto dettaglio e disegno vettoriale semplificato permette poi di eseguire un'analisi più approfondita rispetto al passato fra accuratezza costruttiva e progetto architettonico. Come noto, la coerenza metrica dell'edificio (*symmetria*), ottenuta attraverso maglie modulari, rappresentava un elemento necessario a garantire la qualità dell'edificio e l'ottimizzazione del computo metrico ne assicurava un'adeguata esecuzione; tuttavia, in presenza di elementi curvilinei, si rendevano necessari specifici aggiustamenti volti alla risoluzione di problemi relativi all'impiego di quantità irrazionali (PINHO, XAVIER 2013). L'individuazione di moduli (*posótēs*) per definire il disegno planimetrico e il relativo scostamento rispetto ad essi è oggi più facilmente controllabile mediante appositi strumenti che nascono in ambito industriale per eseguire confronti fra progetto ed esecuzione.

L'impiego di mappe cromatiche e relativi istogrammi per definire lo scostamento fra modello ideale ed esecuzione reale è una delle caratteristiche tipiche dei programmi di RM, che senza dubbio aiutano a definire l'accuratezza costruttiva e di conseguenza il limite metrico entro cui validare un'ipotesi ricostruttiva (Fig. 6). Il concetto espresso da DUNCAN-JONES (1980) circa i "*conjectured target feet*", ovvero quelle che potremmo definire come le "cifre tonde", che il progettista aveva attribuito ad un elemento significativo di un determinato edificio, possono essere quindi definiti di pari passo con un'accuratezza derivata dalle precedenti considerazioni sui tool di confronto fra modelli, indirizzando il processo di verifica delle varie ipotesi verso una metodologia più sistematica e codificabile. Queste considerazioni sono indirizzate

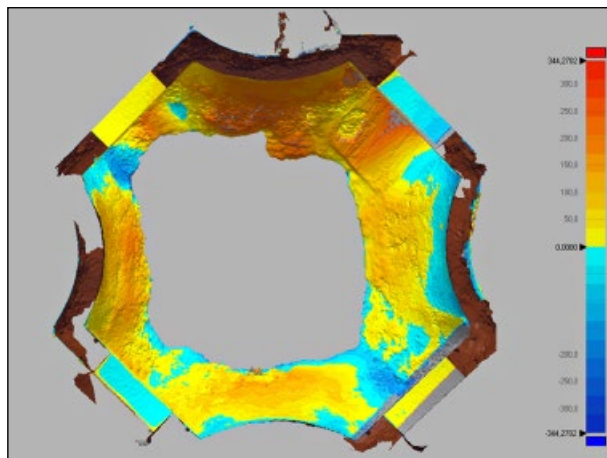


Fig. 6 – Mappa cromatica con deviazioni in positivo (tonalità calde) e in negativo (tonalità fredde) rispetto al modello idealizzato di ricostruzione.

a fornire un quadro generale di interpretazione mediante modelli digitali in grado di filtrare i dati grezzi incamerati nei modelli reality-based attraverso un filtro “culturale”, che permetta di interpretare le differenti tipologie di elementi geometrici ottenibili da tali simulacri digitali.

I modelli digitali reality-based e generati mediante modellazione geometrica sulla base delle ipotesi sul progetto originario, possono poi svilupparsi, attraverso apposite procedure, in elaborati 3D adatti all’ecuzione di verifiche strutturali. In questo caso entrambe le maglie poligonali dovranno essere chiuse e prive di eventuali elementi “appesi” o disconnessi; infatti, in particolare per i modelli da sensori attivi, è indispensabile eliminare tutti gli elementi che non soddisfino la formula di Eulero per i poliedri e la condizione di essere 2-*manifold* (FANTINI 2009). Una volta accertata la congruità con tali esigenze, i modelli devono essere semplificati al fine di renderli compatibili con i sistemi di calcolo agli elementi finiti (FEA), eliminando anche gli eventuali errori di tipo geometrico che si fossero generati (CIPRIANI, FANTINI, BERTACCHI 2015).

E.J.V., F.F.

5. RESTITUZIONI BIDIMENSIONALI E TRIDIMENSIONALI PER DOCUMENTARE E INTERPRETARE LO SPAZIO VOLTATO

La Sala Ottagonale delle Piccole Terme è parte di un articolato sistema di ambienti ed è da essi inscindibile, se l’obiettivo è quello di proporre un’interpretazione attendibile. Per tale motivo è stato realizzato un rilevamento

complessivo dei resti dell'intero edificio, suddiviso in diverse campagne di acquisizione, utilizzando dispositivi basati su sensore attivo, come il laser scanner 3D Zoller+Fröhlich Imager 5010C e la ScanStation Leica C5. Per l'estradosso delle coperture, vista l'altezza delle strutture, è stata invece impiegata una tecnologia di acquisizione passiva basata sul sistema 3DEYE, che consiste in un palo telescopico in carbonio allungabile fino a circa 10 m, alla sommità del quale è fissata una fotocamera digitale Sony DSC-QX100 (risoluzione fotogramma 20 Megapixel, con ottica Zeiss 3,6×28-100 mm), collegata ad una sospensione cardanica meccanizzata, che permette di orientare la macchina fotografica secondo una direzione stabilita dall'utente e di acquisire l'immagine mediante un tablet in connessione Wi-Fi.

Entrambe le metodologie di rilevamento hanno contribuito a completare il modello poligonale dell'edificio e in particolare della Sala Ottagonale per gli approfondimenti e l'interpretazione della sua geometria costruttiva.

