

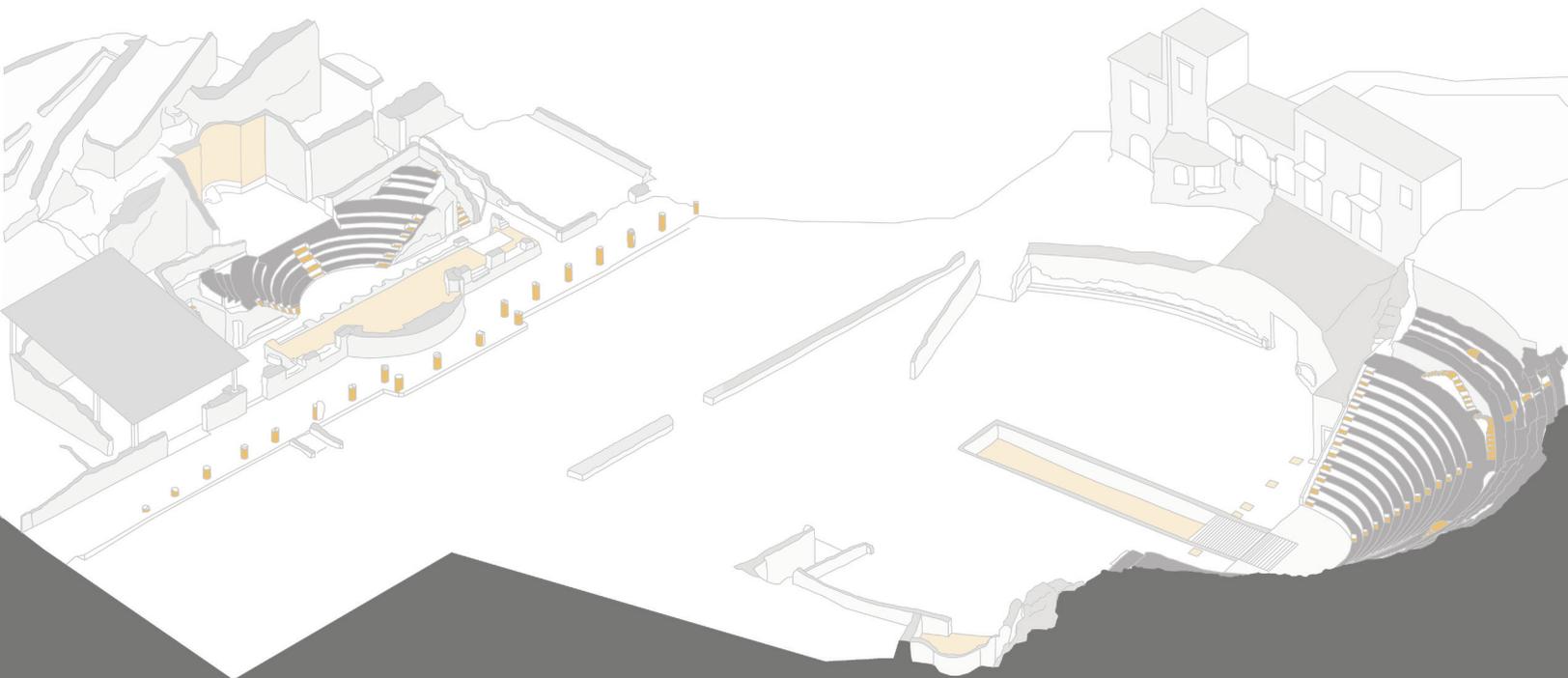
dottoranda  
**ELISA MARIAROSARIA FARELLA**  
tutor  
prof. arch. **MASSIMILIANO CAMPI**  
co-tutor  
prof. ing. **FABIO REMONDINO**

# LO SPAZIO VIRTUALE DEL PASSATO

DOCUMENTAZIONE, MODELLAZIONE E FRUIZIONE DEL PATRIMONIO ARCHEOLOGICO

IL PARCO ARCHEOLOGICO DI PAUSILYPON

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II  
DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA  
XXIX CICLO



L'archeologia, fondata su una cultura materiale da registrare, interpretare e trasmettere, è una disciplina essenzialmente visuale. Il potere comunicativo dell'immagine archeologica, quale veicolo di idee ed espressione di concetti, è da tempo noto. La nascita di nuovi processi di produzione delle immagini rende il tema della visualizzazione archeologica, in particolare, sempre più centrale. L'introduzione delle tecnologie digitali nel campo del patrimonio culturale ha segnato, infatti, l'inizio di un processo di "virtualizzazione" della conoscenza e della conservazione dei beni. Nei sistemi di produzione della conoscenza della "Virtual and Cyber-Era", l'immagine archeologica trova così una sua nuova dimensione, digitale, tridimensionale, poli-funzionale, virtuale ed interattiva.

dottoranda

**ELISA MARIAROSARIA FARELLA**

tutor

**prof. arch. MASSIMILIANO CAMPI**

co-tutor

**prof. ing. FABIO REMONDINO**

# LO SPAZIO VIRTUALE DEL PASSATO

DOCUMENTAZIONE, MODELLAZIONE E FRUIZIONE DEL PATRIMONIO ARCHEOLOGICO

IL PARCO ARCHEOLOGICO DI PAUSILYPON

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA

XXIX CICLO

## Università degli Studi di Napoli Federico II

### Dottorato di Ricerca in Architettura

Settore disciplinare: Tecnologia dell'Architettura e Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente  
Ciclo XXIX

#### Coord. del Dottorato di Ricerca in Architettura

Michelangelo Russo

#### Collegio dei docenti

Roberta Amirante  
Aldo Aveta  
Loreto Colombo  
Antonella di Luggo  
Leonardo Di Mauro  
Riccardo Florio  
Dora Francese  
Luigi Fusco Girard  
Carlo Gasparrini  
Mario Losasso  
Fabio Mangone  
Francesco Domenico Moccia  
Maria Rita Pinto  
Michelangelo Russo (coordinatore)  
Alfredo Buccaro

Massimiliano Campi  
Renato Capozzi  
Maria Cerreta  
Laura Lieto  
Pasquale Miano  
Lilia Pagano  
Renata Picone  
Antonietta Piemontese  
Carmine Piscopo  
Sergio Pone  
Valentina Russo  
Maria Rosaria Santangelo  
Federica Visconti  
Valeria D'Ambrosio  
Andrea Maglio  
Paola Scala

#### Tutor

Massimiliano Campi

#### Co-tutor

Fabio Remondino

#### Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito a questo lavoro di ricerca ed alla preparazione e stesura della tesi. In primis il prof. Massimiliano Campi, che con fiducia e sostegno mi ha offerto in questi anni importanti occasioni di crescita. Un ringraziamento speciale va al prof. Fabio Remondino, che mi ha accolto, guidato e trasmesso entusiasmo per questo lavoro. Ringrazio la Soprintendenza Archeologica di Napoli per la disponibilità e l'opportunità di svolgere questa ricerca nel Parco Archeologico di Pausilypon. Desidero ringraziare tutte le persone che hanno supportato la fase di acquisizione ed elaborazione dei dati, professori e ricercatori del Dipartimento di Architettura della Federico II di Napoli e tutti i ragazzi dell'unità di ricerca 3D Optical Metrology della Fondazione Bruno Kessler, il cui contributo e sostegno sono stati fondamentali. Infine, ringrazio la mia famiglia e Gianluca per avermi dato il coraggio di superare le difficoltà che hanno accompagnato questo percorso.

