



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in
Architettura Costruzione Città
Architettura per la Sostenibilità

A.a. 2024/2025

Relatrice: Elisabetta Caterina Giovannini

Correlatore: Giorgio Verdiani

Candidati: Laura Orsola Ochavo, Federica Racciu

ECHOES OF ATHENA

Priene in 3D: Applicazioni digitali per la riscoperta di un patrimonio perduto

INDICE

ABSTRACT	6	PROGETTAZIONE DELL'ESPERIENZA IMPLEMENTAZIONE TECNICA TEST E VALUTAZIONE	137 144 151
INTRODUZIONE	8		
ROVINE DELLA TURCHIA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO IN ASIA MINORE PRIENE	12 13 23	CONCLUSIONI	160
HBIM PER L'ARCHEOLOGIA HISTORICAL BUILDING INFORMATION MODELING L'EVOLUZIONE DEL RILIEVO NUVOLE DI PUNTI ARCHEOBIM HERITAGE BIM: CASI STUDIO	38 39 41 47 51 53	TAVOLE	162
TECNOLOGIE AR&VR NASCITA E SVILUPPO PATRIMONIO VIRTUALE E MUSEOGRAFIA	60 61 69	BIBLIOGRAFIA	188
GENESI VIRTUALE DEL BENE METODOLOGIE E OBIETTIVI DELLA RICOSTRUZIONE IMPOSTAZIONE DEL MODELLO LE FAMIGLIE CARICABILI: GLI ORDINI ARCHITETTONICI FAMIGLIE DI SISTEMA: MURI, PAVIMENTI E COPERTURE DETTAGLI SCULTORI E APPARATO ORNAMENTALE GESTIONE DEI MATERIALI E TEXTURE ANALISI E VERIFICHE CONCLUSIONI SULLA RICOSTRUZIONE	78 79 85 89 107 111 114 118 122	SITOGRAFIA	190
ECHOES OF ATHENA VR INTRODUZIONE ALLA REALTÁ VIRTUALE OBIETTIVI E FINALITÁ DELL'ESPERIENZA VR METODOLOGIE E TECNOLOGIE	124 125 127 131	ICONOGRAFIA	192

ABSTRACT

Questa tesi si propone di formare un quadro generale delle tecnologie ad oggi disponibili per la restituzione del patrimonio culturale archeologico, nello specifico facendo riferimento al caso studio di Priene, città greca dell'Asia minore sita sulle anse del fiume Meandro.

Nel corso della ricerca verranno sviluppati modelli BIM per la documentazione e l'analisi del sito archeologico, accompagnati da soluzioni interattive basate su VR per la fruizione da parte del pubblico.

Bisogna chiarire che gli esiti della modellazione saranno soggetti ad imperfezioni, in quanto non possiamo verificare la completa attendibilità delle fonti archeologiche.

L'obiettivo della tesi non si limita a sperimentare l'applicazione di queste tecnologie sul sito di Priene, ma ambisce a sviluppare un prototipo di riferimento per la musealizzazione virtuale del patrimonio archeologico e architettonico e più in generale ovunque ci siano delle strutture da riportare alla vita originale, seppure digitale.

INTRODUZIONE

Questa ricerca si inserisce in ambito della digitalizzazione del patrimonio culturale, con l'utilizzo del Building information modeling (BIM) e realtà virtuale (VR), le quali sono tecnologie utilizzate per l'analisi, la documentazione e la divulgazione di beni archeologici. In questo contesto si pone il progetto Echoes of Atena, che si propone come caso studio applicabile in altri ambiti.

Gli obiettivi principali della ricerca sono la ricostruzione digitale del complesso archeologico di Priene e la divulgazione della stessa attraverso la realtà virtuale. Il desiderio finale è quello di offrire una rappresentazione accurata del sito archeologico e di proporre un nuovo modo di fare informazione, integrando dati storici, archeologici e costruttivi, per renderli accessibili al più vasto pubblico possibile, coprendo sia interessi di ricerca che finalità divulgative e ludiche.

La scelta di operare su Priene, antica città greca situata sulla costa dell'Asia Minore, nell'attuale Turchia, nasce dalla coscienza che nello stato attuale del sito archeologico non è possibile un accesso facilitato né una comprensione completa del complesso architettonico.

Nell'attualità i ruderi, pur mentendo valore storico, risultano frammentari e compromessi, per questo, la modellazione si è basata principalmente sulle fonti storiche elaborate dagli archeologi tedeschi nel XIX secolo, in particolare nei lavori di Hennemeyer e Koenigs che analizzano le strutture secondarie e il tempio principale.¹²

Queste fonti hanno rappresentato un riferimento fondamentale per la definizione delle geometrie dei rapporti compositivi dell'intero complesso, consentendo di verificare i dati rilevati dalle evidenze archeologiche visibili nell'attualità sul sito.

Oltre alla documentazione e alla ricostruzione del sito archeologico, la ricerca studia le possibilità offerte dal BIM come strumento per lo studio e la divulgazione del patrimonio storico al pubblico, creando nuovi orizzonti di valorizzazione culturale. Il modello inoltre potrà essere impiegato sia nell'ambito accademico, come comparazione tipologica, sia in ambito

1 - Hennemeyer, Arnd. Das Athenaheiligtum von Priene. Die Nebenbauten – Altar, Halle und Propylon – und die bauliche Entwicklung des Heiligtums. Wiesbaden: Reichert Verlag, 2013.

2 - Koenigs, Wolf. Der Athenatempel von Priene. Archäologische Forschungen Bd. 33 (Priene Bd. 3). Wiesbaden: Reichert Verlag, 2015.

museale e divulgativa, attraverso installazioni VR e piattaforme online per arrivare ad un pubblico più ampio.

L'altro obiettivo della tesi è quello di esplorare la comunicazione e la immersività della ricostruzione di Priene, attraverso l'utilizzo della realtà virtuale (VR). Il modello realizzato diventa uno strumento di divulgazione accessibile, creato per valorizzare la comprensione dell'ambiente architettonico favorendo diverse modalità di fruizione dell'architettura. L'esperienza attraverso il VR consente la restituzione della scala e l'atmosfera del complesso, permettendo agli studiosi, ai visitatori e agli studenti la possibilità di esplorare il patrimonio in modo diretto e intuitivo.

La ricerca, infine si propone come caso applicativo replicabile, capace di offrire un modello esplicativo ed estendibile ad altri siti archeologici e di patrimonio.

ROVINE DELLA TURCHIA

«Il luogo sembra scelto dagli dèi stessi per la sua sacralità.»



Figura 1 - Vista del santuario di Apollo a Delfi

VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO IN ASIA MINORE

Il tema della valorizzazione delle aree archeologiche presenti in Asia Minore si inquadra in un dibattito più ampio anche a livello internazionale sul paesaggio culturale, dove i reperti e la vegetazione formano un sistema unitario che ha come scopo la fruizione da parte del pubblico oltre che la conservazione delle rovine.

Il rapporto tra le rovine e la vegetazione o contesto paesaggistico in cui esse si trovano venne sottolineata già da Plinio il Vecchio nel suo scritto *“Naturalis Historia”* del 77-78 d.C, che auspica la conservazione del contesto e la protezione dagli elementi naturali per difenderli dallo sfruttamento. Allo stesso modo, Pausania dichiara che il rudere acquista significato solo se integrato nel suo contesto naturale, come vediamo ad esempio all'interno del Libro X, 5, 1 della *Periegesi della Grecia* del II secolo d.C. (in greco: *Ελλάδος περιήγησις*), in cui descrive il Santuario di Apollo a Delfi:

«Il santuario di Apollo a Delfi è situato in una regione che per bellezza e maestosità supera ogni altra. Ai piedi del Parnaso, circondato da una gola profonda, il luogo sembra scelto dagli dèi stessi per la sua sacralità.»¹

Questa concezione che lega strettamente il paesaggio con la rovina, si è tradotta in tempi recenti con il concetto di parco archeologico: un luogo di incontro tra elementi architettonici ed elementi naturali. Il parco si distingue inoltre dal paesaggio archeologico, ovvero una porzione di territorio che non ha specifiche caratteristiche riconducibili al parco, ma con un legame ancora più stretto tra l'elemento archeologico e quello naturale. Il paesaggio archeologico affonda le sue radici nel concetto di paesaggio culturale, formalizzato dall'UNESCO nel 1992 come:

1- Pausania, *Guida della Grecia (Periegesi della Grecia)*, libro X, 5, 1, a cura di Umberto Bultrighini e Mario Torelli, Milano, Mondadori, 2017

«il paesaggio culturale è una proprietà culturale e rappresenta “il lavoro combinato di natura e uomo” [...]. È rappresentativo dell’evoluzione della società umana e dei suoi insediamenti nel tempo, condizionato da limiti fisici e/o opportunità rappresentate dal paesaggio naturale e successive forze sociali, economiche e culturali sia esterne sia interne.»²

Questa definizione rafforza ulteriormente l’unione tra natura e uomo come un lavoro, uno sforzo combinato da entrambe le parti che genera paesaggi straordinari.

Esistono vari interventi nelle aree archeologiche in Turchia che provocano riflessioni riguardo alla conservazione del patrimonio archeologico in un quadro delicato tra l’esigenza di omologazione agli standard occidentali per la fruizione del patrimonio a fini turistici e l’integrità del patrimonio stesso.

Patrimonio UNESCO in Turchia Questa ricerca di standard museografici e turistici per il patrimonio ha inizio negli anni Ottanta del secolo scorso, quando tre siti in Turchia vengono inseriti nella lista UNESCO. Nel 1985 viene aggiunto il Parco Nazionale di Göreme dove si possono osservare le chiese rupestri della Cappadocia. Il secondo paesaggio archeologico è il Monte Nemrud Dag e il Mausoleo di Antioco I, aggiunto alla prestigiosa lista nel 1987, dove le terrazze, i tumuli, le statue e le architetture funerarie si fondono con il paesaggio. Infine, nel 1988 viene identificato il terzo sito: l’antica Hierapolis. In questo caso sono le sorgenti di acque termali che hanno scolpito il terreno con cascate di travertino bianco.

Sempre negli anni Ottanta, a sostegno di questa visione integrata tra natura e archeologia, viene approvata la legge turca sulla Tutela per la Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali n.2863 del 1983, che nell’articolo 1 recita:

«Lo scopo della presente legge è definire i beni culturali e naturali mobili e immobili che devono essere protetti, regolamentarne le procedure e le attività, e stabilire l’istituzione e i compiti degli organismi che prenderanno le decisioni operative e applicative»³

2 - UNESCO, Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention Copia archiviata, su whc.unesco.org, UNESCO World Heritage Centre, Parigi, 2005, pagina 83

3 - Legge turca n. 2863 del 21 luglio 1983 (Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu), articolo 1



Figura 2 - Vista aerea del Parco Nazionale di Göreme, da “OUR PLACE The World Heritage Collection”, 2010



Figura 3 - Terrazzamenti di travertino a Hierapolis-Pumakkale, da Umut Özdemir

Riproponendosi di proteggere e regolamentare i beni culturali (patrimonio archeologico) e beni naturali (patrimonio naturale) alla stessa maniera, mettendoli sullo stesso piano di importanza. Tuttavia i buoni propositi della legge 2863 sono spesso sovrastati dagli organismi locali (come le Assemblee Regionali), sabotando le politiche di salvaguardia delle aree archeologiche, spesso autorizzando gli enti comunali a costruire in queste aree per aumentare l'appetibilità dei luoghi agli occhi dei turisti, come ad esempio con strutture alberghiere ad Efeso o Pergamo.⁴

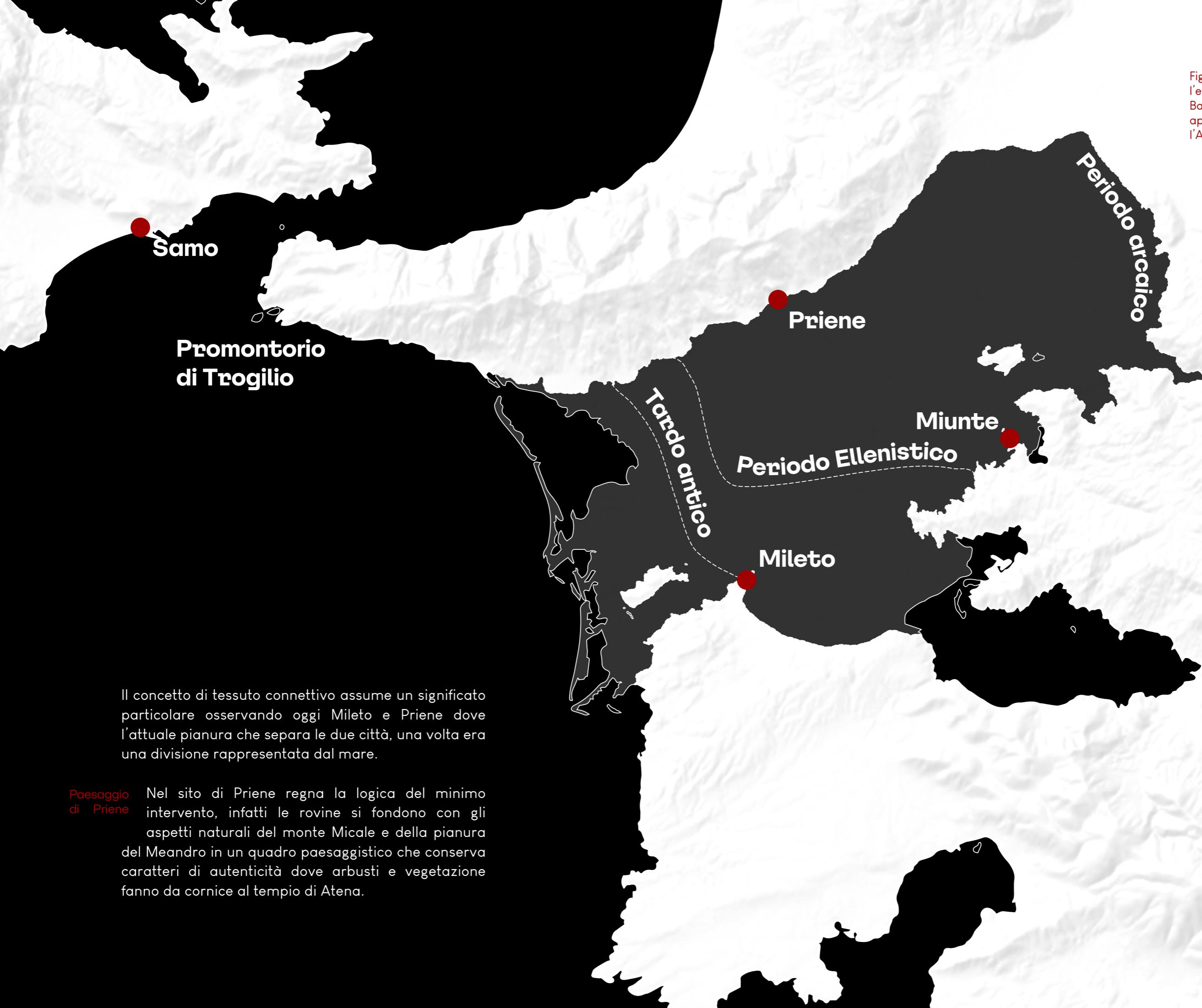
In alcuni casi però, possiamo osservare l'impegno degli enti locali per determinate scelte sulla conservazione e valorizzazione dei ruderi e del loro tessuto connettivo, ovvero del paesaggio che li circonda connettendoli ad altre rovine circostanti o a tessuti urbani, che, abbandonata la pratica di ricostruzione, hanno favorito una maggiore integrazione tra le rovine e l'ambiente naturale attraverso la logica del minimo intervento.



Figura 4 - Monte Micale visto dall'isola di Samos, dallo stretto di Micale

4 - Emanuele Romeo, *Problemi di conservazione e restauro in Turchia*, Torino, Celid, 2008, pagina 44

Figura 5 – Mappa che mostra l’evoluzione dell’insabbiamento della Baia di Mileto a causa degli alluvioni apportati dal fiume Meandro durante l’Antichità, elaborazione propria





La tesi proposta secoli fa da Pausania si ritrova quindi confermata nel paesaggio archeologico odierno: la Turchia possiede numerose porzioni di territorio dove paesaggio e rudere sono inscindibili, in cui l'uno viene valorizzato grazie alla sola presenza dell'altro.

Figura 6 – Rovine del Tempio di Atena a Priene, elaborazione propria, 2025.

ROVINE DELLA TURCHIA

PRIENE

La porta della Lega Ionica

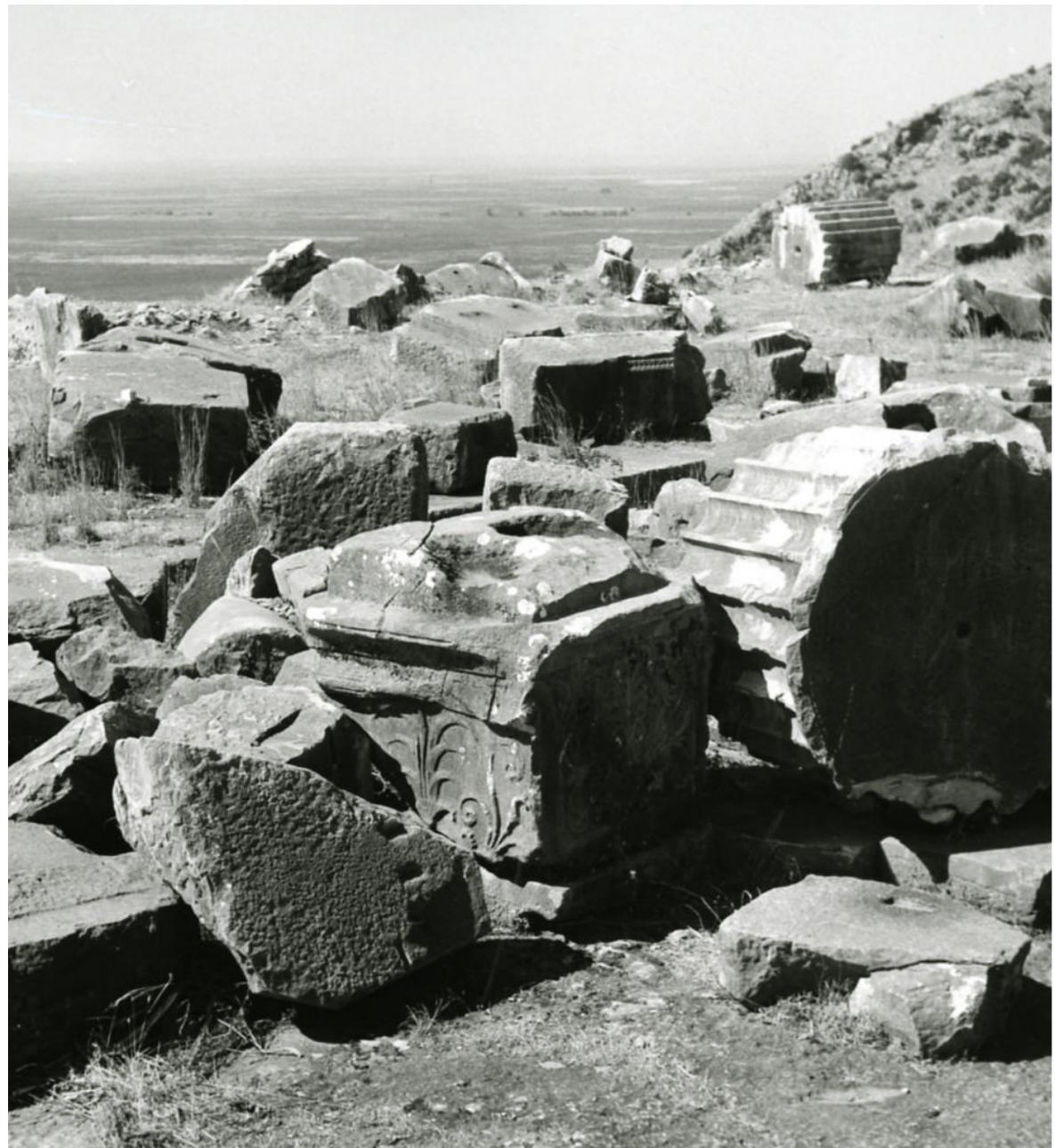


Figura 7 - Rovine del Tempio di Atena a Priene, da Paolo Monti, 1962

Priene (in greco antico: Πριήνη) era una città greca dell'Asia minore sita sulle anse del fiume Meandro. Fu uno dei primi insediamenti greci nella regione della Ionia (in greco antico: Ιωνία), ovvero l'antica regione costiera dell'Asia Minore che deve il suo nome agli Ioni, suoi fondatori di stirpe ellenica. L'insediamento fu selezionato per la sua vicinanza al Panionion (in greco antico: Πανιώνιον), il santuario ionico dedicato a Poseidone e luogo di incontro della Lega ionica quindi centro politico e religioso.

Teorie sullo spostamento di Priene

Il sito di Priene è soggetto a varie teorie che trattano del suo spostamento: i primi archeologi a trattare la teoria furono Theodor Wiegand e Hans Schrader che, effettuando degli scavi nei primi anni del Novecento, non trovarono reperti risalenti a periodi precedenti a quello Ellenistico. Da ciò concluirono che la città doveva essere stata spostata verso il IV secolo a.C. per problemi dovuti a fenomeni naturali come l'insabbiamento del fiume Meandro o un terremoto.

La teoria è stata sostenuta successivamente anche da altri due studiosi britannici: George Ewart Bean e Robert Manuel Cook, che invece attribuiscono lo spostamento agli Ecatomnidi (dinastia della Caria, regione storica nell'ovest dell'Anatolia), per motivi geopolitici. Tuttavia, queste ipotesi vengono messe in crisi dal fatto che manchino testimonianze del tempo da parte di storici dell'epoca come Strabone o Pausania. Anzi, Pausania descrive Priene come una città che non abbandonò mai la propria sede nonostante le difficoltà:

«Gli abitanti di Miunte, oppressi dalle zanzare generate dalla palude, abbandonarono la città e si trasferirono a Mileto, portando con sé le immagini delle divinità e gli altri beni mobili. Ai miei tempi, a Miunte non restava nulla, tranne un tempio di Dioniso in marmo bianco. Una sorte simile toccò agli abitanti di Atarneo, città situata sotto il monte Pergamo. I Prieni, invece,

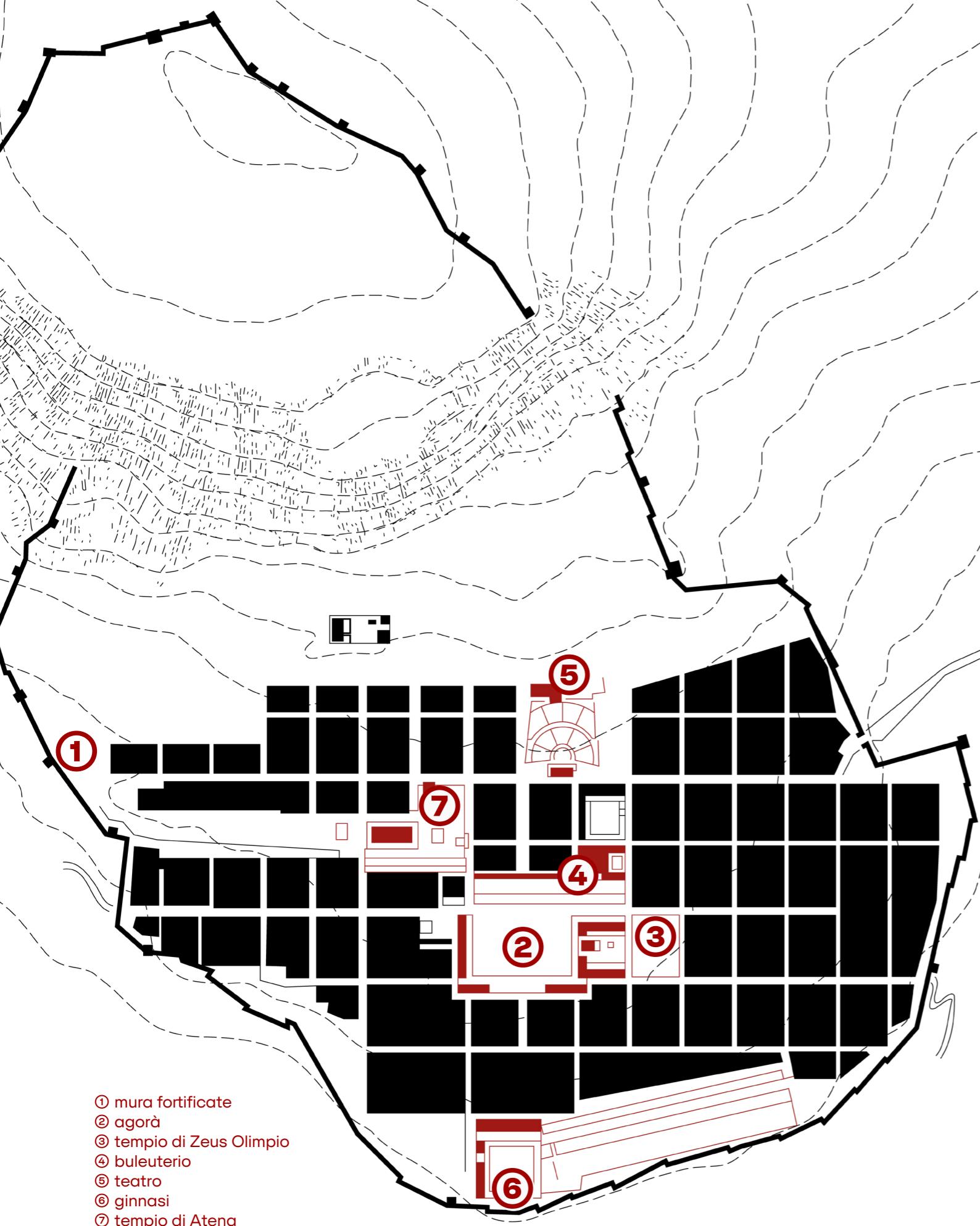


Figura 8 - Pianta generale di Priene con evidenziati i principali punti di interesse, elaborazione propria

pur avendo sofferto molto, non abbandonarono mai la loro città.»¹

Nei testi storici la città subì guerre, distruzioni e cambi di dominio, ma rimase comunque presente nelle fonti in maniera coerente e in riferimento alla stessa posizione geografica. Anche la sua assenza da documenti, come le liste tributarie di Atene, può essere spiegata con guerre o carestie. Quindi sono le testimonianze letterarie dell'epoca a confermarci che Priene sia sempre rimasta nel suo sito originale.

La città di Priene aveva un porto, chiamato Naulochos, la cui posizione esatta è stata discussa a lungo tra gli studiosi. Priene originariamente si affacciava sul fiume Meandro, tuttavia, nel tempo il corso del fiume è stato deviato, escludendo l'ipotesi che il porto si trovasse sul corso d'acqua del fiume. Inoltre, la zona a valle di Priene si trova a 60 metri sopra al livello del mare, questo significa che già in epoca antica quella parte della baia era interrata per via dei depositi del fiume Meandro (oggi Büyük Menderes) che avevano prosciugato il mare.

Nelle fonti dell'epoca possiamo leggere come Strabone nella Geografia libro XIV, paragrafo 1.14 scrive:

«Da Trogilio vi sono quaranta stadi fino a Samo. Essa guarda a sud, così come il porto che possiede un arsenale navale.»²

Dove Trogilio era una città su un promontorio del monte Micale, vicino a Priene. Dunque si può dedurre che il porto di Priene si trovasse o 40 stadi ad ovest, o a sud. Verso sud si trova, ancora oggi, una piana fangosa alluvionale, poco adatta ad un porto. È più probabile quindi, che il porto si trovasse ad ovest, in corrispondenza di pendii montuosi e lagune.

Priene non ebbe mai un ruolo politico degno di rilievo, fu dapprima sottoposta all'influenza e alla dominazione ateniese, poi passò al Regno di Pergamo e infine a Roma, che cominciò ad amministrarla verso la metà del II secolo a.C.

La muraglia Subito dopo la sua fondazione la città fu circondata da una muraglia, costruita interamente in marmo locale ① che ancora oggi risulta essere

1 - Pausania, *Guida della Grecia (Periegesi della Grecia)*, libro VII, 2, 10, a cura di Umberto Bultrighini e Mario Torelli, Milano, Mondadori, 2017

2 - Strabone, *Geografia*, libro XIV, 1, 14, traduzione di Nicola Biffi, Edipuglia, Bari, 2009

in ottime condizioni, presentando lo stesso tipo di pianta a denti che si può osservare nelle mura della città di Troia, con sporgenze separate da brevi intervalli. L'entrata principale era una porta a nord-est, accompagnata da altri due ingressi, uno ad ovest e uno ad est, alle estremità di una strada principale che attraversa la stoà porticata a sud dell'agorà.

Priene fu costruita secondo il sistema di Ippodamo da Mileto, ovvero secondo un piano urbano in cui le strade si incrociano ad angolo retto. Molti degli edifici più importanti erano orientati a sud, come il teatro, il ginnasio, la stoà sacra, la stoà a sud del tempio di Atena e i saloni di molte case. In questo modo, le sale di accoglienza ricevevano il sole tutto l'inverno.

In generale, ogni blocco presentava quattro case, mentre gli edifici ufficiali e quelli religiosi occupavano interamente due o tre isolati. Priene era alimentata con acqua dalle montagne da un acquedotto che penetrava nella città attraverso la muraglia a nord-est. Dopo che l'acqua era stata suddivisa in tre bacini, veniva distribuita in tutta la città attraverso condutture di terracotta.



Figura 9 - Disegno a matita di Priene, da Johann Adam Zippelius 1895-1898

La città presenta tutti i luoghi e gli edifici più importanti delle città greche antiche, come l'agorà, il santuario di Zeus Olimpico, il buleuterio, il teatro, i ginnasi. Inoltre, come caso particolare presenta anche una villa, appartenente ad Alessandro Magno.

L'agorà e il mercato L'agorà ② occupava quasi due blocchi e costituiva il centro della città e lungo i suoi lati erano stati costruiti delle stoà in stile dorico.

Come tutte le piazze di mercato delle città greche, era uno spazio aperto dove si tenevano le riunioni pubbliche, si celebravano le feste e si trattavano gli affari. Era presente un mercato separato per il cibo, nel quale si vendevano verdure, frutta, carne, cereali e vestiti, era vicino all'agorà sul suo lato ovest. Nell'antichità, la piazza dell'agorà e gli spazi che si trovano davanti alle stoà erano coperti da statue commemorative sia in bronzo che in marmo con quest'ultime che venivano dipinte con colori vivaci, come gli edifici vicini, in blu e rosso vivo.

Santuario di Zeus Olimpico Il santuario di Zeus Olimpico ③ era situato accanto alla stoà orientale dell'agorà. Questo recinto sacro, risalente al III secolo

a.C. fu costruito in stile ionico con parecchie similitudini con il tempio di Atena e la cosa non è casuale visto che i due edifici condividono lo stesso architetto: Pitide di Priene, noto come Piteo. E così le basi delle colonne, la forma e la composizione della sima corrispondono al modello che si trova nel tempio di Atena.



Figura 10 - Stato attuale dell'Agorà di Priene, elaborazione propria, 2025.

Figura 11 - Stato attuale del bulleuterio, elaborazione propria, 2025.



Il buleuterio Il buleuterio ④ è uno degli edifici meglio conservati di Priene. Assieme al pritaneo (luogo per i sacrifici), coprono un intero isolato. Il buleuterio era una sala con un altare al centro e gradini usati come posti a sedere, che si elevano parallelamente alle pareti su tre lati.

Sui quattro lati dell'altare erano raffigurati busti di divinità in forma di immagini clipeata, ovvero ritratti racchiusi da una cornice tonda e bucrazi, un ornamento inciso, un muso che rappresenta il cranio di un bue le cui corna sono inghirlandate di fogliame. La sala era coperta da un tetto con intelaiatura di legno.

Il teatro e l'Ekklesia Il teatro ⑤ situato a nord-ovest della città, fu una delle opere principali non solo dell'epoca ellenistica a Priene, ma di tutta l'antichità. Il teatro era il luogo dove si svolgevano le opere drammatiche e dove si teneva un gran numero di attività culturali. Inoltre, era usato come luogo di riunione dell'Ekklesia, o assemblea del popolo. Secondo lo stile dei teatri dell'epoca classica ed ellenistica, aveva una forma a ferro di cavallo e i parodoi (corridoi laterali) erano obliqui. La sala presenta seicentoquaranta posti a sedere destinati ai membri del senato e non è quindi un luogo di riunione del popolo per il quale si ricorreva al teatro, che aveva una capacità di ben cinquemila posti.

Figura 12 sotto - Teatro ellenistico di Priene. Fotografia realizzata dall'autrice, 2025



I ginnasi I ginnasi ⑥ nella città di Priene erano due: uno a nord del buleuterio e l’altro a sud della città. Il ginnasio superiore aveva la scuola e il centro di allenamento atletico più antichi di Priene mentre quello inferiore suggerisce l’atmosfera di una scuola e di un centro di atletica ellenistico.

Gli studenti scrivevano il proprio nome con sulla parete di fondo e Ogni iscrizione inizia con la menzione del luogo, «o *topos*», a volte seguita dal nome dello studente, ed eventualmente da quello di suo padre, entrambi al genitivo.

Una parte di grande rilevanza nella storia urbanistica e religiosa di Priene fu la realizzazione del santuario di Atena Polias. Nella sua configurazione originaria, il complesso era costituito dal tempio dedicato alla dea, edificato su una terrazza artificiale, e dall'altare collocato di fronte al tempio, in asse con il centro della cella, destinato alle ceremonie pubbliche.

In una fase successiva venne costruito, sul lato orientale della terrazza, il propileo. Un edificio che serviva da ingresso per le ceremonie. Fu inoltre edificata la tesoriera, una sala di servizio che poteva essere usata anche per le riunioni e l'intero complesso venne integrato nel sistema urbano esistente attraverso gradinate e rampe di accesso.

Più tardi, in epoca romana, apparvero ulteriori modifiche al santuario, principalmente di carattere decorativo, con interventi su modanature, rilievi e strutture architettoniche secondarie.

Tempio di Atena Uno degli edifici più importanti e antichi della città di Priene è il Tempio di Atena ⑦, costruito nel punto più alto della città, ad un'altezza di quasi 100m sul livello del mare. Atena era la divinità principale venerata in Asia minore Occidentale già a partire dal VII secolo a.C.

Il tempio fu costruito e progettato da Piteo, e divenne il modello classico di architettura ionica. Secondo Vitruvio, Piteo pubblicò un libro che esponeva i suoi principi architettonici. La pianificazione e costruzione principale lo colloca nella fase tardo-classica/ellenistica iniziale, compatibile con la fase di attività architettonica in Caria tra IV sec a.C. e inizi III secolo a.C.

Questo edificio era un periptero a 6 colonne sui lati piccoli e 11 su quelli lunghi, di ordine ionico. Secondo l'analisi di Koenigs, il progetto si basa su una spaziatura modulare della campata pari a 353,3 cm corrispondente a 12 piedi attici, che determina la disposizione delle colonne e la griglia planimetrica dell'edificio.

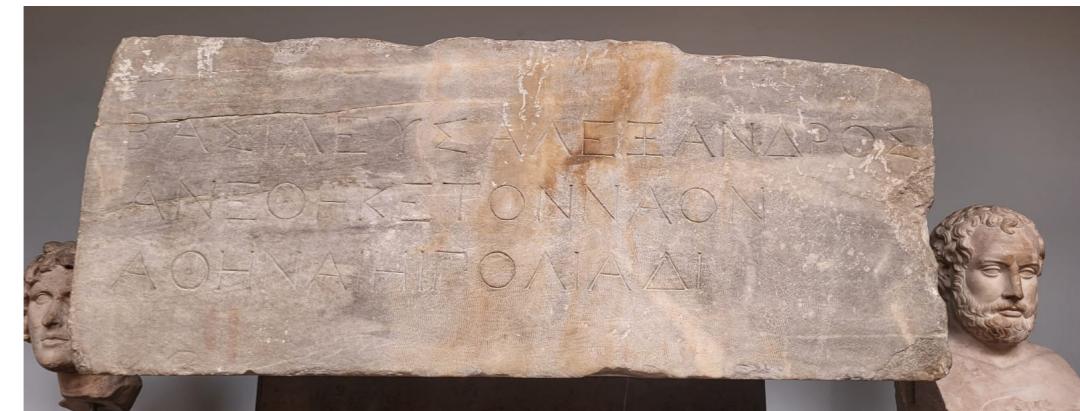
Le dimensioni dello stilobate erano di 37,20 m per 19,55 m. L'intero naos misurava 100 piedi attici, cioè 29,5 m di lunghezza. La cella era lunga 50 piedi e il pronao 30. L'opistodomo era molto piccolo, avendo solo 12 piedi o 3,53 m di lunghezza.

I lati del tempio erano alti 50 piedi, che era la lunghezza della cella; le colonne erano di 43 piedi, i restanti 7 piedi sono quelli della trabeazione. Il materiale di costruzione era il marmo locale di Mykale. Le decorazioni architettoniche erano originariamente dipinte, con prevalenza di tonalità

Figura 13 - Colonne ricostruite per anastilosi del tempio di Atena Polias a Priene, elaborazione propria, 2025.



Figura 14 – Iscrizione dedicatoria di Alessandro Magno del tempio di Atena Polias a Priene, al British Museum di Londra, elaborazione propria, 2025.



rosse e blu, secondo una prassi diffusa nell'architettura ionica dell'epoca. La scansione in altezza del tempio di Atena può essere descritta in questo ordine:

1. La piattaforma a crepidoma con tre gradini
2. La base della colonna, detta efesina, è composta da un plinto quadrato dove si poggia il tondino (modanatura convessa), sopra la quale si trova una gola. Sopra questa ci sono due scozie (scanalature concave) separate da tondini. La parte finale dove si poggia il fusto e il toro e un tondino.
3. La colonna. Il diametro inferiore della colonna è di un decimo dell'altezza del fusto che porta ventiquattro scanalature
4. Il capitello, è composto da un'echina scolpita con ovoli e punte di lancia, da due volute, da un canale (tra le due volute) bordato da piccole modanature, e da un abaco in cima, di forma "cyma reversa", decorato con motivi fogliati lesbi.
5. La trabeazione inizia con un architrave composto da tre fasce, sopra a tutto ciò, si trovano i dentelli, che rappresentano le estremità delle travi di legno. Al di sopra dei dentelli ci sono ancora ovoli, disposti su un altro astragalo decorato con perle e spirali, e infine si trova la cornice e la sima (la grondaia decorata)

Il pronao del tempio era più grande rispetto ai progetti più antichi, caratteristica che persiste nel periodo successivo e nell'epoca ellenistica media. Dietro alla cella, Piteo include un piccolo opistodomo. Il tempio nel suo insieme non suscitò particolare ammirazione, poiché seguiva scolasticamente lo schema del tempio dorico.

La costruzione della parte orientale del tempio iniziò a metà del IV secolo a.C. e fu completata da Alessandro Magno, come riporta un'iscrizione su un blocco del naos: "Re Alessandro dedicò il tempo ad "Atena Polias" (Atena della città), epiteto che identifica Atena come protettrice delle città, una dicitura riscontrabile anche in molte altre poleis a partire da Atene. Mentre la metà occidentale presenta uno stile di decorazione diverso e tardivo e non sembra essere stata terminata prima della metà del II secolo a.C. quando furono rifatti la statua cultuale e l'altare.

La statua cultuale di Atena la rappresenta in posizione eretta, con il suo elmo e l'egida, mentre tiene lo scudo e la lancia e una piccola Nike nella mano destra tesa, una rappresentazione che somiglia molto alla

scultura di Fidia di Atena del Partenone. A giudicare da questi resti, la statua doveva essere alta 6,5 metri, cioè la metà dell'altezza dell'Atena del Partenone sull'Acropoli di Atene.

Attorno al tempio, punto centrale del santuario, si sviluppava un complesso sistema di spazi pubblici e di strutture architettoniche che ne amplificavano la funzione religiosa e urbana: l'altare, il propileo e la terrazza ne sono testimonianza diretta.

L'Altare di Atene

L'altare era posizionato frontalmente rispetto al tempio, in posizione centrale, costituiva: il centro culturale del santuario nel quale venivano realizzati i sacrifici offerti alla divinità principale Atene.

Grazie alle analisi dei frammenti ritrovati del sito archeologico, è possibile affermare che l'altare presentava una forma rettangolare dalle proporzioni armoniche, perfettamente in asse con la visuale del tempio. La struttura richiama idealmente quella dell'altare di Zeus a Pergamo, il quale è caratterizzato dalla sua forma monumentale, è caratterizzato da una scalinata centrale incastrata tra due ali, realizzate attraverso due file di colonne, è ornata da divinità e giganti è oggi conservata presso il museo archeologico di Istanbul.

Dal punto di vista architettonico, l'altare riprende le proporzioni del tempio, era dotato di semicolonne di circa 2,58 metri, le quali poggiavano su uno stilobate a due gradini. Le colonne, diversamente dal tempio, presentano un base attica, con fusto scanalato, e capitelli ionici. L'architrave, invece era composta da due fasce sovrapposte, con una dentellatura continua e un geison ionico con sima decorata.

Dal punto di vista compositivo riprendeva le caratteristiche, come citato prima dell'altare di Zeus a Pergamo, presentava su 3 lati le file di colonne,

Figura 15 - Tempio di Atena a Priene, elaborazione propria, 2025.



intercalate da sculture dedicate alle divinità. La scalinata centrale permetteva una visuale più elevata e ospitava centralmente il tavolo sacrificale.

L'altare, posizionato centrale al complesso, accentuando la spettacolarità del rito, le proporzioni simmetriche e la posizione rialzata permettevano l'accessibilità anche a un vasto numero di partecipanti.

Il propileo rappresentava il punto di accesso, quindi la divisione tra la città laica e lo spazio laico, agendo come punto di vista importante per l'accesso al santuario. Realizzato sul lato orientale del complesso, esso inquadra lateralmente la visuale verso l'altare e il tempio, costituiva infatti il primo passo del percorso nel complesso monumentale.

La posizione alla sommità della scalinata monumentale ne accentua la funzione di filtro visivo.

Il propileo, secondo le fonti storiche, presenta almeno due fasi costruttive: la prima fase, di epoca classica, caratterizzata da un impianto più contenuto, con forme più semplici, una seconda fase, contraddistinta da ampliamenti di forma oltre che da un apparato ornamentale più complesso.

Figura 16 - Vista dell'altare del santuario di Atena Polias a Priene da sud-est, elaborazione propria, 2025



Dal punto di vista architettonico il propileo; termine che designa letteralmente una costruzione edificata davanti (pro) ad un'entrata (pylh) aveva una funzione di controllo sull'afflusso di persone in entrata e uscita. Inoltre probabilmente aveva una funzione non solo di controllo di afflusso ma anche la necessità non solo di solennizzare il passaggio, ma di nascondere i dislivelli del terreno.

Il Propileo Il propileo è caratterizzato dalla classica forma ad "H" già consolidata in età arcaica e un antiprostilo. L'elemento chiave di grande che rende possibile il santuario e la realizzazione della terrazza, infatti l'intero complesso è sostenuto da mura di contenimento che permettevano di isolare lo spazio sacro, esaltando la monumentalità del complesso.

La terrazza costruttiva una piattaforma destinata ad accogliere tutto gli elementi del santuario: il tempio, il propileo e l'alter e la tesoriera. L'affaccio alla città e all'agorà era delimitato da una fila di colonne doriche, le quali permettevano una visuale unitaria non solo sul mare ma anche sulla città.

La Terrazza Dal punto di vista urbanistico la terrazza rappresentava una soluzione simbolica e ingegneristica, ovvero permetteva di innalzare il complesso e dare un senso di importanza e maestosità ai santuari oltre a separare il complesso dalla città.

Figura 17 - Vista del propileo del santuario di Atena a Priene, ripreso da est, 2025



In generale è possibile distinguere diverse fasi di realizzazione del santuario di Atena Polias. Sono fasi che riflettono in modo chiaro la crescita e l'evoluzione della città di Priene. Tra queste la prima fase corrisponde alla costruzione delle strutture fondamentali del complesso, come il tempio e l'altare.

A questa fase iniziale seguì un ampliamento monumentale, che vide l'edificazione del propileo sul lato orientale, la sistemazione della terrazza artificiale e la tesoriera. Questi interventi rispondono a una volontà di monumentalizzazione dello spazio sacro e di integrazione scenografica con il tessuto urbano.

La Tesoriera La tesoriera, era la sala di riunione o di servizio culturale, utilizzate anche per conservare le offerte di valore, come quelle dei santuari di Delfi e Olimpo, infatti avevano un importanza simbolica perché rappresentavano la ricchezza e il prestigio della città. Rimanendo poche tracce di questo spazio si possono identificare principalmente la posizione e la composizione del crepidoma e stilobate.



Figura 18 - Vista della terrazza sacra del santuario di Atena a Priene, elaborazione propria, 2025.

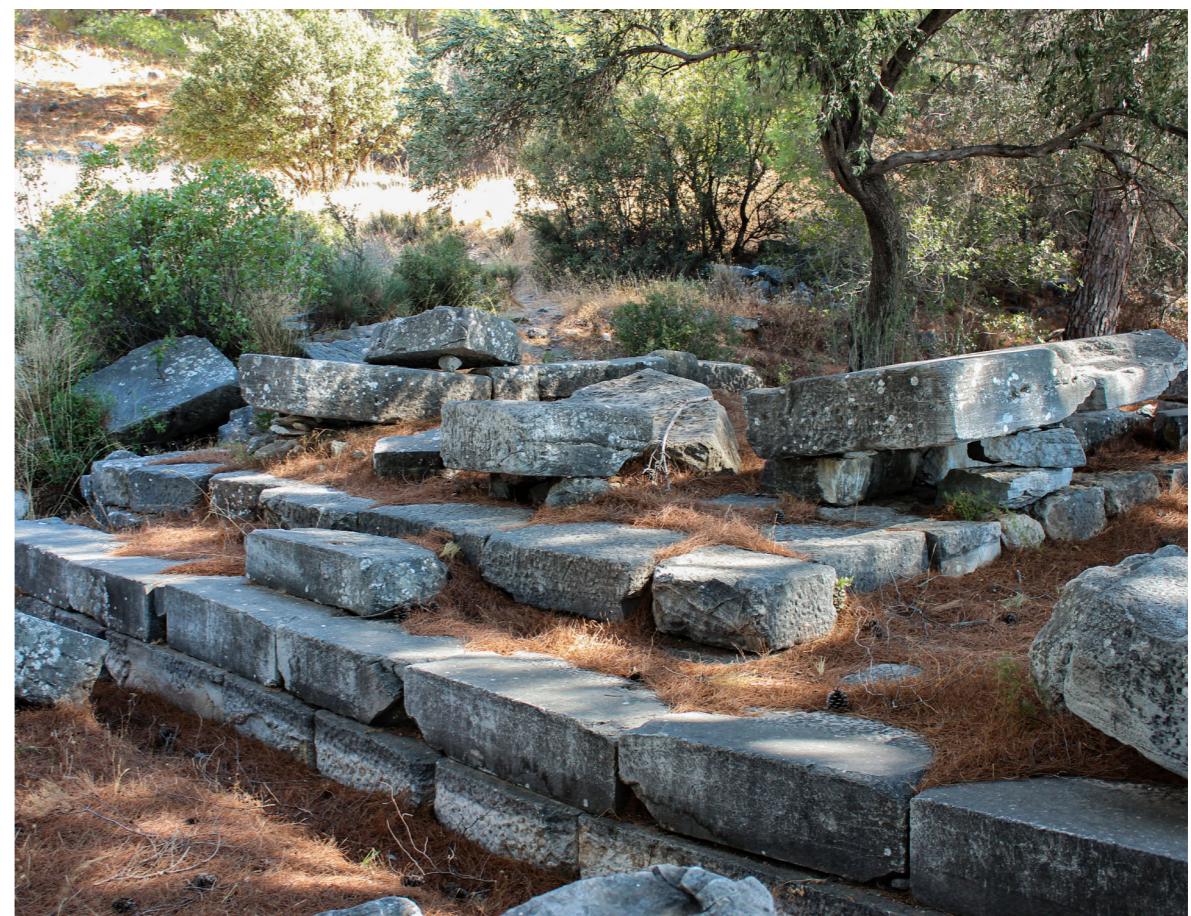


Figura 19 - Vista della Tesoriera del santuario di Atena a Priene, elaborazione propria, 2025

HBIM PER L'ARCHEOLOGIA

L'evoluzione della conservazione del patrimonio



Figura 20 - Ricostruzione in HBIM della facciata della Cattedrale di San Pietro a Mantova, da UNESCO Research Lab di Mantova

HISTORICAL BUILDING INFORMATION MODELING

La diffusione di tecnologie avanzate ha determinato importanti cambiamenti nei modelli di trasmissione e conservazione della conoscenza, a partire dalle modalità di rilievo del costruito fino alla sua divulgazione. Questo cambiamento ha portato a una comunicazione più veloce, a una maggiore efficienza nella ricerca delle informazioni e a un'esecuzione più affidabile dei processi, riducendo tempi e l'utilizzo di supporti cartacei.

Una tecnologia fondamentale in questo ambito di ricerca è il Building Information Modeling, più nota con il suo acronimo BIM, che identifica la creazione di modelli digitali che possono non solo essere condivisi ma integrati con tecnologie immersive come l'XR (“Extended Reality”). Il BIM può anche gestito attraverso strumenti di programmazione visuale (VPL “Visual Programming Language”).