Per quanto riguarda la campagna di rilevamento laser scanner 3D (BERTACCHI, CIPRIANI 2014), gli scanner terrestri utilizzati (ranging scanner) basano il loro funzionamento sull'emissione di un raggio laser, con sistema di rotazione automatica per realizzare acquisizioni panoramiche coprendo l'intero angolo giro (360°) in orizzontale, mentre per quello verticale il campo di ripresa è ridotto (tra 270° e 320°, a seconda del modello) per ovvi motivi di sostegno, in quanto la porzione di spazio sottostante allo strumento rimane occlusa dalla presenza del treppiede. Lo strumento, analizzando il tempo di volo o la differenza di fase del segnale di ritorno, calcola la misura della distanza di ogni singolo punto rilevato sulle superfici investite dal raggio secondo una densità determinata dall'operatore; il numero di punti ottenuti è pertanto direttamente proporzionale alla qualità scelta per l'acquisizione (APOLLONIO *et al.* 2010).

Il risultato di ogni scansione porta alla creazione di una nuvola di punti e, dato che lo strumento lavora nel campo del visibile, si rende necessario effettuare una serie di stazioni, da stabilire a priori, in modo tale da acquisire l'intera morfologia dell'oggetto rilevato, evitando per quanto possibile zone d'ombra (occlusioni), cioè porzioni non rilevate dallo strumento, in modo da non creare lacune nel dato.

Per la visualizzazione e gestione delle nuvole di punti del complesso delle Piccole Terme è stato utilizzato il software Leica Geosystems Cyclone 9.0, che permette la visualizzazione tridimensionale, sia prospettica che ortogonale, delle nuvole di punti, la loro decimazione, esportazione e inoltre la "messa a registro" al fine di ottenere un modello globale dato dalla sommatoria delle singole prese, collegate a quelle contigue mediante l'individuazione di punti omologhi (target). Nell'insieme sono state messe a registro un totale di 80 scansioni, che interessano sia gli ambienti interni che le porzioni dei prospetti catturate dall'esterno dell'edificio. I programmi per la gestione delle nuvole di punti permettono di posizionare piani di riferimento orizzontali e verticali con

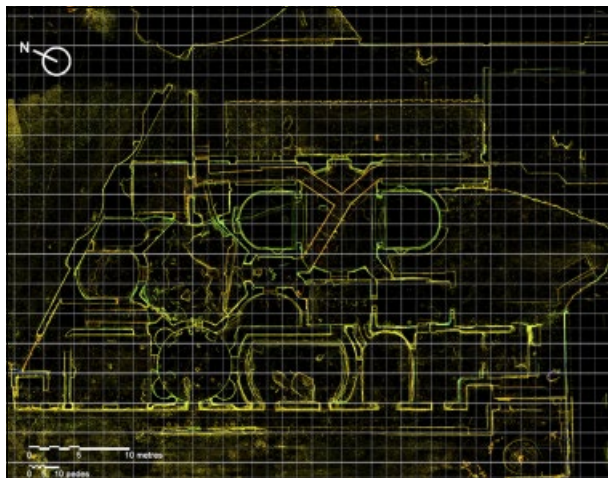


Fig. 7 – Modello a nuvola di punti delle Piccole Terme. Una griglia di 5 piedi di lato evidenzia il modulo progettuale dell'intero edificio (messa a registro delle nuvole: G. Bertacchi).

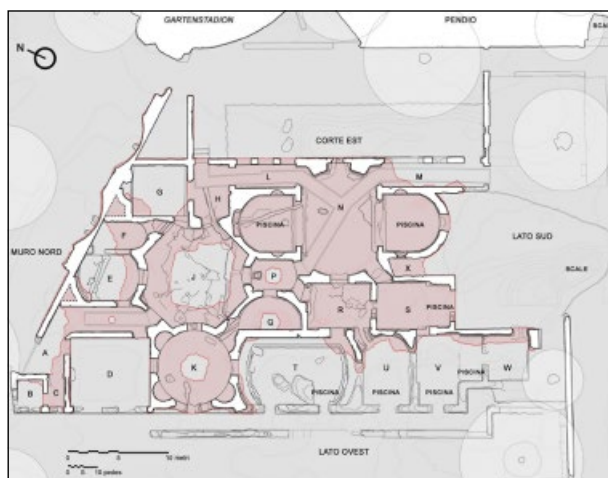


Fig. 8 – Planimetria delle Piccole Terme da rilievo laser scanner terrestre (2015): con retino rosso la proiezione delle volte esistenti (elaborazione: G. Bertacchi).

due finalità: da un lato si possono ottenere viste specifiche orientate rispetto alle quali eseguire operazioni di ridisegno (similmente a programmi CAD), dall'altro si possono usare tali piani per “nascondere” parti della nuvola in modo da creare sezioni dell'edificio, ad esempio con un piano di riferimento

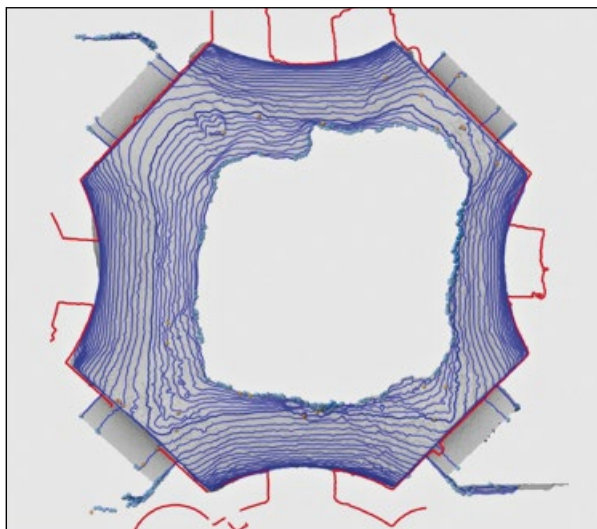


Fig. 9 – Vista ipografica della cupola; l'andamento diverso delle curve di livello nella parte superiore dell'immagine è dovuto a modifiche della superficie a seguito di interventi di restauro.

orizzontale con griglia in piedi romani che rende visibile solo la parte di nuvola sottostante (Fig. 7).