A Te, da sempre e per sempre lampada ai miei passi

## Indice

Premessa p. 5

**PARTE PRIMA - INTRODUZIONE**  
**LA DOCUMENTAZIONE PER L'ARCHEOLOGIA: TEMI, LINGUAGGI, SISTEMI.**

CAPITOLO PRIMO	13
<b>Il rilievo dei monumenti antichi: temi, linguaggi.</b>	
1.1 La ricerca archeologica e le teorie di Ian Hodder.	13
1.2 I “tempi” del disegno: l'evoluzione dei linguaggi grafici nella rappresentazione dell'antico.	17
1.3 La visualizzazione archeologica.	22
1.4 L' “incertezza” del dato archeologico.	24
CAPITOLO SECONDO	29
<b>La rivoluzione digitale in archeologia: l'innovazione dei sistemi e delle procedure per la catalogazione, la registrazione e la rappresentazione del reale.</b>	
2.1 L'informatizzazione e la digitalizzazione dell'archeologia.	29
2.2 Il rilievo <i>reality-based</i> per l'archeologia: panoramica generale.	31
2.3 L'integrazione dei sensori per il rilievo delle strutture archeologiche.	34
CAPITOLO TERZO	39
<b>La visualizzazione e la fruizione virtuale dei modelli digitali: principi, sistemi e sperimentazioni.</b>	
3.1 La “ <i>London Charter</i> ” ed i Principi della “Carta di Siviglia”.	39
3.2 <i>Virtual e Cyber Archaeology</i> .	41
3.3 Sistemi e dispositivi per la fruizione virtuale.	42
3.4 Campi di applicazione e sperimentazioni nel settore archeologico.	44

**PARTE SECONDA - METODOLOGIE****RILIEVO, MODELLAZIONE DIGITALE E FRUIZIONE VIRTUALE.**

CAPITOLO QUARTO	55
<b>Tecniche image-based. La tecnica fotogrammetrica: principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati.</b>	
4.1 La tecnica fotogrammetrica: fondamenti teorici e definizioni.	55
4.1.1 Coordinate immagine e risoluzione delle immagini digitali.	57
4.1.2 Parametri di orientamento interno ed esterno.	59
4.1.3 Distorsioni.	59
4.2 Pianificazione ed acquisizione delle immagini.	61
4.3 Le equazioni di collinearità.	64
4.4 La calibrazione geometrica della camera.	67
4.5 Orientamento e calibrazione multi-immagine: <i>Bundle Adjustment</i> .	69
4.6 Corrispondenze tra immagini.	72
4.7 La ricostruzione 3D.	74
4.8 Generazione del modello poligonale e texturizzazione.	75
CAPITOLO QUINTO	79
<b>Tecniche range-based: principi teorici, strumentazioni e tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati.</b>	
5.1 I sistemi ottici attivi: classificazioni	79
5.1.1 Sistemi basati sulla triangolazione	80
5.1.2 Sistemi basati sulla misura di distanza	82
5.2 Caratterizzazione dei sensori tridimensionali	85
5.2.1 Risoluzione	85
5.2.2 Accuratezza e precisione	87
5.2.3 Altri parametri che incidono in una scansione tridimensionale	88
5.3 Il Reverse Modeling: dall'oggetto reale al modello digitale	89
5.3.1 La pianificazione e l'acquisizione dei dati	89
5.3.2 Il filtraggio	93
5.3.3 L'allineamento dei dati	93
5.3.4 Il meshing	97
5.3.5 La correzione e l'ottimizzazione del modello	98
5.3.6 Il texture mapping	99
CAPITOLO SESTO	105
<b>“Unity 3D”: il “gaming” per l'archeologia.</b>	
6.1 Strutture formali delle piattaforme virtuali.	105
6.2 La progettazione della “struttura narrativa”.	108
6.3 Lo sviluppo di un ambiente virtuale.	108

6.3.1 Caratteristiche del Game Engine “Unity 3D”.	108
6.3.2 La navigazione in foto sferiche equirettangolari: metodologie per l'acquisizione delle immagini, elaborazione ed utilizzo in “Unity 3D”.	110
6.3.3 L'importazione di modelli tridimensionali.	113
6.3.4 La navigazione interattiva.	113

**PARTE TERZA - CASO APPLICATIVO****II PARCO ARCHEOLOGICO DI PAUSILYPON.**

CAPITOLO SETTIMO	119
<b>La villa del Pausilypon e le strutture del Parco Archeologico.</b>	
7.1 Le architetture romane marittime in Campania.	119
7.2 La villa di Publio Vedio Pollione e le strutture del Parco Archeologico.	122
7.3 Gli scavi e le ricerche archeologiche.	128
CAPITOLO OTTAVO	133
<b>La Grotta di Seiano.</b>	
8.1 I collegamenti ipogei nel contesto napoletano e flegreo.	133
8.2 La Grotta di Seiano.	139
8.3 Il rilievo tridimensionale della Grotta di Seiano.	143
8.3.1 Un sistema a scansione laser portatile per il rilievo tridimensionale: lo Zeb1 della Geoslam.	146
8.3.2 Test preliminari per la verifica delle prestazioni del sensore.	147
8.3.3 Il rilievo della Grotta di Seiano: acquisizione dei dati.	149
8.3.4 Processamento dei dati e valutazione dei risultati.	150
CAPITOLO NONO	163
<b>I teatri del Pausilypon.</b>	
9.1 Il teatro antico: struttura greca e romana.	163
9.2 Il teatro romano nel “ <i>De Architectura</i> ” di Vitruvio.	168
9.3 I teatri del Pausilypon.	170
9.4 Il rilievo dell'area dei teatri: metodologie, acquisizione e processamento dei dati.	173
9.4.1 Rilievo laser-scanning terrestre: acquisizione e processamento dei dati.	174
9.4.2 Rilievo fotogrammetrico terrestre: acquisizione e processamento dei dati.	180
9.4.3 Procedure per l'integrazione dei dati.	182
9.4.4 Generazione del modello poligonale e texturizzazione.	200
9.5 La ricostruzione tridimensionale dell'area dei teatri.	204
9.5.1 La modellazione tridimensionale: riferimenti, dati e processo.	204

CAPITOLO DECIMO	215
<b>Il “virtual tour” di Pausilypon.</b>	
10.1 Progettazione del tour virtuale e della “struttura narrativa”.	215
10.2 Lo sviluppo del tour per la fruizione virtuale.	218
10.2.1 La navigazione in foto sferiche equirettangolari.	219
10.2.2 L’integrazione dei modelli tridimensionali <i>reality-based</i> nel <i>Game Engine</i> .	221
10.2.3 Il processo interpretativo: l’integrazione di materiale grafico e testuale di riferimento nelle scene.	222
10.2.4 Reale/virtuale: il modello tridimensionale ricostruttivo dell’area dei teatri.	223
10.2.5 Il tour virtuale per la navigazione da smartphone e visori <i>VR</i> .	223
Conclusioni	230
Appendice A	233
Appendice B	235
Appendice C	236
Fonti delle immagini	241
Bibliografia	247