Sono proprio la capacità del BIM di gestire il modello 3D nella sua interezza e la sua integrazione con le nuove tecnologie a renderlo particolarmente adatto ad affrontare il campo del restauro con nuove prospettive: l'HBIM (Historic Building Information Modeling) diventa così un punto di partenza per la ricerca e la divulgazione, permettendo di ricreare il patrimonio esistente con autenticità e integrità. La possibilità di collegare ulteriori tecnologie facilita inoltre la diffusione dei contenuti digitali rendendoli accessibili a un pubblico sempre più ampio.

HBIM PER L'ARCHEOLOGIA

Dal tradizionale al laser scanning

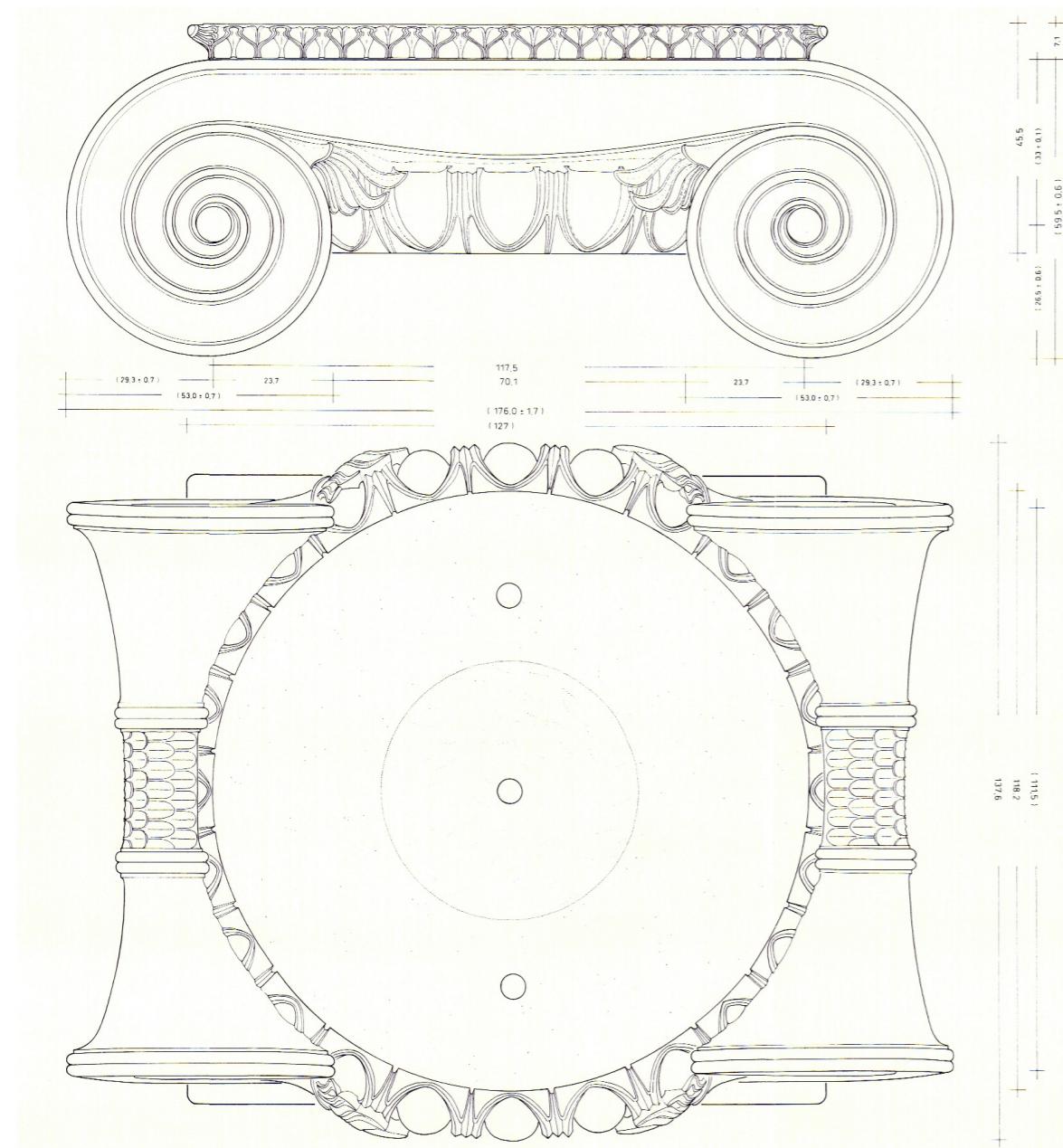


Figura 21 - Rilievo del capitello ionico centrale del Tempio di Atena a Priene, da Theodor Wiegand e Hans Schrader

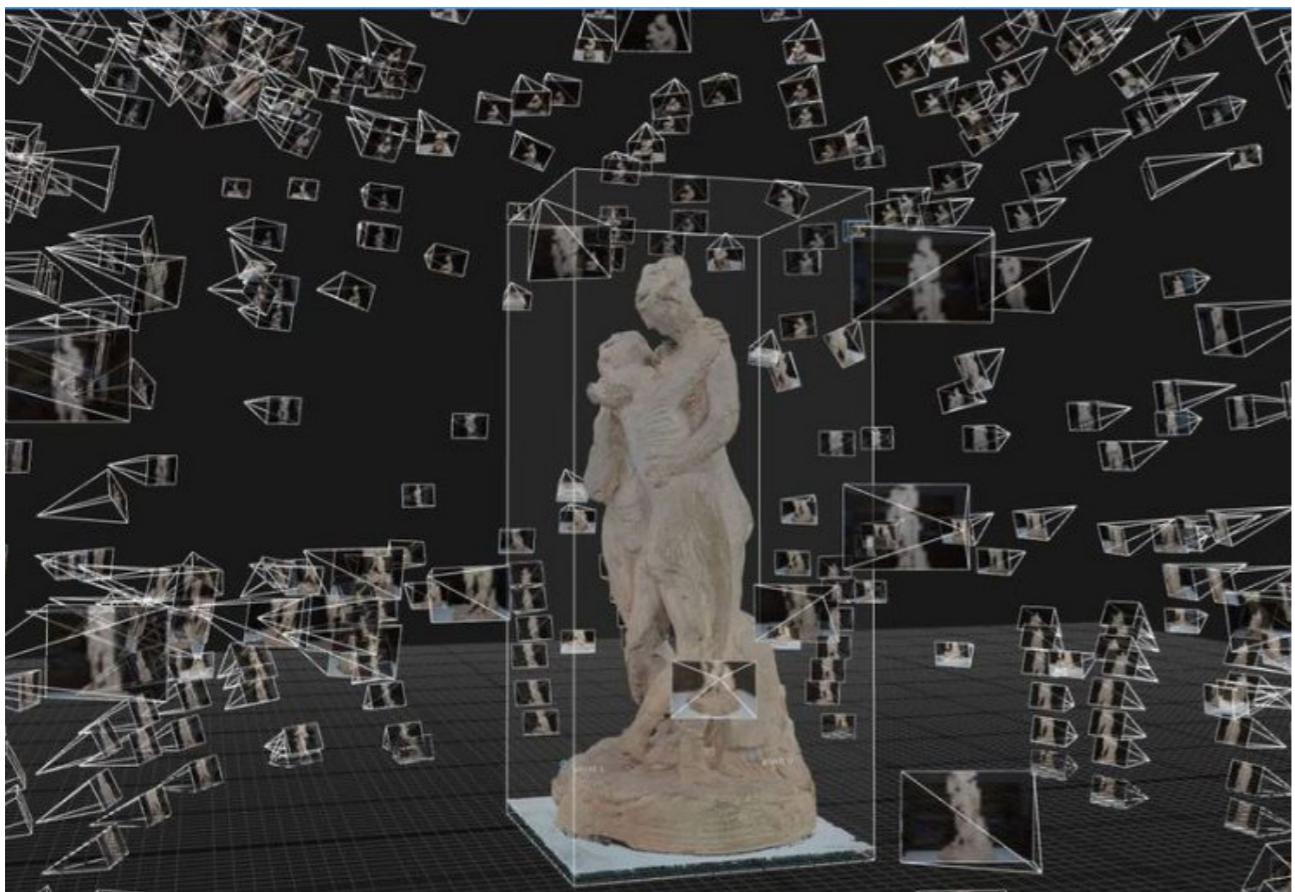
L'EVOLUZIONE DEL RILIEVO

Nell'ambito del restauro e della valorizzazione del patrimonio culturale, il rilievo rappresenta il punto di partenza per l'attività di conoscenza, tutela e intervento. Esso costituisce la base documentale su cui si fondono tutte le successive fasi di analisi, progettazione e conservazione, in quanto consente di acquisire e rappresentare con precisione la configurazione geometrica, materica e spaziale dell'opera o del sito studiato. Nel corso del tempo, le metodologie di rilievo si sono evolute profondamente, passando da tecniche puramente manuali e dirette a sistemi digitali altamente automatizzati, in grado di integrare differenti fonti di dati e di restituire modelli tridimensionali di grande accuratezza.

Il rilievo tradizionale, pur restando ancora oggi un riferimento fondamentale in molti ambiti della pratica del restauro, presenta evidenti limiti in termini di efficienza e precisione. Tale metodologia, basata su strumenti semplici come metri a nastro, squadre, livelle e distanziometri manuali, richiede tempi lunghi e un impegno operativo notevole. La rappresentazione del costruito avviene solitamente attraverso disegni bidimensionali elaborati a mano, con un margine di errore legato inevitabilmente all'interpretazione soggettiva dell'operatore.

Storicamente, il lavoro di rilievo architettonico degli archeologi si basava su misurazioni dette “a punto singolo”, dove ogni dato veniva raccolto individualmente. Si trattava di una metodologia caratterizzata da una bassa densità di informazioni e da una elevata possibilità di compiere errori. Errori che poi avrebbero generato incongruenze durante la fase di disegno. Gli stessi strumenti che venivano impiegati, come il distanziometro laser, la livella ottica o la stazione totale, pur rappresentando un notevole passo in avanti rispetto al semplice metro, richiedevano - e richiedono ancora oggi - una grande attenzione da parte dell'utilizzatore e un continuo controllo, anche ripetuto, delle misurazioni.

Figura 22 – Esempio di fotogrammetrica delle Tre Grazie di Canova, da Factum Foundation



Fotogrammetria A partire dal tardo Novecento, con l’evoluzione delle tecniche di rilevamento e l’avvento dell’informatica, la fotogrammetria ha assunto un ruolo di crescente importanza. Essa si basa sul principio della triangolazione fotogrammetrica, ovvero sulla possibilità di determinare le coordinate tridimensionali di punti nello spazio partendo da più immagini fotografiche acquisite da diverse angolazioni.

Si distinguono due principali tipologie di fotogrammetria:

- Fotogrammetria terrestre, nella quale la fotocamera è posta sul terreno e viene utilizzata per il rilievo di edifici, facciate, scavi o reperti archeologici;
- Fotogrammetria aerea, in cui il sistema di acquisizione è montato su un aeromobile o su un drone, permettendo la documentazione di aree estese e difficilmente accessibili.

La fotogrammetria è un metodo di misura indiretto, basato sull’elaborazione di immagini fotografiche o di immagini acquisite tramite sensori multispettrali, infrarossi o a microonde. Essa consente di ottenere informazioni metriche, cromatiche e morfologiche dell’oggetto indagato, fornendo un rilievo tridimensionale denso e georeferenziato.

Tra i principali vantaggi di questa metodologia vi sono la rapidità di acquisizione, la possibilità di operare anche in contesti difficili da raggiungere e la relativa economicità dei mezzi impiegati. Tuttavia, la fotogrammetria

presenta anche alcuni limiti, quali una precisione inferiore rispetto al laser scanning, la forte dipendenza dalle condizioni di illuminazione e meteorologiche, e la difficoltà di rilevare superfici omogenee, riflettenti o coperte da vegetazione fitta.

Stazione totale Con l’introduzione della stazione totale, evoluzione del teodolite tradizionale, si è potuto coniugare il rilievo angolare e quello lineare in un unico strumento, capace di misurare distanze e angoli con estrema precisione mediante l’emissione di raggi laser o infrarossi.

Nel sistema a raggio infrarosso, il rilievo avviene attraverso un prisma riflettente collocato sul punto da misurare, mentre nel sistema laser la misurazione può essere effettuata anche in modalità “senza prisma”, aumentando la velocità di acquisizione. Nonostante l’elevata accuratezza metrica, il rilievo con stazione totale richiede ancora tempi operativi lunghi, specialmente in aree di grandi dimensioni o di morfologia complessa, e non consente di ottenere un modello tridimensionale completo senza una successiva fase di ricostruzione grafica.

Laser Scanner Negli ultimi decenni l’introduzione del laser scanner 3D ha decisamente rivoluzionato le tecniche di rilievo architettonico e archeologico. La differenza principale è che ora il rilievo è caratterizzato da un’acquisizione enorme di dati. Lo scanner 3D è uno strumento elettronico in grado di emettere un raggio laser che, colpendo una superficie, viene riflesso verso il sensore, il quale registra la distanza, l’angolo e l’intensità del segnale. Grazie a questi dati il software produce una nuvola di punti (detta “point cloud”) che rappresenta, con accuratezza millimetrica, la geometria tridimensionale dell’oggetto rilevato.

Il laser scanner può acquisire milioni di punti al secondo, restituendo una descrizione estremamente dettagliata di edifici, reperti, superfici o interi siti archeologici. Il principio di funzionamento si basa su due sistemi principali:

Il *Time of Flight* (ToF), in cui la distanza viene calcolata in base al tempo impiegato dall’impulso laser per tornare al sensore dopo aver colpito la superficie. Il *Phase Shift*, che sfrutta la variazione di fase tra il segnale inviato e quello riflesso, consentendo una misurazione ancora più precisa su distanze medio-brevi.

Studiando con cura la posizione delle varie postazioni di scansione è possibile coprire integralmente un ambiente. Si potranno così eliminare le

zone d'ombra e ricostruire nella sua integrità il modello tridimensionale. Le nuvole di punti possono anche essere elaborate, tramì software specifici, per poter allineare i dati, filtrare i picchi o il rumore; il tutto per produrre modelli aderenti il più possibile alla realtà.

Scan to BIM Uno degli sviluppi più significativi dell'uso del laser scanner è rappresentato dal processo Scan to BIM, ossia la trasformazione delle nuvole di punti in modelli informativi tridimensionali gestibili nei software BIM. Questa fase consente di passare da un rilievo puramente geometrico a un modello digitale informativo, in cui ogni elemento architettonico può essere associato a dati relativi a materiali, tecniche costruttive, degrado, interventi di restauro e fasi cronologiche.

L'uso aggiuntivo di immagini RGB e foto a 360° consente inoltre di realizzare tour virtuali immersivi, che permettono un'interazione realistica e scientificamente accurata del bene culturale. Si tratta di un vantaggio non solo per la ricerca e per la documentazione, ma anche per la divulgazione nei musei e per la relativa educazione del pubblico.

Prospettive future Nonostante l'enorme potenzialità e gli indubbi vantaggi, anche il laser scanner non è esente da limitazioni tecniche. Tra le più importanti c'è la difficoltà a rilevare dettagli molto piccoli o superfici riflettenti. Inoltre gli strumenti di misura vanno calibrati periodicamente. Anche lo stesso grande vantaggio che deriva della enorme quantità di dati acquisiti, può diventare un ostacolo durante la fase di elaborazione e di creazione dei modelli.

Tuttavia, l'integrazione con la fotogrammetria digitale, con i droni e le tecniche multisensoriali consente oggi di superare molti di questi ostacoli arrivando ad offrire una mappatura tridimensionale completa, precisa e integrata. Il prossimo importante passo sarà dato dall'evoluzione verso sistemi di mobile mapping. L'utilizzo di scanner portatili SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) e di sensori LiDAR montati su droni. Tecnologie che aprono nuovi scenari per il rilievo architettonico e archeologico, rendendo possibile acquisizione più rapide, dall'alto e geo-referenziate. Queste innovazioni delineano un futuro in cui il rilievo tridimensionale non sarà più soltanto un'operazione preliminare, ma un processo continuo di conoscenza e monitoraggio del patrimonio nel tempo.

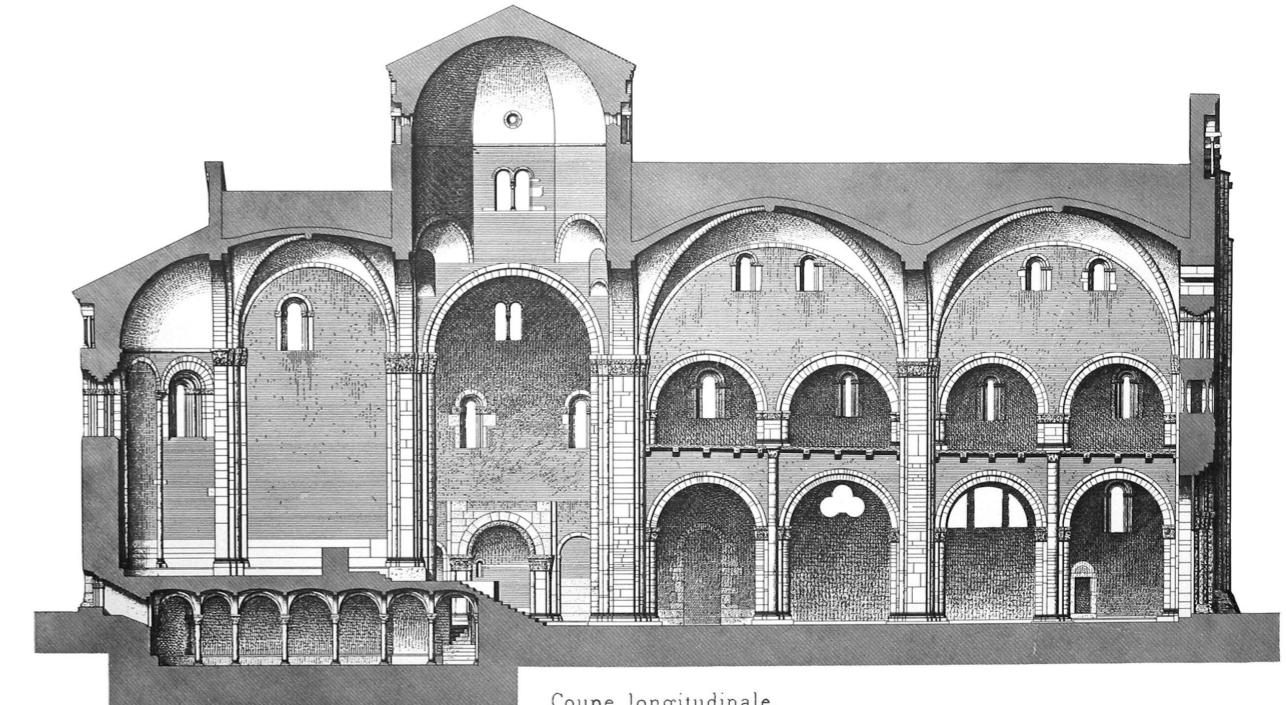
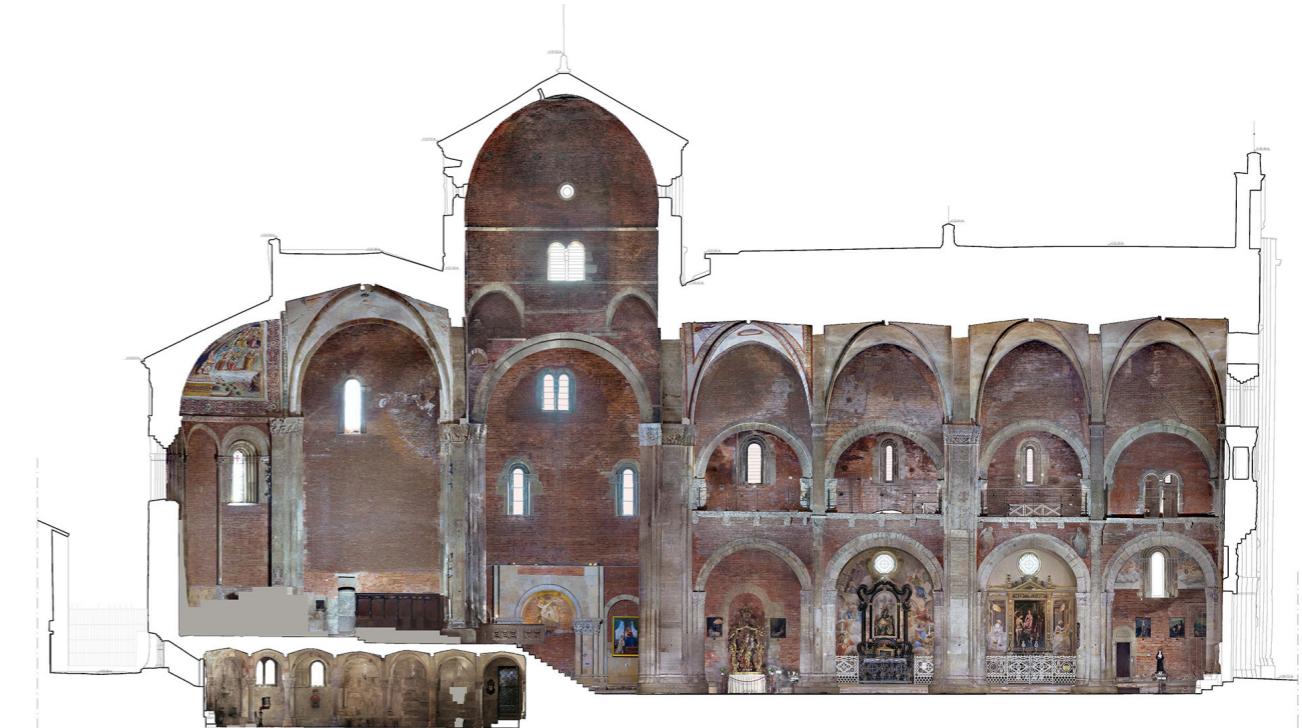


Figura 23 - Confronto di una sezione Scan to BIM e una sezione disegnata a mano della Basilica di San Michele Maggiore, da UNESCO Research Lab di Mantova

HBIM PER L'ARCHEOLOGIA

NUVOLE DI PUNTI

Gestione dei dati spaziali

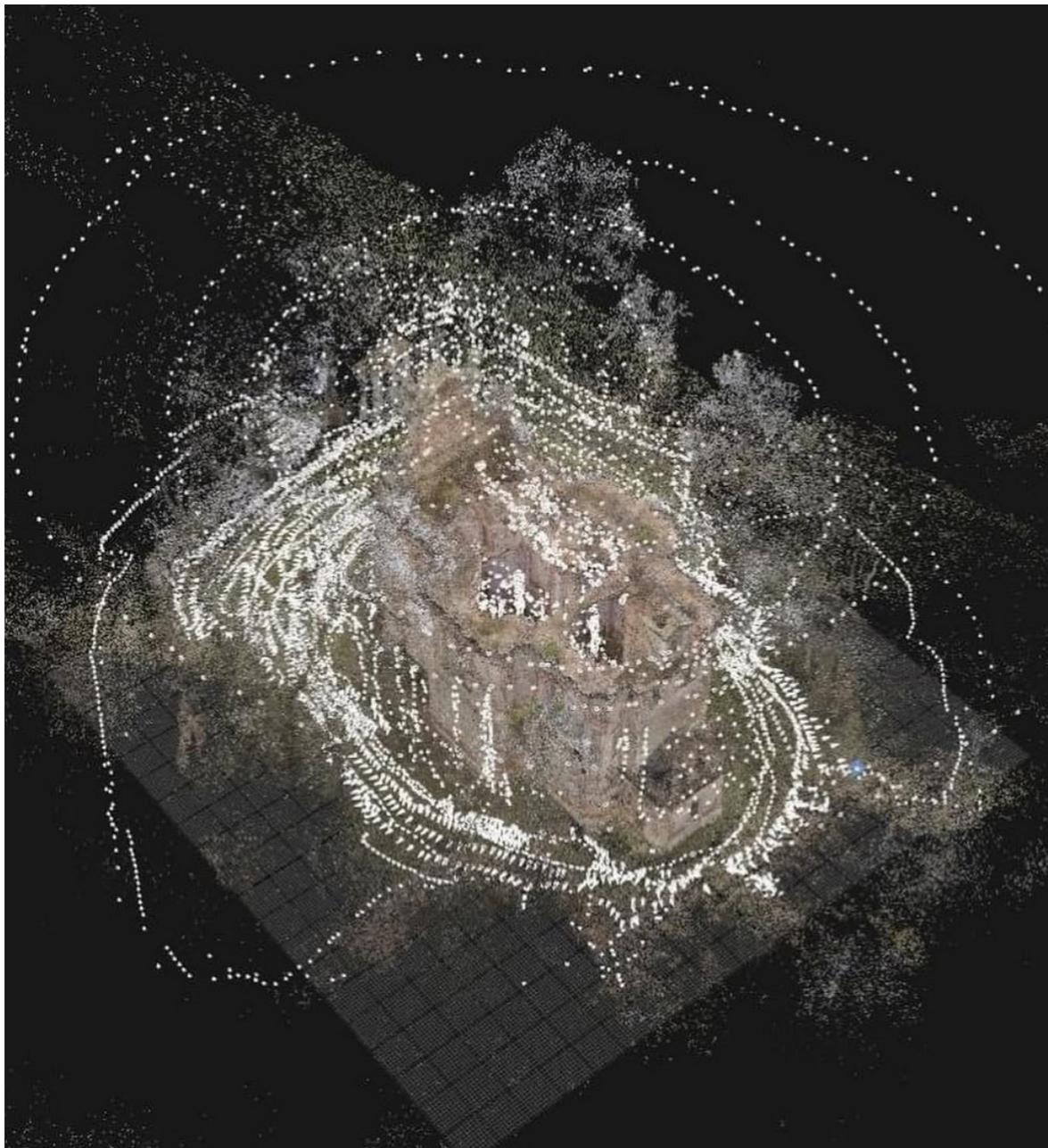


Figura 24 - Nuvola di punti della Chiesa di Tutti i Santi a Hodowica, da pinsel.ar

L'utilizzo del laser scanner, come detto in precedenza, ha come prodotto la creazione di una nuvola di punti ovvero una serie di coordinate spaziali X, Y e Z. Nonostante i vantaggi, la gestione delle nuvole di punti all'interno degli ambienti BIM può presentare alcune criticità. Spesso, infatti, le nuvole vengono convertite in mesh poligonali, ovvero insiemi di superfici piane (poligoni) che approssimano oggetti tridimensionali. A causa della natura discreta, ovvero discontinua, delle mesh, qualsiasi forma tridimensionale viene rappresentata con una certa tolleranza, ovvero con una perdita di dettaglio rispetto all'originale.

In particolare, gli oggetti con superfici curve risultano più complessi da rappresentare rispetto a quelli con superfici piane. Questo perché richiedono un numero molto più elevato di facce per approssimare la geometria delle forme. L'aumento delle facce comporta un aumento della memoria necessaria per gestire il modello. L'aumento di memoria a sua volta rende più difficile la gestione e l'elaborazione all'interno di software BIM. Il problema aumenta quando i dati provengono da tecniche di acquisizione ad alta risoluzione, come il laser scanning o la fotogrammetria, che per loro natura producono enormi moli di dati. Per superare questo problema, le mesh poligonali vengono spesso semplificate. E' un procedimento che consiste nell'accorparle in elementi geometrici più semplici (come possono essere piani, cilindri o superfici regolari). In questa maniera si ridurranno il numero di poligoni e di conseguenza se ne alleggerirà la loro gestione da parte dei computer.

Tuttavia, anche la semplificazione delle mesh comporta una perdita di dettaglio, rendendo necessaria la ricerca di altre soluzioni per rappresentare anche le forme complesse in maniera accurata. Negli ultimi anni si è manifestato un crescente interesse per la tecnica della segmentazione della nuvola di punti, nota come "slicing", per superare le limitazioni imposte dalla modellazione mesh, che consente

di ottenere livelli di dettaglio più elevati. La tecnica prevede la sezione trasversale della nuvola di punti acquisita tramite metodologia laser scanner in più punti e a seguito della sezione l'utente può procedere a disegnare manualmente le curve provenienti dalla nuvola di punti o estrarre automaticamente, generando così le principali caratteristiche dell'oggetto scansionato. Maggiore è il numero di "slice", maggiore sarà anche la precisione del modello tridimensionale restituito, il che comporta una difficoltà aggiuntiva nel caso di forme complesse o irregolari. Inoltre, l'estrazione automatica non è una soluzione adatta alla generazione di modelli digitali, poiché l'automatismo non consente di ottenere curve utilizzabili per la generazione di disegni di rilievo o modelli digitali.

NURBS Per far fronte a queste problematiche, la modellazione basata sulle geometrie NURBS diventa indispensabile. La superficie NURBS, ovvero "Non Uniform Rational Basis-Splines", traducibile in "Splines razionali non uniformi definite da una base", è una rappresentazione matematica della geometria 3D in grado di descrivere con precisione qualsiasi forma senza il bisogno di un numero elevato di poligoni. Esse rappresentano una famiglia di curve e superfici ampiamente utilizzate nell'ambito della computer grafica e modellazione 3D.

Le curve sono definite da un insieme di punti di controllo, una funzione di peso e una sequenza di B-Spline. L'utilizzo delle superfici NURBS consente di ridurre il numero di poligoni necessari per rappresentare una forma, creando modelli più leggeri e facili da gestire, consentendo allo stesso tempo di descrivere le forme in modo più preciso e dettagliato.

Un'alternativa all'uso delle mesh mappate in 3D è rappresentata dalle ortofoto. Queste sono immagini, ottenute da rilievi fotogrammetrici. Sono georeferenziate, cioè sono associate a coordinate reali nello spazio e permettono un'acquisizione precisa e affidabile delle caratteristiche geometriche delle superfici e anche dei loro materiali. È una soluzione che offre un supporto utile sia per la documentazione che per l'integrazione con modelli BIM e GIS.

Nel campo della modellazione generativa BIM, la ricerca tende sempre di più sulla riproduzione di geometrie complesse, superando i limiti delle forme puramente parametriche. Infatti, ad oggi, il BIM presenta alcuni limiti nella rappresentazione accurata del patrimonio architettonico, soprattutto quando si tratta di forme irregolari o storicamente stratificate.

BIM in contesti archeologici Una soluzione può giungere dai nuovi modelli basati sulla modellazione free-form che possono ridurre il divario, offrendo soluzioni più flessibili capaci rappresentare in maniera più fedele la complessità dell'architettura storica.

Quando queste tecnologie vengono applicate a ruderi o a strutture parzialmente conservate, la loro implementazione risulta più complessa. La natura discontinua e frammentaria delle superfici, la presenza di lacune e l'irregolarità delle geometrie rendono difficile una modellazione coerente con i principi parametrici del BIM. Le nuvole di punti ottenute in tali contesti presentano spesso zone d'ombra o aree incomplete, dovute alla difficoltà di posizionare lo scanner in modo da coprire ogni porzione del manufatto. Inoltre, la conversione dei dati in oggetti BIM può richiedere una forte interpretazione da parte del modellatore, il quale deve distinguere ciò che è reale da ciò che è ipotetico o ricostruito.

Nonostante queste evidenti difficoltà, l'utilizzo del laser scanner sui ruderi, si rivela estremamente utile per il controllo metrico e geometrico di alcuni elementi fondamentali. Infatti, attraverso l'analisi di specifiche porzioni del modello come ad esempio i muri perimetrali, le fondazioni, i piani di imposta, o gli allineamenti di colonne o architravi, è possibile ottenere misure di riferimento affidabili che sono fondamentali per impostare correttamente i progetti di restauro o di valorizzazione. Tali dati, anche se parziali, forniscono infatti un quadro dimensionale generale dell'intervento che andrà pianificato e permettono di effettuare verifiche di congruenza tra le diverse fasi del progetto. Verranno infatti migliorate la precisione nella definizione delle quote e dei volumi. In ambito archeologico questa metodologia è preziosa per tenere sotto controllo eventuali danni come deformazioni o variazioni strutturali. Si tratta di dati importanti che aiutano a prevenire danni e che contribuiscono a migliorare - scientificamente - la gestione del sito. Quindi se da un lato l'uso del laser scanning e del BIM comporta una maggiore complessità operativa e interpretativa, dall'altro rappresenta uno strumento fondamentale di conoscenza, di controllo e di pianificazione.

Sono tecniche che permettono di colmare il divario tra la realtà frammentaria del costruito e la necessità di una documentazione sistematica e interoperabile. Tecniche che aprono nuove prospettive per la ricerca, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio archeologico e architettonico.

HBIM PER L'ARCHEOLOGIA

Dal frammento archeologico
alla ricostruzione digitale



Figura 25 - Tempio di Giove, Pompei, Ricostruzione digitale, da Behance.nt

ARCHEOBIM

In ambito archeologico il BIM rappresenta una delle fasi più complicate nella rappresentazione di elementi architettonici.

Tradizionalmente nasce come metodologia per la progettazione e gestione di processi di nuova costruzione, negli ultimi anni, si è progressivamente esteso al campo dell'archeologia, oltre che all'edilizia storica, già fortemente presente.

Ciò ha permesso nuove scoperte e prospettive di studio in questi ambiti. A differenza della ricostruzione dell'edilizia storica, dove l'Heritage BIM viene impiegato per la documentazione di edifici esistenti, generalmente in condizioni frammentarie e lacunose. Per questo motivo il BIM diviene uno strumento prezioso per l'identificazione di elementi conservati, permettendo di definire in modo verosimile le parti mancanti.

Tra i vantaggi dell'approccio si evidenzia la possibilità di gestire e aggiornare i dati relativi a un determinato contesto, ogni elemento del modello (muro, colonna, basamento e copertura) può essere associato a metadati specifici riguardanti le tecniche costruttive, i materiali presenti, le fasi di scavo o altre integrazioni.

Inoltre, questa metodologia non rappresenta una tecnica di modellazione, ma anche uno strumento di ricerca, nella quale vengono inseriti non solo i dati materici del sito, ma anche le informazioni sulle fonti dirette o indirette.

Le finalità in questi contesti sono generalmente per la ricostruzione virtuale, la ricerca e la valorizzazione attraverso la gestione di questi siti. È un approccio generalmente basato sull'analisi delle diverse fonti storiche oltre che alla fase interpretativa degli elementi del sito.

HBIM PER L'ARCHEOLOGIA

Applicazioni pratiche



Figura 26 - Vista aerea delle rovine di Heron, da *Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM*

HERITAGE BIM: CASI STUDIO

Un esempio significativo dell'applicazione di tecnologie avanzate come il laser scanner, NURBS e BIM nella conservazione di un sito archeologico riguarda il sito di Heron in situato nella regione dell'Eritrea in Turchia. Heron deriva dal greco “*Hpwov*” e indica il luogo dei santuari di eroi del tempo.

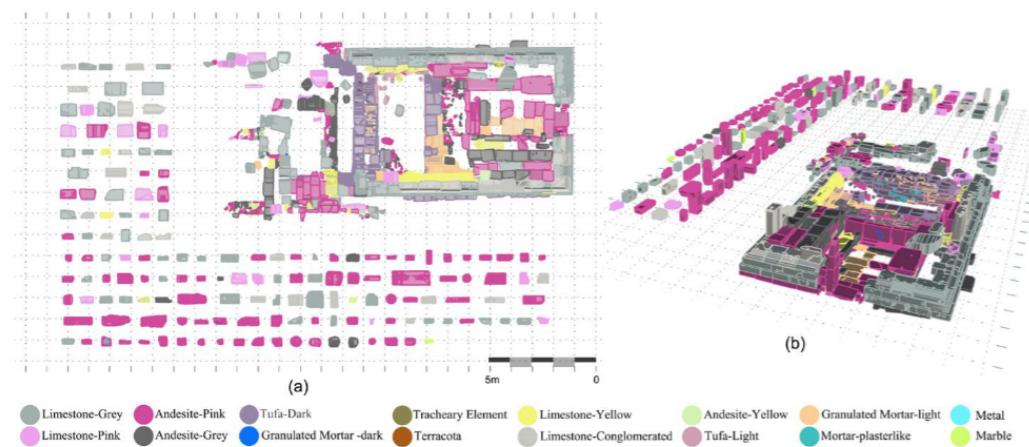
In questo caso, sono stati utilizzati scanner laser e fotogrammetria in combinazione con metodologie tradizionali per il rilievo *in situ*, al fine di acquisire dati dettagliati sui resti archeologici. L'interpretazione visiva dei resti durante il rilievo sul campo ha fornito la base per un inventario dei materiali, che si è arricchito con i dati ottenuti attraverso le tecnologie digitali. I dati acquisiti sono stati utilizzati per creare un database multi modello contenente informazioni geometriche, materiali e dettagli sul deterioramento degli elementi.

Successivamente, è stata effettuata la modellazione geometrica dei resti *in situ* utilizzando software come Rhinoceros e Revit. Poiché gli oggetti geometrici rilevati non erano predefiniti nel software BIM, sono stati utilizzati modelli basati su NURBS, successivamente importati in Revit come famiglie generiche.

Gli inventari contenenti le interpretazioni visive raccolte sul campo sono stati rielaborati in un modulo di inserimento dati tramite programmazione, permettendo la creazione di un database relazionale facilmente integrabile nel software BIM attraverso il linguaggio di programmazione visiva Dynamo (Versione 2.3).

Il database generato, comprendente i riferimenti ai blocchi sparsi e ai resti *in situ* dell'Heron, è stato quindi pronto per essere integrato nel modello geometrico. Questo ha consentito di mappare le informazioni e pianificare azioni di conservazione multi livello. L'analisi ha portato

Figura 27 - Mappatura 3D dell'analisi dei materiali, da *Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM*



a cinque principali risultati, tra cui lo studio delle relazioni spaziali, il deterioramento, le fasi costruttive e le decisioni di intervento per la salvaguardia dei beni.

Il processo di conservazione del Heroon ha previsto decisioni mirate per affrontare il deterioramento materiale e strutturale. Utilizzando un modello 3D e un database multi modale, sono stati pianificati interventi specifici come la pulizia, il consolidamento e la manutenzione, con l'obiettivo di prevenire danni futuri e garantire la salvaguardia del patrimonio.

Cattedrale di San Pietro a Mantova

Un altro caso studio riguardante l'utilizzo di tecnologie HBIM con l'obiettivo di supportare un approccio di conservazione programmata del bene culturale è la modellazione della facciata della Cattedrale di San Pietro a Mantova. La cattedrale è situata nel centro storico della città di Mantova ed è stata dichiarata patrimonio UNESCO nel 2008. Ha una struttura molto complessa, composta da cinque navate, cappelle laterali, coperture diverse e articolate.

Il laboratorio di ricerca ha effettuato un rilievo diviso per aree: per gli interni e capelle è stato utilizzato il laser scanner, per la copertura la fotogrammetria, infine per georeferenziare i dati è stata utilizzata la topografia. Il rilievo ha prodotto un totale di 471 nuvole di punti, integrate all'interno di un unico modello tridimensionale.

Durante i rilievi, hanno riscontrato la presenza di tracce di strutture gotiche, tra cui finestre e archi, i quali vennero murati in un secondo momento.

Attraverso le analisi condotte, viene fatto il confronto tra i dipinti storici rappresentati la cattedrale e le nuvole di punti, è stato quindi possibile notare che la facciata attuale è formata dalla sovrapposizione murature provenienti da periodi storici diversi: gotica, rinascimentale e rivestimento marmoreo settecentesco.

Figura 28 - Ortofoto della facciata della Cattedrale di San Pietro a Mantova generata dalla nuvola di punti, da UNESCO Research Lab di Mantova



Il modello BIM, realizzato Autodesk Revit combina il rilievo con le ricerche storiche ed è strutturato con tre elementi principali che rappresentano le fasi di costruzione storiche: due muri strutturali e uno architettonico per gli elementi decorativi. Gli elementi decorativi, tra cui i pilastri corinzi di ordine gigante, i pilastri tuscanici, le finestre laterali, la porta laterale e centrale e il timpano, sono stati rappresentati mediante famiglie caricabili parametriche.

Il risultato del lavoro è non solo una ricostruzione 3D, ma un archivio integrato che conserva e mette in relazione dati storici, geometrici e tecnici, dove risulta importante, oltre alla precisione geometrica, anche una conoscenza approfondita del manufatto e della sua storia, materiali e tecniche costruttive.

HBIM del Tempio di Uni

Un caso studio significativo è rappresentato dal processo di ricostruzione virtuale del Tempio di Uni, con l'obiettivo di realizzare un modello digitale dell'intera città etrusca, fruibile attraverso tecnologie di realtà aumentata.

Il sito archeologico si trova a Marzabotto, Kainua, fondata intorno al 500 a.C. Nello stato attuale presenta solo le fondazioni, probabilmente dovuti ai danni in età moderna, a causa delle attività agricole, che hanno compromesso gravemente le strutture sacre. Nonostante ciò, è stato possibile identificare le fondazioni murarie e la

planimetria di un tempio tuscanico a tre celle. L'analisi del caso studio si è concentrata sulla modellazione BIM di alcuni elementi chiave, tra cui:

- Il podio
- I materiali da costruzione
- Le ipotesi ricostruttive dell'altare e della copertura

È stato quindi sviluppato un modello semantico BIM, corredata da un indice visivo dei contenuti. Il processo è partito dal rilievo archeologico, con la restituzione vettoriale dei profili delle fondazioni, da cui sono state dedotte le proporzioni generali del tempio.

Successivamente, in ambiente Revit, sono state modellate le fondazioni complete, basandosi sulle proporzioni vitruviane, che tuttavia non risultano perfettamente rispettate. Non è stato possibile definire con precisione gli alzati, che sono stati ricostruiti attraverso un approccio analitico di modellazione semantica BIM, formulando ipotesi il più possibile aderenti a criteri di fattibilità costruttiva reale.

citazione

Il rinvenimento di strutture di fondazione continue ha portato all'ipotesi di tracciati murari lineari, mentre supporti simili a plinti, posizionati in punti precisi del tracciato ipogeo, hanno suggerito la disposizione delle colonne nella pars antica, presumibilmente allineate con le murature di

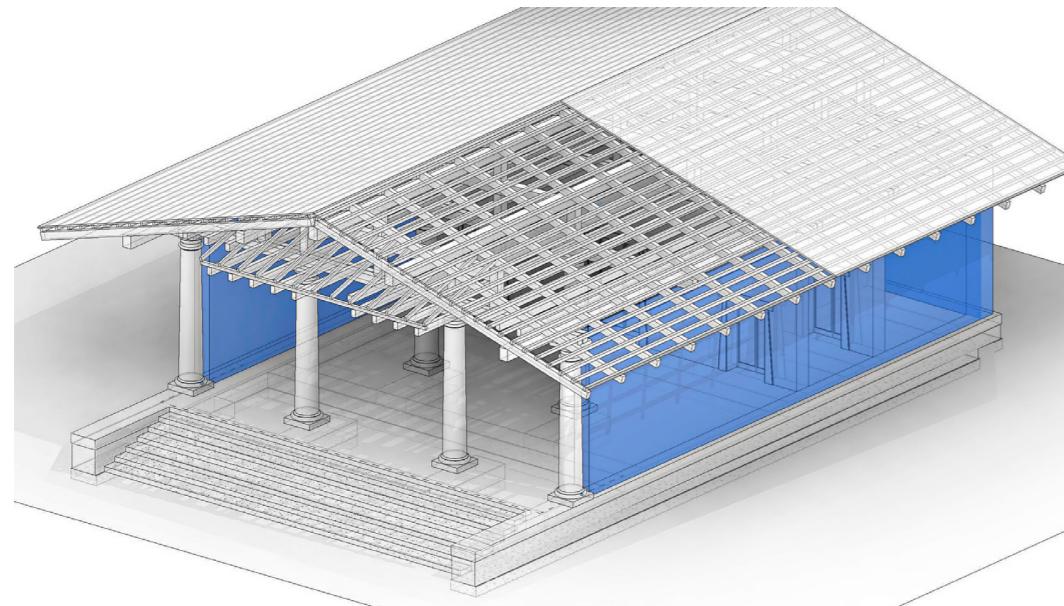


Figura 29 - Il modello Bim complessivo del tempio Uni, comprensivo del sistema di copertura nelle sue diverse componenti linee, da CRIS UNIBO.

separazione dei vani posteriori della pars postica.

Gli allineamenti appena citati hanno permesso di definire le altezze del fabbricato, i profili della trabeazione e le coperture. Sono state create, inoltre, attraverso la modellazione digitale, alcune componenti legate alle indicazioni di Vitruvio, come la colonna tuscanica e la trabeazione. Infine, viene realizzata la copertura con componenti lignei parametrici.

Nel complesso, il modello digitale è stato oggetto di sperimentazione, utile per indagare la combinazione archeologica e ingegneristica, ampliato e modificato nel tempo in base alle esigenze emergenti.

HBIM anfiteatri romani di Verona e Pola

Un altro caso studio di interesse è il progetto di ricostruzione dell'anfiteatro romano di Verona a Pola, finalizzata a testare le potenzialità dell'applicazione del BIM in contesti archeologici complessi e a valutarne vantaggi e criticità.

In questo progetto si presentano edifici già in buono, ciò permette una maggiore facilitazione delle applicazioni di riscopertura. Oltre che alla somiglianza morfologica e dimensionale tra i due anfiteatri, entrambi in forma ellittica, ciò infatti ha permesso di analizzare le diverse strategie di modellazione e gestione dei dati. Il caso studio ha permesso di definire l'importanza di una conoscenza profonda dell'edificio, necessaria per integrare le informazioni all'interno del modello. In archeologia, però, questa esigenza non può essere completata a causa della presenza di pochi dati o conoscenze lacunose,



Figura 30 - Preliminare ricostruzione virtuale dell'area templare a N di Kainua: a destra il tempio di Uni, da CRIS UNIBO.

in alcuni casi, vengono superate, queste lacune, grazie ai rilievi sul campo e all'analisi critica della documentazione grafica esistente.

Le planimetrie pubblicate da J.-C. Golvin (1988) e S. Mlakar (1997) hanno permesso di conseguire una base di riferimento per la modellazione, vengono digitalizzate e importate all'interno del software.

Un ulteriore verifica è avvenuta confrontando l'accuratezza dei disegni con le analisi in situ, al fine di restituire una rappresentazione geometrica quanto più completa.

Il passaggio all'ambiente BIM ha previsto due approcci distinti: Per l'anfiteatro di Verona è stato utilizzato il programma ArchiCAD 23, la difficoltà nell'utilizzo di questo software è nella mancanza di librerie specifiche, di conseguenza è stato necessario modificare e adattare famiglie preesistenti per la creazione degli elementi costruttivi.

Per l'anfiteatro di Pola, invece, è stato impiegato Autodesk Revit, nel tentativo di ottenere un analisi differenti. In questo caso, è stato possibile lavorare con un sistema parametrico più flessibile, siccome ogni elemento architettonico viene modellato ex novo, tramite l'Editor delle Famiglie. Permette di realizzare elementi parametrici personalizzati e archiviati in librerie per poi essere importati all'interno del modello finale.

I diversi workflow hanno permesso di testare le potenzialità del BIM in ambito archeologico, evidenziando i limiti e i vantaggi dei programmi utilizzati. Questa analisi ha inoltre evidenziato la necessità di avere una profonda conoscenza del soggetto analizzato, per ottenere modelli coerenti e scientificamente validi nel campo dell'ArchaeoBIM.

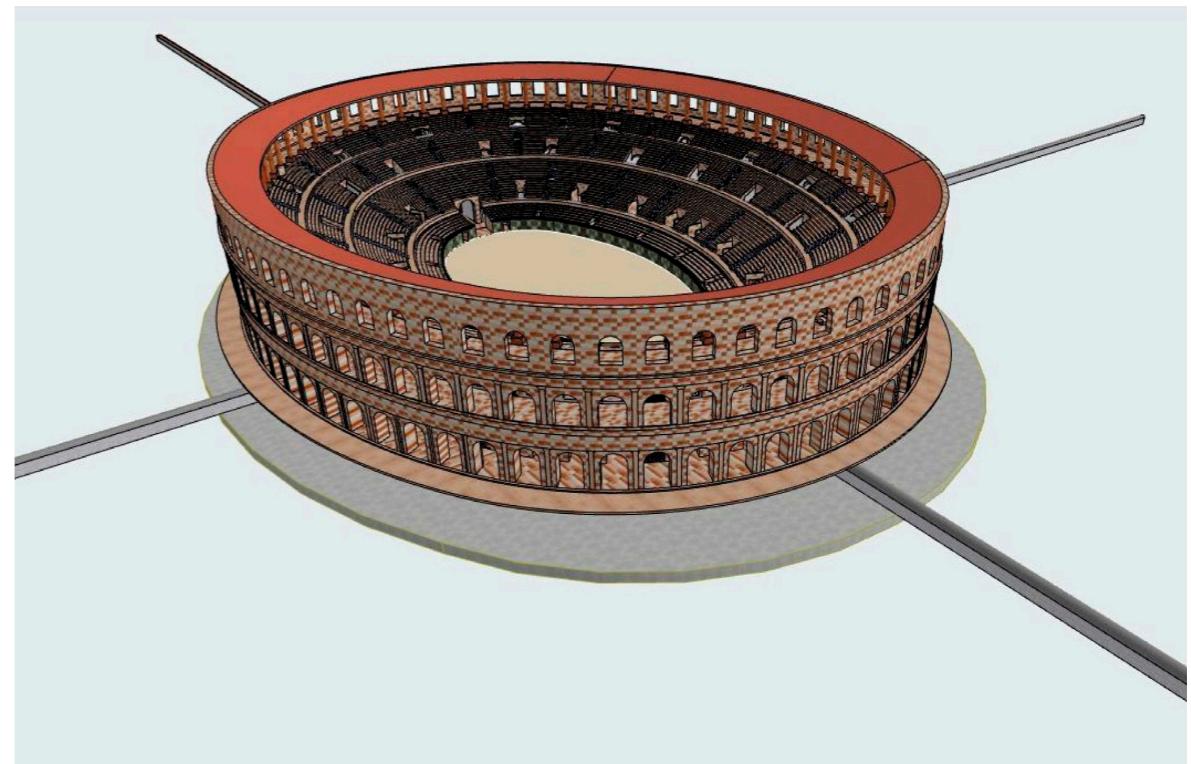


Figura 31 - Ricostruzione dell'anfiteatro romano di Verona, Modello BIM, probabile stato originario, da su Research@UNIPD.