Con questo procedimento è possibile il passaggio da modello tridimensionale ad una serie di sezioni o profili bidimensionali vettoriali, oppure è possibile optare per la realizzazione di ortoimmagini da utilizzare in ambienti CAD ai quali demandarne interamente la vettorializzazione, al fine di ottenere classici elaborati bidimensionali (piante, prospetti, sezioni) (Fig. 8). Le ortoimmagini esportate da Cyclone e importate in programmi di disegno assistito – in questo caso Autodesk AutoCAD – sono immagini referenziate esportate in formato .TIF contenenti informazioni grafiche e metriche del modello. Immettendo infatti i dati contenuti nel file esterno .TWF nel quale si trovano i parametri per georiferire l'immagine, il programma CAD è in grado di scalare le immagini e posizzarle in relazione tra di loro in modo corretto.

Nella Sala Ottagonale i piani di taglio sono stati disposti a varie altezze per evidenziare le caratteristiche morfologiche che documentano i restauri così come gli elementi di muratura originali: una prima linea di sezione è stata posta a circa 20 cm al di sopra dell'originario piano pavimentale; tale livello è di particolare importanza in quanto la parete conserva ancora tracce del rivestimento marmoreo, che consente di identificare con sicurezza lo spessore originario delle pareti dell'ambiente e inoltre di determinare il piano di calpestio antico, anche se in questo caso la superficie attuale è limitata allo strato di preparazione.

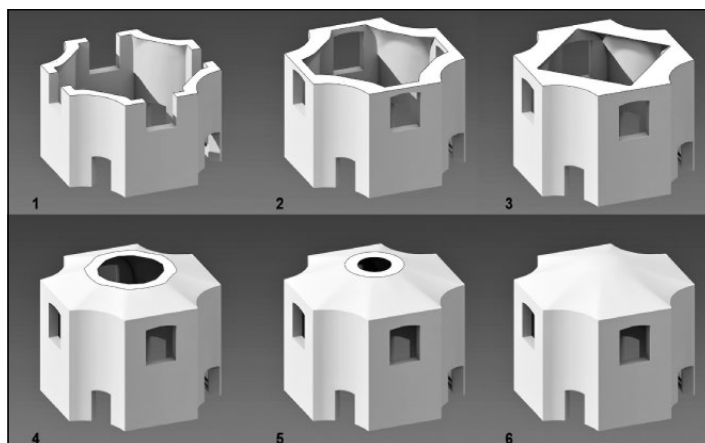


Fig. 10 – Spaccato assonometrico con la sequenza di sezioni orizzontali della cupola a differenti altezze.

La seconda linea di sezione è stata posta a quota 1,40 m per ottenere informazioni sulle aperture presenti. Gli altri piani di sezione – ogni 15 cm – hanno interessato i livelli intermedi per descrivere attraverso curve di livello i numerosi sottosquadri presenti nelle murature, sia al di sopra che al di sotto del piano di calpestio antico.

Concluso il processo di restituzione 2D, il modello a nuvola di punti realizzato è stato esportato verso l'applicativo 3DSystems Geomagic Design X in formato .PTX per realizzare una mesh ad alta densità, con lo scopo di ottenere restituzioni specifiche da impiegare ai fini della comprensione della natura geometrica delle curve alla base della realizzazione della cupola parzialmente crollata. A causa della mancanza di accuratezza esecutiva, che sta alla base del non perfetto parallelismo ed ortogonalità fra muri contigui, è stato necessario estrarre diverse tipologie di sezioni per l'interpretazione geometrica della cupola (Fig. 9):

- Un primo insieme di curve è stato definito attraverso un limitato numero di piani di riferimento verticali ed orizzontali, finalizzati ad individuare le principali sezioni della Sala Ottagonale. Tali giaciture corrispondono a quelle che presumibilmente furono le sezioni progettate con maggior cura dall'architetto (*ichnographia*, *orthographia*) e che quindi presentano gli indizi più importanti relativi al sistema di mutue relazioni geometriche e di misure, che legano le piante con gli alzati e le sezioni longitudinali con quelle trasversali.
- Un secondo insieme di sezioni è invece costituito dalle curve di livello estraibili direttamente dal modello mesh. Nel loro insieme esse forniscono suggerimenti utili per individuare – all'interno di una superficie apparentemente continua

- quelle discontinuità introdotte da restauri, alterazioni superficiali o deformazioni dovute a lesioni, eventi traumatici e così via. Tali curve sono molto importanti, in quanto possono evidenziare anche altri elementi riguardanti la presenza di superfici originarie, che non sono identificabili ad occhio nudo.
- Un ultimo insieme di piani di sezione viene desunto dallo studio delle curve di livello esistenti e può registrare al meglio i punti di cambiamento della direzione delle superfici e di flesso delle strutture voltate, una volta che la geometria complessa è già stata suddivisa e la sua genesi approfondita. Ad esempio, lo studio dell'andamento delle superfici fa comprendere come la forma varii con l'aumentare dell'altezza della cupola, passando da sezioni curve a sezioni pressoché rettilinee come mostrato nella sequenza di curve del rilievo (Fig. 10).

S.B., G.B.