## Premessa

L’archeologia, fondata su una cultura materiale da registrare, interpretare e trasmettere, è una disciplina essenzialmente visuale. Il potere comunicativo dell’immagine archeologica, quale veicolo di idee ed espressione di concetti, è da tempo noto. La nascita di nuovi processi di produzione delle immagini rende il tema della visualizzazione archeologica, in particolare, sempre più centrale. L’introduzione delle tecnologie digitali nel campo del patrimonio culturale ha segnato, infatti, l’inizio di un processo di “virtualizzazione” della conoscenza e della conservazione dei beni. Nei sistemi di produzione della conoscenza della “*Virtual and Cyber-Era*”, l’immagine archeologica trova così una sua nuova dimensione, digitale, tridimensionale, poli-funzionale, virtuale ed interattiva. Lo sviluppo di sistemi in grado di ricreare lo spazio unitario delle tre dimensioni del reale e le conseguenze nei processi di produzione della conoscenza ed apprendimento è sicuramente una delle questioni più importanti per la disciplina. Se, da un lato, sono già state definite delle linee guida e dei principi per la produzione di materiale digitale, dall’altro, si impone lo sviluppo di nuovi sistemi di archiviazione, accesso digitale e condivisione. La complessità introdotta da questo cambiamento, spinge all’utilizzo di approcci multi-disciplinari ed alla definizione di basi di linguaggio comuni per il necessario dialogo tra le parti. La molteplicità dei temi che investono oggi il campo della documentazione dell’archeologia (dalla lettura dell’evoluzione dei rapporti tra rilievo e conoscenza e dei nuovi codici grafici introdotti dal linguaggio tridimensionale, alla consapevolezza della multi-funzionalità dei dati acquisiti per la tutela e valorizzazione del patrimonio) richiede lo sviluppo di metodologie di indagine sempre più complesse. Se analisi storica e conoscenza tecnica sono da sempre i fondamenti del rilievo dell’architettura e dell’archeologia, la seconda

componente richiede oggi competenze sempre più ampie, introdotte dal processo di digitalizzazione. Il progresso tecnologico ha influito non solo sulle modalità di acquisizione e trattamento dei dati, ma anche sulle stesse capacità di conoscere il reale. L'ampliamento dei punti di vista e delle prospettive di osservazione, ma soprattutto la capacità di simulare la presenza in mondi più o meno reali, rappresentano dei cambiamenti che stanno profondamente modificando il nostro rapporto con il mondo.

Gli obiettivi di questa ricerca sono principalmente due:

- L'approfondimento di alcune metodologie di rilievo tridimensionale *reality-based* per la documentazione archeologica di strutture in differenti condizioni ambientali. In particolare, viene trattato il caso di strutture *outdoor* fuori terra e di ambienti archeologici ipogei. Vengono esplorate le possibilità offerte dalle nuove tecnologie e dalla loro integrazione per la creazione di prodotti digitali tridimensionali poli-funzionali, utili alla conoscenza ed all'analisi dei resti archeologici ed alla loro simulazione in ambienti virtuali.
- La sperimentazione e lo sviluppo di tour virtuali interattivi per l'accesso digitale alla documentazione prodotta sul caso studio. Dalla progettazione della struttura narrativa degli ambienti virtuali alle fasi per la loro realizzazione, viene affrontato il caso di due differenti tipologie di utenti potenziali. Un primo tour, destinato a fruitori "esperti" (architetti, storici, archeologi, esperti di geomatica, che in diverso modo si occupano della tutela, conservazione, gestione e promozione del patrimonio archeologico), contiene la maggior parte della documentazione prodotta, fruibile *online*. Un secondo tour per utenti potenziali "non esperti", propone un'esperienza percettivamente intensa e coinvolgente, che stimoli la curiosità ed il desiderio di conoscenza e di partecipazione alla tutela del sito. Questo tour è disponibile per una visualizzazione immersiva ed interattiva attraverso *smartphone* e visori di realtà virtuale.

La ricerca è articolata in tre diverse parti, in cui vengono trattati i principali temi che coinvolgono il settore della documentazione archeologica, l'approfondimento di questioni metodologiche per l'acquisizione ed il trattamento dei dati, l'introduzione ai moderni sistemi di fruizione virtuale e l'applicazione al caso studio.

La **prima parte**, di introduzione alle tematiche trattate nella ricerca, è suddivisa in tre diversi capitoli.

Il primo capitolo è un approfondimento teorico delle questioni che trasversalmente interessano la documentazione archeologica. Dopo

un'introduzione sull'evoluzione delle teorie e dei concetti che hanno influenzato le modalità di conduzione di un'indagine archeologica, viene brevemente presentata l'esperienza di Ian Hodder, ritenuta una delle più significative nel panorama attuale. La lettura, proposta di seguito, sull'evoluzione dei linguaggi grafici nella rappresentazione dell'antico, serve ad identificare le finalità e le esigenze che hanno condotto all'attuale ricerca della tridimensionalità dello spazio. Viene poi trattato il tema della visualizzazione archeologica, nella sua centralità per la produzione di nuova conoscenza e per i riflessi nell'interpretazione stessa del materiale antico. Infine, è affrontata la questione dell'incertezza del dato archeologico nelle procedure di acquisizione pratica e teorica, che introduce ai nuovi sistemi di documentazione digitale.

Nel secondo capitolo, viene inizialmente tracciato un quadro attuale del processo di archiviazione, informatizzazione e digitalizzazione del patrimonio archeologico. Segue una panoramica generale dei sistemi, dei sensori e delle metodologie utilizzate per l'acquisizione dei dati con le procedure del rilievo *reality-based* per l'archeologia, alle diverse scale. L'ultima parte introduce la questione dell'integrazione dei sensori, ritenuta sempre più importante per il controllo ed il miglioramento dei risultati ottenuti.

Il terzo capitolo si occupa della presentazione dei nuovi sistemi di fruizione dei prodotti digitali tridimensionali. La prima parte è dedicata ai principi guida elaborati per la produzione e la visualizzazione del patrimonio digitale. Dopo aver riportato una distinzione terminologica e pratica tra i sistemi di archeologia virtuale, vengono presentati i sistemi ed i dispositivi che consentono la visualizzazione e l'interazione con l'ambiente virtuale. L'ultima parte è una lettura di alcune esperienze e progetti significativi sviluppati negli ultimi anni per la fruizione virtuale.

La **seconda parte** della ricerca è un approfondimento metodologico delle tecniche di acquisizione ed elaborazione tridimensionale dei modelli digitali *reality-based* e dei sistemi di sviluppo di piattaforme virtuali.

Il quarto capitolo è uno studio approfondito della principale tecnica *image-based*, quella fotogrammetrica. Vengono, in particolare, descritti i principi teorici fondamentali e, soprattutto, le procedure per la calibrazione e l'orientamento dell'immagini, fino alla ricostruzione tridimensionale della scena. Alcuni cenni sono presentati sulle procedure di generazione di un modello poligonale e sul *texture mapping* di un modello fotogrammetrico.