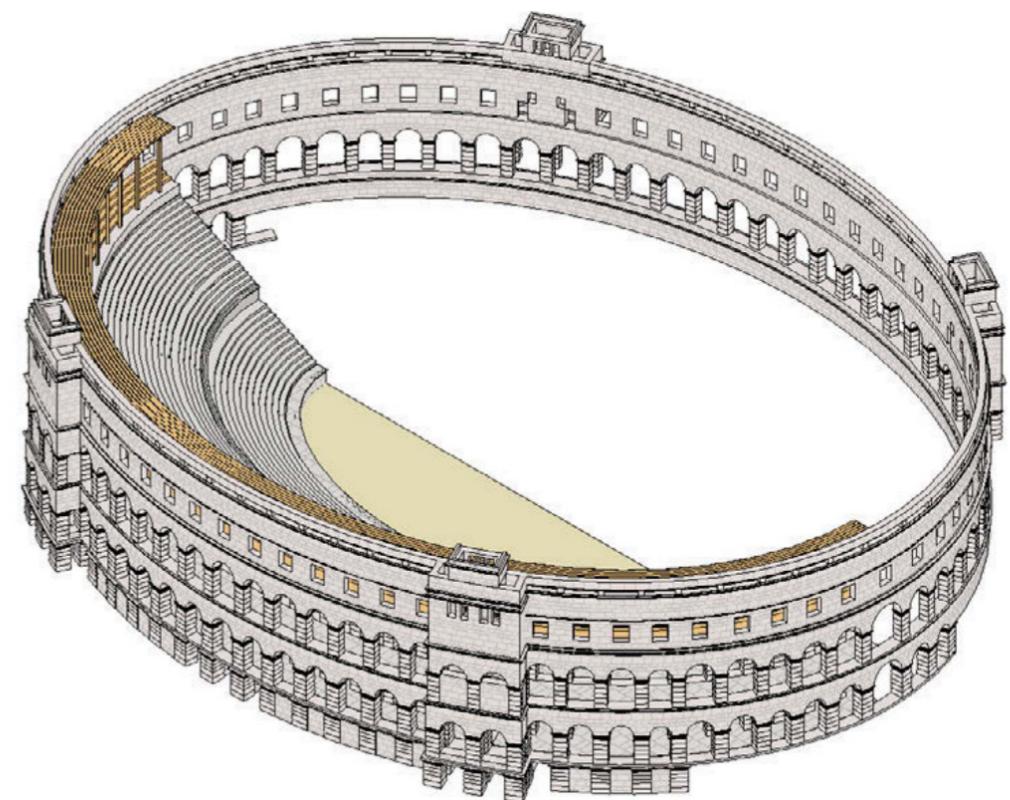


Figura 32 - Ricostruzione dell'anfiteatro Pola, Modello BIM, probabile stato originario, da su Research@UNIPD.

TECNOLOGIE AR&VR

NASCITA E SVILUPPO

Dall'Ottocento ad oggi



Figura 33 - Pubblicità della fotocamera stereoscopica Revere33 del 1953

La realtà estesa è un insieme di tecnologie che comprende la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e realtà mista (MR).

Secondo Paul Milgram e Fumio Kishino (1994) queste tecnologie possono essere collocate lungo il Reality-Virtuality Continuum, un modello concettuale che descrive la sfumatura da mondo reale a mondo virtuale. Tra queste due estremità si collocano la realtà aumentata e la realtà mista.

La storia di queste tecnologie ha radici profonde, con i primi tentativi che risalgono al XIX secolo, come la macchina stereoscopica ideata da Charles Wheatstone nel 1838 e prosegue con lo sviluppo del primo visore VR (head mounted display – HMD) sviluppato da Ivan Sutherland nel 1968, per proseguire alle nostre attuali tecnologie.

VIRTUALITY CONTINUUM

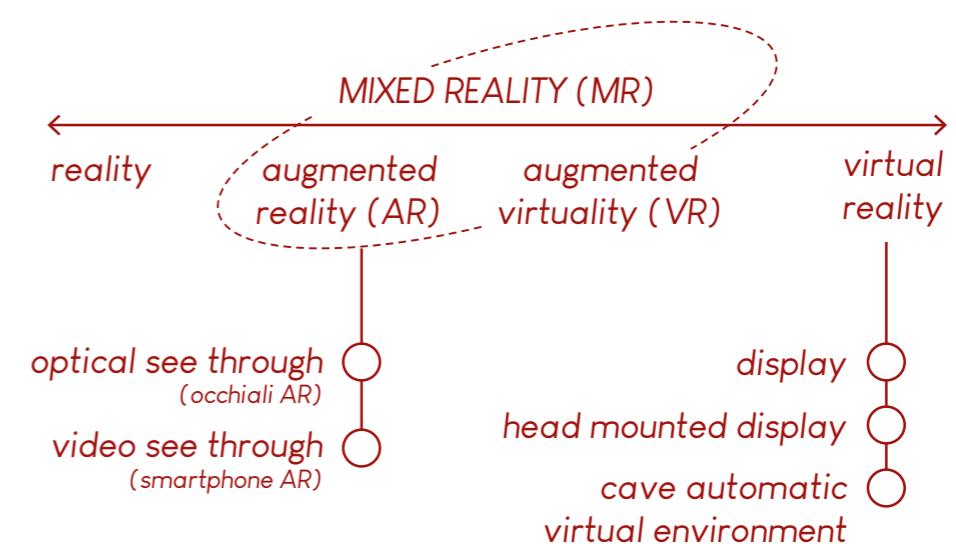


Figura 34 - Schema rappresentativo del Reality-Virtuality Continuum, elaborazione propria

Figura 35 - Veduta stereoscopica dell'Esposizione Internazionale di Londra, 1862



Macchina stereoscopica La macchina stereoscopica, creata nel 1838, fu uno dei primi dispositivi in grado di generare immagini tridimensionali, dando l'illusione della profondità. Esso si basava su un sistema di specchi e prismi che indirizzavano correttamente le immagini destinate all'occhio destro e all'occhio sinistro.

Nel 1852 J.B. Dancer brevettò la prima fotocamera stereoscopica, un'invenzione che con il passare dei decenni ha influenzato la fotografia stereoscopica e 3D.

Sensorama Il termine "extended reality" (XR) nasce negli anni '70 a seguito dell'invenzione del Sensorama, da parte del regista statunitense Morton Heilig, brevettato nel 1962.

Il Sensorama era un dispositivo in grado di coinvolgere da uno a quattro utenti, offrendo un'illusione multisensoriale che combinava suoni, immagini, vibrazioni, odori e sensazioni tattili.

Il macchinario permetteva al fruitore di vivere un'esperienza interattiva e immersiva, simulando realisticamente il luogo rappresentato.

Videoplace Videoplace è un ambiente virtuale sviluppato da Myron Kruger tra la fine degli anni '60 e l'inizio dei '70, il quale permetteva agli utenti di interagire con oggetti digitali senza la necessità di indossare strumenti come visori o occhiali. Il progetto permetteva anche la comunicazione tra più persone superando i limiti della realtà fisica.

Head Mounted Display L'Head Mounted Display, inventato da Ivan Sutherland nel 1968, era un dispositivo indossabile che consentiva di visualizzare delle grafiche sviluppate a computer sovrapposte al mondo reale. L'HMD era un

Introducing . . .

sensorama

The Revolutionary Motion Picture System
that takes you into another world
with

- 3-D
- WIDE VISION
- MOTION
- COLOR
- STEREO-SOUND
- AROMAS
- WIND
- VIBRATIONS



SENSORAMA, INC., 855 GALLOWAY ST., PACIFIC PALISADES, CALIF. 90272
TEL. (213) 459-2162

Figura 36 - Pubblicità del Sensorama del 1962



Figura 37 - Fotografia del funzionamento di Videoplace

Figura 38 - Ivan Sutherland con l'HMD

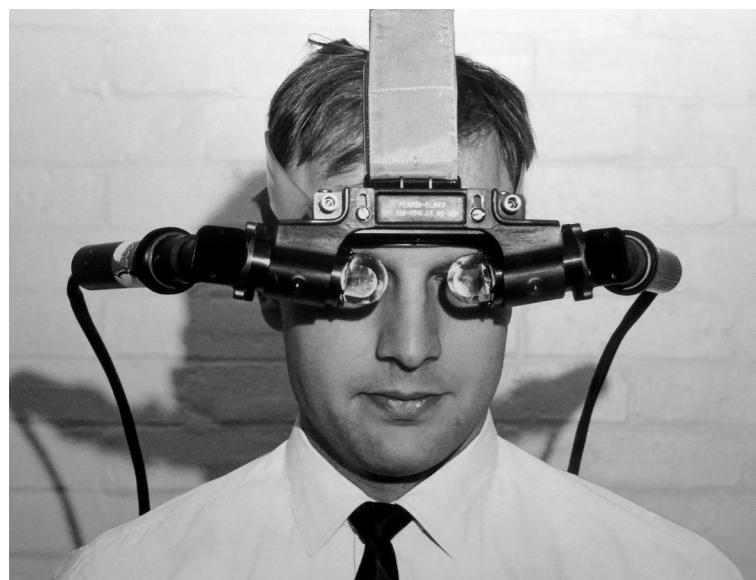


Figura 39 - Ivan Sutherland con l'HMD



dispositivo grande e pesante, sospeso al soffitto, che ospitava un sistema di tracciamento e uno schermo di visualizzazione davanti agli occhi dell'utente. Sebbene la tecnologia fosse ingombrante e non pratica per l'uso quotidiano, ha gettato le basi per i futuri sviluppi della realtà virtuale e aumentata.

Un importante sviluppo avvenne nel 2002, quando Steven Feiner pubblicò un articolo intitolato "A new way of seeing things" nella rivista *Scientific American*, in cui illustrava come gli informatici stessero sviluppando sistemi in grado di migliorare e arricchire la percezione visiva degli utenti nel mondo reale. Descrisse come le interfacce di AR potessero fungere da mediatici tra il mondo reale e quello virtuale dando all'utente informazioni visive, testuali e grafiche all'interno del suo campo visivo.

ARQuake Nello stesso anno, seguendo la linea descritta da Feiner, Bruce H. Thomas inventò il primo videogioco basato sulla realtà aumentata, chiamato ARQuake, che rappresentò un grande passo avanti nell'applicazione di queste tecnologie nel campo dell'intrattenimento. Negli ultimi anni, gli sviluppi nel campo della realtà virtuale (VR) e della realtà aumentata (AR) hanno conosciuto una crescita significativa, con un particolare focus verso dispositivi sempre più portatili e soluzioni più realistiche, personalizzate ed efficienti. Queste tecnologie trovano applicazione non solo nel settore ludico, ma anche in ambiti educativi e formativi, ampliando le possibilità di utilizzo e migliorando l'esperienza degli utenti.

Oculus Rift Il 26 marzo 2016 viene commercializzato l'Oculus Rift, a seguito di finanziamenti di 16 milioni di dollari di cui 2,4 milioni solo dalla campagna Kickstarter. Il Rift è stato il primo dispositivo studiato nello specifico per il consumatore, infatti, fino a quel momento, i visori sul mercato avevano prezzi di partenza molto elevati ed erano principalmente riservati per uso militare o scientifico.

Invece l'Oculus Rift è stato sviluppato principalmente per i videogiochi, al fine di offrire all'utente un'esperienza immersiva che consentisse di entrare all'interno dell'ambiente di gioco, infatti nella pagina del Kickstarter del visore possiamo leggere:

«Abbiamo deciso di cambiare tutto questo con Rift, progettato per massimizzare l'immersione, il comfort e il divertimento puro e senza inibizioni, a un prezzo accessibile a tutti»¹

Oltre al diverso obiettivo di mercato e al prezzo accessibile, il dispositivo introduceva diverse innovazioni tecniche mai viste prima nel campo della Realtà Virtuale, tra cui un ampio campo visivo, una risoluzione ad alta definizione e un sistema di tracciamento a bassa latenza che contribuivano a ridurre la *motion sickness* e aumentare il realismo dell'esperienza.

L'Oculus Rift, prima del suo lancio, venne acquistato dal gruppo Facebook, evento che permise una svolta a questo strumento, conferendo importanza sul mercato del VR e stimolando la nascita di nuovi visori concorrenti come HTC Vive e Playstation VR.

Il suo debutto permise una nuova era della realtà virtuale con dispositivi più accessibili, attraverso esperienze più fluide e una crescente attenzione alle esperienze immersive, non solo per il settore videogiochi, ma anche per la musealizzazione e la comunicazione.

1 - Palmer Luckey, pagina Kickstarter dell'Oculus Rift, 2016

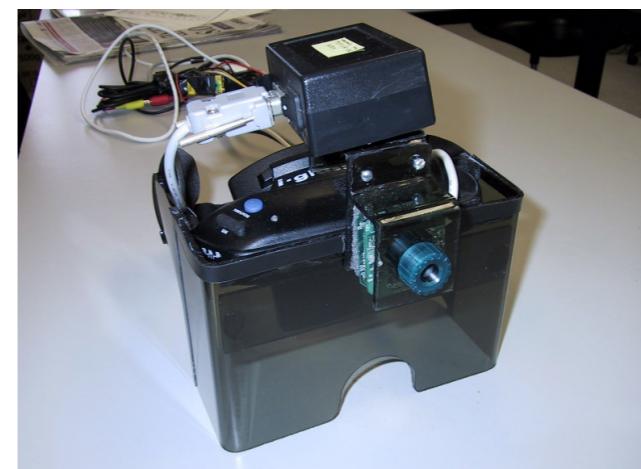
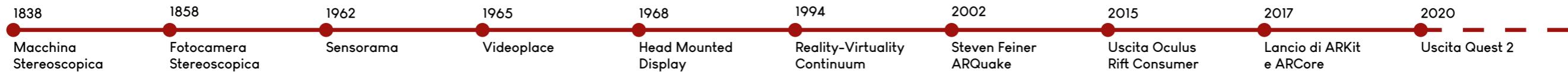


Figura 40 - Fotografia del dispositivo utilizzato per giocare ad ARQuake



Figura 41 - Oculus Rift Consumer Version



ARKit e ARCore Nel 2017 viene compiuto un passo importante nello sviluppo di app mobile che sfruttano la Realtà Aumentata: le due principali aziende produttrici di dispositivi mobili, Apple e Google, introducono i propri Software Development Kit (SDK) per la realizzazione di AR, rispettivamente ARKit per iOS e ARCore per Android.

ARKit viene presentato da Apple durante la conferenza WWDC2017, come piattaforma integrata nel sistema operativo nativo iOS 11, che consente agli sviluppatori di creare esperienze AR senza bisogno di hardware aggiuntivo. Poco dopo Google annuncia ARCore, per rendere la Realtà Aumentata disponibile agli utenti Android.

Entrambe i kit vantano nuove tecnologie basate sul motion tracking per un posizionamento accurato degli oggetti virtuali nello spazio reale, una comprensione dell'ambiente con cui l'oggetto interagisce e una stima della luce avanzata, che consente di illuminare gli oggetti in maniera accurata e corrispondente all'ambiente reale.

Grazie a questi SDK, la Realtà Aumentata diventa finalmente scalabile, accessibile e diffusa, apre la strada a una vasta gamma di applicazioni nei settori di intrattenimento, educazione design e marketing.

Oculus Quest 2 Il 16 settembre 2020 viene annunciata l'uscita dell'Oculus Quest 2 (successivamente Meta Quest 2 a seguito del rebranding di Facebook del 2021), che introduceva una potenza di calcolo superiore, un display a risoluzione più alta e una frequenza di aggiornamento aumentata rispetto al modello precedente.

Una delle principali innovazioni del dispositivo era la sua natura standalone, ovvero la capacità di funzionare in modo completamente indipendente da un computer esterno, grazie ad un processore integrato e un sistema di tracking "inside-out", che utilizza le telecamere sul visore per rilevare il movimento dell'utente nell'ambiente circostante.

La risposta delle testate giornalistiche in campo tecnologico è stata molto positiva: gli articoli lodavano il confort e la leggerezza del dispositivo, lo schermo, inoltre, ad alta risoluzione risulta un ottimo compromesso tra funzionalità e prezzo. Il Meta Quest 2 ha ampliato il concetto di Realtà Virtuale nella contemporaneità, caratterizzato da innovazioni che hanno contribuito alla diffusione su larga scala, anche fuori dalle ambiti ludico.



Figura 42 - Immagine promozionale del Meta Quest 2

TECNOLOGIE AR&VR

«*To see the site in a way that the archaeologists didn't get to see it*»



Figura 43 - Scatto di "Venn Room" alla Biennale di Architettura di Talinn, da Space Popular

PATRIMONIO VIRTUALE E MUSEOGRAFIA

Le tecnologie di Realtà Virtuale (VR), attraverso l'utilizzo di dispositivi specifici come quelli che abbiamo appena analizzato, permettono quindi agli utilizzatori di immergersi in un mondo digitale tridimensionale grazie all'utilizzo di dispositivi specifici creando esperienze visive coinvolgenti e interattive, aprendo un ampio ventaglio di possibilità plasmato dalla creatività degli sviluppatori e dei designer.

Virtual Reality e Augmented Reality Oggi la VR ha ampio spazio nell'ambito videoludico, tramite headset come il PlayStation VR o il Meta Quest, discendenti moderni del visionario head mounted display. Tuttavia, di recente ha acquisito importanza e si sta diffondendo anche in ambito didattico e turistico all'interno di musei e parchi archeologici, offrendo una visione dettagliata e completa di luoghi e siti turistici, di fatto rendendo possibile vivere esperienze innovative e accessibili a tutti e impensabili fino a qualche anno fa.



Figura 44 - Instantanea schermo dell'esperienza VR della ricostruzione dell'Abbazia di Bath, da Wessex Archaeology's Studio

Giungendo al nostro campo di interesse principale possiamo quindi affermare che questi dispositivi, finalmente tecnologicamente validi e dal prezzo relativamente contenuto che ne può facilitare la larga diffusione, rappresentano una risorsa di grande valore, specialmente nell'ambito dell'intrattenimento e nella ricostruzione digitale di siti storici, architetture, musei e aree archeologiche.

Purtroppo però, poiché l'interazione avviene attraverso un display montato sulla testa e tramite l'uso di dispositivi di comando spaziale o di comando audio e / o di movimento (con o senza input o feedback tattile), la VR presenta anche alcuni limiti, come la possibilità di provocare capogiri o disagio all'utente, influenzando negativamente l'esperienza. I casi sono relativamente limitati ma in alternativa o in complemento si può ricorrere alla Realtà Aumentata (AR) che consente di sovrapporre elementi virtuali al mondo reale, creando esperienze di realtà mista in cui i due ambienti si integrano. Questa tecnologia si basa principalmente sull'uso di dispositivi mobili come smartphone, tablet o occhiali smart, permettendo un'interazione in tempo reale con l'ambiente circostante ad una platea più vasta.

Nonostante le enormi potenzialità, anche l'AR presenta delle sfide, tra cui la complessità degli algoritmi di rilevamento e tracciamento degli oggetti fisici, che possono causare maggiore latenza e una minore precisione nelle interazioni, oltre ovviamente al minor coinvolgimento sensoriale.

Infatti la VR permette all'utente una completa immersione nel mondo simulato isolandolo dal mondo esterno, mentre l'AR combina elementi reali con elementi virtuali, permettendo di rimanere a contatto con l'ambiente fisico circostante.

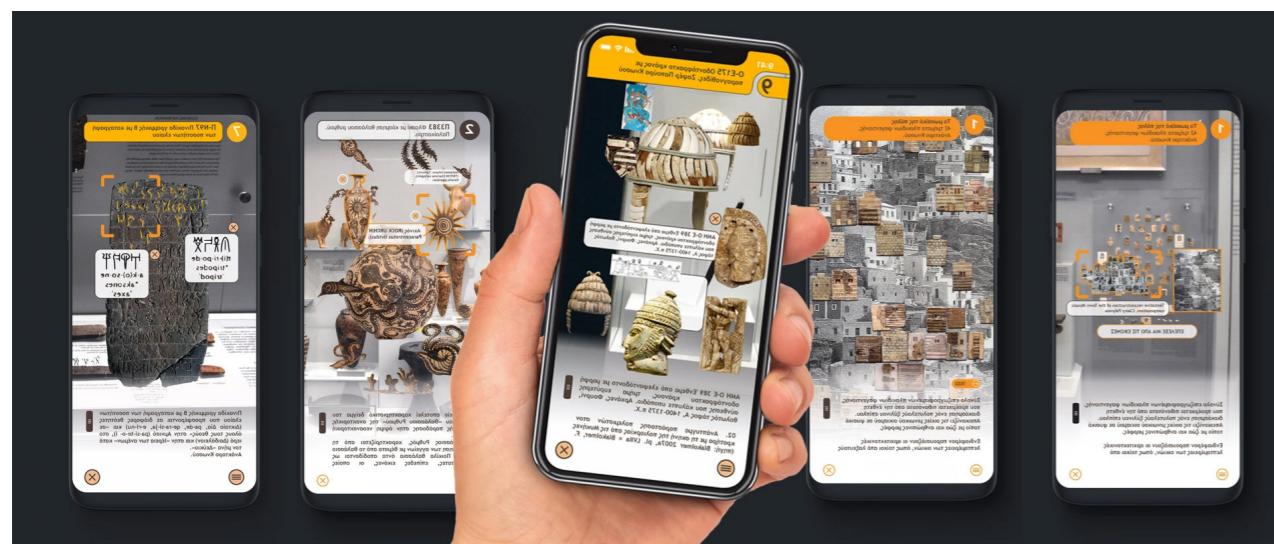


Figura 45 - Esempi di utilizzo della App per smartphone AR del museo di Heraklion, da fourthedesign

Virtual Heritage

Partendo da queste premesse, per comprendere come una giusta miscelazione di queste tecnologie possa incontrare e fondersi con l'archeologia e la conservazione del patrimonio architettonico, bisogna partire dal concetto di "patrimonio virtuale". Un'idea identificata sia dall'UNESCO's World Heritage Magazine nel 1999, come:

«L'utilizzo di tecnologie per l'interpretazione, conservazione e preservazione del Patrimonio Naturale, Culturale e Mondiale»¹

Virtual Archeology

Di conseguenza, il termine di "Virtual Archology" viene introdotto dallo scienziato Paul Reilly, che nel British Archaeological reports del 1990 scrive:

«Cosa significa qui il termine archeologia virtuale? Il concetto chiave è il virtuale, un'allusione ad un modello, una replica, la nozione che qualcosa può fungere da surrogato o da sostituzione per un originale. In altre parole, si riferisce alla descrizione di una formazione archeologica o ad una simulazione della formazione archeologica.»²

L'archeologia virtuale è quindi un concetto astratto, che fonde la realtà con l'immaginario, comunicando un paesaggio per ciò che era.

Dall'inizio dello sviluppo delle tecnologie di XR e per oltre un ventennio, a partire dagli anni Ottanta, le esperienze catalogate come "museo virtuale" si sono però limitate a riproporre una copia digitale del museo reale, senza dare informazioni o esperienze aggiuntive rispetto ad esso. In questo periodo viene elaborata una definizione di museo virtuale da Geoffrey Lewis, che nel 1996 scrive nella sezione degli articoli di Britannica Online, la versione web dell'Enciclopedia Britannica:

«Una collezione di immagini digitali, file sonori, documenti testuali e altri dati di interesse storico, scientifico o culturale ai quali si può accedere per mezzo di media elettronici. Un museo virtuale non ospita oggetti reali e quindi è privo della dimensione materiale e delle caratteristiche peculiari di un museo nel senso tradizionale del termine»³

1 - R. J. Stone, UNESCO's World Heritage Magazine, World Heritage Centre, Parigi, 1999, pagina 18-20

2 - Paul Reilly, British Archaeological reports, Winchester, 1990, pagina 133

3 - Geoffrey Lewis, Britannica Magazine, Edinburgh, 1996

Da allora, sono stati compiuti molti progressi sia nelle tecnologie, che nella concezione di museo virtuale. Negli anni Duemila si assiste, quindi, al tentativo di definire con maggiore accuratezza il concetto di museo virtuale, concentrandosi sia sulla diversità dei contenuti presentati che sulla tipologia del contenitore museale, arricchendo e ampliando le definizioni terminologiche precedenti.

Tra gli studi sui musei virtuali, un punto di vista significativo è quello del progetto V-MUST (Virtual Museum Transnational Network) che analizza il settore dei beni culturali riportando lo stato dell'arte dei musei virtuali europei. Secondo la definizione del V-MUST, il museo virtuale è:

«Una entità digitale che si basa sulle caratteristiche di un museo con lo scopo di complementare, accrescere o aumentare l'esperienza museale attraverso la personalizzazione, interattività e ricchezza dei contenuti.»⁴

4 - Rivista Trimestrale di Scienza dell'Amministrazione, "Musei virtuali e inclusione sociale" Marco Chiuppesi, 1/2016



Figura 46 - Instantanea schermo dell'esperienza VR della ricostruzione dell'Abbazia di Bath, da Wessex Archaeology's Studio

Questa definizione pone enfasi sul fatto che il museo virtuale non è una sostituzione del museo reale, ma un'esperienza complementare che quindi aggiunge materiale ad esso.

Un percorso pluriennale che compie un nuovo passo grazie alle tecnologie immersive che oggi trovano ampio impiego nella valorizzazione del patrimonio culturale, offrendo strumenti innovativi per la fruizione, la conservazione e la divulgazione dei beni culturali. Infatti possiamo osservare come numerosi musei e istituzioni stiano oggi sperimentando soluzioni che combinano rigore scientifico e narrazione interattiva, trasformando il visitatore da osservatore passivo a protagonista dell'esperienza.

The Bath Abbey Footprint Project

Un esempio della direzione intrapresa ci viene dal gruppo Wessex Archaeology che nel 2020 ha effettuato un rilievo fotogrammetrico delle fondamenta dell'Abbazia di Bath. Nonostante le condizioni di lavoro spesso difficili in loco, con scarsa illuminazione e accesso limitato ad alcuni luoghi, ogni area è stata accuratamente catturata in 3D ad alta risoluzione e successivamente ricomposta digitalmente dal team di geomatica. Per ottimizzare l'esperienza, le aree a diversi livelli di dettaglio sono state ricampionate e poi sono state ricomposte in un ambiente VR che mostra il sito nella sua interezza, come non era mai stato visto prima, assieme ai suoi elementi architettonici e luoghi di sepoltura. Gli scavi sono stati posizionati in una ricostruzione dell'abbazia per aiutare l'utente a comprendere il l'abbazia nella sua interezza. Inoltre l'esperienza comprende dei pop up che contengono le spiegazioni.

The Venn Room

Un altro interessante esempio ci viene fornito da The Venn Room, un'installazione immersiva realizzata dal collettivo creativo Space Popular, in occasione della biennale di architettura di Talinn, in Estonia. L'esperienza esplora le intersezioni tra spazio fisico, digitale e narrativo sensoriale. Gli spettatori camminano attraverso un ambiente architettonico che diventa teatro di proiezioni, suoni e interazioni multimediali.

L'installazione si articola come un ambiente tridimensionale che mescola elementi fisici e virtuali per stimolare riflessioni sul tema dell'abitare condiviso e della trasformazione degli spazi. Dal punto di vista tecnico, vengono utilizzati dei portali virtuali rappresentati da zone interattive in cui l'utente può passare da uno spazio fisico a uno spazio digitale, che permettono di "connettere, riordinare o riorganizzare" stanze e oggetti personali.

Figura 47 - Diagramma rappresentativo della Venn Room, da Space Popular

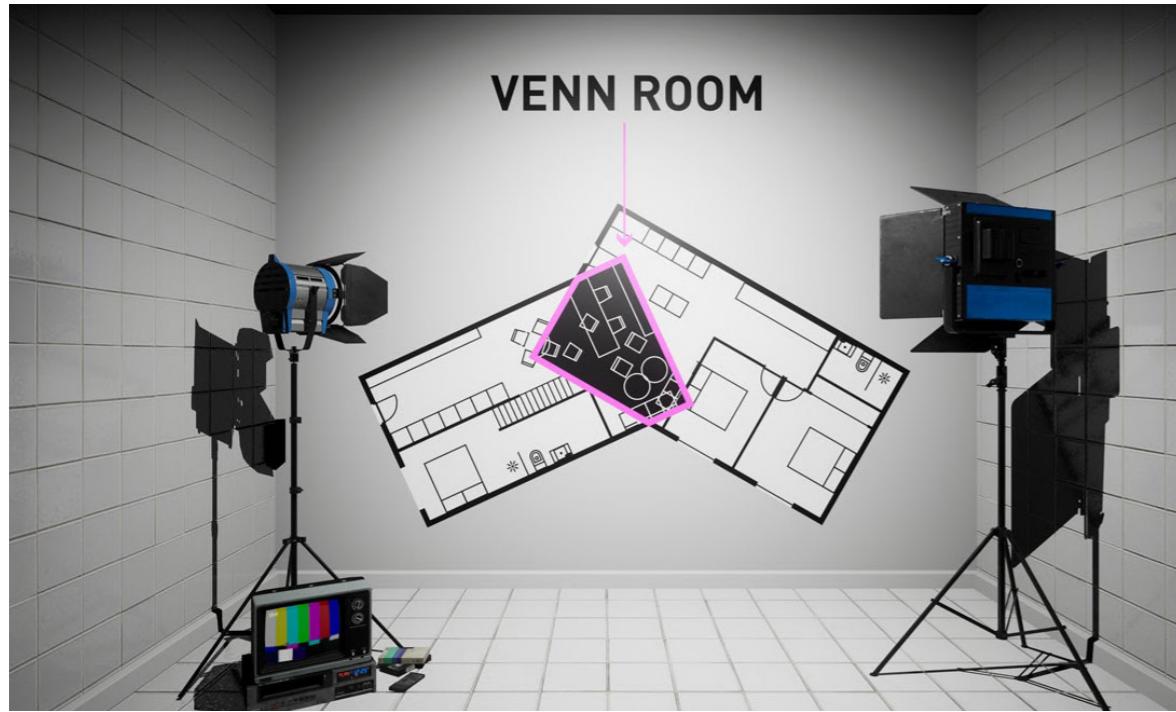


Figura 48 - Venn Room, da Space Popular



«Come i diagrammi di Venn, le case saranno sovrapposte l'una all'altra, creando collage di tutti i tipi di stanze che daranno vita a ibridi senza precedenti di categorie formali e funzionali che metteranno alla prova i nostri codici e rituali sociali e, di conseguenza, il nostro comportamento e il nostro modo di dare un senso al nostro modo di vivere.»⁵

The Venn Room dimostra come un uso combinato di realtà estesa, architettura e coinvolgimento sensoriale possa stimolare un rapporto attivo e riflessivo fra visitatore e contenuto.

*Heraklion
Archaeological
Museum*

Un esempio significativo di realtà aumentata applicata alla museografia è il museo archeologico di Heraklion a Creta, nel quale lo studio di FourtheDesign nel 2013 ha realizzato un'applicazione che permette di migliorare l'esperienza dei visitatori.

Per vedere i contenuti AR è necessario che l'utente scansioni gli oggetti della mostra con la fotocamera.

Una volta riconosciuto il reperto, il sistema di realtà aumentata fornisce varie funzionalità, come modelli 3D degli oggetti, video, guide audio, e attività interattive.

5 - Lara Lesmes and Fredrik Hellberg, *Who owns the global home?*, Catalogue of Tallinn Architecture Biennale, Tallinn, 2019

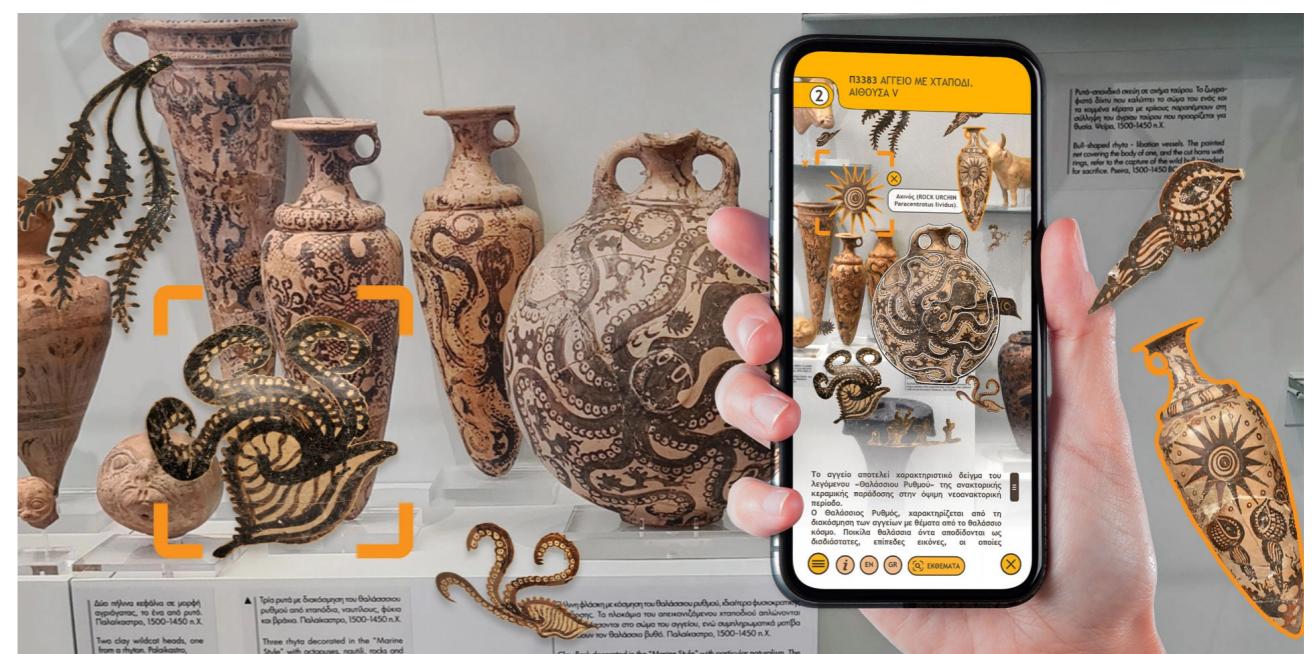


Figura 49 - Esempi di utilizzo dell'AR del museo di Heraklion, da fourtheDesign

Tra le funzionalità più particolari dell'applicazione, troviamo i modelli 3D e l'animazione degli oggetti. I modelli tridimensionali consentono ai visitatori di guardare i manufatti più da vicino e di vederli da angolazioni diverse, ruotandoli e ingrandendoli.

Musei nel Metaverso a Palazzo Madama Nel 2023 il progetto "Musei nel Metaverso", realizzato da CTE Next (Casa delle Tecnologie Emergenti) ha presentato a Palazzo Madama a Torino uno dei primi esperimenti italiani di applicazione delle tecnologie di realtà estesa in ambito museale. L'iniziativa propone un modello ibrido e immersivo, in cui lo spazio reale del museo si estende nel virtuale.

I visitatori infatti possono esplorare in modo interattivo le collezioni museali accedendo anche a contenuti aggiuntivi non presenti fisicamente nel museo, da modelli 3D fino a ricostruzioni storiche e narrazioni personalizzate.

L'interazione viene poi portata al di fuori dello spazio virtuale, integrando stampa 3D di elementi realizzati dagli utenti durante l'esperienza VR, con



Figura 50 - Totem con esposte alcune medaglie rinascimentali stampate in 3D, da Palazzo Madama

l'obiettivo di rendere l'esperienza museale più partecipativa e inclusiva. L'integrazione delle tecnologie immersive nelle mostre ha portato un cambiamento rivoluzionario nell'esperienza museale convenzionale, superando i confini fisici dell'esposizione verso nuovi orizzonti della fruizione culturale. I rapidi progressi nelle tecnologie come Realtà Aumentata e Realtà Virtuale, assieme a sviluppi della computer grafica, hanno migliorato il realismo visivo delle esperienze immersive, rendendo l'applicazione di queste tecnologie incredibilmente immersiva e di grande impatto. Questo miglioramento ha influenzato in modo significativo i visitatori e gli incontri museali.

Il futuro delle tecnologie immersive nei musei

In generale, lo sviluppo di tecnologie immersive in ambito museale è diventato da eventi innovativi e puntuali a esperienze utili e di maggiore presenza. Queste applicazioni consentono di colmare il divario tra il visitatore e il contenuto storico generalmente difficile da rendere immersivo all'interno delle mostre, favorendo quindi connessioni più profonde e incoraggiando la partecipazione attiva.

Attualmente l'attenzione si concentra nel miglioramento delle interazioni con il visitatore, oltre alla narrazione e il loro coinvolgimento, difficilmente realizzabile con i metodi tradizionali.

GENESI VIRTUALE DEL BENE

La tecnologia come strumento
per restituire contesto e
forma.

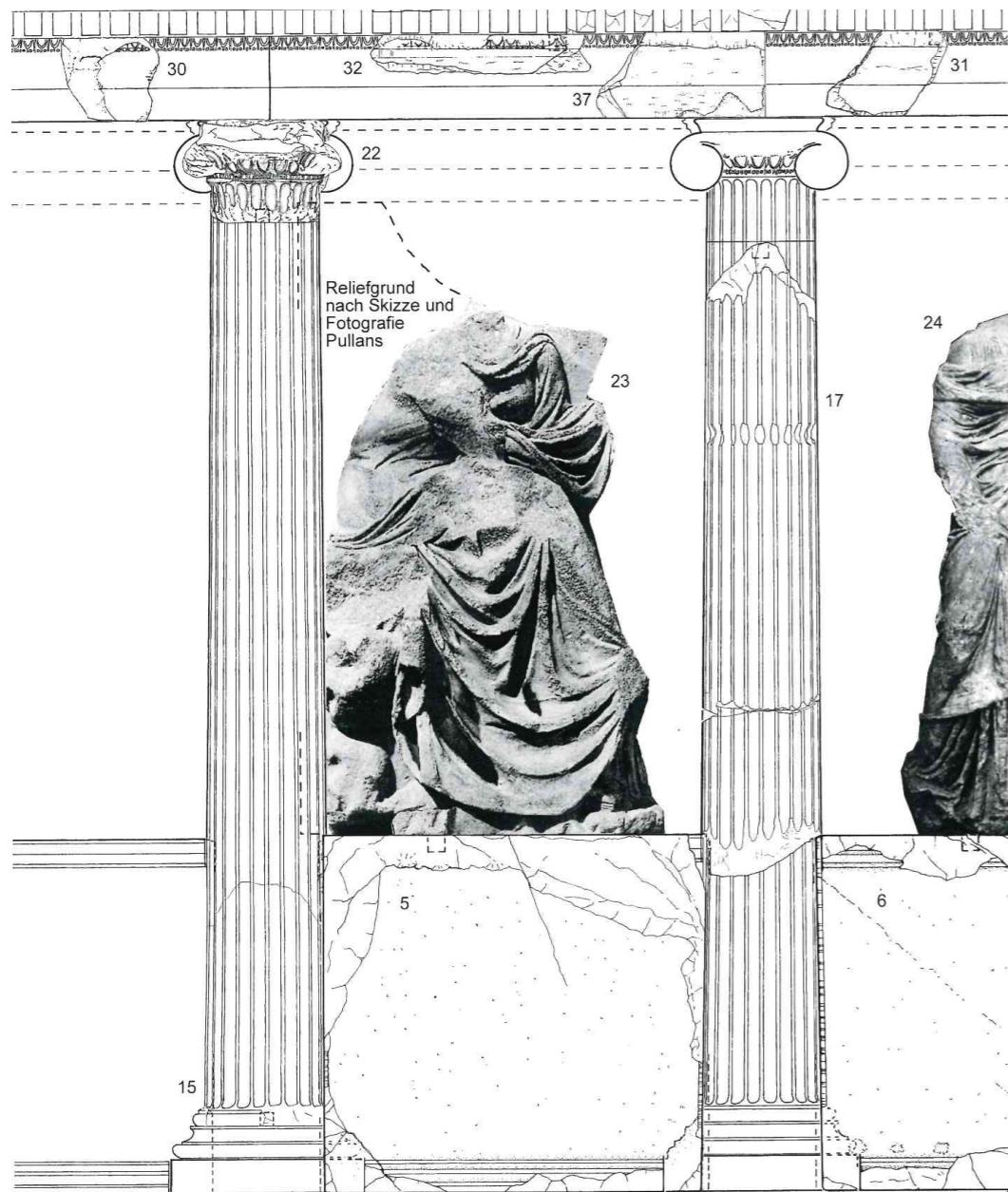


Figura 51 - Theodor Wiegand e Hans Schrader, Altare. Prova architettonica dell'ordine.
Veduta prospettica. Tavola 30. Tempio di Atena a Priene

METODOLOGIE E OBIETTIVI DELLA RICOSTRUZIONE

La modellazione del complesso architettonico di Priene si è basato su un approccio metodologico integrato, capace di unire l'analisi storica e la modellazione parametrica.

L'obiettivo principale è stato quello di creare un modello il più coerente e attendibile possibile rispetto alle indicazioni fornite dalle fonti, al fine di realizzare una rappresentazione digitale e parametrica del sito nel suo insieme. Infatti, rispetto al normale flusso di lavoro utilizzato principalmente per strutture ex novo, orientato a realtà futura, noi poniamo l'obiettivo di acquisire i dati di un elemento già realizzato, seppur in uno stato di rudere, con l'intento di una futura fruizione.

In questa fase, la difficoltà principale è stata individuare famiglie¹ ad hoc che fossero coerenti con le fonti storiche analizzate.

Analisi storica La prima fase è consistita nella raccolta e nell'analisi delle indicazioni fornite dagli archeologi tedeschi che operarono nel sito, i quali pubblicarono tavole, rilievi e misurazioni fondamentali per la comprensione del complesso archeologico. In particolare, la monografia di Theodor Wiegand e Hans Schrader, prodotta dalle campagne di scavo tedesche condotte tra il 1895 e 1899.²

Wiegand diresse gli scavi, mentre Schrader si occupò delle analisi architettoniche e delle ricostruzioni grafiche. Questa impresa si inseriva nella vasta stagione di esplorazioni tedesche in Asia Minore dalla fine dell'Ottocento, che coinvolse anche i siti di Pergamo, Magnesia, Mileto e Didyma.

1 - In Autodesk Revit, una famiglia è un insieme di elementi con caratteristiche comuni, definiti da geometrie e parametri. Si possono differenziare in Famiglie caricabili e Famiglie di sistema.

2 - C. Blümel, "Wiegand, Teodoro," in Enciclopedia dell'Arte Antica (Rome: Istituto della Enciclopedia Italiana, 1966).

Una delle loro scoperte più significative riguarda la straordinaria precisione matematica dell'Athenaion. I due studiosi dimostrarono che il Tempio di Atena segue un modulo costante, ripetuto con coerenza in tutte le parti dell'edificio: un esempio paradigmatico dell'ordine e della razionalità geometrica tipica del tardo classicismo. L'assenza di grande presenza decorativa sottolinea la centralità dell'armonia matematica.

A questa prima fase di studi si affiancano le più recenti pubblicazioni di Wolf Koenigs (*Der Athenatempel von Priene*³) e Arnd Hennemeyer (*Das Athenaheiligtum von Priene*⁴), che propongono una revisione moderna delle analisi ottocentesche. Le loro opere aggiornano e commentano criticamente i risultati di Wiegand e Schrader, integrandoli con nuove metodologie e strumenti di rilevamento.

Durante la ricerca delle fonti storiche per la ricostruzione del complesso sono emersi altri testi fondamentali per la comprensione tridimensionale del sito archeologico.

In particolare, l'articolo pubblicato *National Geographic*, “Città greche d'Oriente: Priene e Afrodisia in 3D”⁵, il quale ha fornito una visione d'insieme complesso.

Nonostante alcune imprecisione tecniche presenti nella ricostruzione, è stato possibile utilizzarla come valido spunto metodologico per la ricostruzione.

Inoltre, altri contenuti reperiti online hanno contribuito a integrare le informazioni disponibile, permettendo una ricostruzione con elementi utili e coerenti rispetto alla narrazione storica e spaziale del modello.

Tali fonti, se analizzate criticamente, sono utili per verificare le differenti interpretazioni del sito archeologico, e di verificare le ipotesi geometriche e proporzionali non totalmente comprensibili dalle fonti storiche, rafforzando così la coerenza con la ricostruzione

Sopralluogo Successivamente, è stato condotto un sopralluogo diretto sul sito di Priene, che si è rivelato fondamentale per acquisire una comprensione spaziale, materica dell'architettura, capendo le differenze

3 - Wolf Koenigs, *Der Athenatempel von Priene* (Mainz: Dr. Ludwig Reichert Verlag, 2016).

4 - Arnd Hennemeyer, *Das Athenaheiligtum von Priene* (Mainz: Dr. Ludwig Reichert Verlag, 2010).

5 - *National Geographic*. Speciale Storica Archeologia. “Città greche d'Oriente: Priene e Afrodisia in 3D.” Ottobre 2021

Figura 52 - Foto delle colonne realizzate attraverso anastilosi di Priene, elaborazione propria



significative tra le fonti storiche analizzate e la realtà attuale.

L'integrazione tra documentazione storica, rilievo diretto e modellazione digitale permette di costruire un modello, coerente e funzionale sia alla ricerca scientifica sia alla rappresentazione divulgativa del complesso.

Un'attenzione particolare è stata rivolta al Tempio di Atena Polias, il principale edificio sacro del complesso. Lo stato di conservazione attuale è fortemente compromesso rispetto all'originale, probabilmente a causa delle condizioni ambientali e delle trasformazioni subite nel tempo. Tuttavia, grazie alle operazioni di anastilosi condotte dai ricercatori tedeschi, sono riusciti a ricostruire parzialmente alcune colonne, fornendo un riferimento importante per la modellazione.

Nell'attualità, osservando attentamente le tracce sul sito, sono ancora riconoscibili gli elementi principali del complesso archeologico tra cui: il tempio, la terrazza, il propileo, l'altare e la tesoreria.

a combinazione dei dati storici e del rilievo sul sito ha consentito di verificare la coerenza tra le tavole di Wolf Koenigs e Arnd Hennemeyer e di comprendere gli elementi del complesso, offrendo una base per la modellazione digitale.

Confronto con i casi studio Rispetto ai progetti di modellazione del BIM di siti archeologici analizzati (HBIM anfiteatri romani di Verona e Pola, HBim del Tempio Uni, Cattedrale di San Pietro a Mantova, il caso studio di Heron), la ricostruzione virtuale del santuario di Priene si inserisce nel panorama esistente adottando tecnologie che rispecchiano lo standard di modellazione tipicamente utilizzato nei siti in stato di rudere e l'utilizzo integrato della nuvola di punti e delle fonti storiche. Tuttavia, si differenzia in due aspetti fondamentali: l'obiettivo di contenuto e la metodologia di divulgazione.

Le principali similitudini, quindi, risiedono nella volontà di costruire elementi architettonici attualmente in stato di rudere, riportandoli alla luce. In diversi casi viene utilizzate le fonti storiche e le similitudini di altri casi studi vengono ripresi, come nel nostro caso. In altri casi invece si basa puramente sulla ricostruzione del sito attraverso le tracce nel terreno e i diversi elementi.

Un'altra similitudine importante è la volontà di realizzare elementi parametrici con la consapevolezza che l'accuratezza scientifica è vincolata ai ritrovamenti in situ; quindi, non ci sarà mai una definizione universale degli elementi.

La principale distinzione, invece, risiede nell'approccio della divulgazione al pubblico; infatti, in questi casi riscontrati nella maggior parte, sono divulgativi per la comunità scientifica, e non per l'accessibilità al pubblico, questo progetto mira specificatamente alla fruibilità integrata della ricostruzione, creando non solo una traccia parametrica e identificativa dei diversi elementi, ma anche una immersione nella realtà oramai perduta.

Tra le strategie di modellazione adottate, il progetto si allinea con le pratiche individuate nei casi analizzati, in particolare nella volontà di parametrizzare i diversi elementi del sito archeologico, oltre alla base di partenza interconnessa, ovvero la base delle fonti storiche oltre che all'utilizzo delle nuvole di punti per il confronto analitico della modellazione realizzata.