6. METODOLOGIA E OBIETTIVI DELL'ANALISI STRUTTURALE A PARTIRE DA MODELLI REALITY-BASED

A partire dal rilevamento tridimensionale delle Piccole Terme e dall'ipotesi ricostruttiva della Sala Ottagonale, si è voluta avviare una collaborazione internazionale con l'obiettivo di sviluppare un metodo di lavoro – integrato ed interdisciplinare – in grado di validare ipotesi sulla “forma” originaria di spazi voltati in base alla verifica strutturale. A differenza di quanto avviene nel caso di analisi strutturali eseguite sulla base del metodo statico di equilibrio, già impiegate in strutture storiche voltate, in questo caso si rende necessaria l'analisi agli elementi finiti (FEA). Data la bassa resistenza a trazione dei materiali impiegati, nel caso di studio si è reso necessario l'impiego di un modello costruttivo di danno per caratterizzare il comportamento meccanico del materiale. La metodologia impiegata prevede l'uso di dati prelevati *in situ* e convertiti in forma di nuvola di punti 3D, che, opportunamente elaborata, viene trasformata in una maglia di poligoni descrittiva dei contorni dell'edificio, per poi divenire una maglia volumetrica solida compatibile con la FEA.

Per analizzare la Sala Ottagonale si è reso necessario un vasto studio bibliografico sulle caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati nel manufatto, così come dei caratteri costruttivi delle fondazioni, delle strutture in elevazione e in particolare delle coperture, che nel caso specifico risultano realizzate in *opus caementicium*. Nello studio di GIAVARINI *et al.* (2006) sono presenti le caratteristiche meccaniche di vari saggi effettuati sull'*opus caementicium* di manufatti di epoca romana; nel lavoro di JACKSON *et al.* (2005), in cui vengono considerate le proprietà meccaniche dell'*opus caementicium* al variare della percentuale di tufo, che cambia in base a provenienza e cronologia, la resistenza a compressione, pari a 3MPa, risulta inferiore rispetto al valore stabilito da GIAVARINI *et al.* (2006), che è stato preso come riferimento per l'analisi strutturale della Sala Ottagonale delle Piccole Terme da GIAVARINI *et al.* (2006).

Il modello è stato ottenuto integrando i risultati di rilievi realizzati con sensori attivi e passivi in più campagne, a partire dal 2013. Obiettivo primario è stato quello di acquisire la dimensione esatta degli spessori murari, in particolar modo quelli relativi all'estradosso delle coperture, per i quali è stato necessario eseguire specifiche campagne di rilevamento posizionando l'apparecchio in posizioni quanto più elevate possibile. L'adozione di un sistema di riferimento comune, basato sull'assegnazione delle medesime coordinate dei punti omologhi, sia nel modello laser scanner che in quello fotogrammetrico, ha consentito una piena integrazione tra i dati derivanti dalle due metodologie e rappresenta un fattore importante ai fini della valutazione della compatibilità morfologica e della risoluzione geometrica dei modelli. Effettuato questo passaggio con apposito software, è comunque necessario semplificare in modo consistente il modello ottenuto, in modo tale da renderlo compatibile con le analisi strutturali. Nel caso di studio in esame si sono resi necessari ulteriori editing per isolare la Sala Ottagonale dalle murature degli ambienti contigui.

Le superfici poligonali ottenute tramite sensori e appositi programmi di reverse modelling e modellazione geometrica sono state poi convertite in una maglia solida. In pratica i modelli precedenti si limitavano a definire il contorno dell'oggetto reale mediante un'approssimazione (la risoluzione del modello): in questo caso è necessario "riempire" tale ingombro con dei tetraedri determinati con l'algoritmo matematico di triangolazione di Delaunay (HANG 2015), implementato nel programma ad elementi finiti ANGLE. Il modello dello stato attuale è composto da 91.634 tetraedri e 22.890 nodi, mentre quello dell'ipotesi strutturale è di 27.145 tetraedri e 7.983 nodi.

L'analisi strutturale è stata eseguita mediante il software ANGLE, nel quale è stata implementata un'applicazione del "modello di danno scalare" sviluppato negli ultimi decenni (OÑATE, HANGANU, BARBAT 1996; ALONSO-DURÁ 2003; PELÀ 2009). Il modello di calcolo tiene conto di tre presupposti necessari per modellare correttamente il comportamento non lineare della muratura: il differente comportamento a compressione e trazione, il degrado della rigidità dovuto a cause meccaniche (livello tensionale) e l'effetto di risposta dovuto alla dimensione degli elementi che formano la maglia di triangoli. Si prende in considerazione un punto di un determinato materiale con un certo livello di deterioramento; il degrado viene rappresentato sotto forma di lacune nel materiale. Se S è la superficie totale considerata e \bar{S} è l'area resistente effettiva, il dato risultante dalla sottrazione $S - \bar{S}$ corrisponde alla superficie delle lacune; la variabile del danno d si definisce con la seguente formula:

$$d = \frac{S - \bar{S}}{S} = 1 - \frac{\bar{S}}{S}$$

Questo indice esprime il grado di deterioramento del materiale ($0 \leq d \leq 1$). Il valore 0 rappresenta l'assenza di danno, mentre 1 indica il deterioramento

totale dell'area resistente. La relazione fra la tensione standard di Cauchy e la tensione effettiva che interessa la parte di sezione resistente reale si calcola mediante una condizione di equilibrio:

$$N = S\sigma \ ; \quad N = \bar{S}\bar{\sigma} \ ; \quad \sigma S = \bar{\sigma}\bar{S} \ ; \quad \sigma = (1-d)\bar{\sigma} = (1-d)E\varepsilon$$

Questo indice scalare è sufficiente per rappresentare adeguatamente il comportamento di materiali quali le costruzioni in laterizio e pietra. L'effetto che si produce sul comportamento meccanico del materiale è la riduzione di rigidità proporzionale a (1 - d).