Il quinto capitolo tratta, invece, l'altra grande categoria di sensori, quelli *range-based*. Anche in questo caso, oltre ai principi fondamentali alla base del funzionamento dei diversi sistemi, vengono approfondite le tecniche

di acquisizione ed elaborazione dei dati, fino alla fase del *texture mapping*. Il sesto capitolo, approfondisce le caratteristiche principali delle piattaforme virtuali, con riferimento specifico al *Game Engine* analizzato ed utilizzato in questa ricerca “Unity 3D”. Dalla fase di progettazione di un ambiente virtuale, vengono trattati alcune specifiche funzionalità del software per la realizzazione di uno spazio immersivo ed interattivo.

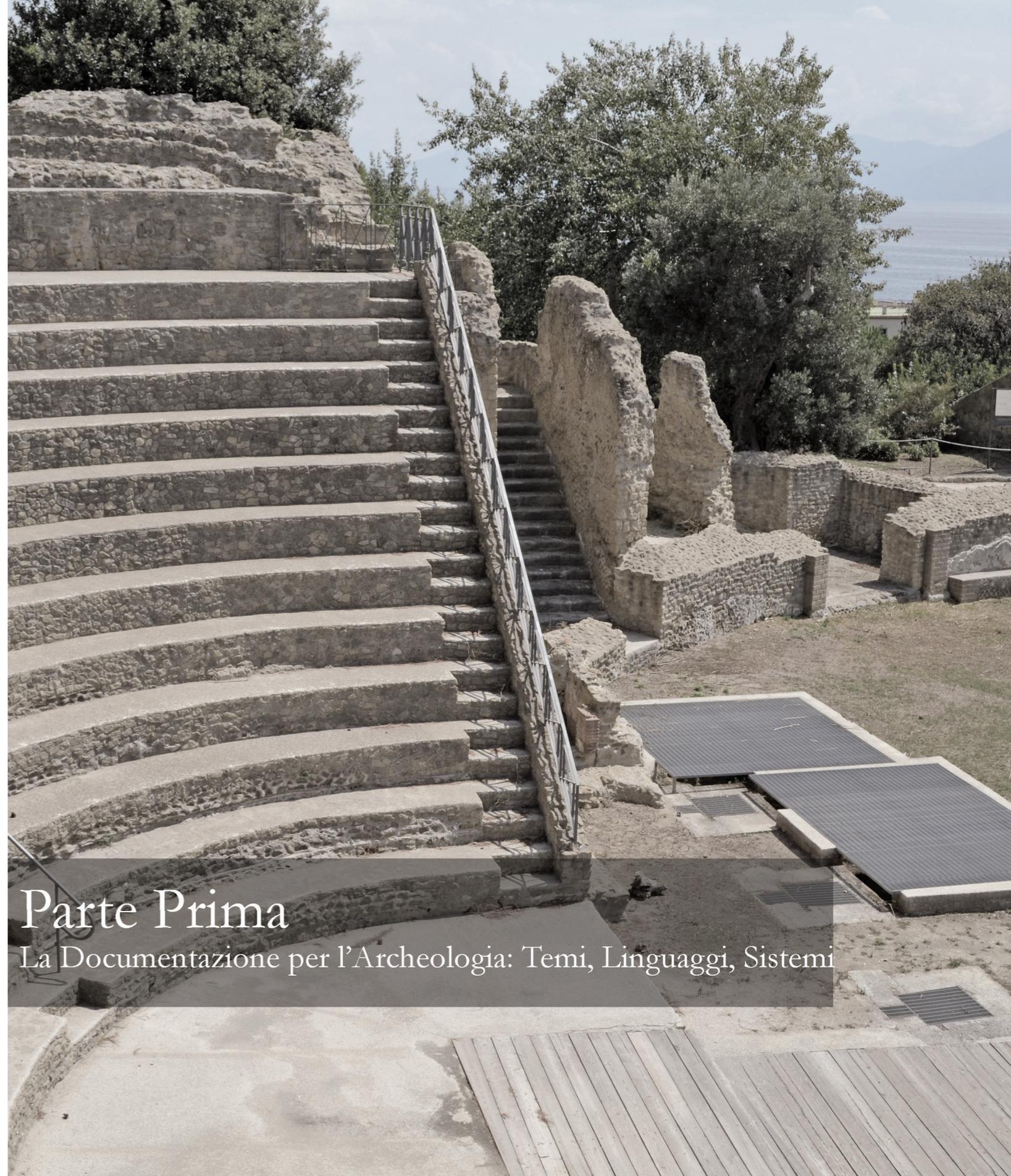
La **terza parte** presenta il caso applicativo della ricerca ed il lavoro svolto nel Parco Archeologico di Pausilypon a Napoli.

Il settimo capitolo, dopo un’introduzione sull’organizzazione spaziale e funzionale delle architetture romane marittime, come quello oggetto di studio, presenta le strutture archeologiche oggi visibili dell’antica Villa di Publio Vedio Pollione sul promontorio di Posillipo, che fanno parte dell’attuale Parco Archeologico. Vengono, inoltre, brevemente trattate le vicende archeologiche e le attività di scavo nel corso dei secoli, fino alla recente riapertura del sito al visitatori.

L’ottavo capitolo approfondisce la prima struttura monumentale rilevata con tecniche *reality-based*, la Grotta di Seiano, un camminamento ipogeo di circa 800 metri che forniva un accesso terrestre alla Villa. Dopo aver analizzato esempi simili nel contesto napoletano e flegreo e presentato le caratteristiche di quella oggetto di studio, viene trattata la fase di rilievo. In particolare, la Grotta di Seiano, è stata rilevata con un sistema di *mobile-mapping* 3D portatile, lo Zeb1 della Geoslam. La verifica dei risultati ottenuti è stata possibile, in questo caso, grazie ad un rilievo topografico integrativo.

Nel capitolo nove vengono presentate le altre strutture oggetto di studio, ovvero i resti di alcune architetture teatrali presenti sull’antico terrazzamento superiore della Villa. Dopo un’introduzione sulla struttura tipologica del teatro greco e romano ed il necessario confronto con le prescrizioni di Vitruvio sull’organizzazione di queste architetture, sono state descritte le strutture visibili oggi a Pausilypon. Di seguito, è approfondita la fase di acquisizione, elaborazione ed integrazione dei dati, ottenuti con due diverse tecniche: rilievo *laser-scanning* terrestre e rilievo fotogrammetrico terrestre. L’ultima parte riguarda la fase di modellazione tridimensionale di un’ipotesi ricostruttiva delle strutture di quest’area, con riferimento al periodo imperiale della Villa.

L’ultimo capitolo presenta lo sviluppo dell’ambiente virtuale con “Unity 3D”, dalla progettazione della struttura narrativa alle procedure per la realizzazione delle diverse scene interattive, per la fruizione *online* e per quella attraverso visori VR e *smartphone*.