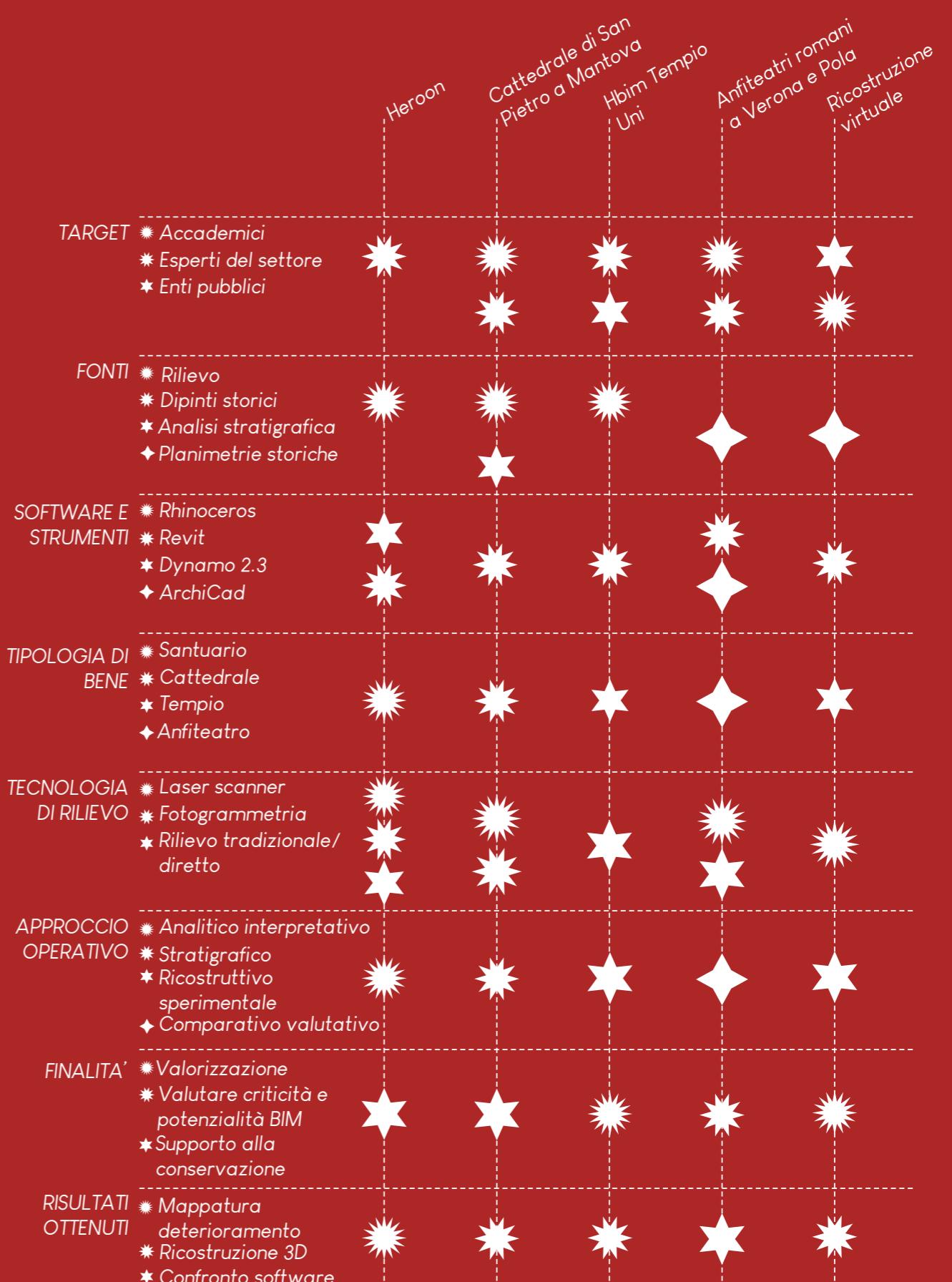


Figura 53 - Tabella di confronto casi studio, elaborazione propria

GENESI VIRTUALE DEL BENE

Il modello prende vita dove il
frammento suggerisce una
forma.

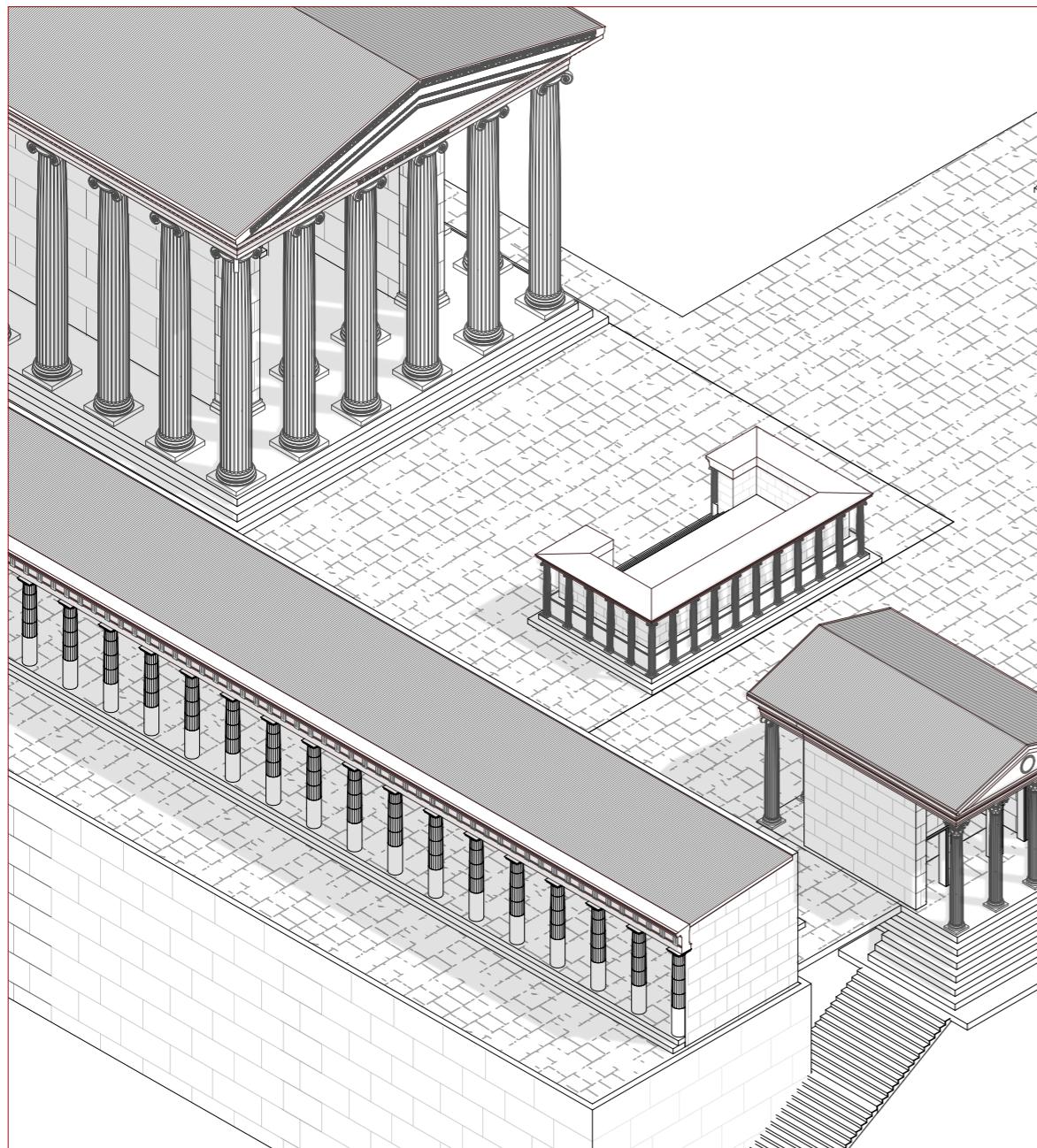


Figura 54 - Vista del modello da Revit, elaborazione propria

IMPOSTAZIONE DEL MODELLO

Definiti gli obiettivi e le metodologie, analizzate le fonti storiche alla base della ricostruzione digitale, si è passati alla fase operativa di impostazione e modellazione del progetto. Questa fase ha riguardato la costruzione del modello digitale.

Prima di avviare la fase di modellazione, è stata effettuata l'impostazione del progetto all'interno dell'ambiente di lavoro Revit, definendo la struttura del modello.

Organizzazione del modello In primo luogo, è stato creato un file di lavoro, organizzato in base alle aree funzionali del complesso archeologico, (ad esempio:

terrazza del tempio, propileo, altare, percorsi di accesso), creando principalmente delle griglie di controllo per l'allineamento dei componenti. Successivamente, sono stati definiti i diversi livelli, corrispondenti ai principali piani di quota, individuati attraverso le analisi delle fonti: la base della terrazza, il crepidoma del tempio, il livello dell'agorà, il propileo e l'altare, oltre ai livelli corrispondenti ai tetti.

Questi livelli hanno costituito la base per la realizzazione del modello e sono serviti per impostare griglie di riferimento utili all'allineamento, al controllo dimensionale e alla verifica di coerenza tra le diverse parti dell'edificio.

Per la realizzazione del modello, si è deciso di utilizzare famiglie User-Defined (caricabili) per elementi come colonne, trabeazioni, architravi ed elementi ornamentali, mentre per muri, solai, tetti e scale sono state impiegate le famiglie di sistema, già integrate in Revit, che consentono modifiche direttamente all'interno del progetto.

Parallelamente, sono stati individuati i parametri chiave per la modellazione, fondamentali per garantire la coerenza geometrica tra tutte le famiglie del progetto (colonne, capitelli, trabeazioni, basamenti, elementi di copertura, ecc.).

L'uso di famiglie parametriche⁶ ha permesso di ricostruire moduli architettonici ripetibili, mantenendo al contempo flessibilità e adattabilità alle variazioni dimensionali derivanti dalle fonti storiche o dai rilievi sul sito.

Infine, il workflow è stato organizzato secondo una logica *bottom up*, partendo dai singoli elementi architettonici fino alla composizione dell'intero complesso archeologico. Ogni fase di modellazione è stata sottoposta a verifica di coerenza rispetto alle fonti storiche e ai dati del rilievo, grazie a queste verifiche è stato possibile migliorare e modificare mano a mano la creazione del modello.

La modellazione delle colonne ha costituito una delle fasi più complesse della ricostruzione del sito archeologico di Priene, siccome la restituzione parametrica degli ordini richiede un grande rigore geometrico e fedeltà formale degli elementi, così da essere replicabile.

Particolare attenzione è stata dedicata alla modellazione dei capitelli, siccome la loro complessità rispetto alla parametrizzazione richiede grande controllo dei diversi elementi, come per il capitello ionico, la voluta, per il corinzio, la composizione delle diverse foglie d'acanto.

A partire da tali studi, è stato sviluppato un sistema di famiglie parametriche che consente di regolare in modo dinamico le dimensioni e le proporzioni di ciascun componente del capitello, del basamento e del fusto, mantenendo costante la coerenza dell'ordine architettonico. La definizione dei singoli elementi in modo parametrico ha inoltre consentito di mettere in relazione le singole parti dell'ordine con i restanti elementi architettonici (colonna, trabeazione, architrave), favorendo la costruzione modulare dell'intero edificio e garantendo uniformità nella scala e nelle proporzioni. Sono stati considerati non solo i rilievi e le tavole pubblicate dai ricercatori Wolf Koenigs e Arnd Hennemeyer, ma anche i principi proporzionali canonici dell'ordini, al fine di compensare eventuali lacune o imprecisioni nelle fonti storiche.

Il risultato finale è un modello informativo pienamente integrato nel sistema BIM del complesso di Priene, costituisce una base scientifica per la ricostruzione architettonica, la conservazione digitale e la divulgazione didattica del patrimonio classico.

6 - Una famiglia parametrica è definita da parametri, ossia variabili che consentono di controllare la geometria e le proprietà dell'elemento, come altezza, larghezza, profondità e materiali. Grazie a questi parametri, il modello si adatta automaticamente alle modifiche, senza necessità di ridisegnare l'elemento.

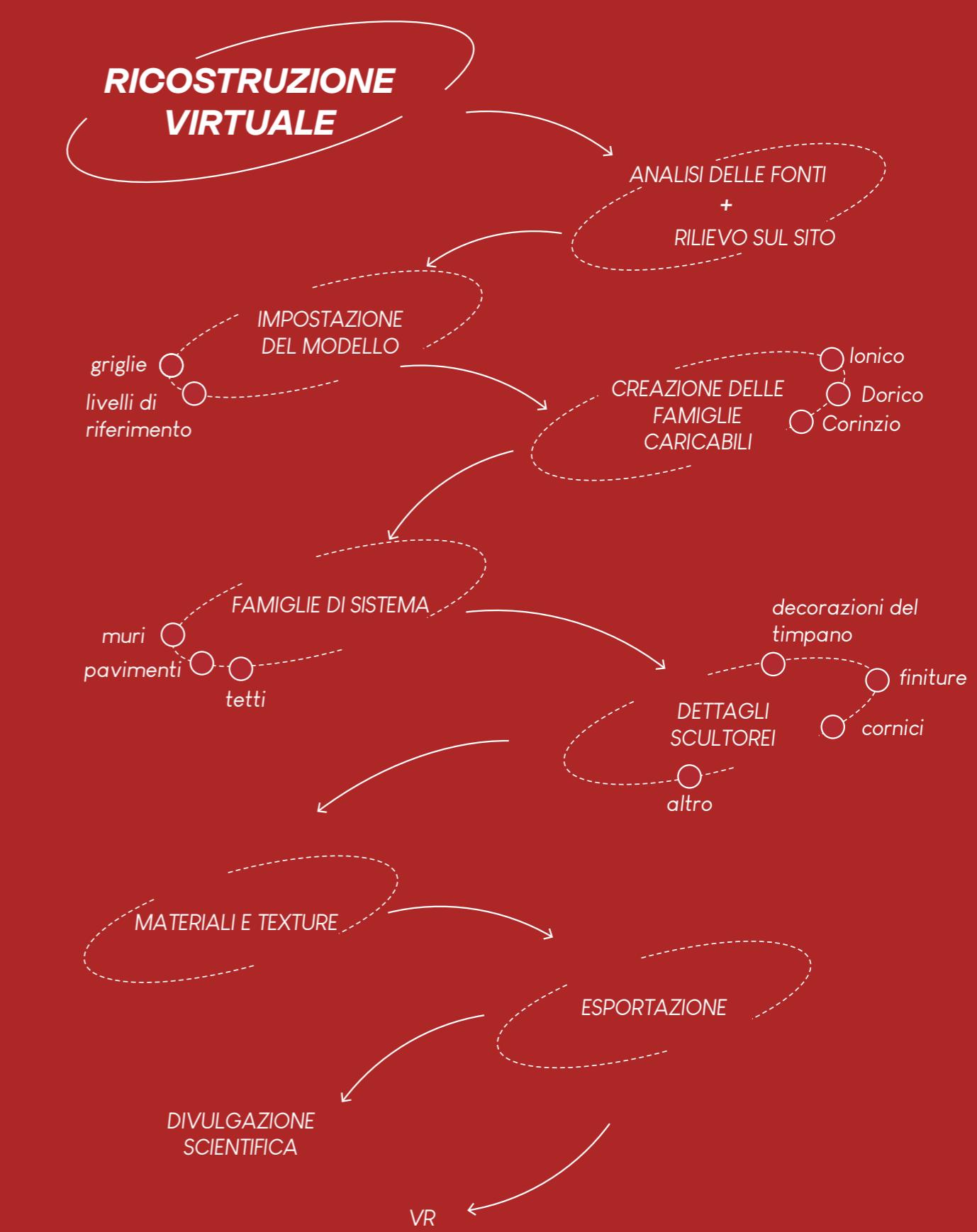


Figura 55 - Tabella di confronto casi studio, elaborazione propria

GENESI VIRTUALE DEL BENE

Il dorico è forte, lo ionico elegante, il corinzio ricco e ornato.

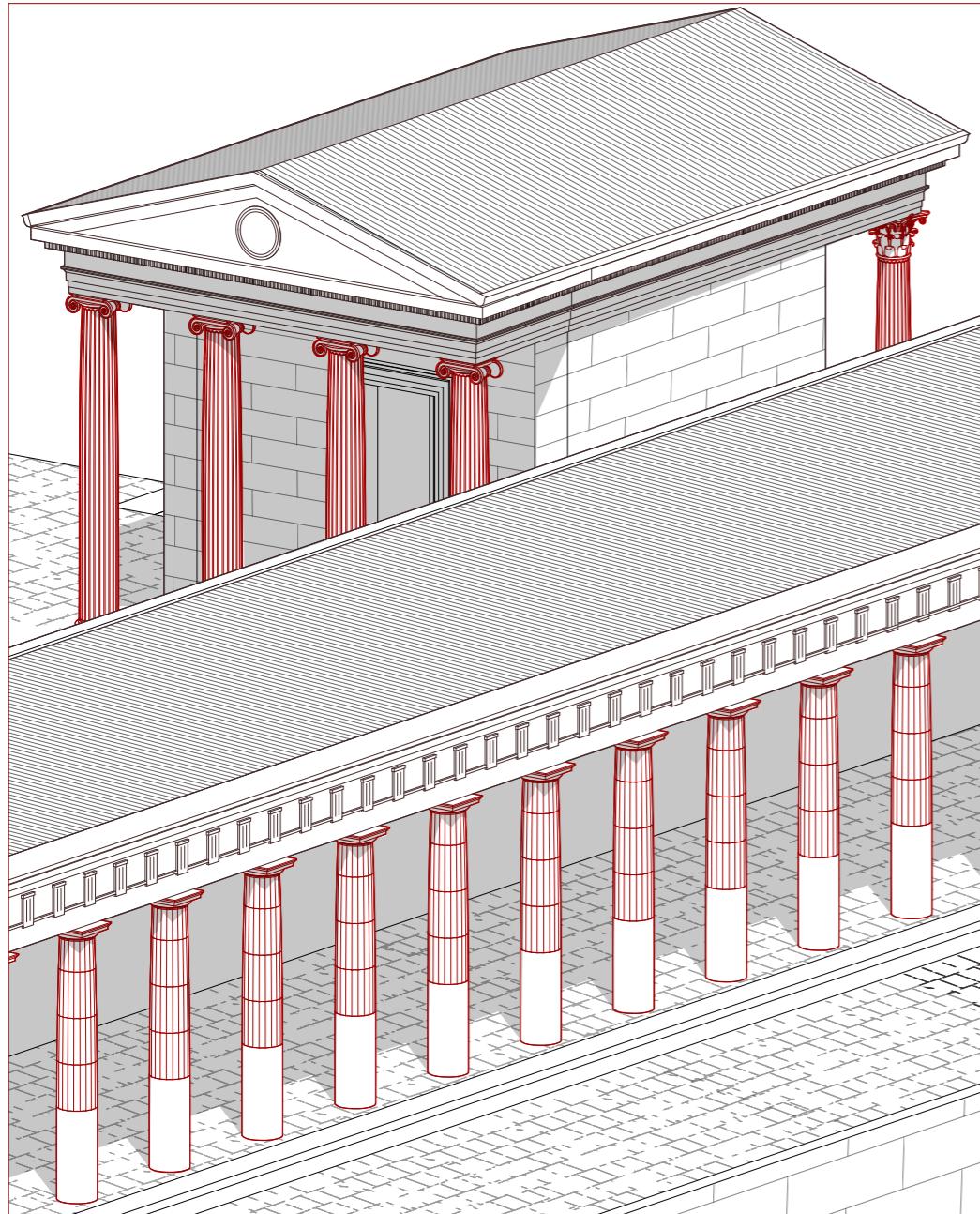


Figura 56 - Vista modello da Revit, elaborazione propria

LE FAMIGLIE CARICABILI:GLI ORDINI ARCHITETTONICI

La prima fase del processo di modellazione si è concentrata sulla definizione delle famiglie parametriche più ricorrenti all'interno del complesso, con particolare attenzione alla modellazione delle colonne. Questo tipo di elemento è stato scomposto in tre famiglie distinte: capitello, fusto e base, ciascuna sviluppata in base alle caratteristiche specifiche dei diversi ordini architettonici.

Sono state quindi realizzate tre tipologie principali di colonne, corrispondenti agli ordini dorico, ionico e corinzio, con un'attenzione particolare ai capitelli, elementi distintivi e complessi dal punto di vista geometrico. Per quanto riguarda il fusto, è stata creata un'unica famiglia condivisa tra l'ordine ionico e quello corinzio, modificando solo alcune proporzioni per adattarla alle differenti configurazioni.

L'ordine dorico, invece, ha richiesto un approccio specifico, poiché caratterizzato da una struttura formalmente diversa e da un disegno delle scanalature peculiare

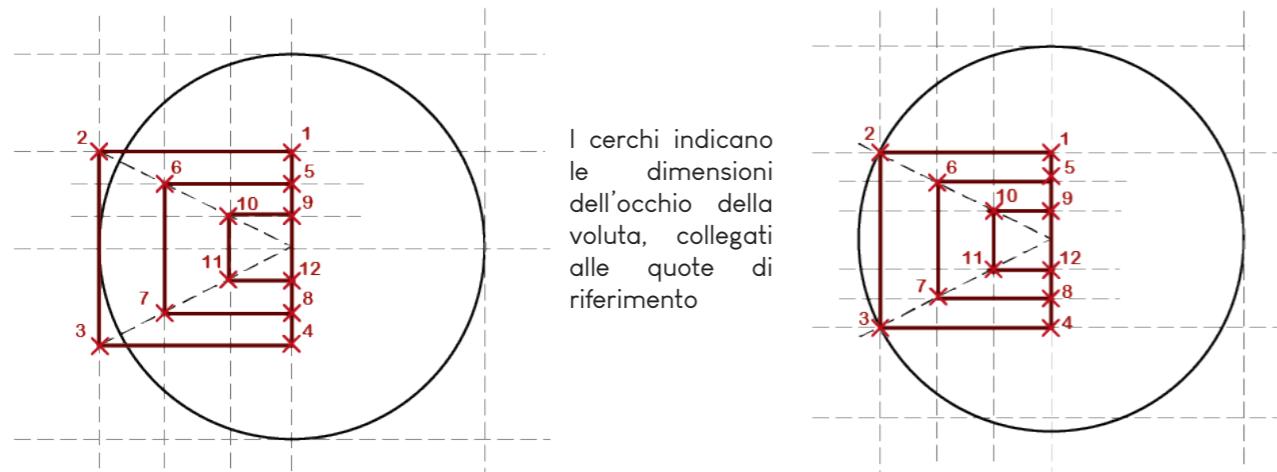
Per le basi, sono state definite due tipologie principali: la base attica e la base efesina⁷, entrambe presenti nel complesso, con prevalenza della base attica, maggiormente ricorrente nelle colonne modellate.

Modellazione dell'ordine ionico Per la creazione dell'ordine ionico è stata avviata a partire dal capitello, l'elemento di maggiore impatto visivo del complesso, oltre che alla complessità formale della rappresentazione della voluta.

L'ordine ionico ha avuto origine in Ionia, una regione costiera dell'Antolia centrale (nell'attualità la Turchia). L'ordine ionico si sviluppò in Ionia durante la metà del VI secolo a.C. e fu trasmesso alla Grecia continentale

⁷ - In ambito ionico, la base, si presenta con diverse varianti secondo le diverse aree geografiche base ionico-attica, base ionico-asiatica o efesina base samia, base cicladica, base libera o peloponnesiaca, base a toro, base composita, base attica.

Figura 57 - Rappresentazione dell'Inner and Outer dell'occhio della voluta



Viene collegato ai piani di riferimento definiti dalle quote EQ, che suddividono i quadranti. L'elemento è costruito come un insieme di linee ed è ancorato alla quota di riferimento centrale, che ne garantisce il posizionamento esatto al centro della spirale.

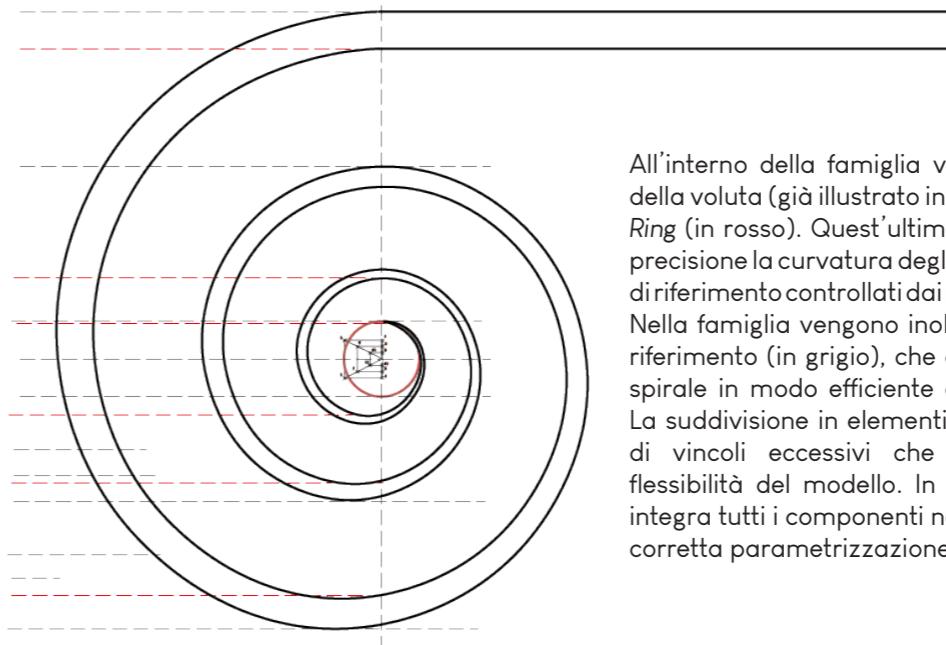
entro il V secolo a.C. Tra i primi esempi di capitello ionico c'è la colonna votiva iscritta di Nasso, risalente alla fine del VII secolo a.C. un altro edificio di grande importanza che riporta nelle vicinanze al nostro sito archeologico che presenta le caratteristiche di ordini ionici Tempio di Artemide a Efeso, una meraviglia del mondo antico, risalente al VI secolo a.C.

Capitello Ionico Il capitello è caratterizzato da tre parti: l'abaco, le volute e un echino o ovo, la parte sotto l'echino appartiene allo stelo della colonna. Per ottenere la forma della voluta, Vitruvio usa il metodo geometrico basato su un "occhio" circolare e dodici punti centrali. Viene, quindi, impostata una famiglia che determina il punto di origine per la spirale. Si disegna un quadrato iscritto nell'occhio, dai punti medi dei lati del quadrato si tracciano due linee che lo dividono in quattro; quindi, ciascuna delle linee viene suddivisa in segmenti uguali, generando punti necessari per costruire le spirali.

Le intersezioni di questa griglia costituiscono i punti di asse per la generazione della spirale "interna" (inner eye), costruita unendo progressivamente i punti numerati da 1 a 12, creando degli archi tangenti, ogni arco è tangente al precedente e costituisce un segmento della spirale. A partire da questo disegno è stato generato lo spessore della voluta (outer eye), ovvero il listello, definito come un dodicesimo del modulo, così da garantire la corretta proporzione e la necessaria simmetria della voluta ionica.

Per la definizione del profilo della spirale viene importato l'occhio della voluta, che viene tracciato seguendo il sistema di riferimento precedentemente impostato secondo le indicazioni classiche e le tavole

Figura 58 - Rappresentazione della spirale creata a partire dalla figura 57



storiche. Tale sistema è strutturato con parametri geometrici vincolanti che assicurano il mantenimento del rigore proporzionale all'interno della famiglia.

I vari parametri sono collegati a un parametro chiave il *Base Diameter* condiviso da tutte le famiglie delle colonne. Questo valore consente di preservare le proporzioni tra tutti gli elementi che compongono il capitello e, in particolare, la voluta. Di conseguenza, ogni modifica alle quote del profilo genera automaticamente l'aggiornamento delle distanze relative, mantenendo la corretta dimensione formale degli elementi della spirale. Una volta importata la famiglia della spirale all'interno della famiglia principale del capitello (insieme a tutti gli altri elementi precedentemente definiti), il suo comportamento parametrico viene associato al *Base Diameter*, cioè al diametro di base della colonna.

In questo modo, la spirale si adatta dinamicamente sia dal punto di vista proporzionale sia dal punto di vista della scala, seguendo ogni variazione del diametro di base e mantenendo invariati i rapporti geometrici. Ciò garantisce coerenza formale e corretto comportamento parametrico dell'intero capitello.

Un sistema analogo è stato adottato per la modellazione degli altri elementi del capitello, tra cui il canale della voluta, il balaustino (o colletto), il balteo, l'abaco e l'echino.

Questi componenti sono stati realizzati tramite profili separati, vincolati a piani di riferimento dedicati e definiti attraverso parametri dimensionali controllati, in modo da garantire coerenza geometrica e proporzionale rispetto alla spirale della voluta e ai vincoli chiave del modello.

Le forme sono state ottenute attraverso estrusioni di profili, semplici o doppi a seconda della complessità del componente. In particolare,

l'echino è stato modellato a partire da un profilo curvilineo ed estruso mediante una doppia estrusione, mentre l'abaco è stato definito come un parallelepipedo generato tramite l'estruzione di un vuoto parametrico.

L'intero capitello è concepito come una famiglia nidificata, all'interno della quale ogni elemento è governato da un set condiviso di parametri proporzionali. Questo consente di ottenere un sistema coerente, scalabile e dinamico, capace di adattarsi automaticamente alle variazioni dimensionali del capitello e della colonna.

Qualsiasi variazione del *Base Diameter* comporta automaticamente l'aggiornamento proporzionale di tutte le parti del capitello, permette così modularità e adattabilità del modello a differenti scale.

In particolare, si è deciso di creare il capitello ionico senza riportatore le modanature, le scanalature, presenti invece nei capitelli ad alto livello di dettaglio.

Figura 59 - Rappresentazione del capitello ionico realizzato in ambiente BIM



Questa semplificazione permette di ottenere un modello più leggero e gestibile, utile per il modello da noi realizzato, senza necessità di decorazioni formali siccome la volontà è di rappresentare l'intero complesso nella sua completezza, oltre che alla difficoltà di parametrizzazione di questi elementi decorativi. Nonostante l'assenza dei dettagli ornamentali, il modello mantiene la coerenza parametrica.

La spirale della voluta ionica è l'elemento più rappresentativo e complesso del capitello. Come sottolinea:

«La ricostruzione della voluta ionica vitruviana presenta una notevole complessità geometrica, tanto da aver prodotto, nei trattatisti rinascimentali, una varietà di interpretazioni e soluzioni diverse.»⁸

Questo concetto evidenzia come la definizione delle proporzioni e della simmetria sia stata oggetto di attenzione e dibattito fin dall'antichità, e ha guidato anche la scelta metodologica adottata nel modello parametrico, in cui la spirale è stata semplificata pur mantenendo le proporzioni principali.

Fusto Una volta definito il capitello, la modellazione si concentra sulla ricostruzione del fusto, completando la continuità geometrica della colonna.

I fusti degli ordini architettonici classici, dipendendo dal tipo di ordine, possono presentare diverse conformazioni, in questo caso si è considerando la realizzazione dei tre ordini architettonici, analizzando le proporzioni geometriche si denota una similitudine significativa con il fusto della colonna ionica e corinzia, al contrario l'ordine dorico presenta una geometria in pianta differente.

Dal punto di vista geometrico, ovvero nella sezione e nel numero delle scanalature, l'ordine ionico e corinzio presentano una similitudine quasi comparabile, di conseguenza è stato possibile realizzare un'unica famiglia parametrica per entrambi gli ordini, adattabile mediante modifica di parametri dimensionali.

Due caratteristiche distintive delle colonne greche sono la presenza di un lieve rigonfiamento, chiamato entasi, che conferisce un effetto di maggiore

8 - Maria Losito, «La ricostruzione della voluta ionica vitruviana nei trattati del Rinascimento», *Mélanges de l'École française de Rome – Antiquité*, 105/1, 1993, pp. 133-175.

Figura 60 - Definizione dei diversi profili, vincolati ai diversi piani per la realizzazione del fusto

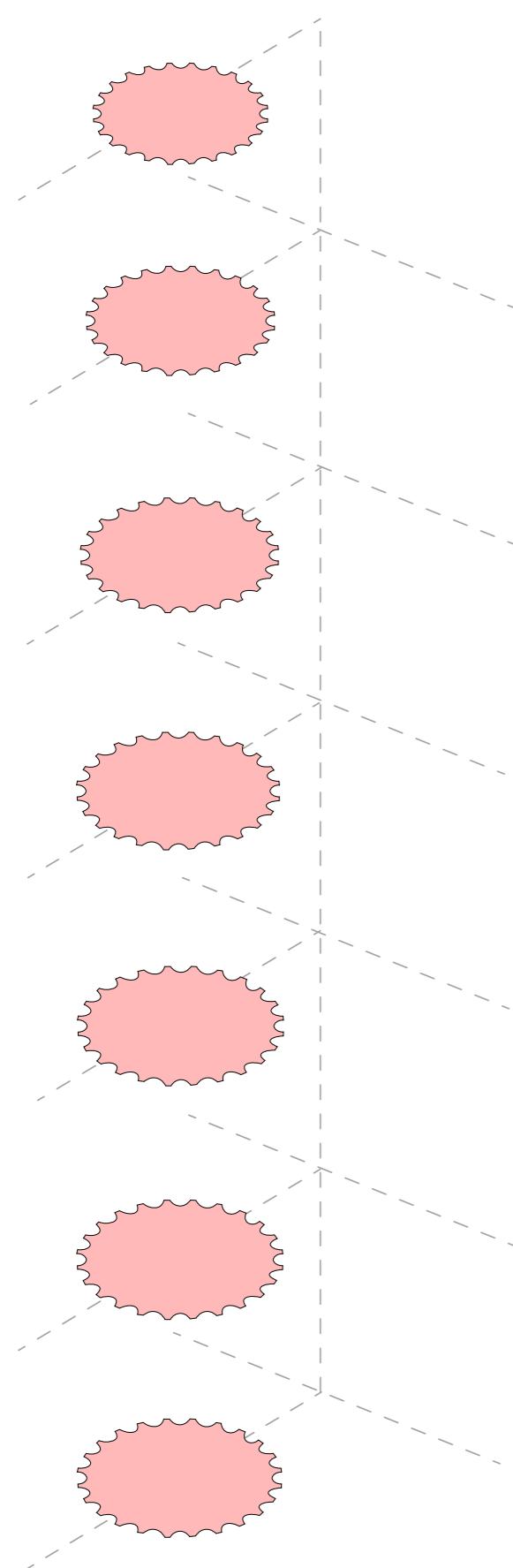


Figura 61 - creazione dello fusto attraverso i diversi profili

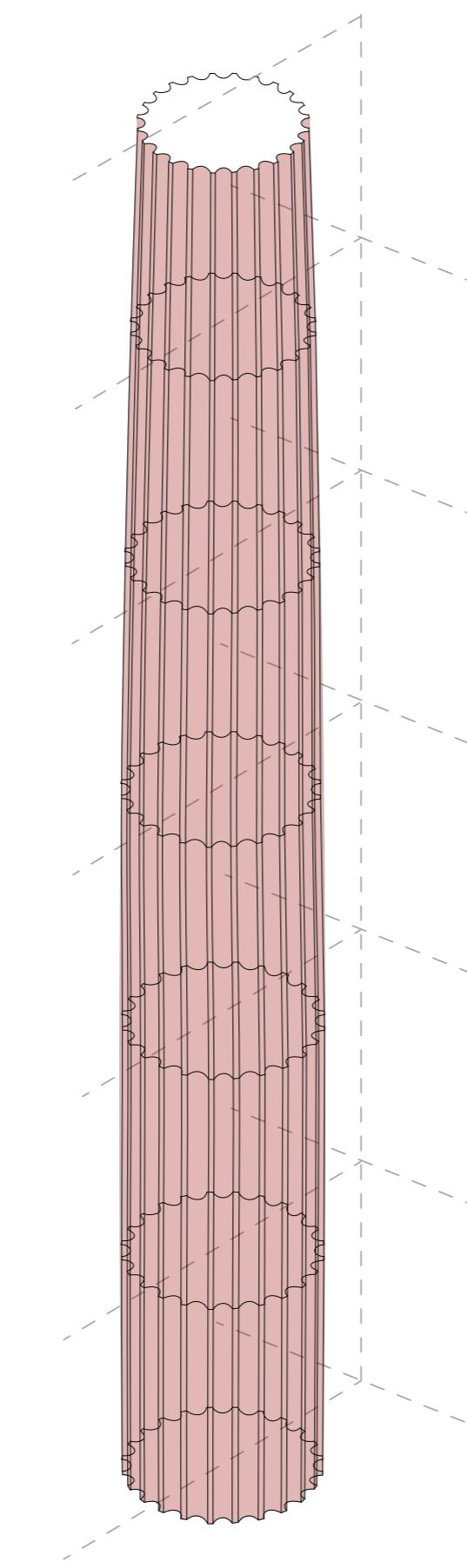
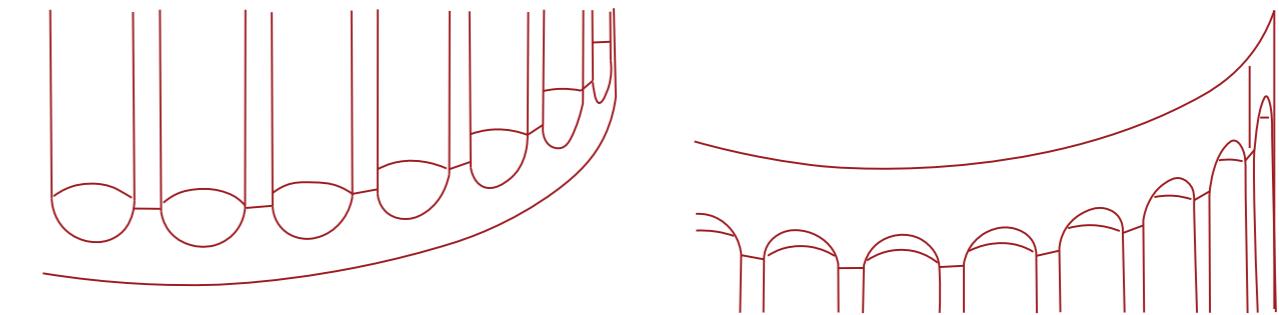


Figura 62 - Rappresentazione della realizzazione del scommoscapo + terminazione superiore ad arco e il l'innoscapo + terminazione inferiore ad arco



vitalità ed elasticità visiva, e una leggera diminuzione della sezione verso l'alto, detta rastremazione, che accentua lo slancio verticale. Questo rigonfiamento si colloca generalmente nel primo terzo o nella metà inferiore del fusto, dopodiché la colonna si restringe gradualmente verso il capitello.

Per realizzare questa caratteristica, durante la modellazione si è deciso di creare una famiglia adattiva⁹ che, mediante la definizione di diversi profili a scale differenti e il loro collegamento tramite il comando *loft*, consente di generare un unico elemento continuo. In questo modo è possibile ottenere la variazione necessaria per definire il rigonfiamento centrale del fusto della colonna.

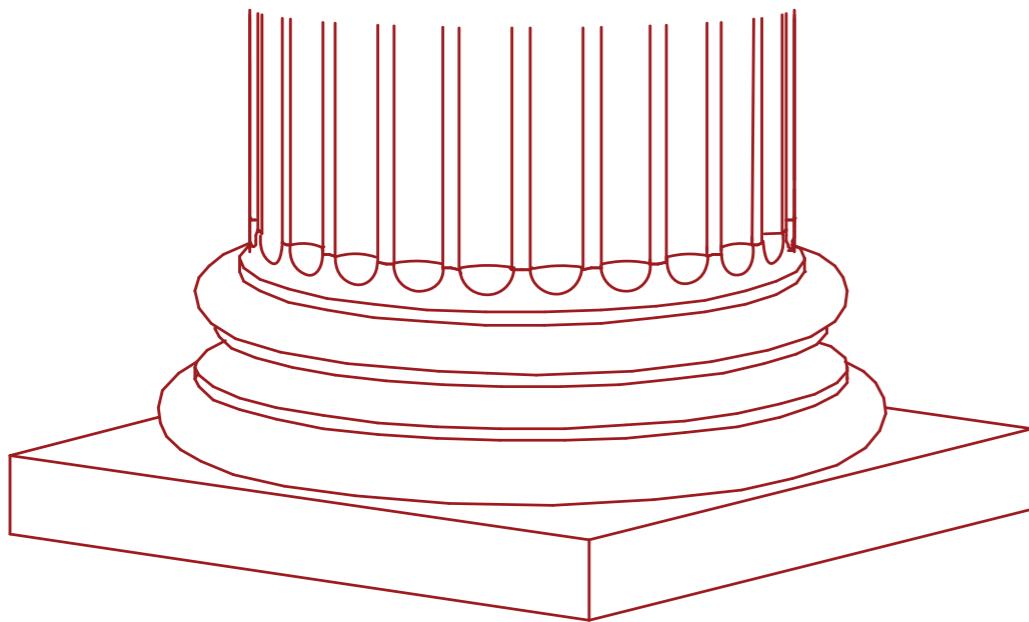
Il processo inizia con la creazione dei differenti profili che identificano le varie sezioni della colonna, disegnando un unico profilo in cui vengono evidenziate le scanalature. Per realizzarlo nel modo più coerente e parametrico possibile, vengono prima impostati vincoli di riferimento, utili a mantenere la coerenza geometrica delle scanalature.

Una volta definiti questi parametri, si disegnano due cerchi concentrici: quello esterno rappresenta il diametro effettivo del fusto, mentre quello interno serve per collegare successivamente il profilo alle elementi delle scanalature verticali. Le scanalature sono in totale 24, separate da un listello intermedio.

I differenti profili vengono importati in una famiglia adattiva, posizionati ad altezze regolari e collegati ai diversi piani di riferimento. Tramite l'impostazione di quote e parametri controllabili e collegati tra loro, a ciascun profilo viene assegnato un diametro leggermente diverso per consentire la formazione dell'entasi. Successivamente, tramite il comando *loft*, i profili vengono uniti per generare il fusto completo della colonna.

9 - La famiglia adattiva è una tipologia di famiglia che permette di creare dei componenti che non dipendono da un singolo punto di inserimento fisso, ma su punti adattivi, questi fungono da ancoraggi che si possono collocare liberamente nello spazio. Si adatta dinamicamente in base alla posizione degli ancoraggi (Adaptive Points)

Figura 63 – Base Attica



Per la parte superiore e inferiore del fusto è invece necessario creare una famiglia separata, dotata di vuoti alle estremità, in modo da consentire la corretta definizione delle scanalature.

Basí Le basi delle colonne rappresentano una delle fasi finali della modellazione degli ordini architettonici.

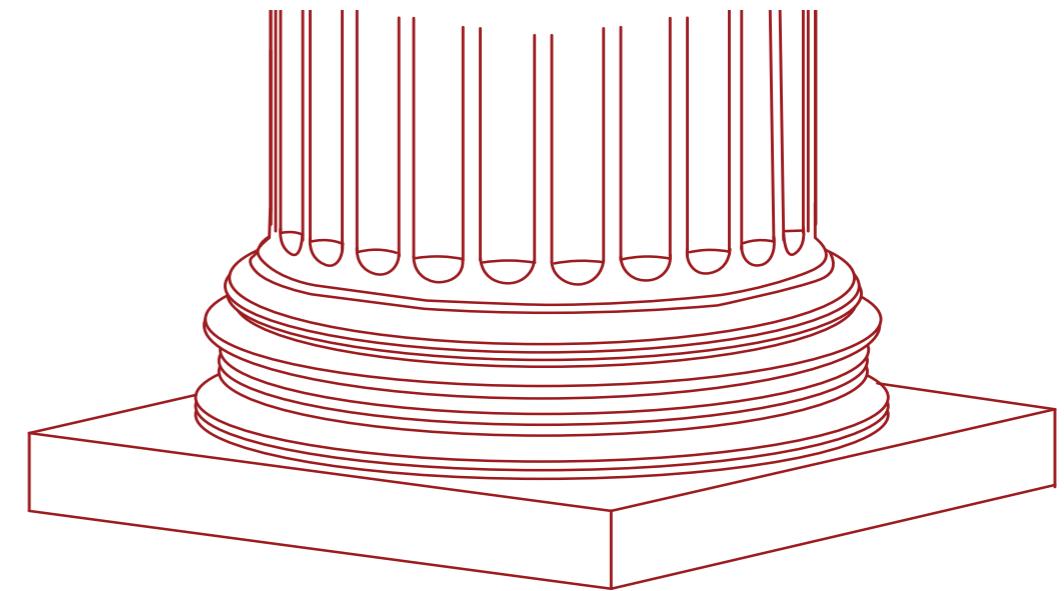
La loro modellazione è stata realizzata seguendo una logica parametriche modulare, come d'altronde il resto della modellazione, per consentire l'adattamento ai diversi ordini architettonici.

Sono state individuate due tipologie di basamento all'interno del complesso di Priene, in base alle fonti storiche e rilievo sul campo.

- La Base Attica, composta da due modanature toriche separate da una scotia, il tutto poggia su un plinto. All'interno del complesso è la più presente. Prende il nome dall'Attica (la regione di Atene, dove fu introdotta nel V secolo a.C.).
- La Base Efesina (o Base Asiatica), più complessa rispetto alla base attica, alterna tori, scotie e astragali. Deriva del Tempio di Artemide a Efeso, uno dei principali esempi di architettura ionica dell'Asia Minore.

Base Attica La base attica è stata modellata seguendo la logica delle famiglie parametriche. L'elemento è composto da quattro parti fondamentali: il toro, la scotia, il toro minore e il plinto. I primi tre elementi sono stati modellati separatamente in una famiglia di profili, e successivamente inseriti nella famiglia nidificata. Il plinto invece viene direttamente modellato all'interno della famiglia principale. Il toro per facilità anche di realizzazione viene realizzato come unico profilo, il quale contiene i parametri del toro e del toro minore.

Figura 64 – Base Efesina



Inseriti i profili e allineati ai livelli di riferimento vengono realizzati attraverso l'estruzione su percorso, su base circolare. Questa struttura modulare permette di modificare rapidamente le dimensioni complessive del basamento mantenendo invariati i rapporti proporzionali e il corretto sviluppo geometrico del profilo.

Dal punto di vista costruttivo, la base attica rappresenta una tipologia semplice e regolare, adottata nella maggior parte degli ordini presenti nel complesso di Priene. Al contrario, per il tempio è stata impiegata la base efesina, più articolata, coerente con il carattere monumentale dell'edificio. Le strutture doriche, invece, ne sono prive, con il fusto che poggia direttamente sullo stilobate.

Base asiatica o efesina

La base Efesina (o Asiatica), di natura più complessa, corrisponde alla base ionica-asiatica, tipica dell'area microasiatica e ampiamente diffusa nei templi ionici dell'Asia Minore. Questa tipologia si contraddistingue per la presenza di un profilo più articolato e riccamente modanato.

Il modello è stato realizzato in modo differente, per la complessità dell'elemento; infatti, è stato realizzato direttamente un unico profilo unitario, con le diverse modanature, vincolate a una serie di parametri dimensionali e relazionali. Questi vincoli, controllati tramite parametri chiave (quali diametro di base, altezza complessiva, raggio dei tori e ampiezza delle scotie), consentono di definire con precisione distanze, curvature e proporzioni, rendendo l'elemento completamente parametrico e adattabile.

La scelta di utilizzare un diverso approccio è definita dalla volontà di applicare le diverse possibilità della modellazione parametrica.

I tre diversi elementi modellati separatamente, capitello- fusto-base, vengono uniti un'unica famiglia completamente parametrica consentendo di adattare o produrre varianti, mantenendo costanti le relazioni proporzionali di base. Questo approccio incrementa la flessibilità e la riusabilità del modello, assicurando al tempo stesso precisione metrica, fedeltà storica e consistenza geometrica con l'architettura ionica-asiatica di riferimento.

Una volta importati tutti i profili all'interno di un'unica famiglia, vengono definiti i parametri di testo necessari alla configurazione della colonna ionica, prevista sia con base efesina sia con base attica. All'interno della famiglia sono quindi impostati parametri descrittivi e funzionali: una breve descrizione della tipologia, l'indicazione della funzione strutturale dell'elemento, i materiali impiegati, la tipologia di capitello utilizzata e la variante di base (attica o efesina), oltre ad altre informazioni utili all'identificazione della famiglia e alla lettura delle sue caratteristiche geometriche e costruttive. Questi metadati consentono di catalogare correttamente la famiglia all'interno del progetto e di garantire coerenza tra i diversi elementi architettonici del modello parametrico.

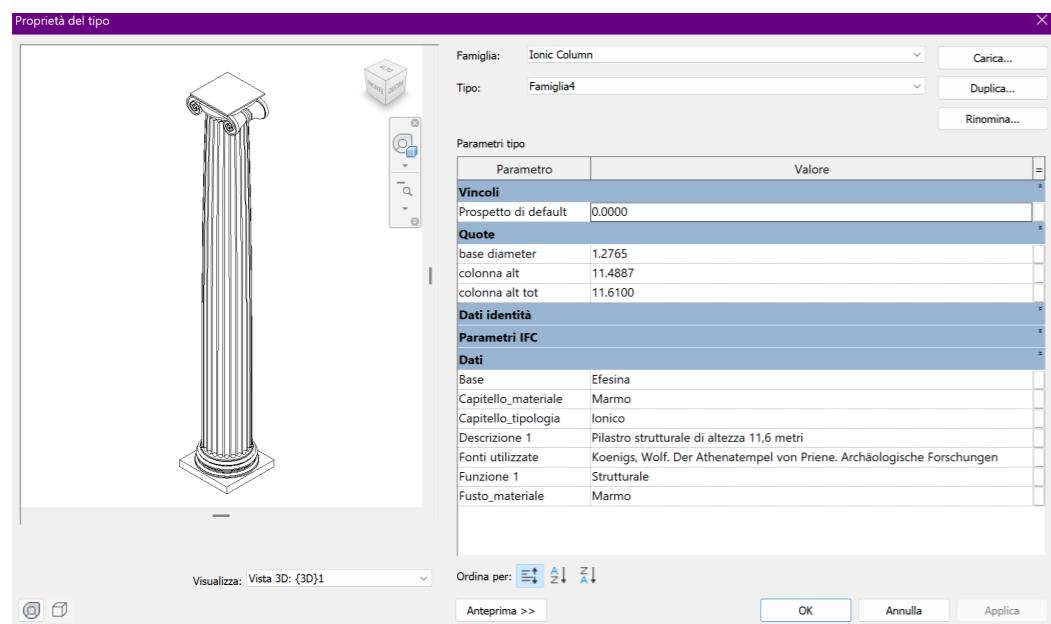


Figura 65 - Tabella degli attributi di uno degli oggetti semanticamente realizzati tramite l'Editor delle Famiglie di Revit, elaborazione propria



Figura 66 - Rappresentazione della colonna ionica con base efesina realizzata in ambiente BIM

Modellazione dell'ordine dorico Il processo di realizzazione dell'ordine dorico segue un approccio simile a quello adottato per l'ordine ionico, ma presenta caratteristiche formali più sobrie e massicce, coerenti con la natura dell'ordine stesso.