Si effettua in primo luogo l'analisi lineare al fine di ottenere un'approssimazione dello stato tensionale della costruzione. Il calcolo viene realizzato tenendo conto dei carichi statici dovuti al peso proprio. Analizzando i risultati delle tensioni strutturali, risultano valori di compressione massima di -0,534 Mpa e di tensione a trazione massima di 0,185 Mpa. La resistenza del materiale costruttivo considerato è di 4,50 Mpa a compressione e 0,77 Mpa a trazione (Tab. 1).

Densità kN/m ³	f _c N/mm ²	f _t N/mm ²	Elast. Mod. N/mm ²	C. Poisson
17,70	4,50	0,77	5740	0,19

Tab. 1 – Parametri di calcolo impiegati per l'analisi strutturale.

Si osserva che per lo stato di carico del peso proprio del materiale, cioè il carico gravitazionale, le tensioni massime sono molto inferiori alle resistenze, sia a compressione che a trazione. Ciò dimostra che la risposta del materiale sarà nella zona elastica, senza cioè arrivare al punto di snervamento o di frattura. In questo caso il calcolo lineare e l'analisi non lineare conducono agli stessi risultati. Per ottenere il coefficiente di sicurezza della struttura si procede ad un'analisi non lineare, incrementando il carico in modo proporzionale al peso proprio, fino ad arrivare al collasso. La relazione fra carico di collasso e carico del peso proprio definisce il fattore di sicurezza per azioni gravitazionali. Il carico di collasso risultante è di 7,5 volte il carico corrispondente al peso proprio (7,5 g); è importante evidenziare l'elevato coefficiente di sicurezza che possiede questo ambiente voltato, considerando che parte della cupola è crollata. La struttura, a doppia curvatura, ne rende il funzionamento meccanico analogo a quello di una cupola con oculo centrale.

Si procede in modo analogo sull'analisi dell'edificio allo stato attuale. Si osserva che i valori massimi delle tensioni principali di compressione e trazione sono inferiori rispetto al caso precedente: ciò è dovuto al fatto che l'edificio ha perso in alcune parti il materiale di cui era costituito e che attualmente le sezioni dei muri presentano uno spessore inferiore a quello originario, per cui le tensioni risultano maggiori. Il carico di collasso è risultato 8.5 volte il carico corrispondente al peso proprio. L'ipotesi avanzata per la forma originaria della

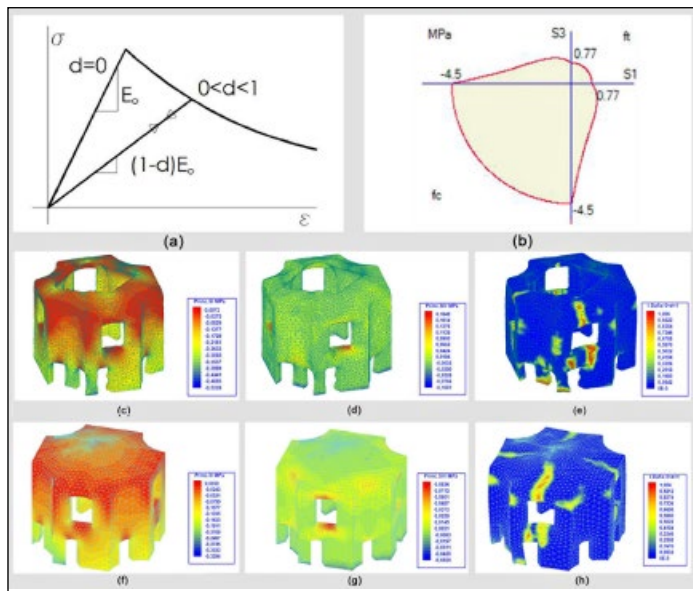


Fig. 11 – a) Riduzione della rigidità e criteri di resistenza; b) Principali sollecitazioni di compressione e di trazione. Stato attuale del vano: c-d) tensioni principali di compressione e di trazione; e) indici di danno e zone fratturate dal carico di collasso di 7,5 g. Ipotesi sullo stato originario del vano: f-g) tensioni principali di compressione e di trazione; h) indici di danno e zone fratturate dal carico di collasso di 8,5 g.

copertura della Sala Ottagonale è risultata coerente con l'analisi strutturale realizzata. Il progetto della sala appare straordinariamente resistente ed è per questo motivo che dopo diciannove secoli mantiene ancora un elevato grado di resistenza. Il crollo di parte della cupola non si deve ad errori di progetto, di costruzione o di resistenza; è invece dovuto al degrado del materiale esposto a fenomeni atmosferici e privato delle originarie protezioni (Fig. 11).

Grazie all'analisi strutturale mediante l'equilibrio che valuta la stabilità generale di strutture storiche cupolate, il calcolo non lineare agli elementi finiti ha permesso di valutare i carichi che portano al collasso, i coefficienti di sicurezza, così come i meccanismi di crollo. Il processo impiegato per ottenere un modello affidabile e calzante, con le esatte dimensioni dell'edificio costruito, si è dimostrato un metodo efficace. Le successive fasi di modellazione, a partire dalla presa dei dati e relativa conversione in nuvole di punti dell'edificio, per passare attraverso le maglie poligonali ed infine ai volumi, richiedono l'impiego di diversi applicativi informatici. Dal calcolo emerge anche che la situazione di conservazione attuale della Sala Ottagonale delle Piccole Terme ne permette una fruizione sicura da parte dei visitatori. Ciò nonostante è necessario prevedere

la protezione della cupola per limitare, per quanto possibile, un ulteriore deterioramento dei materiali dovuto all'esposizione agli agenti atmosferici. Questa prima analisi strutturale è stata effettuata per carichi statici dovuti al peso proprio; per completare l'analisi si intende effettuare successivamente il calcolo per azioni sismiche e per far ciò si modellerà in 3D l'insieme delle sale che costituiscono il complesso termale delle Piccole Terme.