# Parte Prima

La Documentazione per l'Archeologia: Temi, Linguaggi, Sistemi

CAPITOLO PRIMO

**Il rilievo dei monumenti antichi: temi, linguaggi.**

**1.1. La ricerca archeologica e le teorie di Ian Hodder.**

<<Non si insisterà mai abbastanza su quanto sia forte il nesso, a volte nascosto, che lega le nostre decisioni operative e le conseguenti interpretazioni al nostro modo di concepire lo studio del passato e quindi la nostra funzione di ricercatori. Non ci accorgeremo mai troppo presto di quanta 'teoria' sia anche inconsapevolmente carico il nostro operare e di quanto sia utile prenderne coscienza. Con l'accortezza di distinguere tra metodologia e teoria, dal momento che la crescente attenzione ai metodi, che finalmente si registra anche in Italia, non riflette necessariamente un approfondimento della dimensione teorica quanto semmai piuttosto lo pretende.>><sup>1</sup>

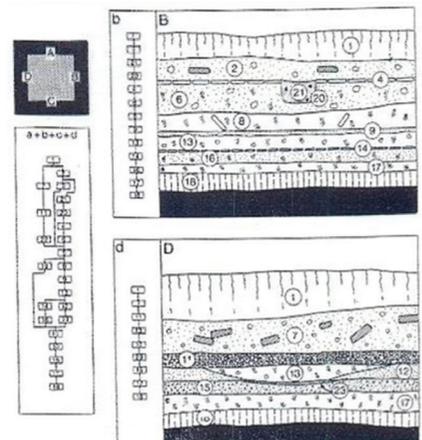
Così Manacorda sottolinea due aspetti della ricerca oggi in ambito archeologico. Da un lato, la crescente consapevolezza dell'influenza delle idee e delle teorie, anche inconsapevolmente, in ogni approccio operativo. Dall'altro, l'inevitabile ritardo dell'Italia nell'affrontare un approfondimento delle questioni teoriche che inevitabilmente influiscono sulle modalità di registrazione, interpretazione e valorizzazione dei resti materiali del passato. La divisione e la settorializzazione delle conoscenze e delle competenze degli ultimi secoli, pur con innegabili successi nella comprensione e sistematizzazione dei prodotti del passato ha, infatti, introdotto un notevole grado di complessità nelle modalità con cui un'indagine archeologica deve essere oggi affrontata. Se in Italia il dibattito sulla teoria non è ancora sentito come una priorità, non altrettanto è avvenuto in altri Paesi, dove la discussione sulle teorie e conseguentemente



1.1.1 - Uno degli scavi in India di Mortimer Wheeler, 1945. Introduzione del metodo di scavi per quadrati.

sulle modalità operative è stato particolarmente rilevante fin dalla nascita nell'Ottocento della cosiddetta "archeologia moderna" (Figg. 1.1.1 e 1.1.2).

L'evoluzione più significativa nelle modalità di approccio interpretativo della disciplina e delle modalità di indagine si avvia a partire dagli anni Sessanta del Novecento negli Stati Uniti d'America, con l'avvento della cosiddetta "*New Archaeology*". La contestazione sui metodi tradizionali di acquisizione ed interpretazione dei dati, portata avanti da un gruppo di giovani archeologici capeggiati da Lewis Binford (1930-2011), pone l'accento sulla necessità di esplicitazione del ragionamento interpretativo da portare avanti con maggiore scientificità. Il movimento sottolinea infatti quanto la raccolta, la descrizione e la classificazione dei dati (e di conseguenza le ipotesi ricostruttive prodotte) siano state basate fino a quel momento su procedure empiriche scientificamente fragili, e per questo non verificabili. Da qui l'avvicinamento alle nuove tecniche scientifiche che si andavano sviluppando soprattutto in altre discipline (come la geografia) e l'allontanamento da un contesto puramente storico, nella convinzione di poter così individuare nuove procedure controllabili e capaci di fornire risultati oggettivi e generalizzabili. In particolare, il movimento è alla ricerca di leggi universali in grado di descrivere i processi culturali di trasformazione e cambiamento delle antiche civiltà (archeologia processuale), applicabili in contesti anche sensibilmente diversi. Il dibattito teorico, ad ogni modo, si traduce nella maggiore attenzione data allo scavo stratigrafico ed alla documentazione, con i quali è possibile risalire ai processi di trasformazione dei contesti. Le critiche rivolte alla *New Archaeology* (se pur in parte condivisibili, se consideriamo l'assunto di una presunta oggettività dell'archeologia da ritenere scienza esatta e fuori da ogni ideologia) non tengono conto del miglioramento sostanziale nelle modalità e nella qualità dell'analisi e della restituzione dei dati raccolti.



1.1.2 - Il Matrix di Harris. Costruzione di sequenze stratigrafiche, 1989.

Pochi decenni dopo, tra gli anni Ottanta e Novanta del Novecento, alla *New Archaeology* si affiancheranno ed in parte opporranno una serie di correnti chiamate "post-processuali". Queste correnti, sottolineando l'estrema semplificazione delle problematiche connesse ai fenomeni culturali a carattere locale nella prassi processuale, sostengono la necessità di un approccio più complesso al dato archeologico. In particolare, lo studio e l'attenzione al contesto (alla base delle specificità e delle variabili individuali) influisce anche in questo caso sulle modalità di trattamento e di interpretazione del dato.

Tra le varie posizioni e teorie archeologiche che si sviluppano nell'ambito dell'archeologia "post-processuale", quelle di Ian Hodder (1948-) meritano

particolare attenzione, perché ritenute oggi un importante riferimento. L'"archeologia contestuale" di Hodder pone l'accento sul contesto, in grado di raccontare il nesso tra cultura materiale e società, leggibili in una specifica testimonianza archeologica. La critica alla "scientificità" della Nuova Archeologia si tramuta nelle sue teorie in un relativismo necessario in ogni approccio interpretativo nella materia archeologica. Non è possibile pensare ad un'unica e senza dubbio oggettiva interpretazione della materia antica. Se pur talvolta il relativismo di Hodder appare eccessivo e totalizzante, l'attenzione ad un'analisi centrata sull'analisi diacronica del contesto (nelle sue componenti stratigrafiche, funzionali e culturali) ed al confronto delle fonti è ormai una pratica riconosciuta e condivisa in ogni approccio con la materia antica. Le teorie di Hodder, trovano applicazione, in particolare, nell'interessante metodo d'indagine adottato sul sito primitivo di Çatalhöyük in Turchia, il cosiddetto "*Reflexive Method*", che si riassume attorno a quattro macro-temi:

- **Reflexivity:** ovvero l'analisi delle ricadute e degli effetti delle posizioni teoriche e delle azioni pratiche messe in atto in un'indagine archeologica sulle comunità interessate (ad esempio, le comunità locali od i futuri visitatori del sito) nel processo di acquisizione, analisi e conoscenza dei dati storici. Nel caso di Çatalhöyük, video e diari testimoniano, in questo caso, il processo e le modalità di conduzione dello scavo e le condizioni del contesto, che possono essere criticamente verificate a posteriori.
- **Relationality or contextuality:** "[...] usually in archaeology, everything depends on everything else within a hermeneutic whole"<sup>2</sup>. Il significato del reale dipende dunque dai rapporti di relazione che permettono di produrre conoscenza. La comprensione di questi rapporti è fortemente legata ad un apporto interdisciplinare nell'interpretazione dei resti. Questo ovviamente implica che l'intero processo risulti flessibile in quanto: "*If everything depends on everything else, then I change one variable in my analysis so there are knock-on effects on all other variables*".
- **Interactivity:** è necessario che in questo processo di produzione flessibile venga offerta la possibilità di chiarire o criticare le interpretazioni archeologiche elaborate. Nell'esempio di Çatalhöyük, il dialogo tra i diversi specialisti, è reso possibile garantendo l'accesso ad un semplice database via Web che facilita lo scambio di informazioni e il confronto.
- **Multivocality:** riguarda la possibilità di interazione e di dialogo con altri e diversi attori coinvolti da un'indagine archeologica (ad esempio, le comunità locali), che spesso hanno necessità ed interessi contrastanti.