A differenza della colonna ionica, infatti, il fusto dorico non possiede una base: poggia direttamente sullo stilobate e si raccorda al capitello senza elementi intermedi.

Capitello Dorico Il capitello dorico, seppur più sobrio rispetto a quello ionico, è stato modellato tramite un procedimento analogo, basato sull'estruzione di profili precedentemente disegnati.

È costituito da due elementi principali: l'echino, la parte convessa inferiore che realizza il raccordo tra il fusto e l'abaco; l'abaco, una lastra quadrata che funge da piano d'appoggio per la trabeazione.

I profili di questi due elementi sono stati sviluppati separatamente e successivamente importati in un'unica famiglia, nella quale vengono parametrizzati attraverso il Base Diameter, il parametro principale che controlla proporzionalmente l'intero capitello.

Fusto La modellazione del fusto segue una logica parametrica simile a quella utilizzata per il fusto ionico, ma con alcune differenze rilevanti: viene utilizzata una famiglia di pilastro (non adattiva), più appropriata per un elemento con proporzioni regolari e senza variazioni complesse di sezione.

Il profilo è caratterizzato da venti scanalature, meno profonde rispetto agli ordini superiori, scolpite come segmenti di cerchio senza listelli intermedi e con incontro ad angolo acuto. La generazione del volume non avviene tramite loft multiprofilo: vengono creati più profili con sezioni differenti, ma l'estruzione viene eseguita unendo due profili alla volta, suddividendo la colonna in segmenti e permettendo così di modellare correttamente l'entasi. Inoltre, secondo quanto riportato nelle tavole storiche, il terzo inferiore del fusto presenta una superficie completamente liscia, priva di scanalature; questa caratteristica è stata riprodotta distinguendo parametricamente la parte liscia da quella scandalata.

Il fusto e il capitello sono stati successivamente importati all'interno di un'unica famiglia, organizzata e controllata tramite livelli di riferimento, utili per posizionare con precisione i diversi elementi e garantirne la corretta gestione una volta inseriti nel modello generale.

A completamento della famiglia, sono stati definiti anche parametri di

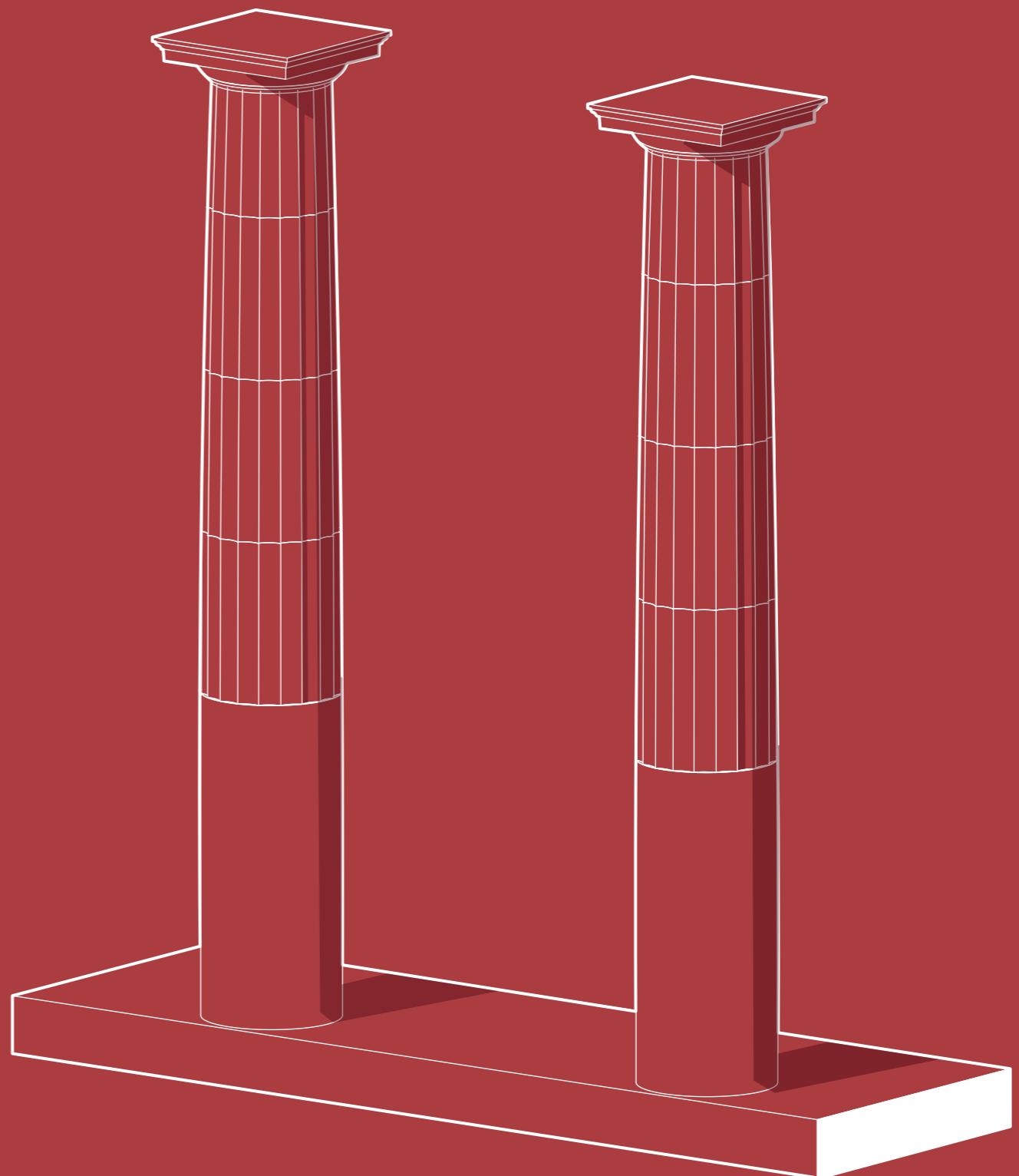
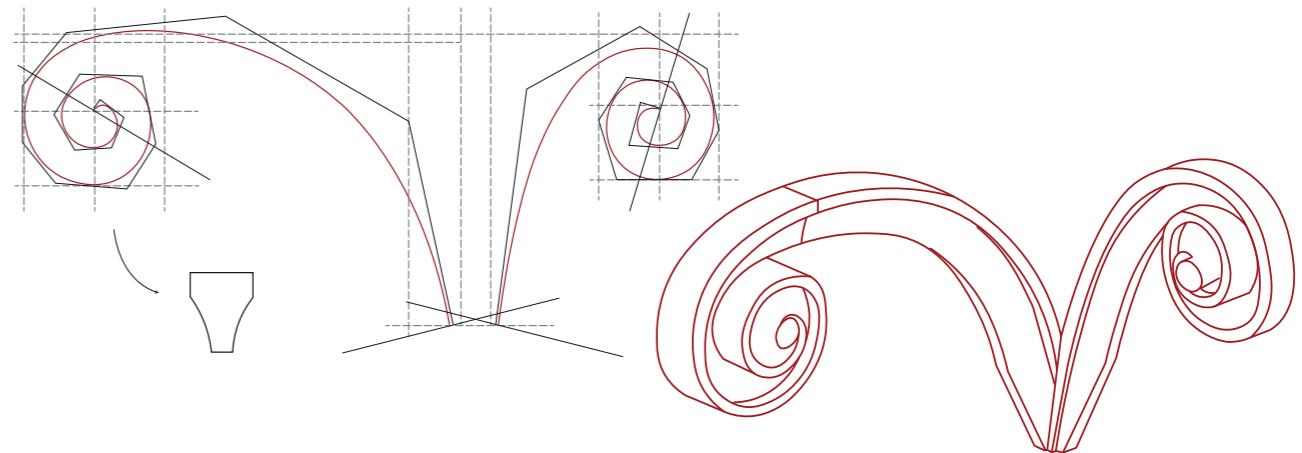


Figura 67 - Rappresentazione della colonna dorica realizzata in ambiente BIM

Figura 68 - Schema di rappresentazione della famiglia di volute presenti nel capitello corinzio, elaborazione propria



testo descrittivi, necessari per documentare le caratteristiche principali dell'elemento (tipologia, ordine architettonico, materiali, configurazione della base e del capitello, ecc.), così da ottenere un modello informativo coerente e consultabile.

L'ordine Corinzio L'ordine corinzio rappresenta uno degli ordini architettonici più raffinati e slanciati. Rispetto agli ordini precedentemente elencati, la colonna misura dieci moduli, caratteristica che la rende più snella. Nato probabilmente nel V secolo a.C. e diffusosi ampiamente in epoca ellenistica, l'ordine corinzio trovò applicazione anche negli edifici monumentali dell'Asia Minore, tra cui templi e propilei, dove la sua ricca decorazione assumeva una funzione sia strutturale sia rappresentativa. Il nome "corinzio" deriva dalla città di Corinto, luogo in cui l'ordine si sviluppò. Dal punto di vista compositivo, l'elemento che lo contraddistingue maggiormente è il capitello: esso è formato da un tronco conico attorno al quale si dispongono una serie di foglie d'acanto stilizzate.

In questo caso, la ricostruzione del capitello corinzio è stata realizzata seguendo le fonti storiche, che evidenziano due fasi distinte di costruzione del propileo. Nella prima fase, il propileo presentava dimensioni più contenute ed era caratterizzato esclusivamente dall'ordine ionico.

In un secondo momento, il complesso venne ampliato e sul lato esterno fu introdotto l'ordine corinzio, arricchendo il complesso di Priene.

Capitello Corinzio La modellazione del capitello corinzio segue un processo articolato, composto da diverse fasi dedicate alla costruzione dei vari elementi che lo caratterizzano. In questo caso la realizzazione avviene tramite l'uso di profili e famiglie completamente adattive, necessarie a causa della complessità degli elementi da modellare.

In una prima fase viene sviluppato il corpo centrale, composto da una serie di profili precedentemente creati e importati all'interno del modello. Attraverso estrusioni su percorso ed estrusioni di vuoti si realizza così la base sulla quale si sviluppa il capitello corinzio. Successivamente vengono modellate separatamente le foglie d'acanto, le volute e la foglia della seconda corona.

Ogni componente viene modellato come famiglia indipendente con differenti parametri e caratteristiche dimensionali diverse. Particolare attenzione è riservata agli elementi adattivi delle foglie, siccome alla

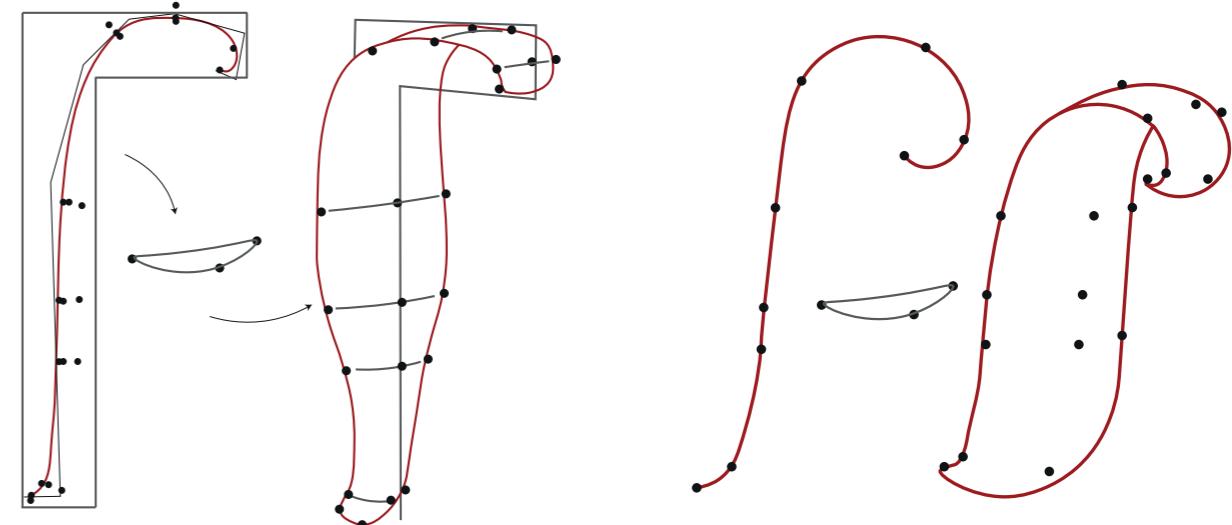


Figura 69 - Rappresentazione delle tipologie di foglie presenti nella famiglia del capitello corinzio, elaborazione propria

loro complessità nelle 3 dimensioni. Nella particolarità di questi elementi infatti, al contrario delle volute che si basa sulla realizzazione di un profilo che crea l'effetto a spirale, viene intersecato con un profilo a parallelepipedo per la realizzazione tridimensionale. Le foglie d'acanto invece richiedono la realizzazione del profilo della foglia, successivamente vengono realizzati i diversi profili su cui la foglia verrà creata, e infine, con una certa similitudine con la realizzazione del fusto, attraverso il comando `loft` vengono uniti i diversi profili sulla base della forma iniziale, utile per riprodurre in modo corretto l'andamento elicoidale delle foglie e al torsione natura delle sue estremità.

La geometria di ciascuna foglia è controllata tramite parametri quali altezza e spessore, vincolati tutti a diverse quote che permettono oltre a una variazione dinamica in funzione del diametro di base della colonna, ma anche di utilizzare lo stesso profilo con dimensioni diverse per differenti tipologie di foglie.

Parallelamente vengono modellati gli altri motivi ornamentali, i boccioli laterali e le volute angolari, anch'essi gestiti come elementi parametrizzati e adattivi.

Una volta completati i singoli componenti, questi vengono assemblati al kalathos e all'abaco, ricostruendo l'intera composizione del capitello secondo le proporzioni canoniche.

La fase più complessa riguarda la disposizione dei diversi elementi ornamentali, infatti, dopo l'estruzione, ogni elemento viene posizionato mediante punti di riferimento adattivi, vincolati alla geometria principale. Ciò permette la corretta simmetria radiale (generalmente 8 o 16 divisioni) e consente una distribuzione armonica dei diversi elementi modellati.

Il risultato finale è un capitello capace di restituire nella complessità formale e la ricchezza plastica dell'ordine corinzio.

Fusto e base Il fusto corinzio è di proporzioni simili rispetto all'ordine ionico, con l'altezza pari a 10 volte il diametro di base, dando un aspetto più snello e longilineo. Per questo motivo viene utilizzata la medesima famiglia di fusti, con proporzioni differenti.

La base è di tipo attico, costituita da un toro, una scozia e un toro inferiore, anch'essa gestita tramite una famiglia parametrica indipendente, collegata al diametro del fusto.

I diversi elementi vengono successivamente inseriti all'interno di un'unica famiglia, come negli ordini precedenti.

I tre ordini così modellati consentono una parametrizzazione completa, garantendo coerenza tra le diverse tipologie (ionico, dorico e corinzio) e un'elevata adattabilità dimensionale tramite pochi parametri principali, come il diametro di base e l'altezza totale. Durante la modellazione dei tre ordini, prima della loro importazione nel modello, vengono impostati i parametri descrittivi e funzionali già menzionati. Questi risultano utili sia per una migliore definizione del componente, sia per la sua integrazione all'interno del modello informativo, permettendo così di ottenere un elemento completamente coerente e dotato di tutte le caratteristiche richieste dal processo BIM.

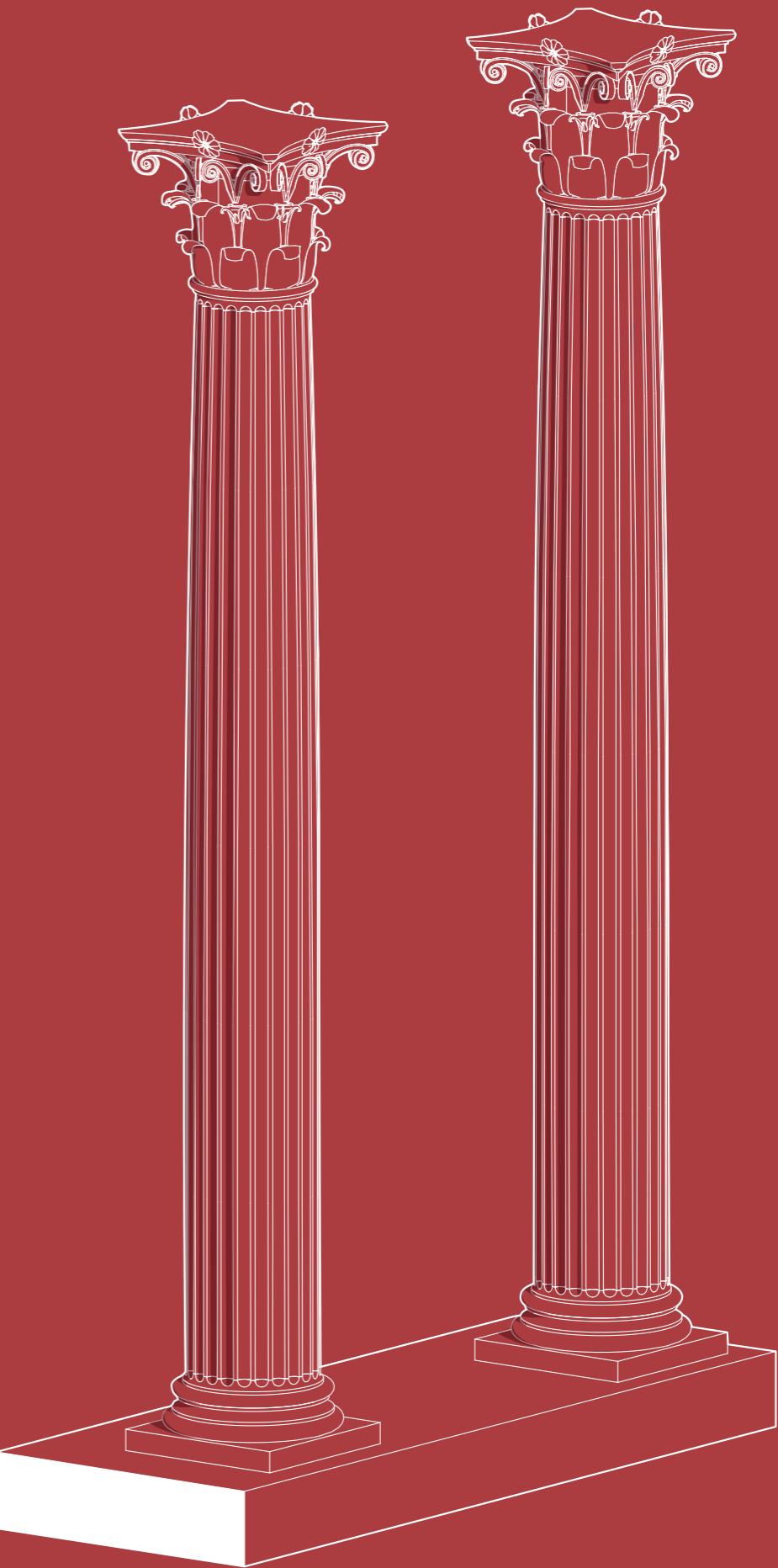


Figura 70 -Rappresentazione della colonna corinzia con base attica realizzata in ambiente BIM

GENESI VIRTUALE DEL BENE

Sono le strutture a dare ritmo e presenza all'architettura.



Figura 71 - Foto del propylon di Priene, elaborazione propria

FAMIGLIE DI SISTEMA: MURI, PAVIMENTI E COPERTURE

Per la modellazione del complesso architettonico, il processo è iniziato con l'identificazione delle principali tipologie: muri, pavimenti, basamenti e coperture.

Sono state innanzitutto analizzate le murature in pietra, distinguendo diverse tipologie in base allo spessore, variabile da 65 cm a 30 cm. Per ciascuna di esse sono state create modificate le famiglie di sistema, definendo per ciascuna le proprie caratteristiche, in grado di adattarsi alle diverse forme geometriche e costruttive riscontrate nel sito. Sono stati inoltre definiti i muri di contenimento delle terrazze, anch'essi come famiglie separate.

Un procedimento analogo è stato adottato per la modellazione dei pavimenti e dei crepidoma e stilobati, nei quali sono state individuate diverse tipologie dimensionali, con spessori variabili tra 30 e 40 cm, tenendo conto anche delle inclinazioni e delle differenze di quota presenti tra i diversi piani del complesso.

Particolare attenzione è stata riservata agli elementi del crepidomi e dello stilobate, che costituiscono le basi dei templi. Per questi componenti sono state utilizzate le famiglie dei pavimenti, questa soluzione permette una maggiore flessibilità nelle variazioni dimensionali.

La modellazione delle coperture ha richiesto un processo particolarmente articolato, poiché è stato necessario ricostruire con precisione la decorazione del tempio antico, comprendente frontone, trabeazione e cornici. Successivamente sono stati modellati i sistemi strutturali dei tetti, tra cui coppi, travi e travetti.

Per la realizzazione della trabeazione sono stati definiti i diversi componenti secondo i principi degli ordini classici. In particolare, per l'ordine ionico del tempio si è partiti dall'architrave, suddivisa in dodici

parti: tre assegnate alla prima fascia, quattro alla seconda e cinque alla terza. Le sporgenze sono determinate sulla base di quinti di modulo.

La cornice è invece suddivisa in dieci parti: primo ogee; dentello; filetto (pari a un quarto di parte); astragalo (delle stesse dimensioni del filetto); echinus; corona; ogee pari a metà parte; filetto della corona con un quarto di parte; cyma recta, di una parte e un quarto; labbro o filetto del cymatium, pari a mezza parte. Le sporgenze sono determinate da quinti di un piccolo modulo, con dodici di questi necessari per definire la sporgenza complessiva del cornicione.

Per la realizzazione della trabeazione, è stato definito un profilo di estrusione lungo il percorso principale dell'edificio, sul quale sono stati identificati i principali elementi architettonici che la compongono.

Il profilo è stato ricostruito a partire dalla documentazione storica, l'elemento principale è stato poi completato mediante l'inserimento di componenti di dettaglio, modellati separatamente e successivamente integrati nella struttura principale, come modanature, listelli e cornici decorative.

Al contrario, il frontone è stato modellato attraverso estrusioni indipendenti, create per riprodurre l'effetto di rilievo caratteristico di questa parte dell'edificio. Tale effetto è stato ottenuto combinando diversi elementi costruttivi (timpano, decorazioni scultoree e cornici) modellati come famiglie distinte e poi assemblati nel modello generale.

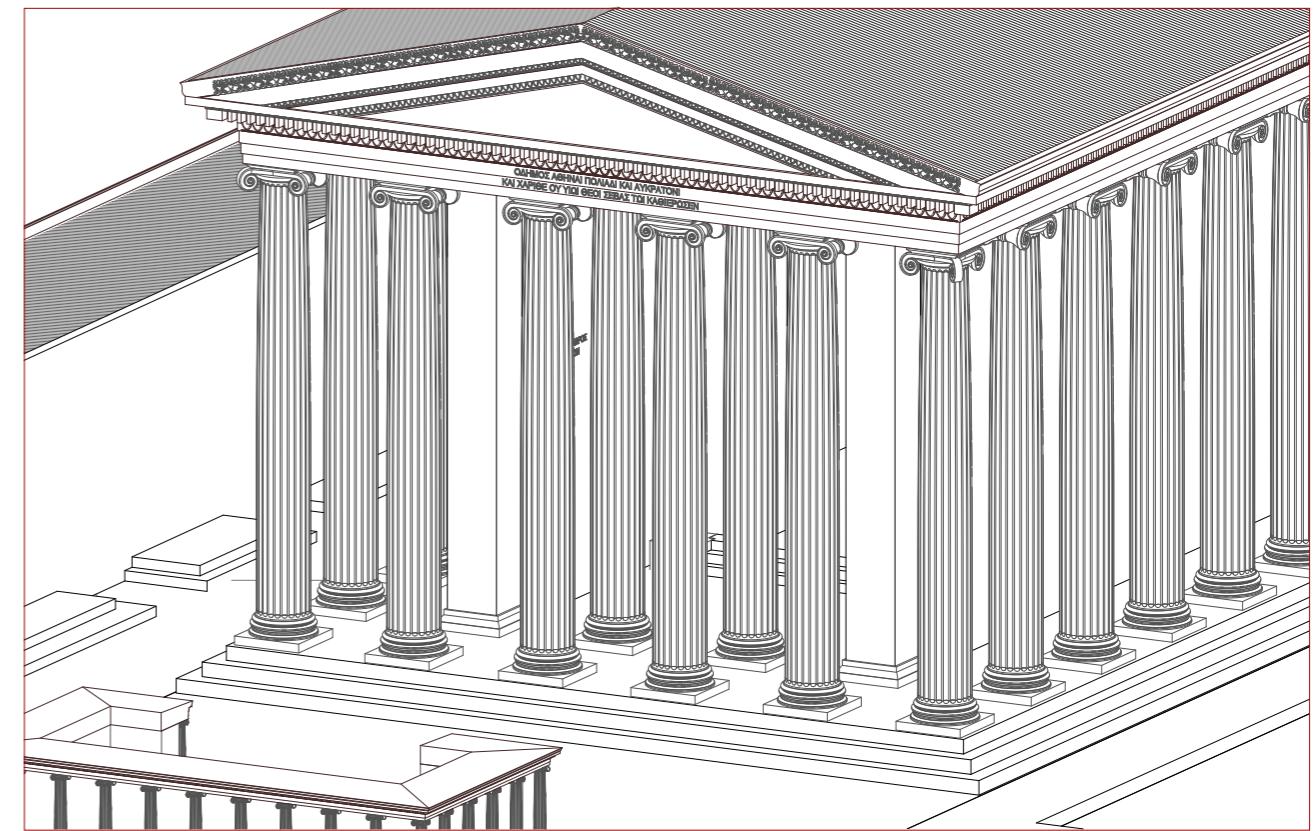
L'utilizzo di questa tipologia di famiglie consente di mantenere un modello leggero e parametrico, ottimizzando le prestazioni del progetto pur garantendo un elevato grado di definizione visiva e realismo. Infine, la strutturazione modulare delle famiglie consente un'agevole riutilizzabilità in altri progetti o ambienti BIM compatibili, favorendo la scalabilità e l'interoperabilità del modello digitale.

Invece per la terrazza nel quale è presenta l'ordine dorico, è diviso da sette parti e la settima parte superiore è dedica alla listella o taenia, sotto si inserisce la guttae, (realizzata poi successivamente), successivamente è presente il fregio, composto da nove dei ventiquattro parti che compongono la trabeazione, nel quale vengono collocati le metope e i trifigli, in questo caso solo i trifigli sopra le guttae. L'ultima parte è composta dalla cornice, di nove parti, uguale al fregio in termini di dimensioni, dove contendono ulteriori modanature. Per la realizzazione

a differenza del tempio e del propileo, viene realizzato un profilo, che poi viene importato all'interno del modello e creata una estrusione su percorso, il quale però ha tenuto conto della presenza degli elementi di costruzione del tetto, travi e travetti, ingrati nella forma all'interno della modellazione.

La realizzazione dei collegamenti verticali, attraverso la famiglia scala, è stata realizzata principalmente per connettere l'agorà al complesso di Priene oggetto di analisi. In particolare, tale connessione avviene attraverso una serie di scaloni modellati mediante famiglie di pavimenti, derivate dal propileo, che si raccordano alla famiglia della scala realizzata. Una volta identificata la base di attacco della scala, è stata definita la geometria complessiva tenendo conto dell'inclinazione del terreno esistente, precedentemente importato nel modello. Questo ha consentito di adattare la scala alla morfologia sito, garantendo la continuità altimetrica tra i diversi livelli e una integrazione coerente con gli altri elementi architettonici del complesso.

Figura 72 - Vista del tempio, altare e terrazza, dal modello di revit, elaborazione propria



GENESI VIRTUALE DEL BENE

L'ornamento nasce dalla
proporzione



Figura 73 -Vista del capitello ionico, elaborazione propria, 2025

DETTAGLI SCULTOREI E APPARATO ORNAMENTALE

Una volta definita nel suo complesso la modellazione degli elementi principali e strutturali, è stato possibile realizzare gli elementi di dettaglio scultoreo e gli apparati ornamentali. Questi componenti, fondamentali per il completamento del modello, sono stati realizzati attraverso la creazione di famiglie specifiche.

Il dettagli scultorei e l'apparato ornamentale includono tutti quegli elementi decorativi che completano e arricchiscono il progetto, garantendo una restituzione coerente e fedele dell'intero complesso architettonico. Tra questi rientrano la sima, il soffitto a cassettoni, il kyma ionico, i dentelli, lo scudo del propileo, i profili delle porte, le decorazioni della cornice, oltre alle ornamentazioni del fregio e dell'architrave.

Ornamento dell'ordine dorico Molti di questi componenti sono stati modellati come famiglie basate su *host*, cioè, associate a superfici di riferimento sulle quali vengono applicate direttamente. Questo approccio consente un controllo preciso del posizionamento e dell'allineamento rispetto agli elementi architettonici principali.

Per l'ordine dorico è stato modellato un triglifo dedicato, sviluppato come famiglia basata su *host*. Gli elementi che lo compongono sono stati ottenuti mediante estrusioni di vuoto, un procedimento analogo a quello utilizzato per le scanalature del fusto dorico, così da mantenere coerenza formale e costruttiva.

Ornamento dell'ordine ionico Per l'ordine ionico sono stati realizzati il kyma ionico e l'astragalo, entrambi costruiti secondo la medesima logica parametrica. L'astragalo è stato suddiviso in due tipologie differenti, come indicato dalle fonti storiche: uno più snello e sviluppato in altezza, posizionato in corrispondenza del fregio; uno leggermente più piccolo, impiegato nella zona superiore del frontone.

Figura 74 -Vista dell'apparato ornamentale del Tempio di Atene



Pur presentando leggere semplificazioni formali utili alla modellazione, entrambe le tipologie rispettano le proporzioni e la composizione degli originali.

Sono stati modellati con famiglie host-based anche ulteriori elementi, come lo scudo del propileo e le iscrizioni in greco visibili sul fronte e all'interno del tempio.

Le principali iscrizioni riprodotte sono:

«Ο ΔΗΜΟΣ ΑΘΗΝΑΙ ΠΟΛΙΑΔΙ ΚΑΙ ΑΥΚΡΑΤΟΝΙ ΚΑΙ ΧΑΡΙΘΕΟΥ ΥΙΩΙ ΘΕΟΙ ΣΕΒΑΣ ΤΩΙ ΚΑΘΙΕΡΩΣΕΝ»¹⁰

“Il popolo di Atene (dedicò questa offerta) ad Atena Poliade, ad Aucratone figlio di Charitheus, divino, in onore di colui che la consacrò.”

«ΒΑΣΙΛΕΥΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΑΝΕΘΗΚΕ ΤΟΝ ΝΑΟΝ ΑΘΗΝΑΙΗ ΠΟΛΙΑΔΙ»¹¹

“Il re Alessandro dedicò il tempio ad Atena Polias.”

Sima,
cornici,
soffitto

La sima e i coronamenti della cornice del propileo, dell'altare e del tempio sono stati prodotti mediante estrusioni su percorso, mentre i dentelli della cornice sono stati realizzati attraverso estrusioni di vuoto. Il soffitto a cassettoni è stato sviluppato in due varianti, differenziate in base alla posizione nel complesso e alle indicazioni ricavate dalle ricostruzioni storiche.

Cornici
porte

Infine, sono state modellate, con la stessa logica parametrica e basata su host, le cornici delle diverse aperture presenti nel complesso, così da garantire uniformità e coerenza stilistica.

10 - Koenigs, Wolf. *Der Athenatempel von Priene. Archäologische Forschungen Bd. 33 (Priene Bd. 3)*. Wiesbaden: Reichert Verlag, 2015.

11 - British Museum, Priene Inscription of Alexander the Great, object no. G 1870-0320-88, consultato il 29 novembre 2025, https://www.britishmuseum.org/collection/object/G_1870-0320-88

GENESI VIRTUALE DEL BENE

GESTIONE DEI MATERIALI E TEXTURE

La scelta dei materiali si è basata sulla documentazione storica e sulle analisi effettuate sul sito, la scelta di questi elementi ha permesso di identificare in modo chiaro i diversi elementi all'interno del modello. La gestione dei materiali è stata realizzata all'interno di Revit mediante parametri condivisi ed esportabili per il controllo della verifica.

Nel corso della realizzazione delle famiglie di progetto sono state identificate i materiali, già selezionati nella fase di elaborazione. Questa metodologia permette una gestione efficiente, infatti nel modello principale è possibile mantenere i materiali assegnati per ogni famiglia.

In tal modo, eventuali modifiche o sostituzioni possono essere gestite semplicemente tramite l'editor dei materiali, modificato un singolo materiale si aggiornano automaticamente tutti gli elementi collegati.

Inoltre, questi parametri identificati tra i diversi materiali si rivelano particolarmente utili per l'integrazione nella realtà virtuale, dove la resa visiva dei materiali è necessaria per la visione d'insieme del sito archeologico.

In fase di definizione, sono state individuate quattro tipologie principali di materiali, con l'obiettivo di semplificare l'importazione nel modello virtuale e uniformare la rappresentazione complessiva. La riduzione a poche tipologie di materiale, oltre alla non identificazione della colorazione, permette un'identificazione chiara dei diversi elementi oltre ad identificare dei materiali in modo arbitrario: le colorazioni originali, infatti, risultano oggi non visibili e i dettagli cromatici avrebbero potuto introdurre falsi storici.

Le categorie individuate sono:

- Marmo (fig.75): utilizzato per le famiglie caricabili (capitello, fusto e basamento), nonché per gli elementi decorativi e ornamentali.



Figura 75 - Marmo



Figura 76 - Pavimentazioni

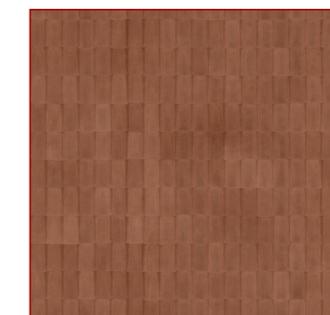


Figura 77 - Coppi

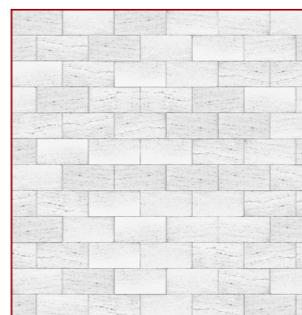


Figura 78 - Mattoni in pietra

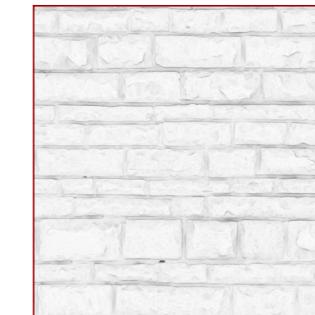


Figura 79 - Muro di contenimento

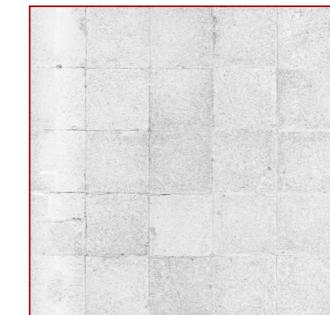


Figura 80 - Pavimentazioni

- Mattoni in pietra (fig. 78): impiegata per i muri portanti dei diversi edifici.
- Muro di contenimento (fig. 79): scelto per il muro di contenimento della terrazza, poiché più simile al materiale effettivamente rilevato in situ.
- Pavimentazioni: (fig. 76-fig. 80) definite in due tipologie: una generale per l'intero modello e una specifica per il tempio, al fine di agevolare l'identificazione delle superfici pavimentate.
- Materiali di completamento: aggiunti per mantenere un'integrità di rappresentazione più realistica, tra cui il coppo e il legno per le coperture.

Sono state utilizzate texture fotografiche ad alta risoluzione, calibrate in tonalità e saturazione per restituire una matericità corretta. Le texture sono state scelte in base al rilievo in situ, oltre alla qualità di rappresentazione di esse, in modo da garantire la definizione adeguata agli ambienti immersivi.

Figura 81 - Instantanea schermo del modello 3d, elaborazione propria

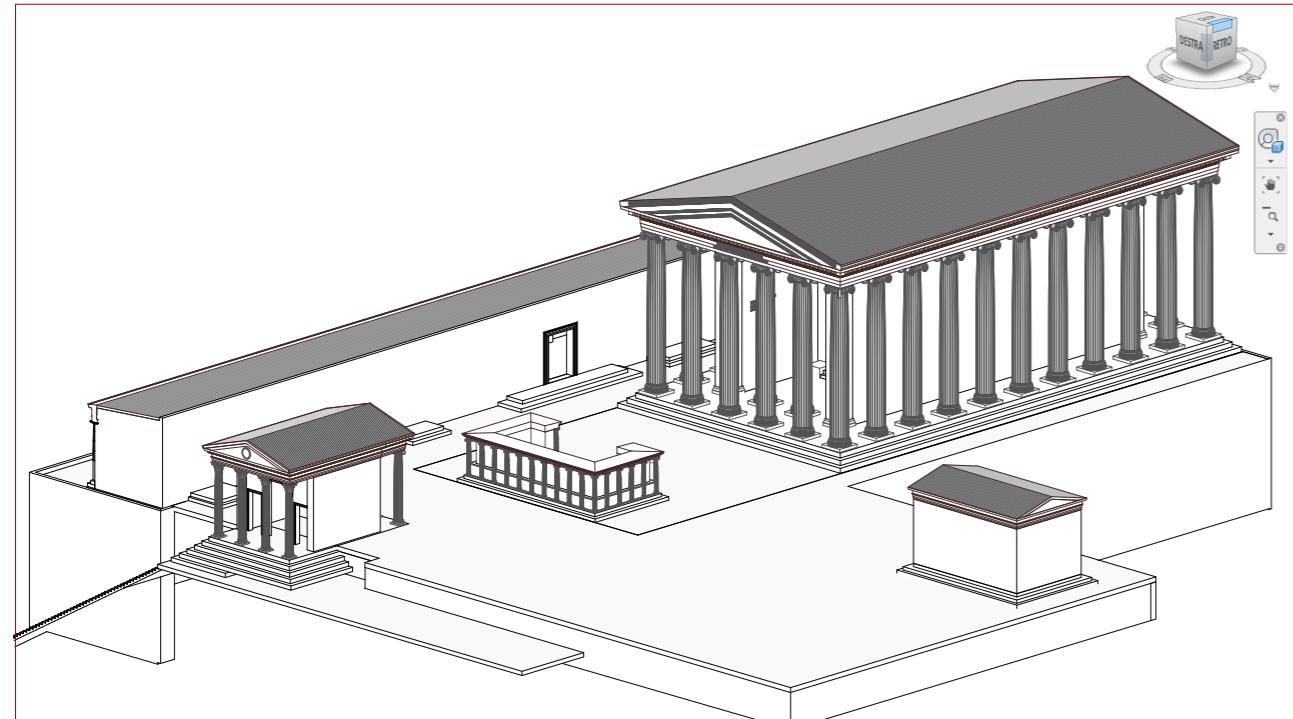


Figura 82 - Instantanea schermo del modello 3d, elaborazione propria

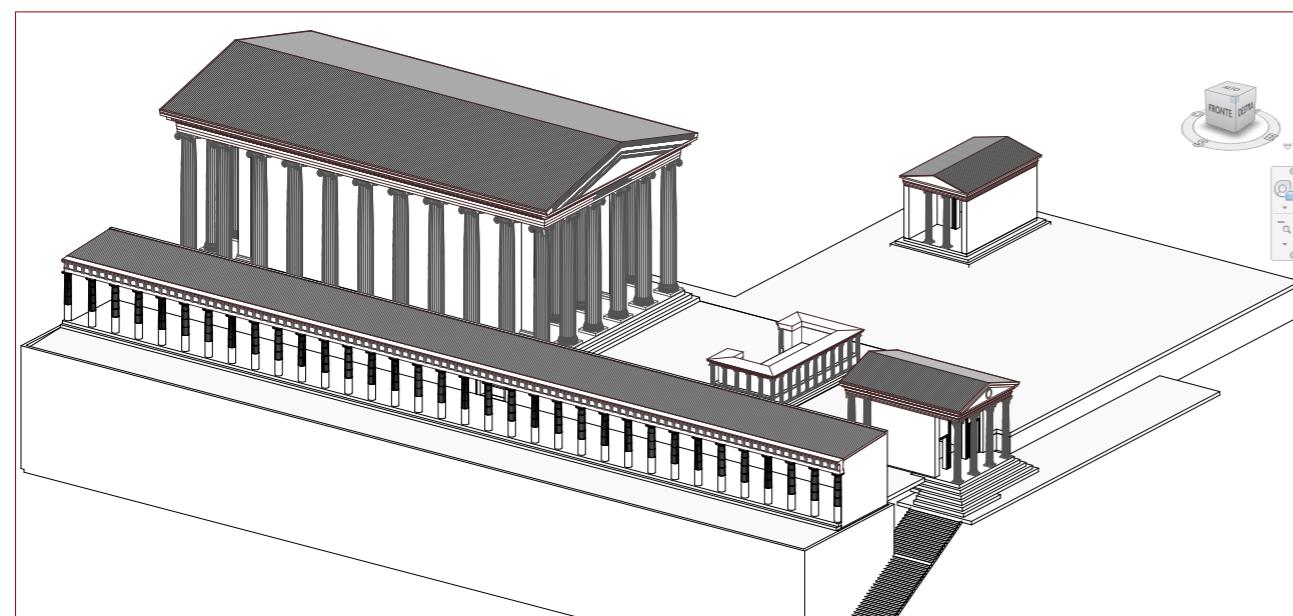


Figura 83 - Instantanea schermo del modello 3d dell'altare, elaborazione propria

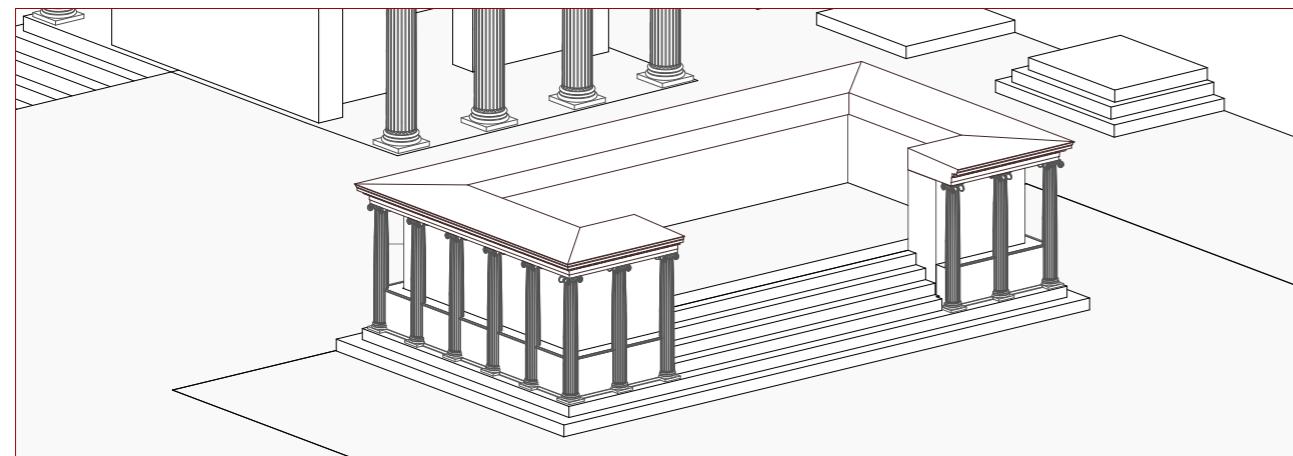


Figura 84 - Instantanea schermo del modello 3d Tempio, elaborazione propria

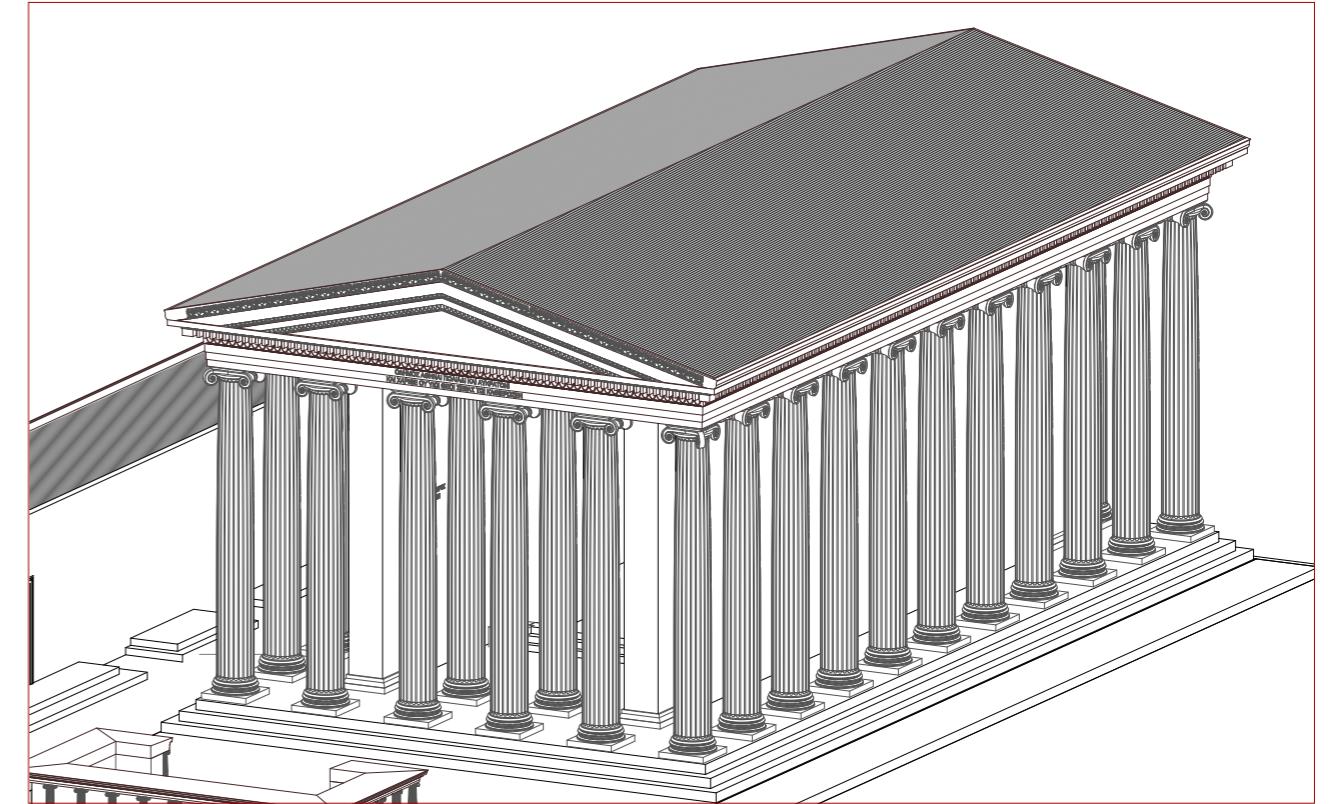


Figura 85 - Instantanea schermo del modello 3d del Propileo, elaborazione propria

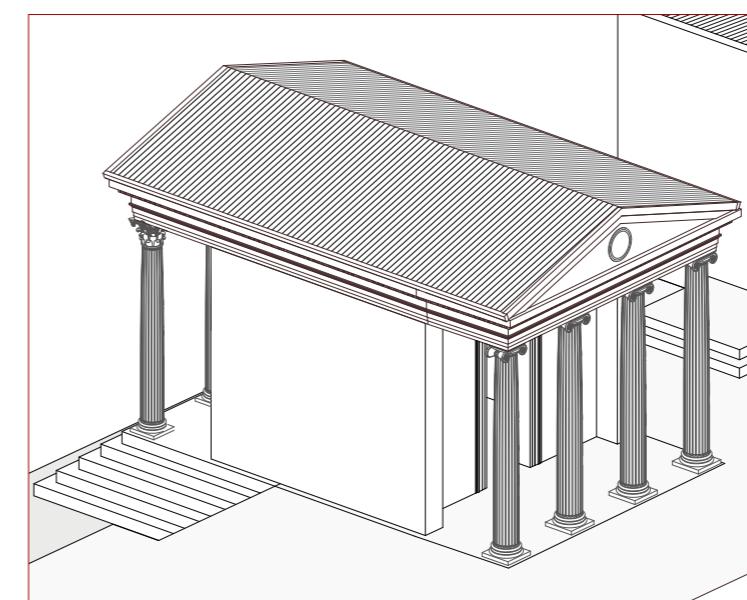


Figura 86 - Instantanea schermo del modello 3d della Tesoriera, elaborazione propria

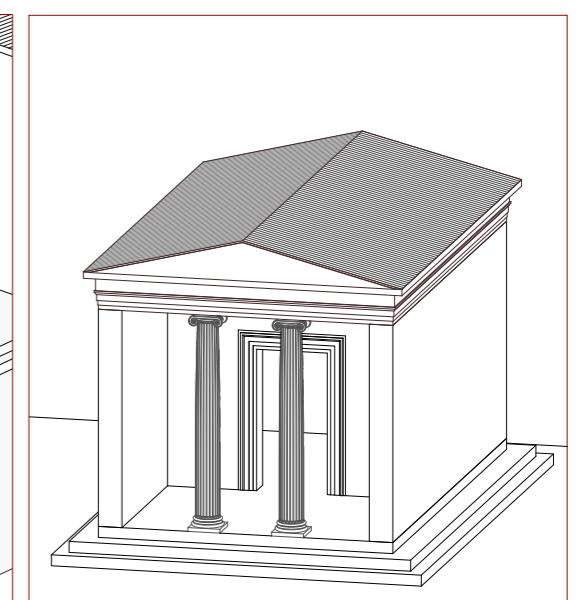
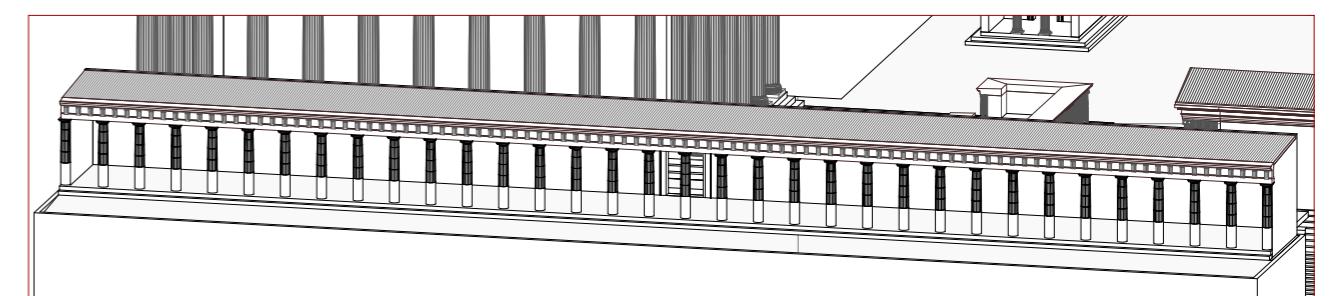


Figura 87 - Instantanea schermo del modello 3d della Terrazza, elaborazione propria



GENESI VIRTUALE DEL BENE

ANALISI E VERIFICHE

Per verificare gli elementi modellati rispetto alla realtà archeologica, ricostruiti sulla base delle fonti storiche, è necessaria un'analisi di confronto tra il modello realizzato e la nuvola di punti del sito archeologico. In questo modo è possibile ottenere una valutazione metrica fondata sul calcolo delle tolleranze geometriche.