A.A.D., B.S.E.

7. CONCLUSIONI

Dalle analisi effettuate, si evidenzia come la cupola della Sala Ottagonale faccia parte di una sorta di catalogo di prototipi architettonici, che vennero sviluppati sotto il principato di Adriano, di cui abbiamo testimonianza, oltre che nella residenza tiburtina e a Roma, in altri luoghi frequentati dall'imperatore, tra i quali – per citare un esempio – Baia, in Campania. In ragione dell'originalità delle forme, è molto difficile indagare questi ambienti voltati attraverso un'analisi tipologica convenzionale; inoltre, per quanto riguarda in particolare la Sala Ottagonale delle Piccole Terme di Villa Adriana, ulteriori problemi sono dovuti all'attuale stato di conservazione delle strutture, in parte compromesso dall'alterazione subita in seguito all'azione di eventi naturali e antropici (restauri, riutilizzi, spoliazioni). A tal proposito preme sottolineare che il restauro di strutture tanto complesse quanto uniche, se condotto in assenza di un panorama di conoscenze interdisciplinari, rischia di pregiudicare non solo la lettura, e quindi la comprensione di un manufatto, ma – fatto assai più grave – di indebolirne la struttura.

L'analisi geometrica della volta si è rivelato un tema di grande interesse, in quanto ha consentito di registrare diverse caratteristiche tipiche dell'architettura adrianea mistilinea, anche se le discontinuità geometriche corrispondenti all'alternanza di forme concave e convesse, ben evidenti in planimetria, vengano quasi mascherate e rese ambigue negli alzati, in modo da non far percepire con esattezza allo "spettatore" la reale forma della copertura.

Diversamente da quanto mostrano gli esempi della grande semi-cupola del Serapeo o della cupola del vestibolo di accesso di Piazza d'Oro, nei quali sia le curve di intersezione fra vele e fusi o fra un fuso e l'altro vengono mantenuti nella loro essenza geometrica, la cupola ottagonale delle Piccole Terme esprime una precisa volontà di stupire il visitatore con effetti scenografici (in senso vitruviano). Questo tipo di artifici non rappresenta di per sé una novità per l'architettura imperiale romana, sebbene in questo caso ci si trovi di fronte ad un "effetto ottico" talmente raffinato da presupporre, a livello progettuale, una particolare dimestichezza con le nozioni della geometria antica e della resistenza dei materiali, per poterne consentire la traduzione in fase esecutiva.

Che cosa fosse esattamente la tecnica della *scaenographia* in uso presso

gli architetti all'epoca di Adriano non è dato saperlo con certezza, tuttavia è legittimo supporre che si trattasse di una serie di costruzioni grafiche che permettevano di correggere o alterare la percezione di una determinata parte di un edificio, come sottolineato da Bartoli in un altro celebre caso di cupole adriane, segnatamente nel caso dei lacunari del Pantheon. La studiosa ipotizza che l'architetto avesse impiegato una proiezione stereografica per ottenere il particolare effetto della visione della cupola, che consente a chi si posiziona al centro della planimetria dell'edificio, volgendo lo sguardo verso l'alto, di percepire i lacunari simmetrici rispetto al loro asse radiale, sebbene nella realtà i vari piani paralleli all'intradosso che li costituiscono risultino slittati progressivamente verso l'alto (BARTOLI 1995, 52-54).

Queste considerazioni conclusive, basate sui dati acquisiti con la tecnologia digitale di ultima generazione, testimoniano l'importanza dell'uso di sistemi di rilevamento evoluti per indagare esempi di architettura antica, di grande rilevanza in quanto documenti originali ma, al contempo, di grande fragilità, non solo nell'accezione letterale: un restauro eseguito senza una presa di coscienza effettiva della "geometria" sottesa all'elegante fluire di superfici che concorrono a formare una cupola di questo tipo potrebbe portare ad alterarne permanentemente l'"effetto" insito nel progetto originario. È quindi necessario distinguere, all'interno dell'ampia mole di informazioni geometriche ricavabili dalla strumentazione laser scanner, i dati relativi ad elementi originali, ai restauri, alle carenze di accuratezza in fase esecutiva, alle alterazioni dovute ad usura e ad eventi naturali, e così via. La metodologia qui esposta è stata sviluppata con l'obiettivo di fornire gli elementi necessari per una ricostruzione "a ritroso" del progetto della sala a cupola, in modo da poter comprendere, perlomeno nelle sue linee guida essenziali, quelle istanze di carattere estetico, funzionale e costruttivo alla base della concezione architettonica adrianea, e più in generale dell'architettura romana.

La validazione di tali ipotesi ricostruttive, ottenute anche attraverso le analisi strutturali qui esposte, mostra una possibile strategia indirizzata a colmare una lacuna che caratterizza talune ricerche "di area" – spesso incentrate sul conseguimento di risultati specifici che esulano da una comprensione complessiva dei caratteri del progetto e della costruzione antichi. Al contrario, un approccio deontologicamente consapevole, è quello che porta a facilitare le azioni di salvaguardia e promozione attraverso una conoscenza piena e onnicomprensiva, capace cioè di facilitare il compito di chi è tenuto a gestire siti non solo di grande interesse storico-archeologico, ma dal carattere di universalità come Villa Adriana.