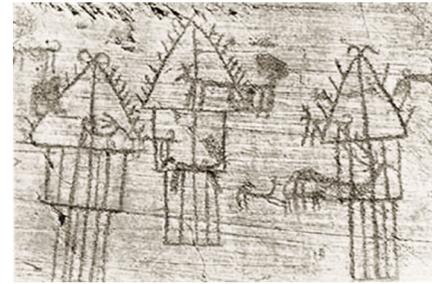
Oltre che nei temi appena citati, la straordinaria modernità di Hodder si esprime quando descrive il “*non-dichotomous thinking*”, ovvero della necessaria rottura delle categorie e dei confini della disciplina archeologica. Rottura che si concretizza non solo nel rifiuto della settorializzazione e frammentazione delle conoscenze, ma soprattutto nel passaggio dalla nozione di “sito” a quella di “sito disperso”. Già l'avvento, agli inizi del XX secolo, delle nuove tecniche diagnostiche e di telerilevamento e l'inizio della ricognizione topografica estensiva, aveva aperto ad una dimensione indeterminata dei siti. La possibilità di osservazione da quota di aree molto estese per l'identificazione di tracce nel terreno, oltre all'utilizzo di tecniche al suolo molto più sistematiche in un'ottica stratigrafica, ha permesso infatti una notevole estensione del campo di indagine. Il sito non è più solamente il luogo che preserva le emergenze macroscopiche del passato, ma ogni area in cui la vita dell'uomo si è manifestata lasciando tracce del proprio passaggio. Il sito diventa così un'unità fondamentale di documentazione dei resti che emergono in superficie, nodi di una rete complessa di relazioni spaziali e temporali tra i centri in cui si è svolta l'attività umana. Anche questa definizione del problema appare comunque ben presto riduttiva. Le tracce dei materiali antichi, pur presentandosi con diverse concentrazioni, rappresentano una realtà continua nel paesaggio. Da qui un'ulteriore innovazione con l'introduzione del concetto di “non sito” (*off site*), per la necessità di collocare queste tracce meno evidenti o significative all'interno di quella che è, ad ogni modo, testimonianza del passaggio dell'uomo nel tempo. La rottura delle barriere ideologiche sul concetto di sito e la proliferazione dei siti, trova una sua nuova definizione nel “sito disperso” di Hodder nell'esperienza di Çatalhöyük: “[...] *at Çatalhöyük we see the site disperse. Different teams produce different Çatalhöyüks. [...] Numerous people interact in the interpretation of the site so that it becomes unclear who is in and who is not in 'the team'. [...] By this is meant that the varied groups, with their different interests and expectations approach the site, they construct different versions of it which are only partly rooted in the finds made at the physical location called Çatalhöyük*”. Nella distruzione dei confini fisici e culturali del sito l'apertura verso un approccio completamente diverso all'indagine archeologica ed alla diffusione dei prodotti è inoltre evidente quando afferma: “*The archaeological view is seen as one among many. The archaeological statements may get re-interpreted within a quite different story. We can decry this situation and lament the loss of archaeological authority. Or we can embrace such experiences as a function of the erosion of boundaries between 'high' and 'low' culture. In the latter case, the archaeologist welcomes the wider public appeal and recognizes the need to speak to different communities and to argue a case in relation to a variety of different points of view.*” Con Hodder arriviamo dunque ad oggi ed alla evidente complessità

di operare oggi in questo ambito. La diversità degli attori coinvolti, l'innovazione tecnologica e le nuove modalità di acquisizione teorica e pratica del dato sono gli elementi attorno a cui si sono sviluppati una molteplicità di temi che intervengono in ogni “processo archeologico”. Abbiamo già visto come Hodder ridefinisca il concetto di sito e ridisegni le modalità di interazione tra tutti coloro che sono coinvolti in questo processo. Tra i temi più rilevanti sistematizzati nei suoi studi ed emergenti nel dibattito attuale attorno alla disciplina, tre in particolare vengono trattati ed approfonditi di seguito: l'evoluzione dei linguaggi della rappresentazione, la visualizzazione archeologica e le problematiche nell'acquisizione del dato archeologico.

## 1.2 I “tempi” del disegno: l'evoluzione dei linguaggi grafici nella rappresentazione dell'antico.

<<Apprendiamo a conoscere meglio le arti dei tempi antichi: analizzandole pazientemente avremo stabilito i fondamenti delle arti del nostro secolo; noi riconosceremo che a lato dei fatti materiali che cambiano senza interruzione ci sono dei principi che sono invariabili e che la storia risveglierà la curiosità, essa rivela anche per chi sa sfogliare i tesori del sapere e della esperienza che l'uomo intelligente deve impiegare”>><sup>3</sup>.

L'archeologia, fondata su una cultura materiale da registrare, interpretare e trasmettere, è una disciplina essenzialmente visuale. Il potere comunicativo dell'immagine archeologica, quale veicolo di idee ed espressione di concetti, è da tempo noto. Poca consapevolezza vi è invece nei riguardi dell'influenza che l'immagine ha nella creazione di conoscenza e nella costruzione di teorie ed ipotesi sul passato, essendo essa stessa generatrice di significati. Lo stile della rappresentazione e le convenzioni adottate rivelano una dimensione identitaria ed indipendente dell'immagine, in grado di raccontare se stessa anche oltre il proprio contenuto. Il discorso sul rilievo dei monumenti antichi, legato indissolubilmente alle metodologie per la registrazione del reale, trova infatti uguale fondamento nella procedura di interpretazione, codificazione e decodificazione del segno grafico. Come perfettamente sintetizzato da Portoghesi: “La parola rilevare evoca direttamente quell'azione per via di levare che caratterizza l'azione dello scultore, quando un blocco di pietra ricava una immagine che prima abitava la sua mente come realtà immateriale. Chi rileva un edificio compie lo stesso percorso alla rovescia: dalla immagine realizzata nel materiale, alla sua descrizione rigorosa per mezzo di un'astrazione: il disegno, una astrazione che ha le qualità di semplicità,



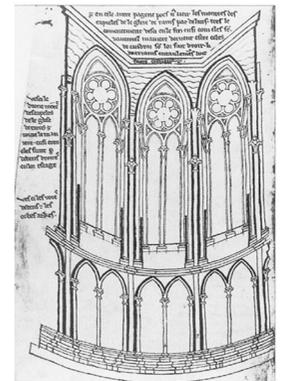
1.1.3 - Incisioni rupestri in Valcamonica, I millennio a.C.. Rappresentazione di palafitte.