Il confronto tra modello digitale e rilievo è indispensabile nel processo di ricostruzione, poiché consente la validazione scientifica degli elementi modellati, verificandone l'aderenza e la coerenza con la documentazione storica disponibile. Tale operazione permette di valutare la plausibilità delle fonti storiche in relazione al contesto reale del patrimonio archeologico.

La ricostruzione del sito è stata realizzata a partire dalle misure indicate nelle fonti e dall'applicazione delle proporzioni formali. Per valutare in modo oggettivo l'accuratezza delle fonti e la correttezza del modello, è quindi necessario confrontare quest'ultimo con la nuvola di punti del sito archeologico di Priene.

La nuvola di punti comprende l'intero santuario di Priene; per rendere il confronto più agevole, è stata ripulita dagli elementi non utili e sono state estratte solo le porzioni di interesse per l'analisi.

Per garantire maggiore correttezza metodologica, e considerando che molti ruderi risultano frammentati o collocati a terra, si è scelto di utilizzare gli elementi impilati tramite anastilosi, poiché maggiormente leggibili nel sito archeologico. La selezione degli elementi è stata condizionata anche dalla difficoltà di allineare frammenti isolati e dalla necessità di individuare parti chiaramente riconoscibili e geometricamente coerenti con il modello teorico.

Sono quindi state prese in esame tre porzioni del fusto della colonna, selezionate in base al loro stato di conservazione: la parte inferiore (in corrispondenza dell'innesto del fusto), la parte superiore (che sorregge il capitello) e un elemento intermedio. Per ciascuna di queste porzioni, la parte corrispondente della nuvola di punti è stata estratta e salvata separatamente.

Parallelamente, dal modello è stata esportata la colonna in formato .OBJ, poiché il software CloudCompare, utilizzato per l'analisi, permette l'importazione di mesh ma non di modelli parametrici. Sia la nuvola di punti sia il modello sono stati importati in CloudCompare, dove è stata effettuata l'operazione di allineamento tramite il comando "Align", selezionando tre punti omologhi per garantire una corretta sovrapposizione spaziale.

Una volta completato l'allineamento, è stata condotta l'analisi tramite il comando "Cloud-to-Mesh", che consente di calcolare le differenze geometriche tra la nuvola di punti e la mesh del modello virtuale. Per la prima comparazione sono stati impostati parametri di tolleranza compresi tra 10 e 20 mm, considerando che la nuvola di punti presenta una tolleranza strumentale di circa 3-4 mm, riconducibile al LOA 30 secondo la classificazione USIBD (U.S. Institute of Building Documentation)¹.

L'analisi è stata eseguita sui tre elementi individuati e ha evidenziato un comportamento coerente tra le diverse parti della colonna.

Successivamente, per ottenere una verifica più ampia dei dati e in coerenza con le indicazioni metodologiche, è stata effettuata una seconda analisi utilizzando un livello di accuratezza riconducibile al LOA 20, che prevede tolleranze superiori ai 50 mm.

I risultati confermano una buona coerenza geometrica tra il modello BIM e la nuvola di punti del sito archeologico di Priene. La correttezza formale del modello consente di confermare l'affidabilità delle fonti storiche utilizzate per la ricostruzione. Le differenze rilevate dal software sono principalmente attribuibili alle deformazioni dovute al degrado del materiale nel tempo e alle inevitabili imperfezioni del rilievo strumentale.

1 - U.S. Institute of Building Documentation (USIBD), Level of Accuracy (LOA) Specification Guide, Version 2.0, 2016.

Analisi delle tolleranze geometriche

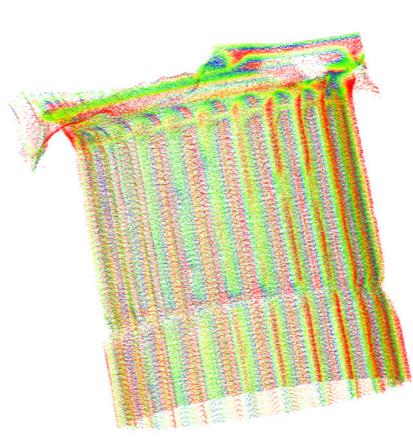


Figura 88 – Fusto superiore della colonna livello di accuratezza LOA 30 (2 cm)

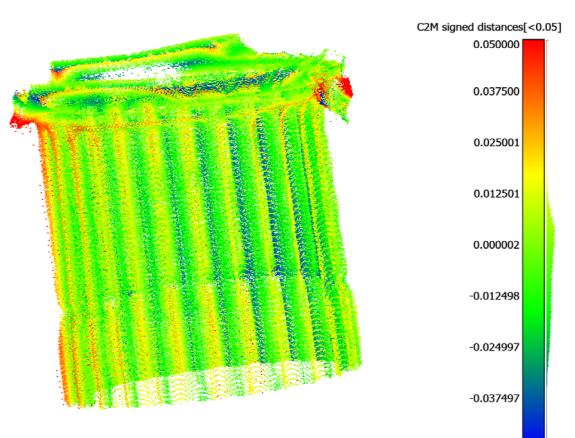


Figura 89 – Fusto superiore della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm).

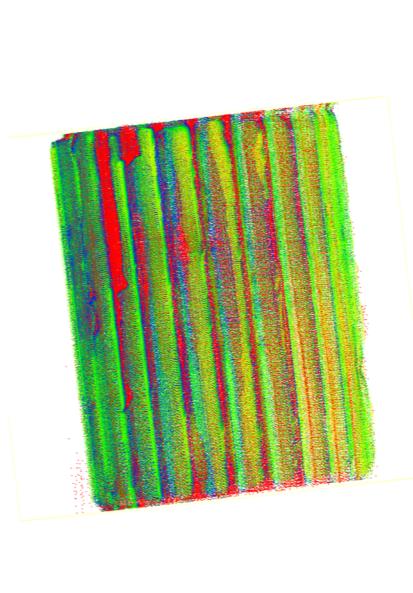


Figura 90 – Fusto centrale della colonna livello di accuratezza LOA 30 (2 cm)

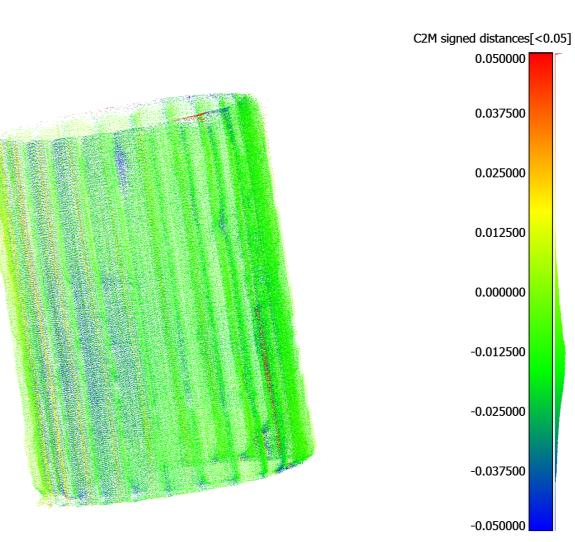


Figura 91 – Fusto centrale della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm).

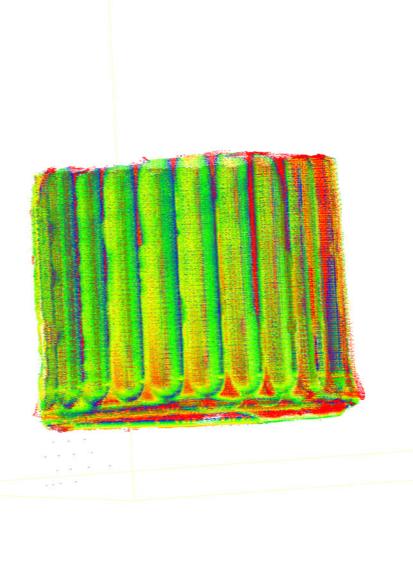


Figura 92 – Fusto inferiore della colonna livello di accuratezza LOA 30 (2 cm)

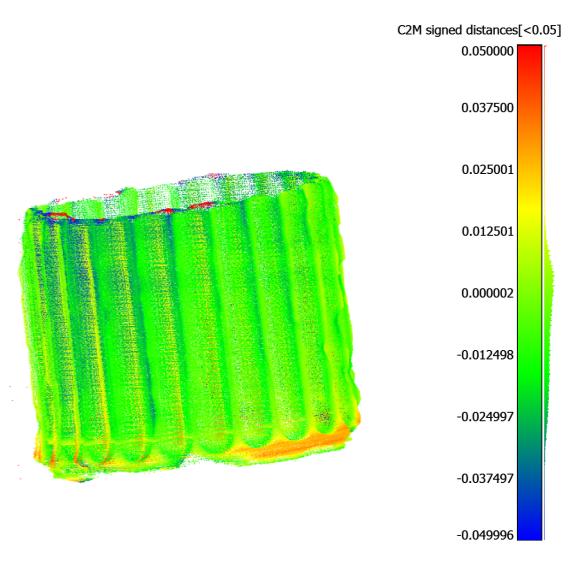


Figura 93 – Fusto inferiore della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm).

Nel complesso, l'analisi dimostra come l'integrazione tra rilievo digitale e modellazione storica permetta di raggiungere un elevato livello di attendibilità nella ricostruzione virtuale del patrimonio archeologico. L'utilizzo di strumenti come CloudCompare si conferma efficace per la verifica metrica del modello.

GENESI VIRTUALE DEL BENE

CONCLUSIONI SULLA RICOSTRUZIONE

Il processo di modellazione del santuario di Priene ha permesso non solo la ricostruzione geometrica del sito archeologico, ma ha anche consentito di trarre importanti conclusioni.

Attraverso la realizzazione del modello, concepito come un progetto integrato che unisce dati storici ed elementi parametrici in un unico ambiente, è stato possibile sperimentare le applicazioni del BIM in contesti archeologici, verificandone potenzialità e limiti nella realizzazione di modelli basati sulla documentazione storica e nel confronto con lo stato di fatto.

La modellazione si inserisce in un contesto già consolidato, convalidando la rappresentazione del sito archeologico e garantendo dati storici e accuratezza scientifica, talvolta mancanti in altre ricostruzioni precedenti.

L'impiego di famiglie parametriche ha facilitato la gestione delle proporzioni tra i diversi elementi, pur richiedendo attenzione nella definizione dei parametri. In particolare, la realizzazione degli ordini ionico e corinzio ha comportato non solo difficoltà nel disegno della voluta e delle foglie d'acanto, ma anche nella modellazione del fusto e delle scanalature. Nel complesso, l'applicazione dei diversi ordini ha permesso di ottenere un elevato livello di dettaglio, valorizzando la comunicazione visiva e storica del complesso.

È stato possibile verificare l'attendibilità delle fonti storiche e delle ricostruzioni attraverso il confronto tra la nuvola di punti e il modello BIM, consentendo di valutare la coerenza e l'accuratezza scientifica del caso studio, fornendo una base solida per l'interpretazione critica delle fonti e delle trasformazioni architettoniche nel tempo.

Per ottenere una definizione integrata della modellazione, è stato necessario attingere a diverse fonti storiche, non sempre completamente coerenti. Tuttavia, non è stato possibile raggiungere un livello di dettaglio elevato in tutti gli elementi ornamentali, in particolare nell'ordine ionico, poiché avrebbero appesantito eccessivamente il modello in Revit. Analogamente, la rappresentazione di alcuni elementi scultorei della facciata è risultata limitata.

Non è stato inoltre possibile integrare completamente le diverse fasi storiche, identificate attraverso l'analisi documentaria: il modello è stato realizzato focalizzandosi sulle ultime fasi di completamento. Le fonti storiche indicano che inizialmente furono realizzati il tempio e l'altare, seguiti da una parte della terrazza e dal completamento del tempio, mentre solo successivamente fu completato il resto del complesso. La realizzazione del Propileo è stata modellata in due fasi, mentre per la Tesoreria le indicazioni sono scarse.

Infine, la parametrizzazione degli elementi architettonici consente di ampliare scientificamente il modello all'intera città di Priene. In questa prospettiva, il modello non rappresenta solo una ricostruzione digitale, ma costituisce un ponte tra memoria e innovazione, un dispositivo di conoscenza che unisce ricerca, tecnologia e valorizzazione del patrimonio culturale.

ECHOES OF ATHENA VR

Un'esperienza immersiva



Figura 94 - Vista del modello 3D del Tempio in Unreal Engine 5, elaborazione propria

INTRODUZIONE ALLA REALTÀ VIRTUALE

Lo sviluppo di una vera e propria esperienza di realtà virtuale per il sito di Priene, intitolata *Echoes of Athena*, nasce con lo scopo di restituire al visitatore l'antico splendore del complesso del tempio di Atena, oggi perduto.

L'applicazione VR utilizza come mondo virtuale dati e geometrie del sito archeologico creati tramite modellazione HBIM con Autodesk Revit, come discusso nel capitolo precedente.

Echoes of Athena è pensata per essere utilizzata dai visitatori dei musei, sia che questi siano esperti del settore sia che siano visitatori amatoriali che desiderano ottenere maggiori informazioni sui reperti esposti. In questo modo il pubblico può esplorare il sito virtuale del complesso del tempio di Atena Polias a Priene, rendendo più vivi e attuali i reperti in mostra.

Lo sviluppo è stato effettuato tramite Unreal Engine 5.4 che, tramite il sistema Blueprint Visual Scripting, consente di implementare logiche di interazione e dinamiche di fruizione anche senza l'impiego diretto di linguaggi di programmazione testuale.

Per le fasi di test e di validazione è stato utilizzato un visore Meta Quest 2, insieme ai plugin specifici forniti da Meta per l'integrazione con Unreal Engine, tra cui il Meta XR Plugin.

ECHOES OF ATHENA VR

Dalla rovina alla rinascita



Figura 95 - Immagine del blocco del Tempio di Atena a Priene con l'incisione di Alessandro Magno al British Museum, elaborazione propria

OBIETTIVI E FINALITÀ DELL'ESPERIENZA VR

Dopo aver analizzato la VR, il suo impiego in campo archeologico e nella conservazione del patrimonio artistico, analizzeremo ora lo sviluppo di una esperienza completa per il sito archelogico di Priene, il cui obiettivo primario consiste nella restituzione fruitiva del contesto architettonico perduto del complesso del Tempio di Atena Polias. L'intento è quello di colmare la distanza percettiva che esiste tra i frammenti materiali conservati all'interno dei musei e la loro configurazione originaria e unitaria, offrendo una nuova modalità di fruizione del patrimonio archeologico tramite la Realtà Virtuale.

Oltre alla finalità divulgativa generale, Echoes of Athena si pone due distinti obiettivi specifici:

- Obiettivi didattici e conoscitivi che mirano alla comprensione tridimensionale e all'apprendimento attivo dei principi costruttivi e ai complessi spaziali che definivano l'architettura del tempio di Atena Polias. L'esperienza immersiva funge da catalizzatore per l'acquisizione di una consapevolezza spaziale altrimenti impossibile con i media tradizionali
- Obiettivi metodologici e di utilizzo, i primi sono focalizzati sulla spiegazione del processo di sviluppo che connette la modellazione HBIM con le esperienze VR. Per quanto riguarda l'utilizzo si analizzerà come l'applicazione sia valida non solo per la comunicazione, ma anche come un strumento per la documentazione analitica e la gestione informativa delle ipotesi ricostruttive del patrimonio culturale, con l'obiettivo finale di mostrare come questo caso di tesi sia applicabile a campi ben più ampi.

Target A seguito di una meticolosa ricostruzione del tempio realizzata tramite Autodesk Revit in ambiente HBIM, basata su ipotesi di studio archeologico e architettonico storiche assieme ad uno studio del Level Of Accuracy tramite CloudCompare. È stato necessario trovare un mezzo adatto per rendere

accessibile il modello anche al pubblico non specialistico, con esigenze specifiche che hanno portato alla realizzazione di un'esperienza adatta ad entrambe le categorie.

L'esperienza VR diventa quindi un soluzione ideale come strumento di divulgazione e di mediazione culturale, pensato per essere adottato dalle istituzioni museali che conservano elementi architettonici provenienti dal sito di Priene, tra cui il British Museum di Londra dove si può osservare un'iscrizione del Tempio di Atena che attesta il finanziamento di Alessandro Magno per il tempio, oppure il Pergamon Museum a Berlino che espone una ricostruzione parziale della parete occidentale della Stoà Sacra di Priene. In questo modo, i visitatori possono comprendere il contesto originario di tali reperti, configurando "Echoes of Athena" come una forma di museo virtuale interattivo, che integra la componente tradizionale con una dimensione immersiva e sensoriale.

Il primo obiettivo del progetto integrato nell'ambito museale è sicuramente quello di una divulgazione immediata delle informazioni storico-archeologiche e architettoniche ma non di meno ambisce a stimolare una riflessione più ampia sia sulla conoscenza di quanto appena appreso sia sull'importanza del ruolo che queste tecnologie immersive possono assumere per valorizzare e tramandare il patrimonio culturale.



Figura 96 - Schema degli obiettivi VR, elaborazione propria

ECHOES OF ATHENA VR

Dal BIM ad Unreal Engine



Figura 97 - Vista del modello 3D del Tempio in Unreal Engine 5, elaborazione propria

METODOLOGIE E TECNOLOGIE

Echoes of Athena è stato realizzato all'interno di Unreal Engine 5.4. La scelta è stata dettata da vari fattori: la qualità grafica, le performance in VR, il supporto per HBIM, il vantaggio competitivo e l'adozione del sistema di programmazione di Blueprint Visual Scripting.

Qualità grafica e performance Unreal Engine è un sistema di creazione 3D real time, leader nel settore dei videogiochi, del rendering fotorealistico e per la sua capacità di gestire scenari complessi. È stato scelto per restituire al meglio l'antico splendore del Tempio di Atena Polias. Inoltre, Unreal offre strumenti avanzati per l'ottimizzazione delle esperienze VR, sia nella programmazione sia nella fruizione finale, garantendo un'esperienza fluida con una bassa latenza, elementi indispensabili per evitare un effetto di motion sickness e massimizzare la sensazione di presenza nell'ambiente virtuale

Supporto per HBIM Inoltre, Unreal Engine offre supporto diretto all'importazione dei modelli BIM provenienti da Revit in particolare attraverso il plugin Datasmith. Questo strumento non si limita a convertire la geometria, ma funge da traduttore di pipeline (insieme di componenti software collegati tra loro), generando un file importabile in Unreal che conserva per intero la struttura gerarchica del modello, la geometria ottimizzata e i metadati informativi (texture, materiali e informazioni HBIM). Questa integrazione è stata fondamentale per garantire che la fedeltà geometrica e la documentazione del modello di ricostruzione venissero mantenute nel paesaggio all'ambiente VR. Tale scelta è stata presa anche considerando il modello di licenza dell'engine (<https://www.unrealengine.com/en-US/license>) che permette l'uso gratuito per educatori e



Figura 98 - pipeline Datasmith, elaborazione propria

scuole e anche, pur con certi limiti, alle organizzazioni governative (<https://www.unrealengine.com/en-US/faq>).

Vantaggio competitivo In un contesto di ricostruzione archeologica, l'uso di Unreal Engine, considerato come uno standard industriale per la visualizzazione architettonica e la simulazione in tempo reale, pone il progetto su un piano di maggiore affidabilità e professionalità rispetto a soluzioni open-source o motori di rendering meno avanzati. Questo allineamento inoltre, massimizza il potenziale di adozione del progetto da parte di istituzioni museali e di ricerca.

Blueprint Visual Scripting Unreal Engine nativamente usa il linguaggio di programmazione C++, ma offre in parallelo anche il sistema di Visual Scripting Blueprint che permette, anche a chi sia digiuno di programmazione, di creare applicativi complessi tramite un'interazione visuale a nodi. La scelta è quindi caduta su questa seconda opzione che è stata fondamentale per testare rapidamente le logiche di gioco, le interazioni e gli eventi narrativi, cruciali per la fase di progettazione e collaudo dell'esperienza VR. Inoltre, dal momento che il focus primario del progetto non era lo sviluppo di un gioco complesso, Blueprint ha fornito una curva di apprendimento più accessibile per implementare le logiche specifiche dell'esperienza nel miglior tempo possibile. Questa scelta ha permesso di focalizzare le risorse sul dettaglio grafico della ricostruzione HBIM, sul design dell'esperienza e sulla flessibilità nella manutenzione della logica di interazione, piuttosto che sulla programmazione.

Blueprint fornisce anche l'indubbio vantaggio che questa esperienza di programmazione sia replicabile in ambiti similari con sforzi relativamente contenuti rendendo così Echoes of Athena un caso di studio.

Hardware Lo sviluppo, il testing e il packaging del progetto sono stati eseguiti su una workstation portatile e con un Meta Quest 2. Questo ambiente di sviluppo, caratterizzato da un processore Intel Core i5-10300H @ 2.50GHz e una scheda grafica NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti, pur non essendo una configurazione top-tier, si è dimostrato più che sufficiente per la creazione del mondo virtuale e per la programmazione con Blueprint.

Sebbene il visore possa operare in modalità stand-alone, Echoes of Athena è stato sviluppata per essere fruibile tramite il visore Meta Quest 2, operando in modalità PC VR con collegamento Oculus Link con un cavo USB-C ad alta velocità. Questa modalità utilizza il visore solo come display e input

controller, mentre il rendering è fatto dal PC di supporto offrendo quindi maggiori capacità di calcolo e di gestione di mondi complessi.

La scelta del Meta Quest 2 è dovuta al suo ampio campo visivo (Field of View, FoV), alla risoluzione elevata di 1832 x 1920 pixel per occhio e una frequenza di 90Hz. Tutte caratteristiche che consentono un'immersione più profonda nell'ambiente virtuale del tempio.

Confronto con i casi studio Rispetto ai progetti di VR e AR museale e archeologica analizzati (*The Bath Abbey Footprint, The Venn Room, Heraklion Archeological Museum, Musei nel Metaverso a Palazzo Madama*), Echoes of Athena si inserisce nel panorama esistente adottando tecnologie che rispecchiano lo standard industriale, sia a livello di software di sviluppo (Unreal Engine), che di hardware per la fruizione (Meta Quest 2). Tuttavia, si differenzia in due aspetti fondamentali: la metodologia di modellazione e l'obiettivo di contenuto.

La principale distinzione quindi risiede nella metodologia di modellazione tridimensionale. Poiché i casi studio analizzati si concentrano o sulla realizzazione di un modello tramite fotogrammetria e laser scanner oppure adottano pipeline di modellazione ottimizzata per il game development, mentre Echoes of Athena si fonda su una ricostruzione HBIM. Questa scelta pone la rigorosità geometrica e la gestione dei dati architettonici al primo posto, trasformando il modello in un documento analitico invece che una semplice rappresentazione visiva.

Un'altra differenziazione è data dall'obiettivo del contenuto. Molti progetti si concentrano sull'aumento del contesto attuale tramite pannelli informativi, come possiamo osservare per il caso di Bath Abbey Footprint e l'Heraklion Archeological Museum. Echoes of Athena invece, ha come scopo la ricreazione dell'atmosfera originaria del complesso del Tempio di Atena Polias, oggi perduto. Mentre l'esperienza di Palazzo Madama ha un obiettivo primario di partecipazione attiva ad una storia, Echoes of Athena mira specificatamente alla sensazione di presenza storica attraverso la ricostruzione integrale dell'ambiente.

Tra le strategie di user experience adottate, il progetto si allinea con le pratiche individuate nei casi analizzati, in particolare per il target e il paradigma di interazione. Il pubblico identificato è il visitatore museale generale, che richiede quindi un'interfaccia minimalista e non intrusiva.

Pertanto, si è adottato un sistema informativo basato su pannelli informativi, una scelta comune ai progetti di divulgazione che non richiede una conoscenza pregressa o approfondita delle modalità di interazione VR e di conseguenza massimizza la sua fruizione.

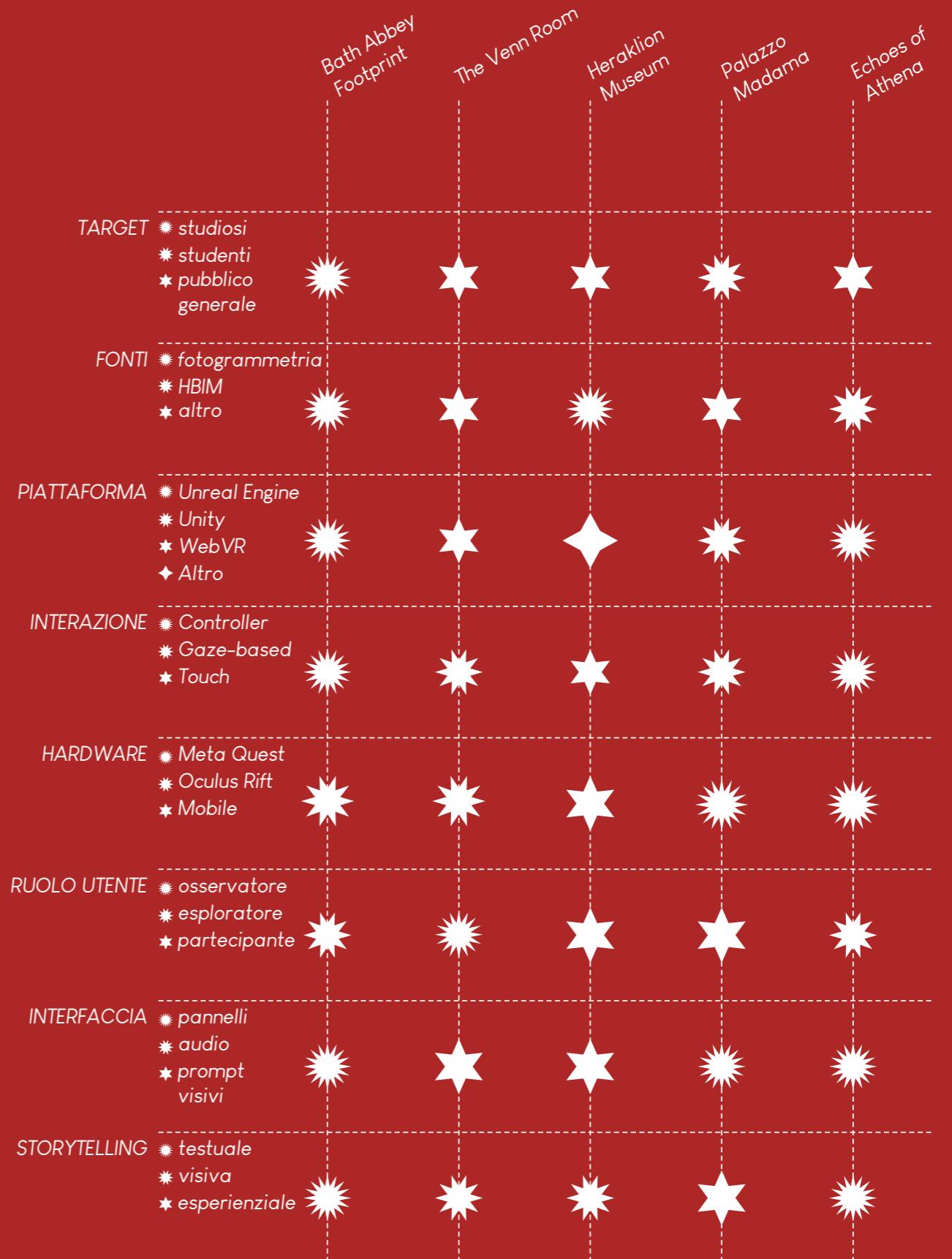


Figura 99 - Tabella di confronto casi studio, elaborazione propria

ECHOES OF ATHENA VR

Scelte di Design



Figura 100 - Vista del modello 3D del Tempio in Unreal Engine 5, elaborazione propria

PROGETTAZIONE DELL'ESPERIENZA

Come già accennato in precedenza per gli obiettivi, la narrativa alla base di Echoes of Athena si fonda sul contrasto dialettico tra la condizione attuale del sito di Priene che, come per molti altri siti, viene percepito come un insieme di rovine frammentarie e il suo aspetto originario, quando il tempio di Atena rappresentava un luogo monumentale e sacro, centro di devozione e riflessione per la comunità cittadina. L'esperienza mira dunque a offrire al visitatore un ambiente evocativo e sospeso nel tempo, che riflette il periodo di massimo splendore della *polis*. Per trasmettere questa dimensione spirituale e la vitalità del sito, l'atmosfera è stata curata sotto diversi aspetti, dall'illuminazione fino ai suoni ambientali.

Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, il programma Echoes of Athena è strutturato come un'esperienza di tipo riflessiva e contemplativa e questo viene fatto per facilitare l'utente nella comprensione del valore storico, architettonico e culturale del tempio e del sito nel suo complesso. Non si tratta quindi solamente di ricostruire in digitale Priene, ma di stimolare un processo intellettuale di riscoperta e della relativa contestualizzazione in altre parole si tratta di intrecciare un'osservazione con la curiosità e con la conoscenza.

Dal punto di vista interattivo, l'applicazione privilegia un approccio esplorativo non lineare: l'utente è come un visitatore dell'epoca e come tale può muoversi liberamente all'interno della ricostruzione del sito, osservando da vicino le strutture e i dettagli architettonici. L'esperienza integra inoltre elementi informativi attivabili mediante interazione diretta. Inquadrando specifici edifici o elementi costruttivi, l'utente riceve un prompt visivo che segnala la possibilità di interagire. Una volta attivato, viene visualizzato un pannello informativo contenente dati relativi all'oggetto selezionato, tra cui materiali, dimensioni, funzione e attività che vi si svolgevano.

Questo sistema di interazione consente di coniugare la dimensione estetica e immersiva con quella didattica e divulgativa, favorendo un coinvolgimento

attivo e una comprensione più profonda del patrimonio archeologico di Priene.

Storyboard e Mockup Il flusso dell'esperienza è stato stabilito durante una fase preliminare di storyboard: uno strumento progettuale che ha consentito di visualizzare l'evoluzione narrativa e i punti chiave del percorso utente. Parallelamente, è stata sviluppata la User Interface (UI), con l'obiettivo di garantire la leggibilità delle informazioni senza compromettere la sensazione di immersione. Gli elementi di interfaccia sono stati progettati in maniera da non sopraffare l'utente e allo stesso tempo mantenere una coerenza estetica di progetto.

La sequenza esperienziale può essere divisa in tre momenti chiave che favoriscono un coinvolgimento cognitivo ed emotivo bilanciato, in cui la ricostruzione scientifica si intreccia con l'estetica evocativa:

1 INTRODUZIONE

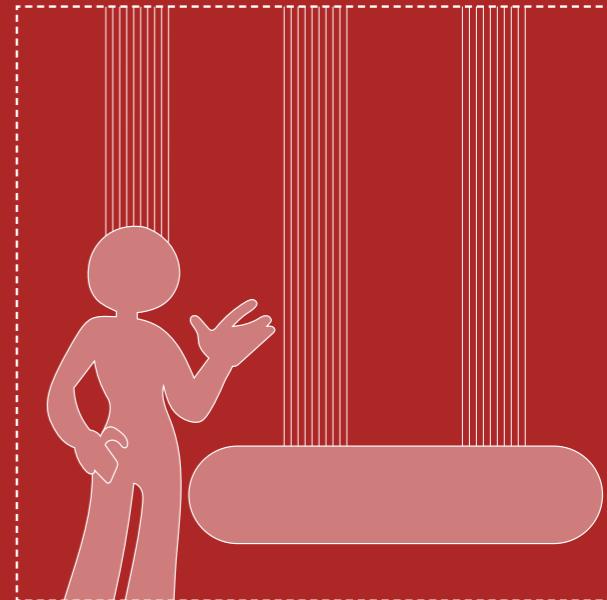
L'esperienza si apre con una schermata con il titolo e le istruzioni relative su come spostarsi e su come interagire con il mondo virtuale.

ECHOES OF ATHENA



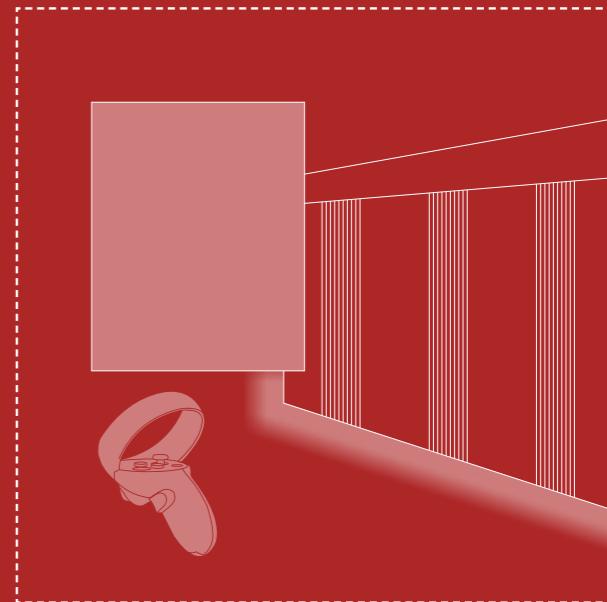
2 CONTESTO E GUIDA

Nel Propileo, la porta del complesso è punto di partenza, l'utente incontra un agente narrativo che si presenta sotto forma di persona che tramite un breve dialogo introduce il contesto storico culturale e invita l'utente ad esplorare.



3 ESPLORAZIONE E INTERAZIONE

L'esplorazione libera costituisce il resto dell'esperienza. Quando l'utente entra nel raggio di azione di un elemento interagibile, esso acquisisce un contorno luminoso, invitando l'utente ad avvicinarsi. Successivamente, l'utente riceve un prompt visivo che fornisce informazioni su come interagire. L'attivazione rende visibile un cartellone informativo.



Scelte di design La corretta definizione dell'atmosfera ha rappresentato, sin dalle prime fasi dello sviluppo di Echoes of Athena, un aspetto chiave e fondamentale, poiché era importante offrire all'utente un luogo virtuale che avesse un carattere evocativo e sotto certi aspetti anche onirico. Questo per trasportare, seppure virtualmente, l'utente in un luogo remoto sia fisicamente che temporalmente. Partendo da queste premesse si è quindi proceduto per ricreare la sensazione di trovarsi all'interno di un ambiente vivo ma anche di essere all'interno di un tempio sacro, un antico luogo di culto che all'epoca era sicuramente frequentato ma in maniera silenziosa e pacata.

Luce Anche la luce, un dettaglio che forse sembrerà trascurabile al visitatore virtuale, è stata studiata opportunamente e si è deciso di impostarla al tramonto, un'ora della giornata dal grande potere evocativo e simbolico con colori dorati e tenui. E così la luce calda del tardo pomeriggio si riflette sul marmo facendolo brillare e rendendolo vivo, mentre le ombre lunghe aiutano a generare una profondità di campo che coinvolge ulteriormente l'utente. Piccoli tocchi aggiuntivi come un effetto di bloom per enfatizzare ulteriormente l'effetto dorato della luce e una palette cromatica che riprendere i toni della luce delle tarde ore della giornata, ispirata ad una lunga tradizione pittorica che va da Akropolis di Leo Von klenze, fino a Impression, soleil levant di Claude Monet, aiutano a rendere reale il virtuale.

Colori Come colori principali sono stati scelti l'oro e l'azzurro, una decisione non solo estetica, ma anche simbolica: troviamo infatti l'oro come un protagonista che indica la strada e accompagna il visitatore in questo viaggio e che riappaie anche nei contorni luminosi degli oggetti selezionabili e nei prompti di interazione che invitano l'utente alla scoperta. L'azzurro etereo, che rappresenta gli abitanti del tempio, aiuta a farli percepire come spiriti di un tempo passato, un ricordo di quegli abitanti che popolavano e rendevano viva Priene. L'oro e l'azzurro riflettono infine anche il contrasto evidente tra la frammentazione delle rovine esposte nel museo e l'antico splendore del complesso monumentale.

Figura 103 - Akropolis, Leo von Klenze, 1846



Figura 102 - *Impression, soleil levant*, Claude Monet, 1872



Figura 104 - *Les Champs Élysées*, Henri Edmond Cross, 1890



Dal punto di vista della *User Interface* (UI), è stata adottata una strategia di massima discrezione per aumentare l'immersione.

I pannelli informativi che compaiono accanto agli elementi architettonici più significativi mantengono la coerenza visiva con l'ambiente virtuale grazie all'utilizzo delle stesse tonalità di colori. Le informazioni proposte sono contenute ma sufficienti per far conoscere dimensioni, materiali e funzioni. Inoltre, per facilitare e garantire la leggibilità del testo, indipendentemente dalla posizione dell'utente, i pannelli stessi sono progettati per orientarsi dinamicamente.

Locomozione Per quanto riguarda la locomozione, è stato scelto il teletrasporto mediante puntatore come unico metodo di movimento. Questa scelta diminuisce il rischio di *motion sickness*, principale fattore di abbandono nelle esperienze VR, soprattutto per il pubblico non specializzato.

Interazione La modalità di interazione con il mondo virtuale è basata sul puntamento e sull'attivazione: quando l'utente rivolge lo sguardo verso un elemento con cui si può interagire e di cui quindi esiste un pannello di informazioni, un'icona suggerisce l'azione da compiere.

Tutte le scelte di design generano un ambiente coerente e armonico, in cui luce, colori, interfaccia e interazione si fondono e contribuiscono a trasmettere un senso di spiritualità e di memoria del luogo storico. L'obiettivo ambizioso di questa sinergia è che l'utente non percepisca solo la ricostruzione architettonica, ma anche l'atmosfera emotiva e simbolica che circondava il tempio di Atene nei secoli del suo splendore, riportandolo in vita dopo millenni.

TEMPIO DI ATENA (IV-III secolo a.C.)

Su una terrazza che domina la città antica sorgeva il Tempio di Atene Polias, opera di Piteo di Alicarnasso.

Costruito in marmo del monte Mykale, misurava 21 metri per 39, con un'altezza di 17 metri e colonne alte 11 metri che ne scandivano la forma perfetta.

Era il cuore religioso della città: qui si custodiva il fuoco sacro, si celebravano sacrifici e feste in onore della dea protettrice.

A causa di un terremoto, il santuario cadde in rovina, ma il suo spirito perdurò tra le pietre.

TERRAZZA (IV-III secolo a.C.)

Sulla terrazza meridionale, aperta verso il sole e il mare, sorgeva una sala che accompagnava la vita quotidiana dei cittadini di Priene.

Il muro nord correva lungo tutta la terrazza di 76 metri, costruito in pietre rettangolari unite con argilla.

Le colonne, 32 in tutto, con diametro inferiore di 0,60 m e scanalature leggere, sorreggevano una trabeazione ornata da teste di leone e triglifi regolari.

Sotto questo portico si passeggiava, si osservava il mare e si svolgevano le attività di tutti i giorni, mentre il tempio vegliava silenzioso sulla città.

ALESSANDRO MAGNO (IV a.C.)

La costruzione del lato orientale del tempio ebbe inizio nella metà del IV secolo a.C., fu Alessandro il Grande a portarne a compimento l'opera.

Sul blocco più alto dell'ante sud del naos, un'iscrizione incisa nella pietra recita come un voto eterno:

«Il re Alessandro dedicò il tempio ad Atene Polias.»

COLONNA IONICA (IV-III secolo a.C.)

Sui lati del tempio si ergono le colonne ioniche, che catturano la luce e scandiscono lo spazio con eleganza.

Il fusto slanciato, con 24 scanalature conduce al capitello, ornato da volute e motivi fogliati, armonizzando col canale e l'abaco in cyma reversa.

L'entablamento si sviluppa in architrave a tre fasce, dentelli, ovoli e sima con teste di leone.



STATUA DI ATENA (IV-III secolo a.C.)

Nel cuore del tempio si ergeva Atene, in piedi, avvolta nella pelle di capra e coronata dal suo elmo guerriero.

A sinistra giacciono lo scudo e lancia, simboli della sua forza protettrice; nella destra, una piccola Nike, portatrice di vittoria.

Il suo volto, sereno e solenne, ricordava l'Athena del Partenone, eco lontana della stessa divinità che vegliava su Atene e su Priene.

AGORÀ (IV-III a.C.)

Nel cuore della città antica si apriva l'Agorà, vasta quasi 75 metri per 35, centro vitale di Priene e crocevia di voci, commerci e riti civici.

Lungo i suoi margini si allineavano stai doriche, dove i cittadini si incontravano all'ombra delle colonne.

Qui si svolgeva la vita della polis un luogo di scambio, decisione e festa.

ECHOES OF ATHENA VR

IMPLEMENTAZIONE TECNICA

La struttura dell'esperienza Echoes of Athena su Unreal Engine comprende due livelli, il primo per l'introduzione con il titolo e il secondo per il livello principale contenente il tempio.

Echoes of Athena è stato sviluppato a partire da un template VR messo a disposizione dall'engine stesso. Un livello su Unreal ha bisogno di una modalità di gioco, in questo caso definita come VRGamemode e di un pedone, ovvero l'utente, definito come VRPawn. La modalità e il pedone dettano le regole del gioco e dell'interazione con il mondo.

Gli asset utilizzati in Echoes of Athena comprendono il modello realizzato su Revit e importato con Datasmith e altri asset di contesto, tra cui case, alberi, l'agorà e gli abitanti del tempio, scaricati con licenza gratuita dal sito Sketchfab (<https://sketchfab.com/feed>), libreria online gratuita di modelli 3D. La costruzione del contesto si basa su varie ricostruzioni storiche, assieme ad una geolocalizzazione nel sito di Priene per rendere al meglio l'ambientazione del monte Micale. Lo studio e la realizzazione del contesto contribuiscono all'immersione totale nel tempio e proprio per questo motivo si è scelto di realizzarlo, piuttosto che lasciare il Tempio sospeso nel vuoto, come se fosse privo di vita.

LIVELLO INTRODUTTIVO

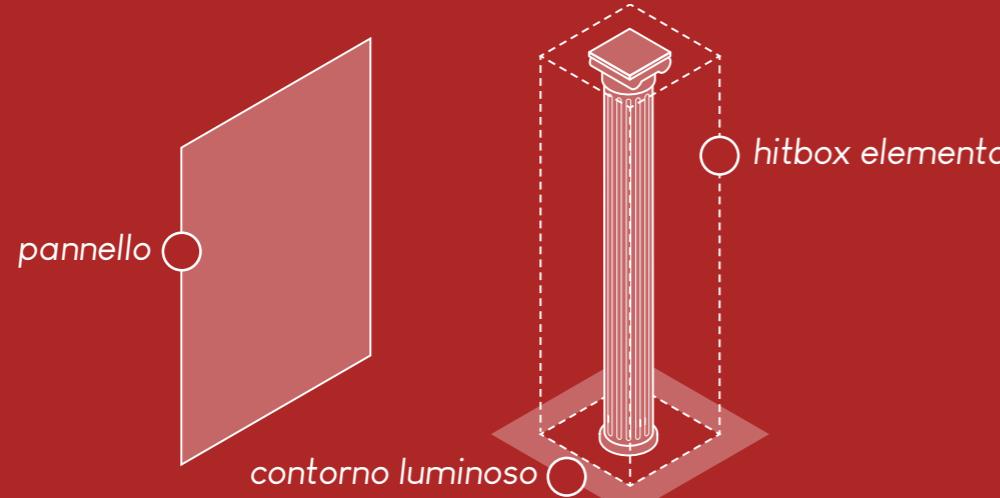
I livelli sono composti da degli attori, che su Unreal Engine sono gli oggetti che compongono la scena. Nel caso del livello di introduzione gli attori sono la scritta del titolo e l'icona animata del controller. Gli attori sono composti da widget, ovvero degli elementi 3D di Interfaccia Utente (UI). Mentre l'icona animata è composta da un attore contenente una Material Billboard, cioè un cartellone che mostra un materiale pre impostato. In questo caso viene utilizzato un materiale composto da una serie di immagini che si muovono, per rendere l'idea di un'animazione. Nel livello di introduzione l'azione accade nella Blueprint del livello, ovvero in una sezione dedicata alla modellazione e alla programmazione visuale di un determinato elemento. In questo caso parliamo della Blueprint del livello: quindi, trascorsi 10 secondi dall'inizio del livello, si procede al livello successivo.

APERTURA LIVELLO: apre il livello successivo



LIVELLO PRINCIPALE

Il livello principale è molto più complesso ed è composto da un attore per ogni oggetto interagibile. Dal punto di vista della visualizzazione 3D, ogni attore è composto da un cubo che copre il volume dell'elemento e funziona da volume di collisione, poi comprende una *Billboard*, un cartellone che ha applicata un'immagine del pannello informativo. Infine contiene un piano che crea il contorno luminoso che segnala la possibilità di interazione e una scatola di collisione che rappresenta l'area in base cui si attiva il contorno.