Inoltre si è potuto constatare che i risultati ottenuti da questa ricostruzione 'a posteriori' del progetto alla base della Sala Ottagonale delle Piccole Terme non si limitano a fornire una soluzione plausibile e coerente per comprendere la realizzazione di tale ambiente con la temperie tecnico-scientifica

dell'epoca e le scelte della committenza, ma permettono di estendere l'algoritmo geometrico/costruttivo all'interpretazione di altri padiglioni di Villa Adriana, caratterizzati dalle medesime peculiarità: si pensi in particolare alla sala meridionale di Piazza d'Oro e al padiglione di accesso dell'Accademia, che presentano una planimetria di partenza basata sulla figura dell'ottagono declinata in tutte le possibili varianti dell'alternanza di lati concavi e convessi.

B.A, F.F.

BENEDETTA ADEMBRI

Soprintendenza Archeologia Lazio ed Etruria Meridionale
benedetta.adembri@beniculturali.it

ADOLFO ALONSO-DURÁ, FRANCISCO JUAN-VIDAL

Instituto de Restauración del Patrimonio
Universitat Politècnica de València
aalonsod@mes.upv.es, fjuan@ega.upv.es

GIANNA BERTACCHI

Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio
Università degli Studi di Firenze
gianna.bertacchi@unifi.it

SILVIA BERTACCHI, LUCA CIPRIANI, FILIPPO FANTINI

Dipartimento di Architettura
Alma Mater Studiorum Università di Bologna
silvia.bertacchi@unibo.it, luca.cipriani@unibo.it, filippo.fantini2@unibo.it

BEATRIZ SORIANO-ESTEVALIS

Programa ETSA, Escuela de Doctorado
Universitat Politècnica de València
beasoes@arq.upv.es

BIBLIOGRAFIA

- ADEMBRI B., CIPRIANI L., FANTINI F., BERTACCHI S. 2015, *Reverse designing: An integrated method for interpreting ancient architecture*, «SCientific RESearch and Information Technology. Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione», 5, 2, 15-32 (doi: 10.2423/122394303v5n2p15).
- ADEMBRI B., DI TONDO S., FANTINI F. 2015, *Architecture with concave and convex rhythms and its decoration in Hadrian age: The Maritime Theatre and the southern pavilion of Piazza d'Oro in Hadrian's villa*, in E. GASPARINI, P. PENSABENE (eds.), *Proceedings of the Tenth International Conference Interdisciplinary Studies on Ancient Stone (Rome 2012)*, Roma, L'Erma di Bretschneider, 3-12.
- 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 (eds.), *Adriano e la Grecia, Villa Adriana fra classicità ed ellenismo. Studi e ricerche*, Milano, Electa, 81-90.
- ALONSO-DURÁ A. 2003, *Un modelo de integración del análisis estructural en entornos de cad para estructuras de edificación*, Tesi di dottorato, Universitat Politècnica de València.

- ANGLE. Programa de Elementos Finitos. © Adolfo Alonso. Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Politécnica de Valencia.
- APOLLONIO F.I., GAIANI M., REMONDINO F. 2010, *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, in B. BENEDETTI, M. GAIANI, F. REMONDINO (eds.), *Modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei*, Pisa, Edizioni della Normale.
- BARTOLI M.T. 1995, *Scaenographia vitruviana, il disegno delle volte a lacunari tra rappresentazione e costruzione*, «Disegnare Idee Immagini», 9/10, 51-62.
- BERTACCHI S., CIPRIANI L. 2014, *Documentazione del patrimonio architettonico e urbano mediante rilievo laser scanner 3D*, «Bollettino Ingegneri», 11, 15-24.
- BIANCHINI C., FANTINI F. 2015, *Dimensioning of ancient buildings for spectacles through Stereometrica and De mensuris by Heron of Alexandria*, «Nexus Network Journal Architecture and Mathematics», 17, 23-54 (doi: 10.1007/s00004-014-0230-8).
- BLAKE M.E. 1973, *Roman Construction in Italy from Nerva through the Antonines*, Philadelphia, American Philosophical Society.
- CALANDRA E. 1996, *Oltre la Grecia. Alle origini del filellenismo di Adriano*, Perugia, Edizioni scientifiche italiane.
- CALANDRA E. 2013, *Adriano princeps e committente*, in «Forma Urbis», 18, 8.
- CINQUE G.E. 2010, *Approcci preliminari allo studio della pianta della Villa Adriana di Tivoli*, «Romula», 9, 19-53 (<https://rio.upo.es/xmlui/handle/10433/351>).
- CIPRIANI L., FANTINI F., BERTACCHI S. 2014, *Survey and representation of vaults and cupolas: An overview on some relevant Italian UNESCO sites*, in H. THWAITES, S. KENDERDINE, J. SHAW (eds.), *Proceedings of the International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM) (Hong Kong 2014)*, Danvers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 50-57 (doi: 10.1109/VSM.2014.7136682).
- CIPRIANI L., FANTINI F., BERTACCHI S. 2015, *El color en las piedras y los mosaicos de Rávena: nuevas imágenes de los monumentos antiguos a través de la fotogrametría no convencional de última generación*, «Ega. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica», 26, 190-201.
- CONTI C., MARTINES G. 2010, *Hero of Alexandria, Severus and Celer: Treatises and Vaulting at Nero's Time*, in A. SINOPOLI (ed.), *Mechanics and Architecture, Between Epistémè and Técnica*, Roma, Edizioni di Storia e Letteratura, 79-96.
- DE ANGELIS D'OSSAT G. 1936, *Sugli edifici ottagonali a cupola nell'Antichità e nel Medio Evo*, in *Atti del I Congresso Nazionale di Storia dell'Architettura (Firenze 1936)*, Firenze, Sansoni, 13-24.
- DUNCAN-JONES R.P. 1980, *Length-units in Roman town planning: The pes monetalis and the pes drusianus*, «Britannia», 11, Cambridge, Society for the Promotion of Roman Studies.
- FANTINI F. 2009, *Teorie e tecniche della rappresentazione numerica e poligonale*, in R. MIGLIARI (ed.), *Geometria descrittiva, II, Tecniche e applicazioni*, Novara, Città Studi Edizioni, 60-94.
- GAIANI M. (ed.) 2015, *I portici di Bologna. Architettura, modelli 3D e ricerche tecnologiche*, Bologna, Bononia University Press.
- GAIANI M., BENEDETTI B., REMONDINO F. (eds.) 2010, *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa, Edizioni della Normale.
- GIAVARINI C., SAMUELLI FERRETTI A., SANTARELLI M.L. 2006, *Mechanical Characteristics of Roman "opus caementicium"*, in *Fracture and Failure of Natural Building Stones*, Dordrecht, Springer, 107-120.
- HANG S. 2015, *TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator*, «ACM Trans. on Mathematical Software», 41, 2, Article 11 (February 2015) (doi: 10.1145/2629697).
- HIDALGO PRIETO R. 2010, *Il Teatro greco*, in M. SAPELLI (ed.), *Villa Adriana. Una storia mai finita. Novità e prospettive della ricerca*, Milano, Electa, 113-119.
- JACKSON M.D., MARRA M., HAY R.L., CAWOOD C., WINKLER E.M. 2005, *The judicious selection and preservation of tuff and travertine building stone in ancient Rome*, «Archaeometry», 47, 485-510.