di forza sintetica, di chiarezza, che sono proprie del mondo delle idee... Rilevare vuol dire quindi umanizzare le cose, tradurle in un linguaggio plasmato sulle capacità ordinatrici della nostra mente, spogliandole delle qualità meno adatte ad imprimersi nella mente e nella memoria...<sup>24</sup>. La comprensione e la decodifica del linguaggio grafico adottato per la realizzazione di “modelli”, che schematizzano e traducono le tre dimensioni del reale (così come percepito) in un documento interpretato, è fondamentale se consideriamo che: “[...] i significati attribuiti oggi, sia ai rilievi contemporanei che a quelli trasmessi dalla storia, sono esito non solo della capacità interpretativa attuale, ma anche di tutto l’insieme dei modelli conoscitivi e dei modi di strutturazione del segno che si sono sviluppati nel tempo e che si sono impressi in ciascuna immagine tanto da diventare parte integrante del suo attuale potere comunicativo”<sup>25</sup>. La lettura dell’esistente che offre un’indagine di rilievo è quindi necessariamente condizionata dalla cultura e dall’ideologia del tempo, dalla stratificazione delle interpretazioni e delle conoscenze che consentono il riconoscimento di valori, dalla capacità di decodifica dei linguaggi grafici del passato, dagli obiettivi che in un particolare momento storico guidano domande e percorsi di ricerca. Leggere i processi di trasformazione del segno grafico nel tempo, aiuta a comprendere che ogni sua evoluzione è in realtà il frutto sempre di rinnovati obiettivi ed esigenze nella trasmissione e comunicazione delle informazioni, e, soprattutto, di un costante avanzamento nel riconoscimento dei valori attribuiti alle testimonianze del passato. Da qui l’esigenza che si avverte oggi, e sottolineata ancora da de Rubertis, di inquadrare ogni produzione all’interno di un modello di riferimento, consci della “[...] complessità e provvisorietà storica del rilievo, nonché del suo potere surrogatorio della realtà”. La lettura dell’evoluzione dei linguaggi grafici aiuta a comprendere gli avanzamenti nel riconoscimento del rapporto tra documentazione e conoscenza, alla base degli attuali orientamenti nella ricerca di nuove forme di rappresentazione e valorizzazione dei resti archeologici. La necessità di esprimersi attraverso le immagini e l’esigenza di far emergere, attraverso schemi concettuali, le esperienze sensibili della realtà, è già riconoscibile nell’iconografia preistorica delle dimore primitive (Fig. 1.1.3), in cui il disegno (fortemente astratto, concettuale, simbolico e con scopi principalmente didattici e progettuali) si configura quale veicolo fondamentale di informazioni. È tuttavia in epoca romana che iniziano studi sempre più organici di codificazione grafica, innanzitutto del tessuto edilizio, rappresentato principalmente su supporti lapidei (Fig. 1.1.4). Allo stesso tempo, nasce la consapevolezza di poter ricavare informazioni dall’osservazione dei

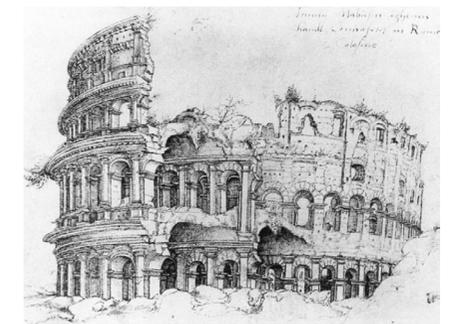


1.1.4 - Frammento della *Forma Urbis Romae*, realizzata tra il 203 ed il 211.

dati materiali del passato, che, anche casualmente, vengono rintracciati nel terreno. Pur non esistendo ancora, ovviamente, il nostro concetto di ricerca storica o di sito archeologico, né forme adeguate di documentazione dell’esistente, l’identificazione di questi luoghi del tessuto urbano (da poter principalmente trasformare in cave di antichità) porta comunque al riconoscimento del valore dei dati materiali provenienti da un tempo passato. Con la fine dell’Impero romano e le trasformazioni che ne conseguono, il paesaggio urbano si arricchisce di una nuova tipologia di insediamenti (quelli che avevano nel tempo perso forma e funzione), e si pongono le basi per la futura ricerca antiquaria. La bellezza di manufatti non più riproducibili e dei siti che li contengono è riconosciuta, più che per particolari caratteristiche estetiche, per l’intrinseco valore di antichità. Dal punto di vista del linguaggio grafico, tuttavia, in epoca medievale, l’evoluzione verso forme di astrazione del segno alla ricerca di una rappresentazione quanto più oggettiva e neutrale, attraverso l’uso esclusivo della linea e rigoroso della geometria, avrà comunque finalità prevalentemente progettuali, non interessando quindi ancora la registrazione dei resti del passato (Fig. 1.1.5). È, infatti, il Rinascimento a segnare un punto fondamentale di svolta nella revisione e codificazione di linguaggi grafici per la rappresentazione dell’esistente, dagli studi sistematici sulla prospettiva alle prime teorizzazioni sul disegno “oggettivo”, ovvero basato sulle proiezioni ortogonali. È proprio qui che, attraverso la pratica della copia del modello reale, nasce la consapevolezza delle potenzialità del disegno nel divenire uno straordinario “strumento conoscitivo”, e comincia quell’affannosa ricerca (mai terminata) per elaborare un metodo razionale di rappresentazione applicabile alla realtà delle cose e agli edifici esistenti. Proprio a partire dalle ricerche di artisti, antiquari ed architetti sulle rovine, in particolare dell’antica Roma, muta infatti la percezione di quei manufatti, in grado di raccontare un glorioso passato da cui attingere valori e di testimoniare straordinarie capacità compositive e costruttive. È in questo clima di risveglio culturale, di ansia di scoperte ed esplorazioni, che al rilievo dei monumenti viene riconosciuto il ruolo di disciplina fondamentale per la conoscenza di quegli oggetti provenienti da un tempo lontano. Se, in questo tempo, rilievo e ricerca filologica, guidati dall’interesse della riscoperta dei testi latini, procedono di pari passo, nasce anche un incessante desiderio di verificare le prescrizioni ed i modelli degli antichi maestri (Vitruvio, che viene riscoperto proprio in questo secolo) con la realtà materiale dei ritrovamenti. Infatti, al di là di Vitruvio, il cui testo rappresenta il riferimento assoluto, architetti ed artisti riconoscono il valore “didattico” delle rovine stesse, dando maggiore fiducia ai resti che alle fonti letterarie. La sintesi migliore ci è offerta in questo caso da Alberti, quando che



1.1.5 - Cattedrale di Reims Villard de Honnecourt. Cattedrale di Reims, 1230.



1.1.6 - Il Colosseo, Jan Gossaert, 1519.



esempio, il rapporto tra le murature di diversi periodi) che per sottolineare la loro collocazione in rapporto al contesto. Pur coesistendo per un lungo periodo, disegno accademico da un lato (soprattutto in riferimento all'Ecole des Beux-Arts e ai lavori nelle accademie) e fondamentalisti del disegno geometrico dall'altro, e rappresentando perfettamente quella doppia strumentalità del disegno, "espressiva" e "comunicativa" ma mai fine a sé stessa, come ricordato da Roberto de Rubertis, la prima componente sarà comunque destinata quasi a scomparire. Perdita indiscutibile, dunque, di un modo immediato di comunicare i valori dell'architettura, che si è cercato negli ultimi anni di recuperare, con l'elaborazione di una forma di rappresentazione dell'esistente, meno legata all'astrattismo e più ad una nuova forma di realismo attenta alle tre dimensioni del reale (Fig. 1.1.9).