Nella Blueprint di ogni elemento troviamo tre eventi principali:

NASCONDI BILLBOARD E CONTORNO



EFFETTO CONTORNO: attiva il contorno luminoso quando l'utente entra nel suo raggio di azione



EVENTO INTERACT: stabilisce il comportamento dell'evento personalizzato "Interact"

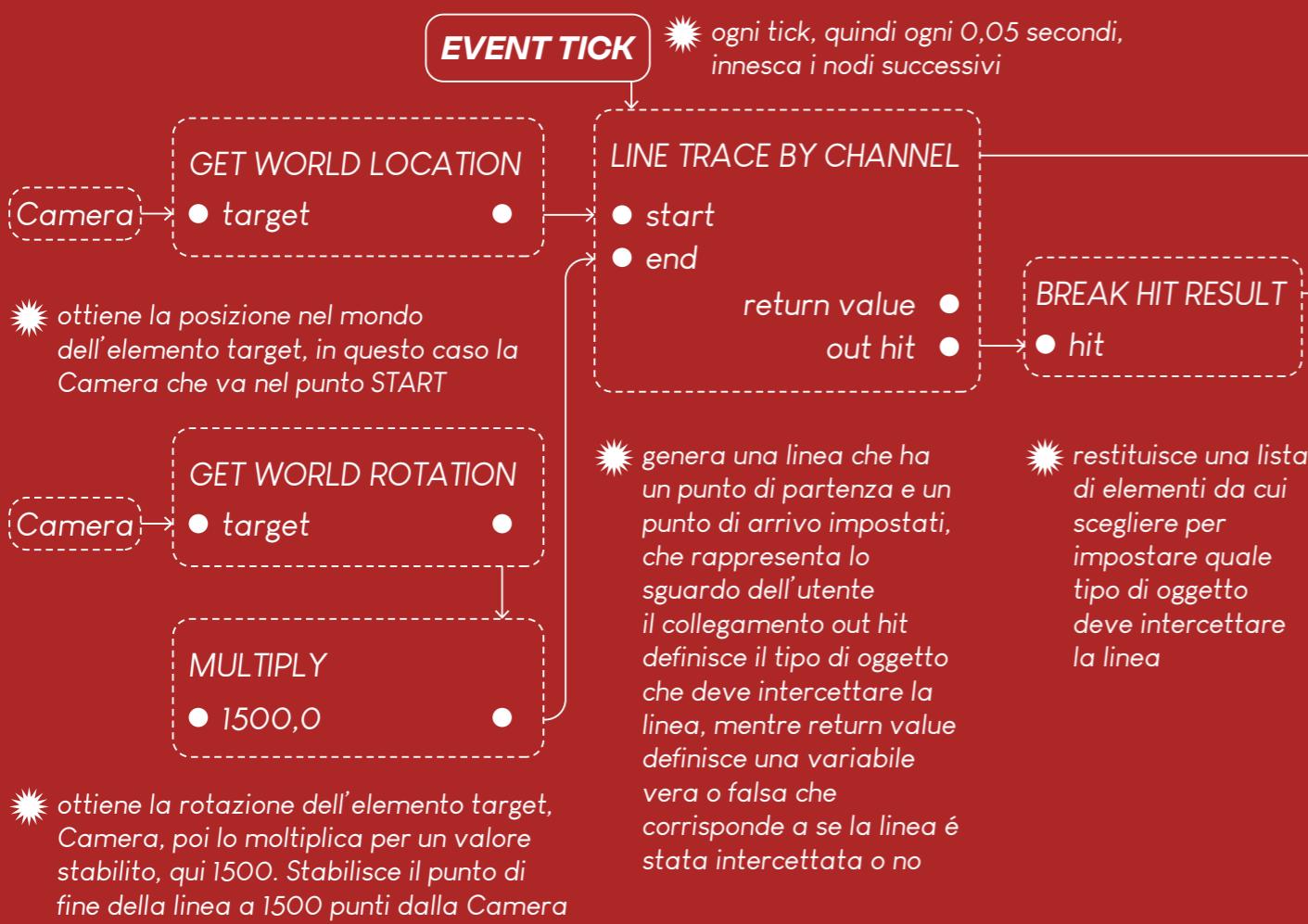


VRPAWN

Infine, dopo aver impostato il comportamento degli attori interagibili, la Blueprint del VRPawn definisce come innescare tali comportamenti. Il Pawn è composto da vari elementi, tuttavia, verranno analizzati soltanto quelli realizzati per Echoes of Athena e non quelli preimpostati dal template VR di Unreal Engine come le meccaniche di locomozione o la mappatura dei tasti del controller.

Gli elementi presenti nel Pawn sono una Material Billboard che rappresenta l'animazione del controller che indica le istruzioni e il widget che contiene la scritta. Nel grafico degli eventi osserviamo:

LINETRACE: imposta un comportamento che sta alla base di tutte le interazioni. Viene generata una linea virtuale che parte dall'utente e va avanti



COME INNESCARE L'AZIONE

ENHANCEDINPUTACTION IA_HAND_GRASP_RIGHT

ENHANCEDINPUTACTION IA_HAND_GRASP_LEFT

● nodo catalizzatore, quando viene premuto l'input sul controller, procede al nodo successivo

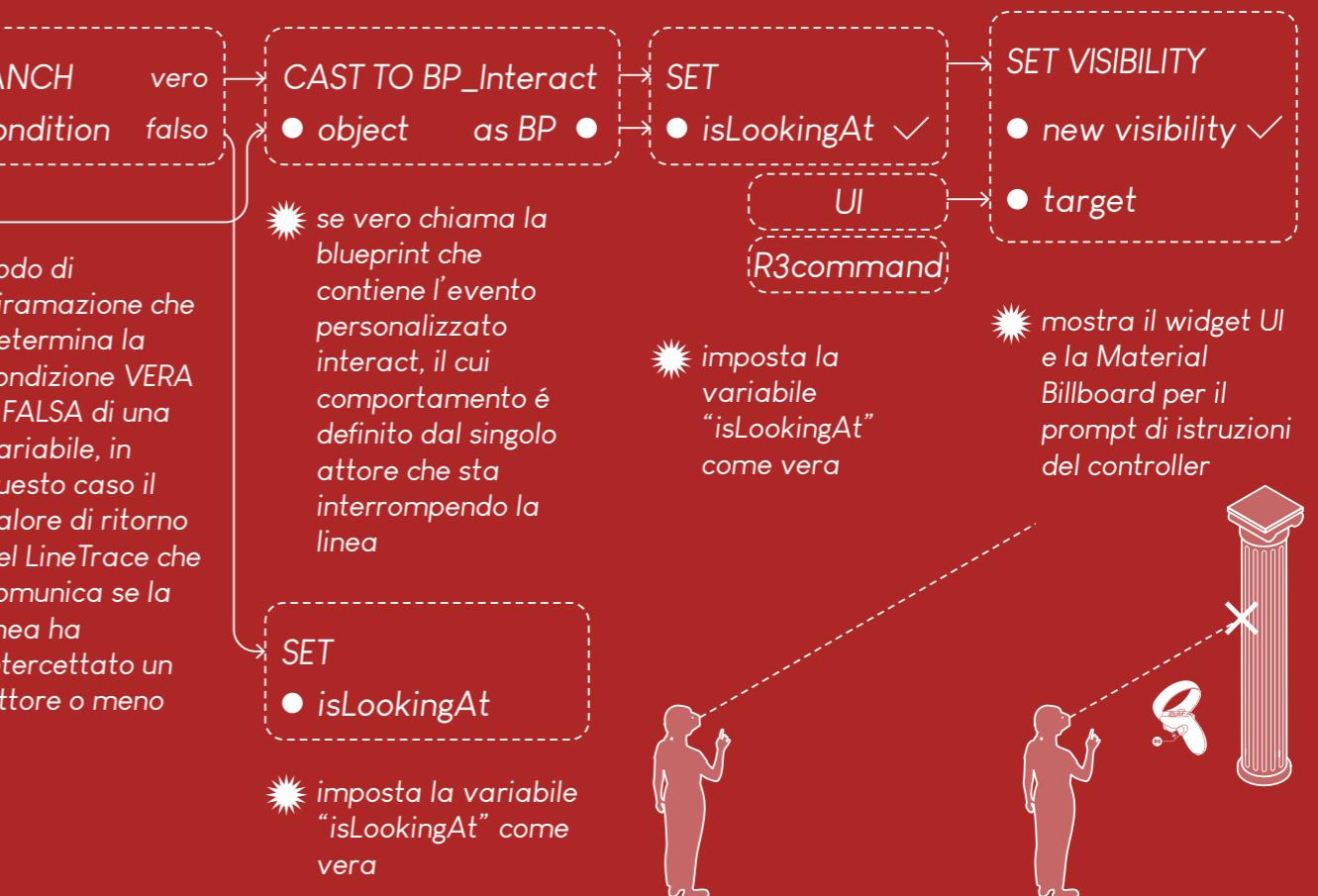
INTERACT

● esegue l'evento personalizzato interact

PLAY SOUND 2D

● riproduce un suono predefinito che segna l'interazione

CONSEGUENZA DEL LINETRACE: viene stabilito cosa succede a seguito dell'interruzione della linea



ECHOES OF ATHENA VR

TEST E VALUTAZIONE



Figura 105 - Immagine scattata durante il play testing di Echoes of Athena

A seguito della prima implementazione, Echoes of Athena è stata sottoposta a una fase di testing su un campione di 52 utenti, condotto nell'arco di una settimana. L'obiettivo primario di questa indagine era duplice: consolidare la user experience (UX), misurando l'usabilità e la sensazione di presenza e al contempo testare la sua immediatezza e completezza in relazione all'obiettivo finale di esposizione in un contesto museale o istituzionale.

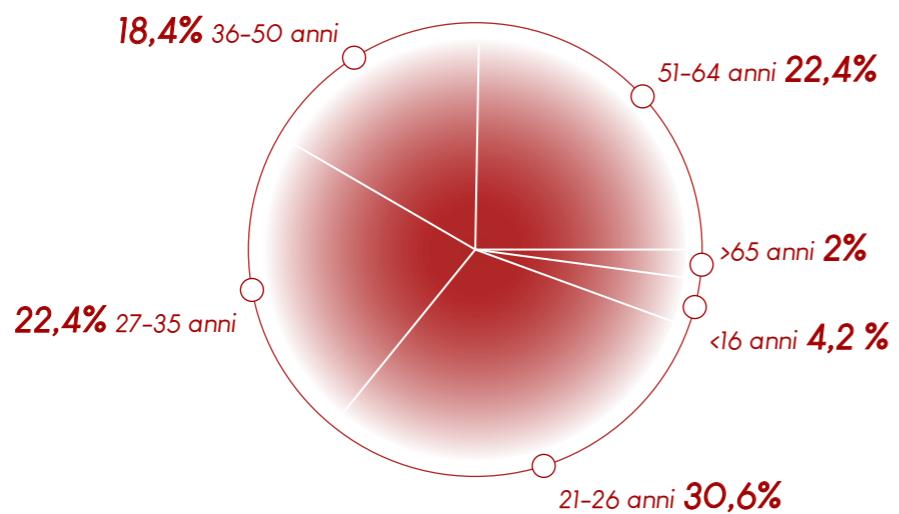
Il campione è stato valutato tramite un questionario composto da 13 domande, diviso in due sezioni principali: le 3 domande iniziali erano di natura socio-economica e demografica, essenziali per inquadrare l'eterogeneità del pubblico, mentre le restanti 10 domande costituivano le metriche di valutazione sull'esperienza effettiva, suddividendosi in tre categorie: domande sull'usabilità e interazione, tra cui misurazione della facilità d'uso e del teletrasporto e della logica di attivazione dei pannelli informativi, domande di valutazione estetica e di immersione e infine feedback qualitativo iterativo, quindi una raccolta di commenti aperti riguardanti eventuali suggerimenti per integrazioni e miglioramenti.

La raccolta di questi dati ha permesso di eseguire un'analisi oggettiva dell'esperienza, fondamentale per passare ad una versione migliorata e sempre più vicina ad un prodotto finale pronto alla presentazione.

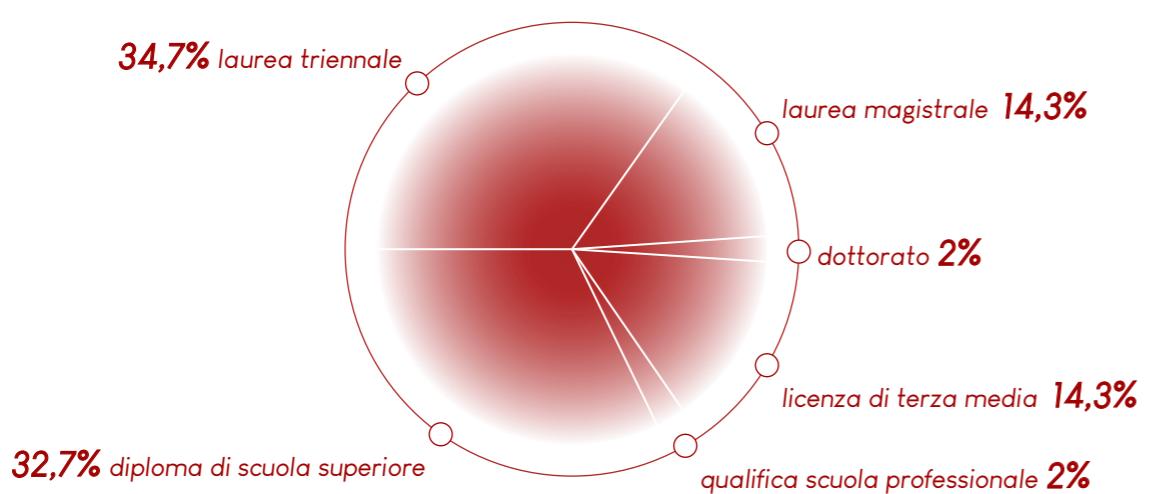
Domande socioeconomiche e demografiche

Dalle domande di carattere socioeconomico e demografico emerge che il campione è composto prevalentemente da partecipanti di età compresa tra i 21 e i 26 anni, seguiti dalla fascia 27-35 anni. La maggior parte dei rispondenti (67,4%) possiede un titolo di studio universitario, sia triennale sia magistrale. Per quanto riguarda l'occupazione, le categorie più rappresentate sono impiegati o funzionari pubblici e studenti universitari.

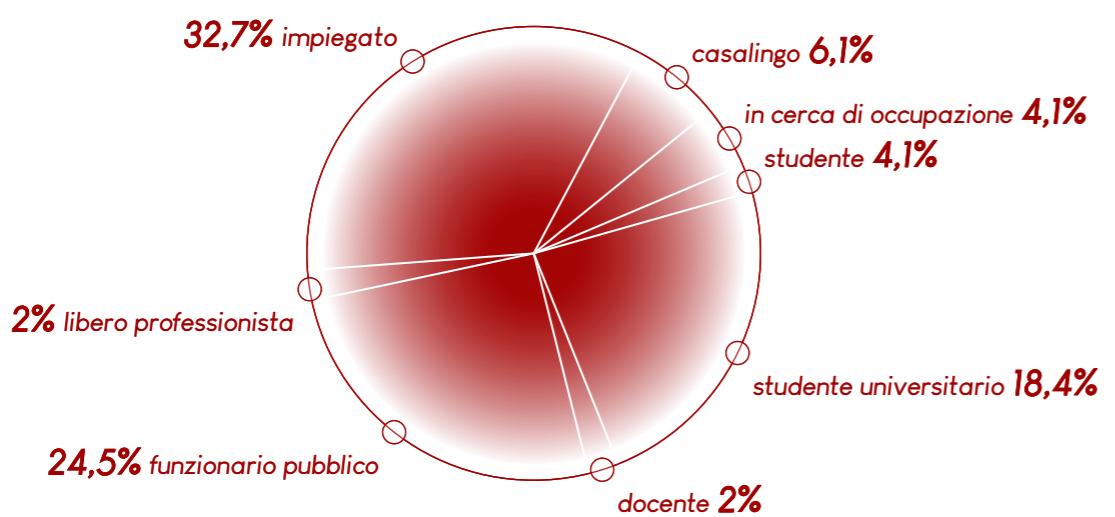
QUANTI ANNI HAI?



QUAL È IL TUO TITOLO DI STUDIO?



QUAL È LA TUA OCCUPAZIONE?



Da questi dati possiamo concludere che gli utenti giovani fossero più propensi a sperimentare nuove tecnologie e con maggiore dimestichezza digitale. L'elevato livello di istruzione, inoltre, indica un pubblico abituato a contesti di apprendimento complessi. La distribuzione delle occupazioni riflette un campione abituato ad attività intellettuali e formative. Questi aspetti possono aver influito positivamente sulla comprensione e utilizzo dell'esperienza.

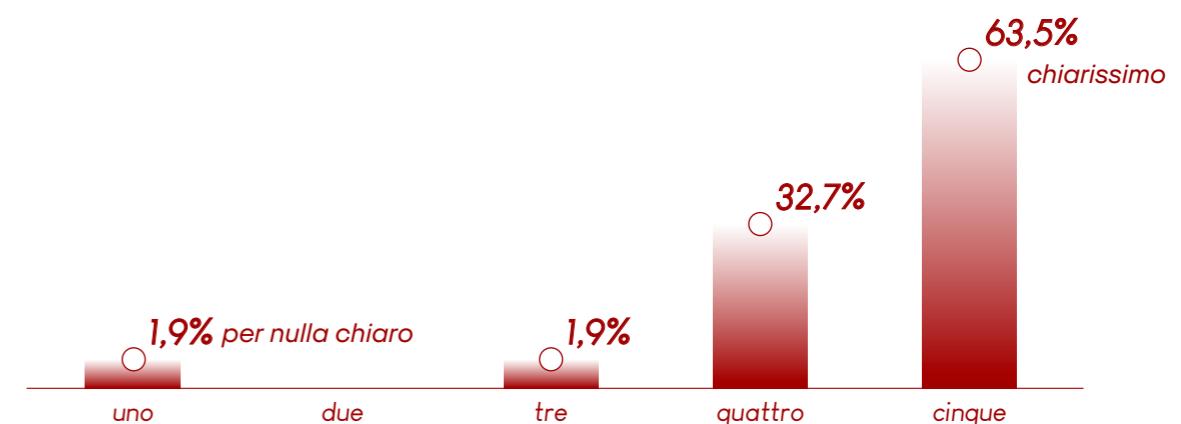
Domande di usabilità e interazione Le domande sull'usabilità si concentrano sugli aspetti tecnici, in particolare sulla la chiarezza degli obiettivi dell'esperienza, delle attività da svolgere, sulle modalità di interazione e sui meccanismi di locomozione, con una domanda specifica riguardante l'eventuale presenza di motion sickness, argomento delicato che è stato quindi valutato con attenzione.

I risultati mostrano che per quanto riguarda la motion sickness e la comprensione degli obiettivi, non sono emerse criticità rilevanti. Le principali difficoltà sono state invece riscontrate nell'interazione con gli elementi dell'ambiente virtuale: nonostante il 57,7% del campione non abbia riscontrato problemi, il restante 42,3% ha dichiarato leggera incertezza o confusione nell'interazione con gli oggetti.

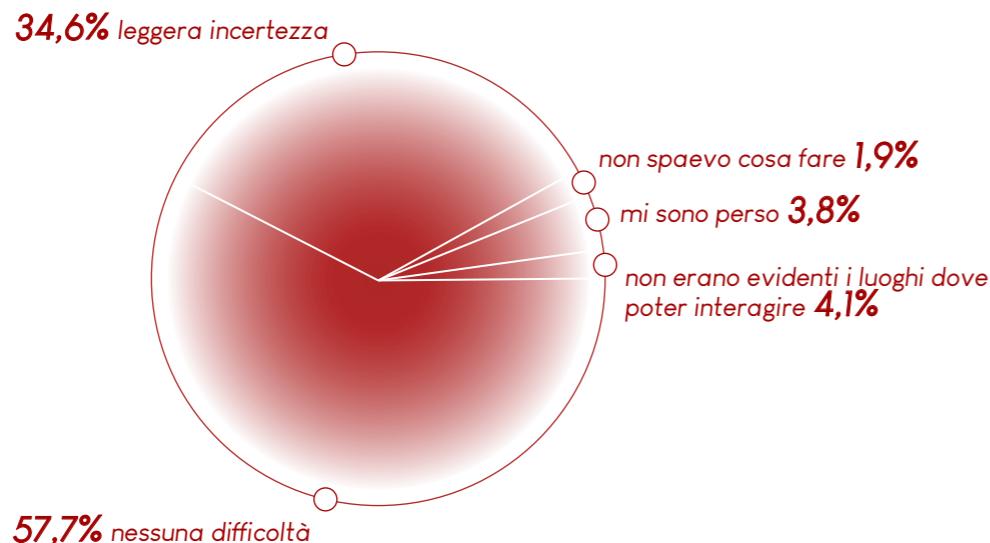
Infine, il 50% delle persone ha dichiarato qualche difficoltà nell'orientarsi all'interno dello spazio virtuale.

Questi risultati sono stati utili nella fase di revisione e ottimizzazione dell'esperienza, dove sono stati ri-progettati i punti di interazione per risultare più intuitivi e concentrati in aree specifiche, al fine di ridurre la dispersione

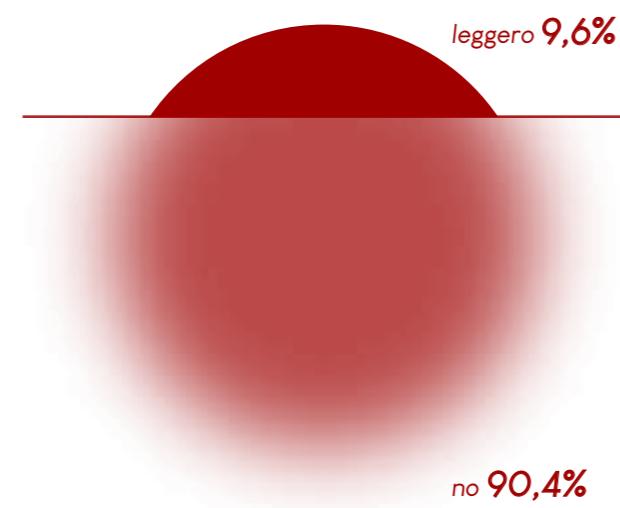
QUANTO TI È STATO CHIARO COSA DOVEVI FARE ALL'INTERNO DELL'ESPERIENZA



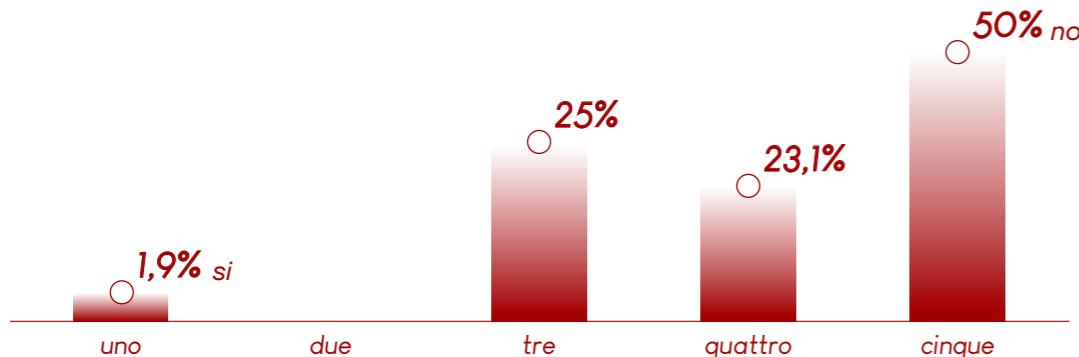
HAI AVUTO DIFFICOLTÀ A CAPIRE COME
INTERAGIRE CON GLI OGGETTI?



HAI PROVATO FASTIDIO DURANTE L'ESPERIENZA?



TI È SEMBRATO FACILE MUOVERTI E
ORIENTARTI NELLO SPAZIO?



migliorare l'orientamento. Inoltre, per facilitare ulteriormente la navigazione nello spazio virtuale è stata integrata una mappa nell'interfaccia per offrire un riferimento visivo costante e aumentare la percezione di controllo nell'ambiente.

Domande di valutazione estetica Per la valutazione dell'esperienza è stato ritenuto fondamentale analizzare anche la ricezione estetica, al fine di comprendere se fosse stato raggiunto l'obiettivo di un'immersione completa all'interno del tempio di Atena.

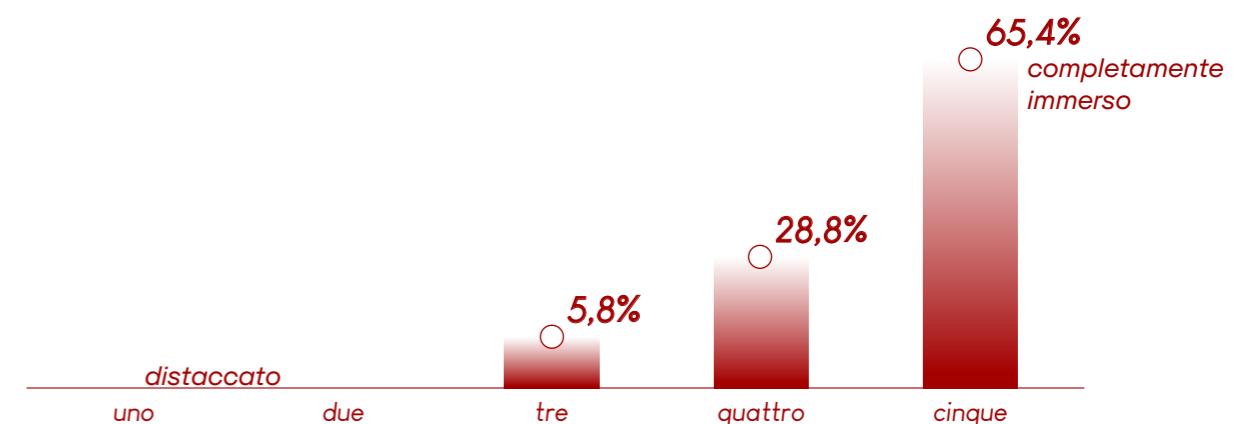
La totalità del campione ha dichiarato di essersi sentito immerso dentro al tempio con una valutazione pari o superiore a 3 su 5. Risultati analoghi sono stati registrati riguardo alla qualità dell'illuminazione e resa cromatica dell'ambiente, giudicate complessivamente soddisfacenti.

In una domanda aperta, ai partecipanti è stato chiesto di descrivere l'atmosfera del tempio con una parola o breve frase. Le risposte raccolte indicano che il target percettivo e sensoriale dell'atmosfera prefissato è stato raggiunto: infatti tra i termini più ricorrenti compaiono immersiva, onirico, pacifico, realistica e tranquilla.

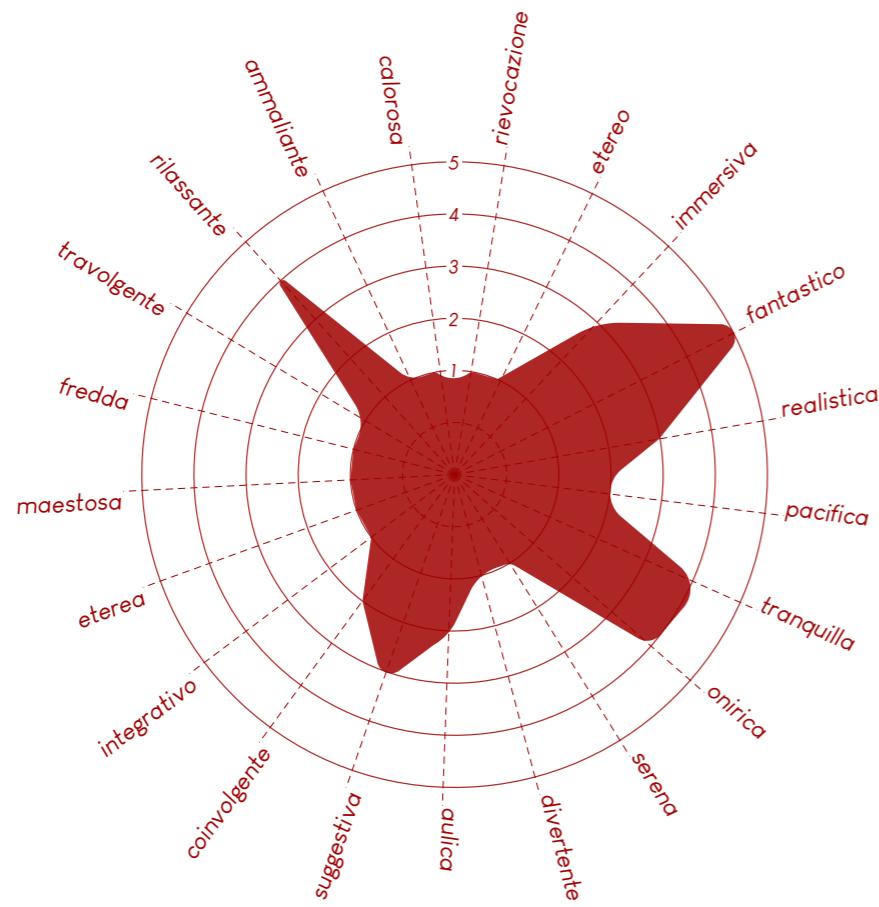
Infine, la quasi totalità del campione (90,4%) ha dichiarato di aver provato stupore o emozione durante l'esperienza, confermando l'efficacia dell'ambiente virtuale nel generare un coinvolgimento emotivo positivo.

I risultati che emergono dall'indagine statistica confermano che la combinazione di scelte estetiche e progettuali ed in particolare la cura della

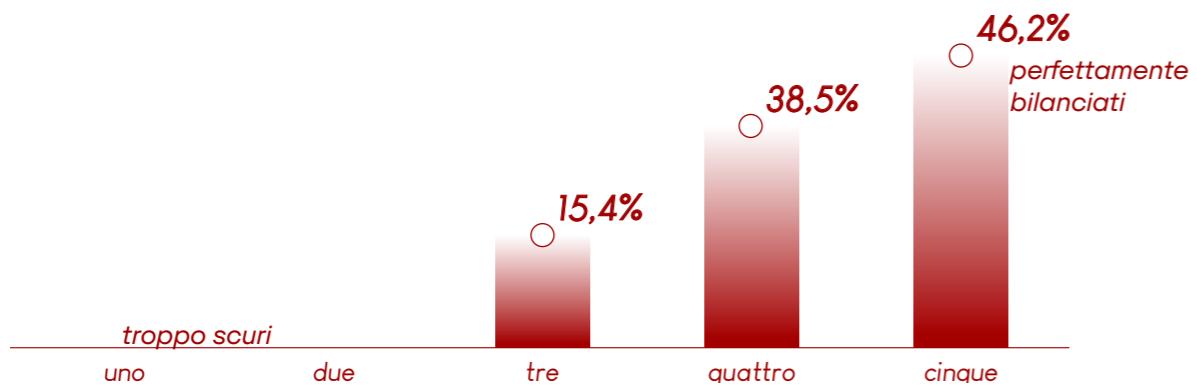
QUANTO TI SENTITO "DENTRO" IL TEMPIO,
IMMERSO NEL MONDO?



COME DESCRIVERESTI L'ATMOSFERA DEL TEMPIO IN UNA BREVE FRASE?



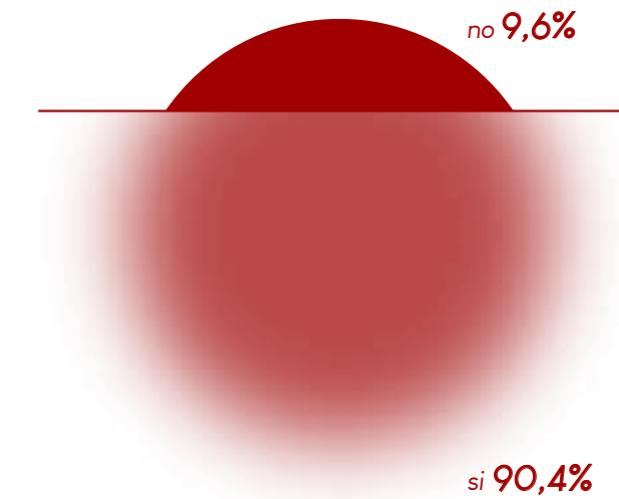
COME VALUTI L'ILLUMINAZIONE E I COLORI
DELL'AMBIENTE?



luce, dei colori e delle spazialità, abbiano chiaramente contribuito in modo significativo al senso di coinvolgimento percepito dagli utenti.

Domande sul miglioramento Il sondaggio si conclude, come da prassi, con una valutazione sintetica in cui l'utente può dare un voto complessivo sull'esperienza VR e una domanda aperta dove scrivere suggerimenti, possibili aggiunte o miglioramenti. Quest'ultima sezione si è rivelata molto utile, poiché ha permesso di raccogliere proposte interessanti su cui si è agito di conseguenza. Da queste risposte è emerso il desiderio di ampliare la possibilità di interazione,

C'É STATO UN MOMENTO IN CUI HAI PROVATO STUPORE O EMOZIONE?



sia aggiungendo ulteriori punti di interazione, sia implementando nuovi tipi di interazione e magari introducendo personaggi storici dell'epoca e figure in abiti originali. Tutti suggerimenti per arricchire la dimensione narrativa e migliorare la percezione di realismo.

La valutazione globale è stata positiva, con il 92,3% di valutazioni superiori ad una votazione di 8 su 10, concludendo in maniera positiva la fase di valutazione.

Conclusioni Dunque la fase di play testing e di sondaggio ha consentito di identificare non solo i punti di forza dell'esperienza, tra cui splendono i commenti sulla parte immersiva ed estetica, ma anche le criticità riguardanti i suoi punti deboli e parti da migliorare per renderla pronta all'esposizione.

Sulla base delle criticità emerse, sono state introdotte delle strategie di ottimizzazione, divise in due tipologie di miglioramento. I primi, di tipo "quality of life", hanno riguardato l'aspetto tecnico e l'usabilità: riduzione e delle aree di interazione, maggiore evidenza dei punti dove compaiono i cartelloni e introduzione della mappa per facilitare l'orientamento.

I secondi invece sono di natura contenutistica, che hanno mirato invece ad arricchire la dimensione narrativa e immersiva dell'esperienza attraverso l'aggiunta di personaggi storici rilevanti e di nuove tipologie di interazione. Nel complesso, le modifiche puntano ad ottenere un'esperienza ancora più accessibile, coerente e coinvolgente, migliorando la qualità della fruizione.

MIGLIORAMENTI TECNICI

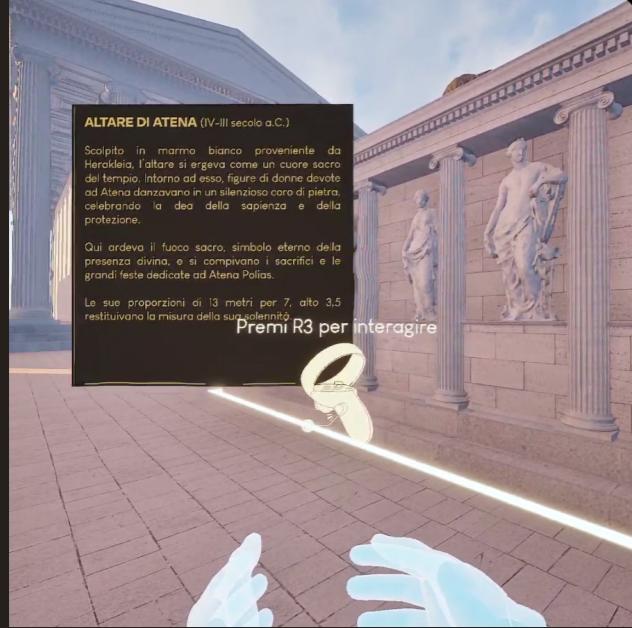


Figura 106 – Instantanea schermo dei punti di interazione nella prima versione di Echoes of Athena



Figura 107 – Instantanea schermo dei punti di interazione nella seconda versione di Echoes of Athena

MIGLIORAMENTI NARRATIVI



Figura 110 – Instantanea schermo dei personaggi nella prima versione di Echoes of Athena

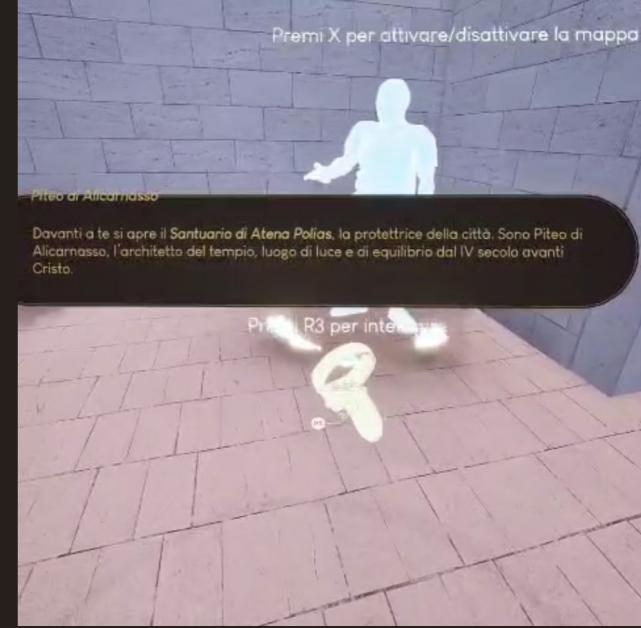


Figura 111 – Instantanea schermo dei personaggi nella seconda versione di Echoes of Athena



Figura 108 – Instantanea schermo dell’interfaccia utente nella prima versione di Echoes of Athena



Figura 109 – Instantanea schermo della interfaccia utente nella seconda versione di Echoes of Athena



Figura 112 – Instantanea schermo della statua di Atena nella prima versione di Echoes of Athena



Figura 113 – Instantanea schermo della statua di Atena nella seconda versione di Echoes of Athena

CONCLUSIONI

Il percorso di ricerca svolto durante la stesura di questa testi ha rappresentato un'opportunità per approfondire il processo di modellazione da impiegare nell'ambito archeologico. Per prima cosa è stato interessante confermare l'accuratezza dei risultati delle geometrie create mediante la loro comparazione con la nuvola di punti. Inoltre, l'iter lavorativo che da modellazione BIM ha portato allo sviluppo di un'esperienza di Realtà Virtuale, ha trasformato Echoes of Athena in un caso studio replicabile e funzionale. Affermazioni comprovate dal processo di test e valutazione sottoposto ad un elevato numero di utenti che hanno collaudato l'esperienza e che ha dimostrato l'efficacia del VR per la comunicazione e divulgazione del caso studio, ottenendo risultati chiari e coerenti.

Il caso di studio ha rappresentato una grande opportunità di ricerca, grazie anche alla buona documentazione del sito archeologico e questo nonostante le difficoltà legate alle lacune tecniche dell'archeologia e delle ricostruzioni virtuali. Lo studio, attraverso il test comparativo, ha anche confermato un riscontro tecnico nella correttezza delle fonti storiche rispetto al sito archeologico.

Un'aspetto molto interessante della combinazione tra la modellazione 3D e la realtà virtuale è stato quello di offrire un'esperienza immersiva, capace di coinvolgere un ampio pubblico, non solo di ricercatori. Un pubblico vasto che quindi risulta particolarmente rilevante in ambito di valorizzazione del patrimonio storico archeologico.

E' importante sottolineare infine che le possibilità offerte dal caso studio realizzato, non sono solo limitate all'area geografica circoscritta, ma possono essere facilmente esportate e ampliate a contesti diversi, siano essi altri siti archeologici o singoli edifici.

In definitiva questa ricerca, attraverso l'utilizzo della modellazione solida e della rappresentazione virtuale di un sito, apre prospettive interessanti e dalle grandi potenzialità per la comunicazione archeologica.

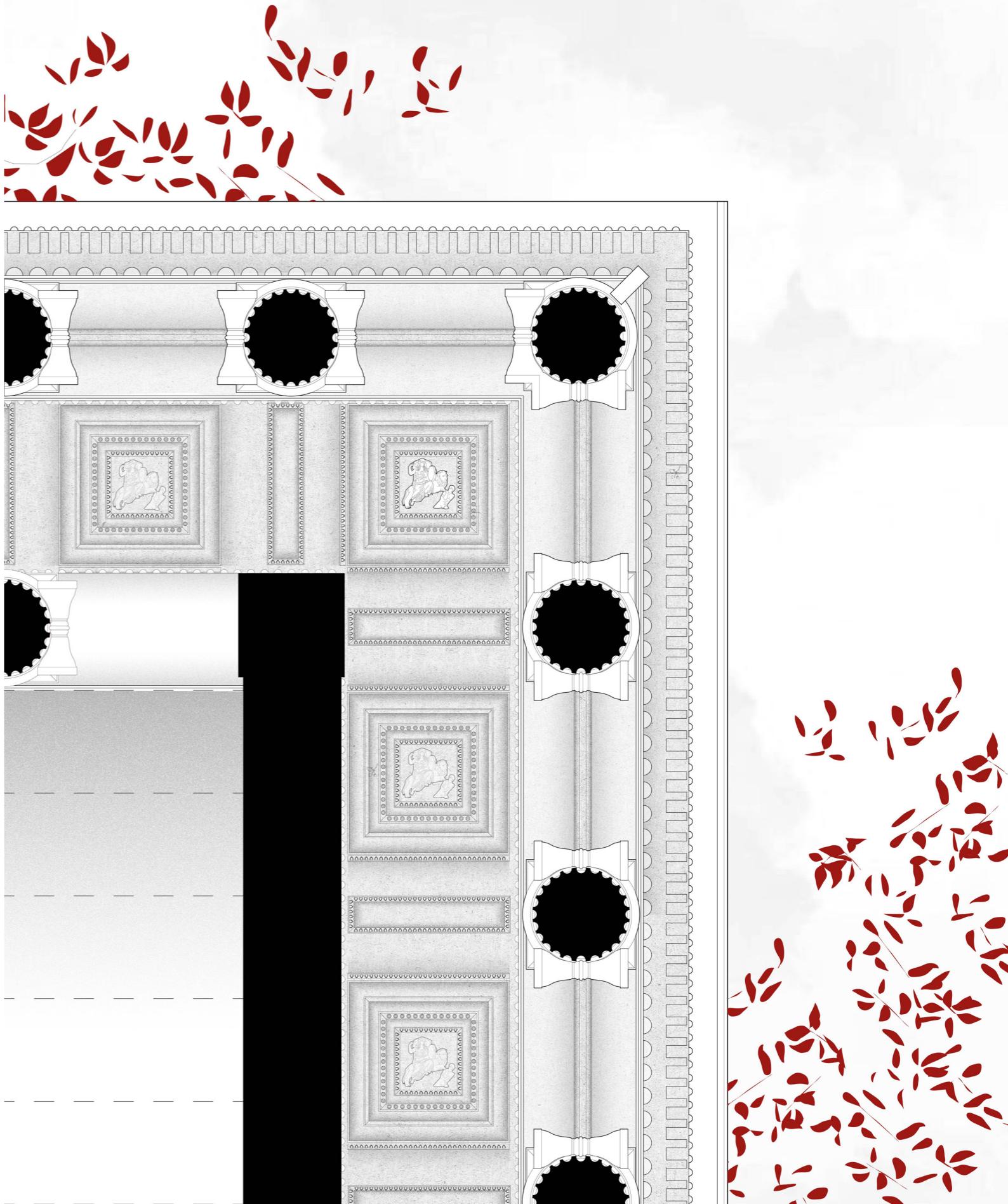
TAVOLE

PIANTA DEL SOFFITTO DEL TEMPIO DI ATENA POLIAS A PRIENE

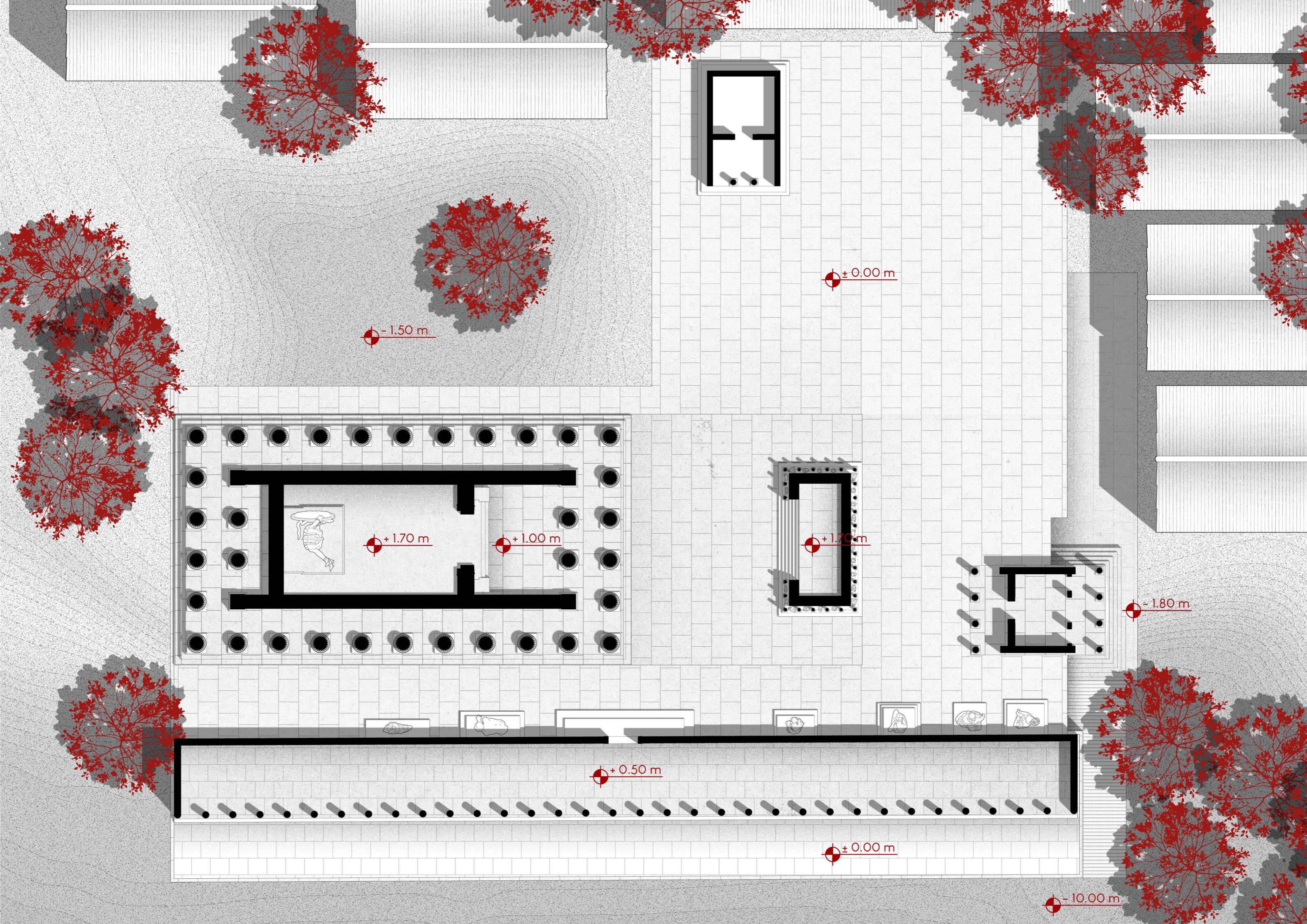
La rappresentazione consente di cogliere la complessa articolazione del fregio, rendendo ben percepibili le metope, che si presentano come campiture rettangolari regolari. Questi pannelli non avevano soltanto una funzione decorativa, ma svolgevano anche un ruolo narrativo e simbolico: spesso raffiguravano imprese di dei o di eroi legati alla comunità locale, permettendo così al tempio di esprimere visivamente l'identità religiosa e culturale della polis.

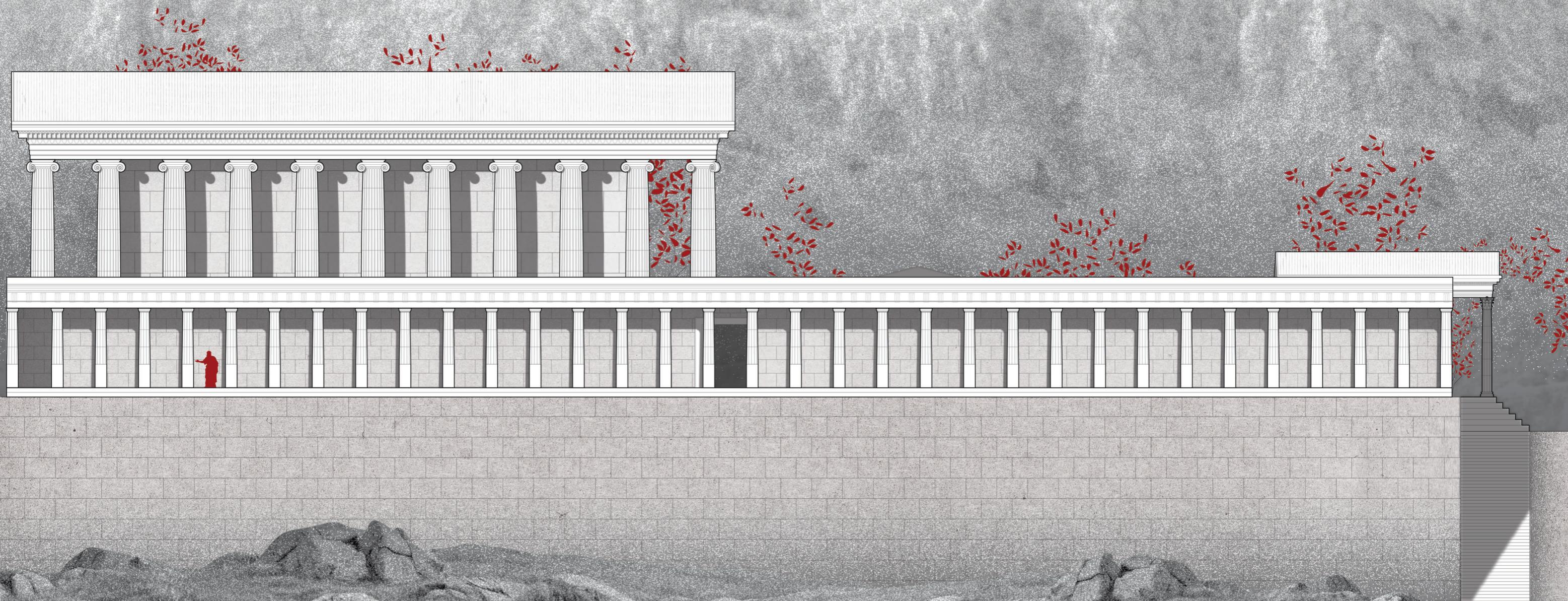
Nonostante la frammentarietà delle testimonianze, il contenuto figurativo permette di riconoscere un programma iconografico di notevole rilievo, pienamente coerente con l'ambito cultuale della dea Atena, protettrice del santuario. In uno dei pannelli, le fonti iconografiche sembrano raffigurare la dea Cibele¹, molto diffusa nelle regioni dell'Asia Minore, tradizionalmente rappresentata accompagnata da un leone o seduta su di esso, simbolo del suo dominio sulle forze della natura.

1 - Divinità identificata come Grande Madre, oggetto di culto sia in Asia che in Grecia, personifica la natura e la fecondità.