- LANCASTER L.C. 2005, *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome. Innovations in Context*, Cambridge, Cambridge University Press.
- MACDONALD W.L., BOYLE B.M. 1980, *The Small Baths at Hadrian's Villa*, «Journal of the Society of Architectural Historians», 39, 5-27 (doi: 10.2307/989488).
- OÑATE E., HANGANU A., BARBAT A. et al. 1996, *Structural analysis and durability assessment of historical constructions using a finite element damage model*, in *Structural Analysis of Historical Constructions*, Barcelona, Cimne, 189-224.
- OPPER TH. 2008, *Hadrian, Empire and Conflict*, London, The British Museum Press.
- PELÀ L. 2009, *Continuum Damage Model for Nonlinear Analysis of Masonry Structures*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Ferrara - Universitat Politècnica de Barcelona.
- PINHO E.M., XAVIER J.P. 2013, *Grid-based design in Roman Villas: A method of analysis*, «Nexus Network Journal», 15, 83-13 (doi: 10.1007/s00004-012-0138-0).
- PUMA P. 2013, *Le Terme di Nerone a Pisa. I rilievi per una nuova piattaforma di comunicazione e divulgazione*, in *Atti del Congreso La Experiencia del reuso, Propuestas Internacionales para la Documentación, Conservación y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico*, Madrid, UPM, 265-271.
- PUCCI M., BLANCO A. 2010, *Ad thermas: A system between private and public life in the ancient town*, in W. BÖRNER, S. UHLIRZ (eds.), *Proceedings of the 15th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2010)*, Wien, Museen der Stadt Wien - Stadtarchäologie, 502-512.
- SVENSHON H. 2010, *Das Bauwerk als "Aistheton Soma". Eine Neuinterpretation der Hagia Sophia im Spiegel Antiker Vermessungslehre und Angewandter Mathematik*, in F. DAIM, J. DRAUSCHKE (eds.), *Sonderdruck aus Byzanz – das Römerreich im Mittelalter*, 2, 1, Vienna, Römisch-Germanisches Zentralmuseums, 59-95.
- VERDIANI G., PUCCI M., BLANCO A. 2009, *The Small Baths in Hadrian's Villa. A ground test for enhancing the approach to the digital survey and reconstruction for archaeologists and architects*, in W. BÖRNER, S. UHLIRZ (eds.), *Proceedings of the 14th International Congress Cultural Heritage and New Technologies (Vienna 2009)*, Wien, Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie, 259-271.
- VISCOGLIOSI A. 2006, *Traiano e gli imperatori adottivi*, in C. BOZZONI, V. FRANCHETTI PARDO, G. ORTOLANI, A. VISCOGLIOSI, *L'architettura del mondo antico*, Bari, Editori Laterza.
- Vitruvio Pollione, *Architettura dai libri I-VII* (trad. S. Ferri), Milano 2002, BUR.
- WARD-PERKINS J.B. 1974, *Architettura Romana* (15th edition), Milano, Electa (trad. it.).

ABSTRACT

For its unique features and size, the Hadrian's Villa site has always been the object of studies and investigations. Italian and foreign institutions, as well as research organizations, are working together with the common purpose of understanding and protecting the universally recognized ensemble of buildings and works of art, belonging to the World Heritage List since 1999. Within this interdisciplinary framework, over the past decade, new technologies for digital documentation in the field of cultural heritage have gained more importance with respect to the traditional field of architectural/archaeological surveying. Through expeditious surveying – with no physical contact with the object and different measurement resolutions – several 3D reality-based models were created in the last years, with special regards to the Villa's pavilions characterized by more complex and daring shapes. The aim was a better understanding of specific problems in those cases where archaeological investigation methods may take advantage of a correct and complete digital surveying of elevations in general and in particular of vaulted spaces, intrados and extrados surfaces. 3D digital models of complex roofing, as shown in the case study of the Small Baths, provide additional advantages concerning the use of finite elements analysis (FEA). Both the digital models (current state of conservation and reconstruction hypothesis) underwent to an accurate stress analysis that enables further achievements for site conservation and management and for ancient constructive and designing techniques.