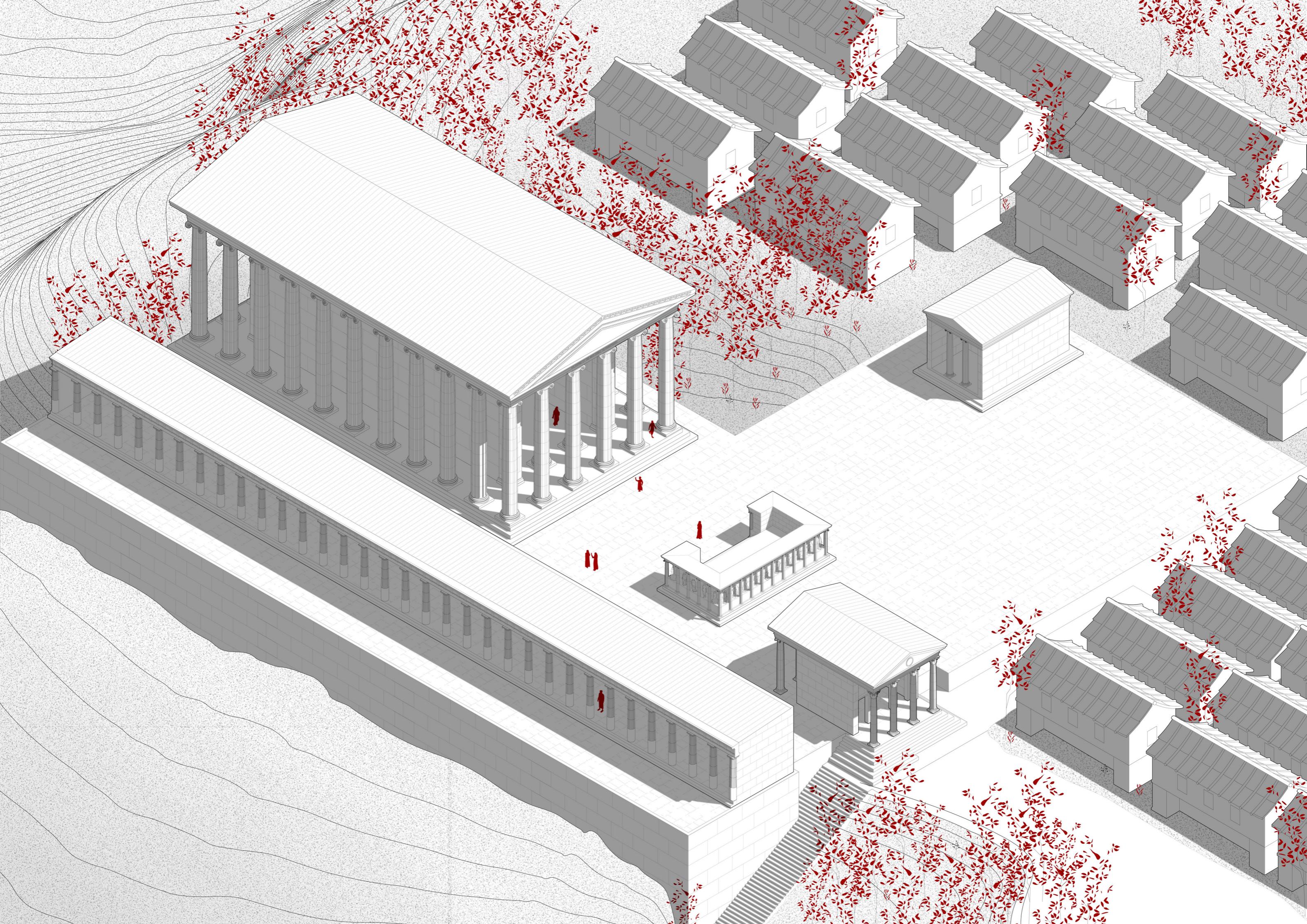


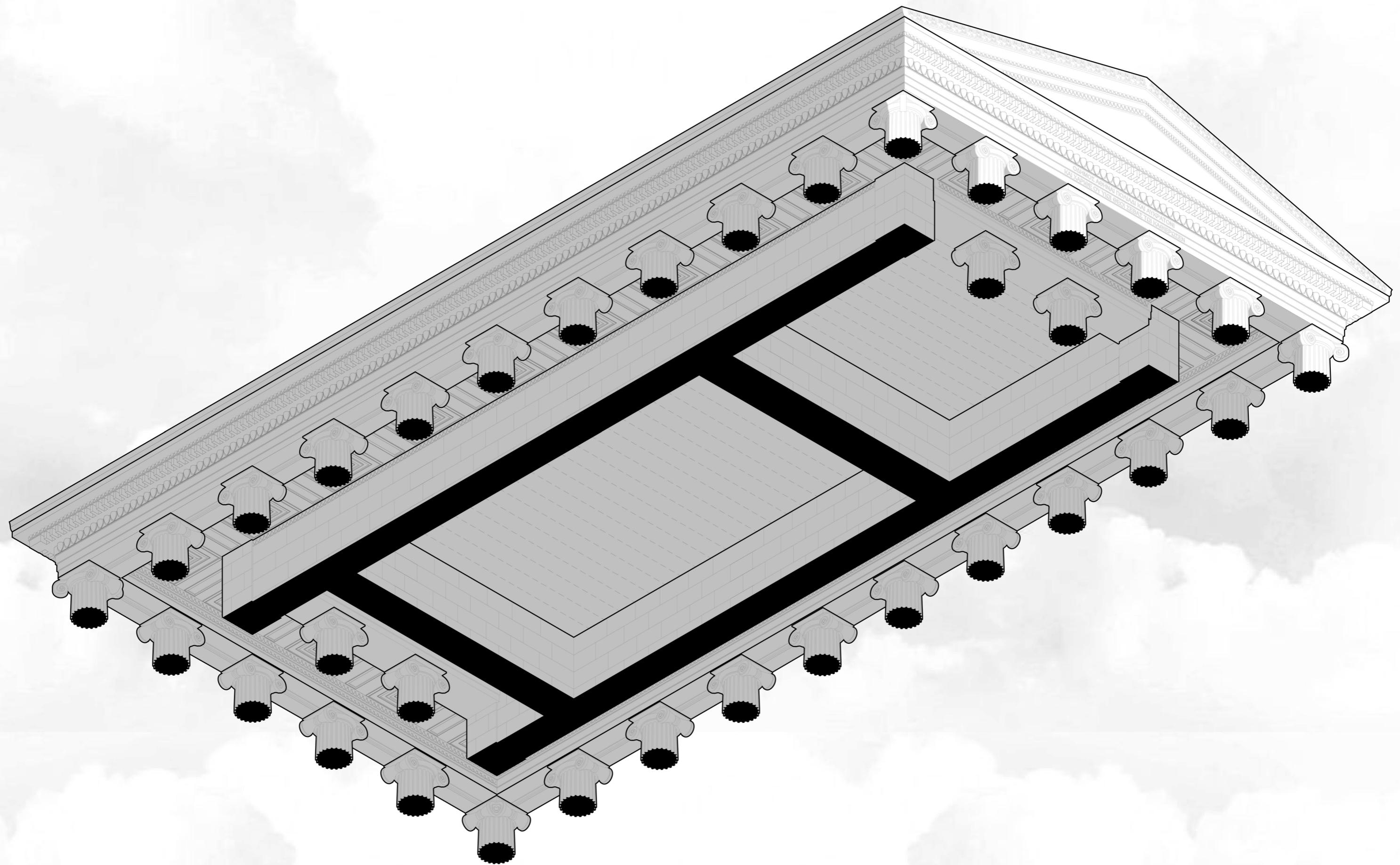


FASI COSTRUTTIVE DEL SANTUARIO DI ATENA POLIAS A PRIENE

- Fase iniziale (IV sec. a.C.)** La costruzione del tempio ebbe probabilmente inizio subito dopo la rifondazione della città (intorno al 350 a.C.). In questa prima fase vennero realizzati il naos e parte della peristasi, che risulta iniziata ma non completamente edificata. A questo periodo risale anche la celebre dedica di Alessandro Magno (324/3 a.C.), incisa sull'anta del pronao: ciò indica che il corpo principale del tempio era già in piedi, e con ogni probabilità anche l'altare doveva essere stato completato.
- Fase di lenta progressione (III–inizio II sec. a.C.)** Successivamente si registrò una fase di rallentamento dei lavori, dovuta probabilmente a carenze finanziarie e a instabilità politica. L'avanzamento del cantiere procedette a tratti, grazie a contributi occasionali. Un decreto del 296/5 a.C. ricorda, ad esempio, il sostegno del sacerdote di Artemide, Megabyzos, lodato per il suo intervento a favore della syntéleesis, cioè del completamento dell'opera.
- Fase ellenistica tardiva (fine II sec. a.C.)** Alla fine del II secolo a.C. si verificò un vero e proprio boom edilizio, che coinvolse anche il santuario. In questa fase venne costruita la stoa meridionale, un grande portico colonnato che definiva il limite meridionale del complesso. A quest'opera venne attribuita una priorità tale da superare perfino il completamento della peristasi del tempio, ancora incompiuta. Priene conobbe il boom edilizio intorno al II sec a.C che coinvolse anche il santuario di Atena Polias, dove si allestì la stoa a sud, ma secondo un calcolo moderno i materiali usati per l'impiego del lavoro dell'intero colonnato nella stoa potesse corrispondere a tre intercolunni del tempio. La realizzazione impiegò all'incirca trecento cinquanta anni, con diverse fasi.
- Fase romana (età augustea, I sec. a.C.–I sec. d.C.)** Il completamento definitivo del tempio avvenne con ogni probabilità in età romana, quando furono ultimati il colonnato perimetrale e gli elementi decorativi. Una nuova dedica posta sull'architrave orientale, nella quale Augusto compare associato ad Atena, testimonia infatti un intervento imperiale che contribuì in modo determinante alla conclusione del complesso.







ACCESSO AL SANTUARIO: IL PROPILEO

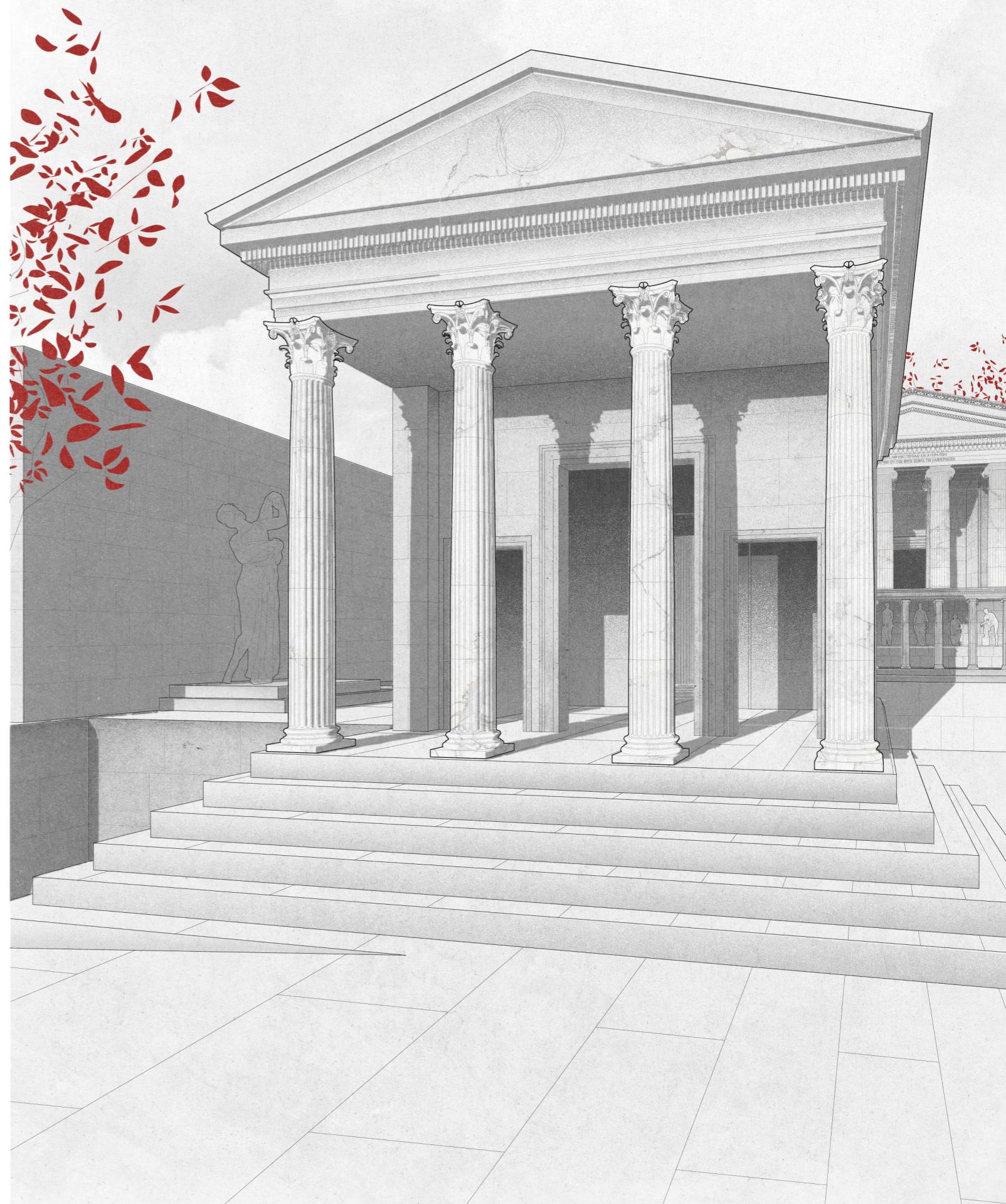
Il propileo era disposto ad est rispetto al santuario, il quale permetteva l'accesso dalla "Via di Atena" e la scalinata che saliva dall'agorà. Per arrivare all'accesso della santuario è necessario superare un grosso dislivello, attraverso una scalinata. E' necessario dunque presupporre che sia stato realizzato insieme al prolungamento orientale del muro di terrazza e della stoà, allo scopo di ampliare verso oriente.

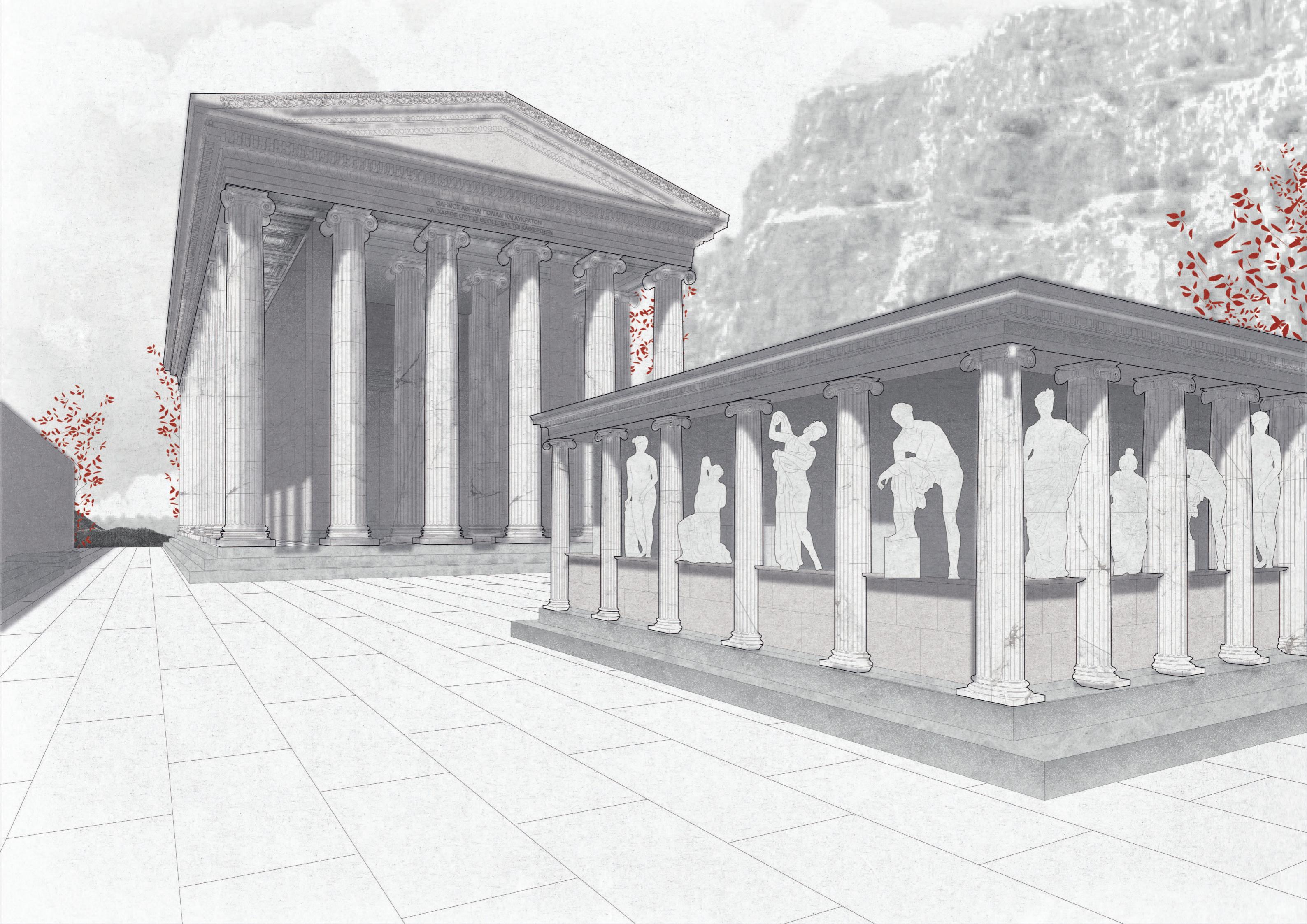
La realizzazione del propileo può essere suddivisa in diverse fasi:

Fase 0 – Probabilmente consisteva in una semplice parete-portale o in una scalinata anteriore che collegava la "Via di Atena" con il santuario. Questa prima sistemazione, databile all'inizio del I secolo a.C., sarebbe stata realizzata contemporaneamente all'ampliamento della parte orientale della terrazza.

Fase I – Rappresenta la prima costruzione monumentale del propileo, intorno al terzo quarto del I secolo a.C. In questa fase vennero realizzati la struttura a gradoni e lo stylobate che corre lungo tutto il perimetro dell'edificio. A questa fase appartiene anche l'installazione dei capitelli corinzi, che permettono una datazione precisa dell'intero complesso. Secondo Hennemeyer, la fase I costituisce la fase architettonicamente più chiara, coerente e stilisticamente definita, nella quale il propileo assume il suo aspetto monumentale classico.

Fase II – Successiva al I secolo a.C., è caratterizzata da un ampliamento dell'edificio verso ovest, all'interno del santuario. In questa fase furono realizzate nuove fondazioni, e vennero reimpiegati capitelli ionici privi di elementi ornamentali utili ai fini della datazione. Questa fase non introduce un nuovo apparato decorativo coerente, ma estende e modifica la costruzione precedente.





ΟΔΗΓΟΣ ΑΓΗΝΑΙ ΠΟΛΙΔΙ ΚΑΙ ΑΥΓΡΑΤΟΝΙ
ΚΑΙ ΧΑΡΙΣΙ ΟΥ ΥΙΟΙ ΘΕΟΙ ΣΒΑΣ ΤΟΙ ΚΑΒΙΕΡΟΣΣΕΝ



ΟΔΗΜΟΣ ΑΕΘΝΑΙ ΠΟΛΙΔΙ ΚΑΙ ΑΥΚΡΑΤΟΝΙ
ΚΑΙ ΧΑΡΙΣΕ ΟΥ ΥΙΟΙ ΘΕΟΙ ΣΕΒΑΣ ΤΟΙ ΚΑΘΙΕΡΩΣΕΝ

ALESSANDRO MAGNO A PRIENE

La dedica del tempio di Atena a Priene sembra essere stata rivolta agli abitanti della città. Secondo il geografo Strabone, Alessandro Magno aveva inizialmente richiesto agli Efesini di poter apporre una dedica nel grande tempio di Artemide, offrendo in cambio di coprire tutte le spese, passate e future, del santuario.

La città di Efeso, però, rifiutò la proposta: accettare avrebbe significato, da un lato, riconoscere come onore ciò che in realtà era una conseguenza della recente spoliazione subita dal santuario; dall'altro, sarebbe apparso inappropriato che un sovrano considerato divino destinasse offerte a una divinità diversa da sé.

La richiesta avanzata da Alessandro sia a Efeso sia a Priene si colloca all'interno della sua precisa linea politica: presentarsi come un sovrano devoto, liberatore dal dominio persiano e pienamente inserito nella tradizione religiosa greca. L'elemento religioso, infatti, costituiva uno degli strumenti principali attraverso cui legittimava la propria autorità nelle città dell'Asia Minore.

La dedica ad Atena Polias a Priene assume, in questo contesto, un significato ancora più profondo. Il tempio era probabilmente appena ultimato – o comunque in fase avanzata di completamento – e rappresentava un prestigioso intervento architettonico interamente voluto e finanziato dagli abitanti di Priene.

Non potendo legare il proprio nome né al santuario di Artemide a Efeso, né alla costruzione del tempio di Atena (iniziato ben prima del suo arrivo), Alessandro scelse comunque di “firmare” l'edificio con una dedica ufficiale. In questo modo rafforzava la propria immagine di re protettore delle città greche dell'Asia, consolidando allo stesso tempo il consenso politico in una regione strategicamente importante per la sua campagna contro i Persiani.

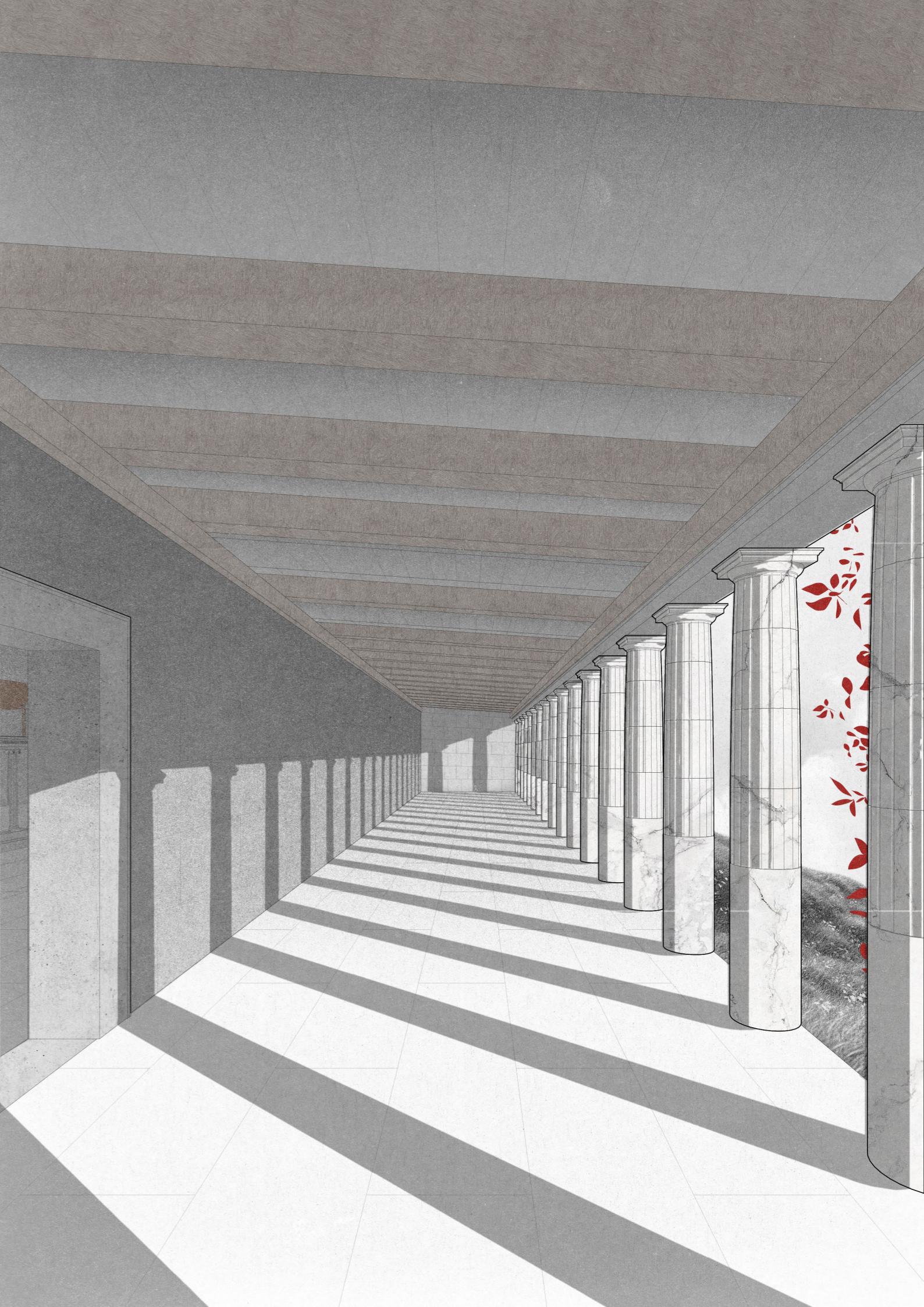


LA TERRAZZA

La terrazza presenta due fasi costruttive principali: durante la prima fase si estendeva per una lunghezza di 23 colonne, risultando lunga 55,75 metri in totale.

Solo durante una seconda fase durante una riorganizzazione dell'area anteriore del santuario, fu estesa verso est di altre 9 colonne, per un totale di 32 colonne.

Dalla terrazza si aveva una visione complessiva della città di Priene, da cui quindi era possibile osservare i punti principali di essa. Tra questi ad esempio l'agorà con il mercato, il tempio di Zeus Olimpico e il bouleuterio, assieme alle parti residenziali.



BIBLIOGRAFIA

- Theodor Wiegand e Hans Schrader. Priene: Ergebnisse der Ausgrabungen und Untersuchungen in den Jahren. Berlin: G. Reimer, 1904.
- Legge n. 2863 del 21 luglio 1983 (Kültür ve Tabiat Varlıklarının Koruma Kanunu), articolo 1.
- Ekrem Akurgal. Civilisations et Sites Antiques de Turquie. Trad. Elsie Shallot e Bruno Simon. Istanbul: Haset Kitabevi, 1986.
- Nancy Demand. "The Relocation of Priene Reconsidered." Victoria: Classical Association of Canada, 1986.
- Paul Reilly. British Archaeological Reports. Winchester, 1990, 133
- Mallgrave, Harry F., ed. Ordonnance for the Five Kinds of Columns after the Method of the Ancients. Edited by Julia Bloomfield, Kurt W. Forster, e Thomas F. Reese. Santa Monica, CA: The Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1993.
- Marco Vitruvio Pollione. *De Architectura*. A cura di Pierre Gros, traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano. Torino: Einaudi, 1997.
- R. J. Stone. "UNESCO's World Heritage Magazine." World Heritage Centre, Parigi, 1999, 18–20.
- UNESCO. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. Copia archiviata, su whc.unesco.org. Parigi: UNESCO World Heritage Centre, 2005.
- Emanuele Romeo. Problemi di conservazione e restauro in Turchia. Torino: Celid, 2008.
- Strabone. *Geografia*. Trad. Nicola Biffi. Bari: Edipuglia, 2009
- Hennemeyer, Arnd. Das Athenaheiligtum von Priene. Die Nebenbauten – Altar, Halle und Propylon – und die bauliche Entwicklung des Heiligtums. Wiesbaden: Reichert Verlag, 2013.
- Paul F. Aubin. Renaissance Revit: Creating Classical Architecture with Modern Software. North Charleston, SC: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.
- Koenigs, Wolf. Der Athenatempel von Priene. Archäologische Forschungen Bd. 33 (Priene Bd. 3). Wiesbaden: Reichert Verlag, 2015.
- Simone Garagnani, Andrea Gaucci, e Elisabetta Govi. "ArchaeoBIM: dallo scavo al Building Information Modeling di una struttura sepolta. Il caso del tempio tuscanico di Uni a Marzabotto." Archeologia e Calcolatori 27 (2016): 251–270.
- Pausania. Guida della Grecia (Periegesi della Grecia). A cura di Umberto Bultrighini e Mario Torelli. Milano: Mondadori, 2017.
- Fabio Bianconi, Marco Filipucci, e Federica Magi Meconi. "Parametrical Vitruvius. Generative Modeling of the Architectural Orders." SCIRES-IT – SCientific RESearch and Information Technology 8, no. 2 (2018): 29–48.
- Giuseppe Squillace. "Dedica del tempio di Atena Polias a Priene da parte di Alessandro Magno." Xon 2, no. 2 (2018).
- Massimiliano Papini. "Pendono interrotte le opere": Antichi monumenti incompiuti nel mondo greco." Studi e Ricerche, Studi umanistici – Antichistica. Roma: Sapienza Università Editrice, settembre 2019.
- Maria Shehade e Theopisti Stylianou-Lambert. "Virtual Reality in Museums: Exploring the Experiences of Museum Professionals." 2020.
- G. Verdiani. Digital Heritage and Reconstruction: Methods, Experiences and Research Pathways. Firenze: Firenze University Press, 2020.
- National Geographic. "Città greche d'Oriente: Priene e Afrodisia in 3D." Speciale Storica Archeologia, ottobre 2021.
- Tugba Saricaoglu e Gamze Saygi. "Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM." Virtual Archaeology Review, 2022.
- Gehan Selim, Monther Jamhawi, Mohamed Gamal Abdelmonem, Shouib Ma'bdeh e Andrew Holland. "The Virtual Living Museum: Integrating the Multi-Layered Histories and Cultural Practices of Gadara's Archaeology in Umm Qais, Jordan." Basel 14, 2022.
- Roberta Spallone. "Modellazione tridimensionale e presentazione del patrimonio culturale: esperienze di realtà aumentata (AR) e realtà virtuale (VR) / 3D Modeling and Presentation of Cultural Heritage: Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) Experiences." Nuove frontiere nel Disegno I New Frontiers in Drawing, 2023.
- Fabrizio Banfi. Virtual heritage. Dalla modellazione 3D all'HBIM e realtà estesa. Rimini: Maggioli Editore, 2023.
- Caterina Previato. "BIM e archeologia: i casi studio degli anfiteatri romani di Verona e Pola." Archeologia e Calcolatori 35, no. 1 (2024): 427–445.

SITOGRAFIA

- Android Developers Google Blog, ARCore: Augmented reality at Android scale, <https://android-developers.googleblog.com/2017/08/arcore-augmented-reality-at-android.html?> (consultato 16/10/25) ↗
- Bibliapt, Trogilio, <https://bibliapt.org/e/voz/o/T/Trogilio.htm> ↗ (consultato il 17/08/2025)
- BIMidea, ScanToBim: Perchè scegliere un processo Innovativo, <https://www.bimidea.it/scantobim-ecco-perche-scegliere-un-processo-innovativo/> ↗ (consultato il 03/06/2025)
- Enciclopedia Treccani, Fotogrammetria, <https://www.treccani.it/enciclopedia/fotogrammetria/> ↗ (consultato il 03/06/2025)
- Enciclopedia Treccani, Priene, [https://www.treccani.it/enciclopedia/priene_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/priene_(Enciclopedia-Italiana)/) ↗ (consultato il 03/06/2025)
- Faro, Compresione dei Laser Scanner <https://www.faro.com/it-IT/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners> ↗ (consultato il 03/06/2025)
- Fotografia Artistica, Stereoscopia e macchina fotografica stereoscopica, <https://fotografiaartistica.it/stereoscopia-e-macchina-fotografica-stereoscopica/> ↗ (consultato il 15/06/2025)
- Ingegneria Loreti, Stazione Totale, <https://www.ingegnerialoreti.it/stazione-totale-cosa-serve-come-funziona-strumento-topografico> ↗ (consultato il 03/06/2025)
- InnovareWeb, Realtà aumentata – storia e applicazioni, https://www.rivistainnovare.com/innovazioni-tecnologie/realta-aumentata-storia-applicazioni/?utm_ ↗ (consultato il 16/06/2025)
- Kickstarter, Oculus Rift Step into the game, <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game> ↗ (consultato 16/10/2025)
- MarTech, Apple's ARKit launches a new channel: The hidden layers of reality, <https://martech.org/apples-arkit-launches-new-channel-hidden-layers-reality/> ↗ (consultato 16/10/2025)
- MinnaLearn, Introduzione alla realtà estesa: AR, VR e MR, <https://courses.minnalearn.com/it/courses/emerging-technologies/extended-reality-vr-ar-mr/introduction-to-extended-reality-ar-vr-and-mr/> ↗ (consultato il 14/06/2025)
- Paul F. AUBIN, Parametric Classical Orders—A Journey with Revit Family Editor, www.paulaubin.com ↗ (consultato 16/06/25)
- Treccani, Enciclopedia dell'Arte Antica, voce "Priene", https://www.treccani.it/enciclopedia/priene_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Antica%29/ (consultato 05/08/25)
- VR Italia, Il Sensorama: La nascita della Realtà Virtuale, <https://www.vr-italia.org/il-sensorama-realta-virtuale/> ↗ (consultato il 12/06/2025)
- Wikipedia, Archeologia Virtuale, https://it.wikipedia.org/wiki/Archeologia_virtuale ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Wikipedia, Caria, <https://it.wikipedia.org/wiki/Caria> ↗ (consultato il 13/08/2025)
- Wikipedia, Oculus Rift, https://it.wikipedia.org/wiki/Oculus_Rift ↗ (consultato il 17/10/2025)
- Wikipedia, Quest 2, https://en.wikipedia.org/wiki/Quest_2 ↗ (consultato 16/10/2025)
- Wikipedia, Sacrifici religiosi nell'Antica Grecia, https://it.wikipedia.org/wiki/Sacrifici_religiosi_nell%27Antica_Grecia ↗ (consultato 10/10/25)
- BOCCARDI, Luisa, Storia: Base, pubblicato il 31/01/2011, <https://www.teknoring.com/wikitecnica/storia/base/> ↗ (consultato il 12/08/25).
- Wikipedia, Fusto (architettura), https://it.wikipedia.org/wiki/Fusto_%28architettura%29 ↗ (consultato il 10/10/25)
- Smarthistory, Greek Architectural Orders, <https://smarthistory.org/greek-architectural-orders/> ↗ (consultato il 15/10/25)
- Vitruvio, De architectura, <http://www.mlahanas.de/Greeks/Texts/Vitruvius/TenBooksOfArchitecture.html> ↗ (consultato il 10/08/25)
- Vignola, Giacomo Barozzi da. Le regole de' cinque ordini di architettura civile. Roma: Tipografia della R. Camera Apostolica, 1861. Consultabile su HathiTrust Digital Library: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=gri.ark:/13960/t58d75w62&seq=12> ↗ (consultato il 29/11/2025).
- C. Blümel, "Wiegand, Teodoro," in Enciclopedia dell'Arte Antica (Rome: Istituto della Enciclopedia Italiana, 1966). [https://www.treccani.it/enciclopedia/teodoro-wiegand_\(Enciclopedia-dell'-Arte-Antica\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/teodoro-wiegand_(Enciclopedia-dell'-Arte-Antica)/) ↗ (consultato il 05/09/25)

ICONOGRAFIA

- Figura 1 Immagine da sito web, National Geographic, Delfi, il santuario sepolto del Dio Apollo, https://www.storicang.it/a/delfi-il-santuario-sepolto-dio-apollo_14641 ↗ (consultato il 13/08/2025)
- Figura 2 Immagine da sito web, Our Place World Heritage Collection, <https://www.ourplaceworldheritage.com/our-project/> ↗ (consultato il 20/08/2025)
- Figura 3 Immagine da sito web, Unesco World Heritage, <https://whc.unesco.org/en/list/485/gallery/> ↗ (consultato il 20/08/2025)
- Figura 4 Immagine da sito web, Wikimedia Commons, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9825513> ↗ (consultato il 22/08/2025)
- Figura 5 Elaborazione propria, Mappa che mostra l'evoluzione dell'insabbiamento della Baia di Mileto a causa degli alluvioni apportati dal fiume Meandro durante l'Antichità
- Figura 6 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo (18/09/2025).
- Figura 7 Immagine da sito web, Paolo Monti, https://preserver.beic.it/delivery/DeliveryManagerServlet?dps_pid=IE8935863 ↗ (consultato il 28/08/2025)
- Figura 8 Elaborazione propria, Pianta generale di Priene con evidenziati i principali punti di interesse
- Figura 9 Adam Zippelius, Disegno a matita di Priene
- Figura 10 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo dell'Agorà di Priene (18/09/2025)
- Figura 11 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del buleuterio (18/09/2025)
- Figura 12 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del Teatro ellenistico di Priene (18/09/2025)
- Figura 13 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo delle colonne ricostruite del Tempio di Atena a Priene (18/09/2025)
- Figura 14 Elaborazione propria, Iscrizione dedicatoria di Alessandro Magno del Tempio di Atena a Priene, esposta al British Museum di Londra (16/08/2025)
- Figura 15 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del Tempio di Atena a Priene (18/09/2025)
- Figura 16 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo delle rovine dell'Altare a Priene (18/09/2025)
- Figura 17 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del Propileo (18/09/2025)
- Figura 18 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del Terrazza (18/09/2025)
- Figura 19 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo della Tesoriera (18/09/2025)
- Figura 20 Immagine da sito web, UnescoLab Mantova, Cathedral of San Pietro in Mantua, <https://www.unescolab.mantova.polimi.it/cathedral-of-san-pietro-in-mantua-hbim-for-programmed-conservation/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 21 Theodor Wiegand e Hans Schrader, rilievo di capitello ionico del Tempio di Atena a Priene
- Figura 22 Immagine da sito Web, Parametric Architecture, How can metaverse help re-imagine the future of heritage preservation?, <https://parametric-architecture.com/how-can-metaverse-help-re-imagine-the-future-of-heritage-preservation/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 23 Immagine da sito web, UnescoLab Mantova, Scan-to-BIM: the survey of the Basilica of San Michele Maggiore in Pavia, <https://www.unescolab.mantova.polimi.it/scan-to-bim-the-survey-of-the-basilica-of-san-michele-maggiore-in-pavia/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 24 Immagine da sito web, Pinsel.ar https://www.instagram.com/pinsel.ar/p/CLTs_fTlIBc/?img_index=4 ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 25 Immagine da sito web, Behance.net <https://www.behance.net/gallery/64606147/Ruins-from-Ancient-world-reconstructed> ↗
- Figura 26 Immagine da sito web, Polipapers, Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM, <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/17370/15221> ↗ (consultato il 08/07/2025)
- Figura 27 Immagine da sito web, Polipapers, Data-driven conservation actions of heritage places curated with HBIM, <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/17370/15221> ↗ (consultato il 08/07/2025)
- Figura 28 Immagine da sito web, UnescoLab Mantova, Cathedral of San Pietro in Mantua, <https://www.unescolab.mantova.polimi.it/cathedral-of-san-pietro-in-mantua-hbim-for-programmed-conservation/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 29 Il modello Bim complessivo del tempio Uni, comprensivo del sistema di copertura nelle sue diverse componenti lignee, da CRIS UNIBO <https://www.archcalc.cnr.it/journal/articles/851> ↗ (consultato il 02/09/2025)
- Figura 30 Preliminare ricostruzione virtuale dell'area templare a N di Kainua: a destra il tempio di Uni, da CRIS UNIBO <https://www.archcalc.cnr.it/journal/articles/851> ↗ (consultato il 02/09/2025)
- Figura 31 Ricostruzione dell'anditeatro romano di Verona, Modello BIM, probabile stato originario, da su Research@UNIPD. <https://www.archcalc>.

- cnr.it/indice/PDF35.1/26_Doria_Previato.pdf ↗ (consultato il 05/09/2025)
- Figura 32 Ricostruzione dell'anfiteatro Pola, Modello BIM, probabile stato originario, da su Research@UNIPD. https://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF35.1/26_Doria_Previato.pdf ↗ (consultato il 05/09/2025)
 - Figura 33 Immagine da sito web, Camera Wiki, Revere Stereo 33, https://camera-wiki.org/wiki/Revere_Stereo_33 ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 34 Elaborazione propria, Schema rappresentativo del Reality-Virtuality Continuum
 - Figura 35 Immagine da sito web, MET museum, Stereographic Views of The International Exhibition of 1862, <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/286659> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 36 Immagine da sito web, Telepresence <http://www.telepresence.org/sensorama/index.html> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 37 Immagine da sito web, Research Gate, A Study on Interactive Media Art to Apply Emotion Recognition, https://www.researchgate.net/publication/274621011_A_Study_on_Interactive_Media_Art_to_Apply_Emotion_Recognition ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 38 Immagine da sito web, Immersive Archive, Ivan Sutherland's Head-Mounted Display, <https://immersivearchive.org/ivan-hmd.html> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 39 Immagine da sito web, Immersive Archive, Ivan Sutherland's Head-Mounted Display, <https://immersivearchive.org/ivan-hmd.html> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 40 Immagine da sito web, TinMith, ARQuake: Interactive Outdoor Augmented Reality Collaboration System, <https://www.tinmith.net/arquake/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 41 Immagine da sito web, Wikipedia, Oculus Rift, https://it.wikipedia.org/wiki/Oculus_Rift ↗ (consultato il 16/10/2025)
 - Figura 42 Immagine da sito web, Meta, Introducing Oculus Quest 2, the Next Generation of All-in-One VR <https://about.fb.com/news/2020/09/introducing-oculus-quest-2-the-next-generation-of-all-in-one-vr/> ↗ (consultato il 16/10/2025)
 - Figura 43 www.dezeen.com/2020/04/20/venn-room-space-popular-virtual-reality-communication/ ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 44 Immagine da sito web, Wessex Archeology, Virtual Reality experience an excavation below Bath Abbey <https://www.wessexarch.co.uk/our-work/virtual-reality-experience-excavation-below-bath-abbey#main-content> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 45 Immagine da sito web, Four the Design, Augmented Reality Apps – Heraklion Archaeological Museum, <https://fourthedesign.gr/en/portfolio/augmented-reality-apps-heraklion-archaeological-museum/> ↗ (consultato il 01/09/2025)

- [portfolio/augmented-reality-apps-heraklion-archaeological-museum/](https://fourthedesign.gr/en/portfolio/augmented-reality-apps-heraklion-archaeological-museum/) ↗ (consultato il 01/09/2025)
- Figura 46 Immagine da sito web, Wessex Archeology, Virtual Reality experience an excavation below Bath Abbey <https://www.wessexarch.co.uk/our-work/virtual-reality-experience-excavation-below-bath-abbey#main-content> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 47 Immagine da sito web, Dezeen, Swapping video calls for VR will change our homes forever says Space Popular, <https://www.dezeen.com/2020/04/20/venn-room-space-popular-virtual-reality-communication/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 48 Immagine da sito web, Dezeen, Swapping video calls for VR will change our homes forever says Space Popular, <https://www.dezeen.com/2020/04/20/venn-room-space-popular-virtual-reality-communication/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 49 Immagine da sito web, Four the Design, Augmented Reality Apps – Heraklion Archaeological Museum, <https://fourthedesign.gr/en/portfolio/augmented-reality-apps-heraklion-archaeological-museum/> ↗ (consultato il 01/09/2025)
 - Figura 50 Immagine da sito web, Youtube, Palazzo Madama Torino - Musei nel metaverso, https://www.youtube.com/watch?v=Ov-_koUDwxs ↗ (consultato il 17/10/2025)
 - Figura 51 Theodor Wiegand e Hans Schrader, Altare. Prova architettonica dell'ordine. Veduta prospettica. Tavola 30. Tempio di Atena a Priene
 - Figura 52 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo del Colonne del Tempio di Priene (18/09/2025)
 - Figura 53 Tabella di confronto casi studio, elaborazione propria
 - Figura 54 Vista assonometrica della ricostruzione del Santuario di Atena a Priene, elaborazione propria
 - Figura 55 Schema del Workflow della ricostruzione virtuale, elaborazione propria, elaborazione propria
 - Figura 56 Vista assonometrica della ricostruzione del Santuario di Atena a Priene, focus sui diversi ordini architettonici, elaborazione propria
 - Figura 57 Rappresentazione dell'Inner and Outer dell'occhio della voluta, elaborazione propria
 - Figura 58 Rappresentazione della spirale creata a partire dall'occhio della voluta, elaborazione propria
 - Figura 59 Rappresentazione del capitello ionico realizzato in ambiente BIM, elaborazione propria
 - Figura 60 Definizione dei diversi profili, vincolati ai piani per la realizzazione del fusto, elaborazione propria

- Figura 61 Rappresentazione della creazione del fusto attraverso i diversi livelli del profilo, elaborazione propria
- Figura 62 Rappresentazione della realizzazione del scommoscapo + terminazione superiore ad arco e l'innoscapo + terminazione inferiore ad arco, elaborazione propria
- Figura 63 Rappresentazione della Base Attica, elaborazione propria
- Figura 64 Rappresentazione della Base Efesina, elaborazione propria
- Figura 65 Tabella degli attributi di uno degli oggetti semantici realizzati tramite l'Editor delle Famiglie di Revit, elaborazione propria
- Figura 66 Rappresentazione della colonna ionica con base efesina realizzato in ambiente BIM, elaborazione propria
- Figura 67 Rappresentazione della colonna dorica realizzato in ambiente BIM, elaborazione propria
- Figura 68 Schema di rappresentazione della famiglia di volute presenti nel capitello corinzio, elaborazione propria
- Figura 69 Rappresentazione delle tipologie di foglie presenti nella famiglia del capitello corinzio, elaborazione propria
- Figura 70 Rappresentazione della colonna corinzia con base Attica realizzata in ambiente BIM, elaborazione propria
- Figura 71 Elaborazione propria, Fotografia dell'autrice durante il sopralluogo Foto del propilon di Priene (18/09/2025)
- Figura 72 Vista del tempio, altare e terrazza, dal modello di revit, elaborazione propria
- Figura 73 Vista del capitello ionico, elaborazione propria, (18/09/2025)
- Figura 74 Figura dell'apparato ornamentale del Tempio di Atena, elaborazione propria
- Figura 75 Marmo <https://ambientcg.com/view?id=MarbleSubstance001> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 76 Pavimentazioni <https://ambientcg.com/view?id=PavingStones112> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 77 Coppi <https://ambientcg.com/view?id=RoofingTiles014A> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 78 Mattoni in pietra <https://ambientcg.com/view?id=PavingStones125A> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 79 Muro di contenimento <https://ambientcg.com/view?id=PavingStones128> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 80 Pietra <https://ambientcg.com/view?id=PavingStones111> ↗ (consultato il 01/08/2025)
- Figura 81 Instantanea schermo del modello 3d, elaborazione propria
- Figura 82 Instantanea schermo del modello 3d, elaborazione propria

- Figura 83 – Instantanea schermo del modello 3d dell'altare, elaborazione propria
- Figura 84 Instantanea schermo del modello 3d Tempio, elaborazione propria
- Figura 85 Instantanea schermo del modello 3d del Propileo, elaborazione propria
- Figura 86 Instantanea schermo del modello 3d della Tesoriera, elaborazione propria
- Figura 87 Instantanea schermo del modello 3d della Terrazza, elaborazione propria
- Figura 88 Fusto superiore della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 89 Fusto superiore della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 90 Fusto centrale della colonna livello di accuratezza LOA 30 (2 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 91 Fusto centrale della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 92 Fusto inferiore della colonna livello di accuratezza LOA 30 (2 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 93 Fusto inferiore della colonna livello di accuratezza LOA 20 (5 cm), elaborazione propria dal programma Cloud Compare
- Figura 94 Vista del modello 3D del Tempio di Atena a Priene in Unreal Engine 5, Elaborazione propria
- Figura 95 Immagine del blocco del Tempio di Atena a Priene con l'incisione di Alessandro Magno al British Museum, Elaborazione propria
- Figura 96 Schema degli obiettivi VR, elaborazione propria
- Figura 97 Vista del modello 3D del Tempio di Atena a Priene in Unreal Engine 5, elaborazione propria
- Figura 98 Elaborazione propria, Pipeline Datasmith
- Figura 99 Elaborazione propria, Tabella di confronto casi studio
- Figura 100 Elaborazione propria, Vista del modello 3D del Tempio di Atena a Priene in Unreal Engine 5
- Figura 101 Storyboard, elaborazione propria
- Figura 102 Immagine da sito web, Wikipedia, Akropolis, Leo von Klenze, 1846 https://it.wikipedia.org/wiki/File:Akropolis_by_Leo_von_Klenze.jpg (consultato il 18/10/2025)
- Figura 104 Immagine da sito web, Claude Monet, Impression Sunrise by Claude Monet <https://www.claude-monet.com/impressionsunrise.jsp> (consultato il 18/10/2025)

- Figura 105 Immagine da sito web, Art Institute Chicago, Les Champs Élysées, <https://www.artic.edu/artworks/12586/les-champselysees> (consultato il 18/10/2025)
- Figura 106 Immagine scattata durante il play testing di Echoes of Athena
- Figura 107 Istantanea schermo dei punti di interazione nella prima versione di Echoes of Athena
- Figura 108 Istantanea schermo dei punti di interazione nella seconda versione di Echoes of Athena
- Figura 109 Istantanea schermo dell'interfaccia utente nella prima versione di Echoes of Athena
- Figura 110 Istantanea schermo dell'interfaccia utente nella seconda versione di Echoes of Athena
- Figura 111 Istantanea schermo dei personaggi nella prima versione di Echoes of Athena
- Figura 112 Istantanea schermo dei personaggi nella seconda versione di Echoes of Athena
- Figura 113 Istantanea schermo della statua di Atena nella prima versione di Echoes of Athena
- Figura 114 Istantanea schermo della statua di Atena nella seconda versione di Echoes of Athena