### 1.3 La visualizzazione archeologica.

<<Visualization is essentially a process of conversion. In the case of archaeology, this act of conversion involves transforming material remains from mute, inanimate objects into archaeologically meaningful ones. Thus, the illustrator, artist, or computer designer who renders archaeological objects is not only a translator but also an active spokesperson. The role of these professionals in recording, interpreting, and presenting objects and ideals has always been vital to our discipline, and their influence on the way we approach data and the way we imagine the past cannot be overstated>><sup>9</sup>. L'immagine archeologica ha da sempre, come abbiamo visto, il compito di produrre e comunicare conoscenza. La forza comunicativa dell'immagine è legata non solo al messaggio trasmesso ma anche ai significati intrinseci espressi dal segno adottato. Lo sviluppo di metodi "scientifici" e codificati per la rappresentazione del passato a partire dal Settecento, sulla base delle importanti conquiste del Rinascimento (par. 1.2), è alimentata da finalità essenzialmente educative e divulgative. Il tema della "visualizzazione archeologica" ha acquistato ormai un peso rilevante tra le questioni teoriche che interessano la disciplina. Sempre più attenzione è rivolta alle implicazioni dell'utilizzo dell'immagine (ed, in particolare, di quella digitale) nel processo di interpretazione archeologica e di divulgazione dei dati. Le diverse "forme" che l'immagine archeologica ha assunto nei secoli fino ad oggi non indicano semplicemente un'evoluzione verso forme "migliori" di rappresentazione. Piuttosto, riflette l'evoluzione delle esigenze di documentazione e comunicazione, dovute allo sviluppo di nuove capacità di "guardare" ai resti influenzate dai progressi della tecnologia e dalla trasformazione dei contesti urbani ed archeologici. La visualizzazione diventa conoscenza quando rappresenta caratteristiche

dell'oggetto o dei siti, forme e funzioni, in una narrazione critica che suggerisce connessioni e relazioni. Le immagini digitali, provenienti da rilievi tridimensionali o *render* realistici offrono sicuramente informazioni su *texture*, colori, materiali, effetti di illuminazione non ricreabili allo stesso modo in un disegno di tipo tradizionale. Pur essendo chiaro il valore di questi dati come strumenti di analisi, va ancora considerato che anche questo tipo di immagini può alterare la nostra percezione del passato. Le convenzioni, le tecniche adottate e i colori dei disegni realizzati a mano possono infatti indicare con chiarezza la paternità di un'opera e la natura dell'interpretazione dei resti. Il realismo naturalistico dei prodotti digitali rende questa distinzione più complessa. In ogni dato tridimensionale è, tuttavia, innegabile la componente interpretativa alla base di ogni produzione, sia che si tratti di rilievi *reality-based* o di ricostruzioni 3D basati su metodi CAD. La questione diventa piuttosto quella di indagare il riflesso della visualizzazione di queste immagini su un pubblico esperto e non. Riguardo alla "ricezione" dell'immagine, possiamo riprendere nuovamente le parole di Moser quando afferma che: "*In line with theories of reception articulated in humanities, where the meaning of texts/objects is seen to be generated by the interaction of readers/viewers with them, viewing whereby audiences bring their own understandings to the perception of the image and in so doing configure its meanings/s*"<sup>10</sup>. Il significato dell'immagine risulta quindi non solo connesso al suo effettivo contenuto, ma al rapporto di interazione dell'utente con essa. Se un utente esperto è in grado di cogliere i significati codificati da norme grafiche nelle illustrazioni, stile o contesto della presentazione, un utente non esperto si affiderà ad un pregresso gruppo di conoscenze e al proprio carico di aspettative per la comprensione dell'immagine. Baserà dunque il riconoscimento di elementi iconici sulla familiarità delle forme o di un contesto noto. L'attenzione alle forme di ricezione dell'immagine visiva degli ultimi anni si accompagna a quella sulle sue forme di divulgazione. Il tema è tanto più complesso se consideriamo quanto l'utilizzo dell'immagine archeologica anche in contesti esterni propriamente alla disciplina. Non solo illustrazioni per libri o musei (più o meno interattivi), ma anche film o *computer games*. La ricezione di immagini archeologiche in questi contesti, se da un lato potrebbe fornire ad un utente inesperto un nuovo sistema di riferimento visuale in cui collocare le vicende delle culture antiche, allo stesso tempo potrebbe stereotipare e cristallizzare quell'immagine impedendone una lettura critica. La "visualizzazione archeologica" si sta configurando sempre più come una disciplina autonoma negli ultimi anni, con il proliferare di studi sul tema della ricezione dell'immagine e della potenzialità soprattutto dell'immagine digitale nel produrre un nuovo tipo di conoscenza.

#### 1.4 L' "incertezza" del dato archeologico.

Dopo aver introdotto la questione del segno grafico, soggetto a continue fluttuazioni ed evoluzioni legate ai modelli di codifica e che richiede sempre operazioni di storicizzazione, abbiamo già sottolineato come negli ultimi anni quell'antico desiderio di scientificità sia stato tradotto nella ricerca di un linguaggio quanto più oggettivo e neutrale per la registrazione e l'elaborazione dei dati. Dati che, risultano tanto più di difficile lettura quanto maggiormente corrosi e frammentari. Questa ricerca è legata, oltre come abbiamo visto alla provvisorietà del codice grafico, al fatto che il dato archeologico è soggetto ad una sostanziale "incertezza", legata sia a caratteristiche intrinseche, che ai processi di acquisizione teorica e pratica delle informazioni ricercate. Il dato è l'elemento essenziale delle procedure interpretative, l'unità minima che possiede il maggiore contenuto informativo. In questo capovolgimento di ruoli, è il dato ad essere non solo elemento di base ma anche conoscenza implicita. L'impossibilità di distinguere, in un dato registrato, l'oggetto dalle strumentazioni utilizzate, come sottolineato da Hodder quando afferma *"...whether an object in the ground as any chance of becoming an 'archaeological object' depends on the perspectives and methods of the recovery process"*<sup>11</sup> o da Mancorda che riflettendo sui metodi sottolinea la domanda fondamentale "cosa cerco...ovvero come la trovo?"<sup>12</sup>, si arricchisce ora di una nuova fondamentale variabile, che mette in discussione la neutralità di qualsiasi registrazione: l'esperienza del suo scopritore. L'arbitrio nasce già quando vengono selezionati gli oggetti e le informazioni da raccogliere. Il dato nasce dunque da un'esperienza sensoriale, da un riconoscimento di valore che orienta il processo di scoperta, selezionando i materiali considerati portatori di informazioni e sovrapponendo ad essi le proprie esperienze e conoscenze pregresse. Il momento della registrazione del dato è senza dubbio un momento fortemente critico, che potrebbe condurre ad una sua distruzione concettuale. Come sottolineato da D'Andrea, riprendendo quanto già espresso da Kuhn già nel 1969: "per quanto il dato sia un fatto oggettivo e neutrale non esiste un modo di spiegarlo senza sovrapporre alla descrizione una teoria, in quanto assume valore solo all'interno di un modello di riferimento"<sup>13</sup>; occorre dunque forse abbandonare l'idea di separare in modo univoco l'oggetto dal soggetto indipendentemente dalle forme della sua osservazione e quindi della sua registrazione. Diviene a questo punto fondamentale, nel processo conoscitivo, comprendere come si è arrivati alla costruzione del dato, documentare questo processo, consapevoli che l'esperienza sensibile non può essere neutrale e che le stesse teorie non sono semplici interpretazioni di dati

inequivocabili. Il rischio, dunque, diventa quello della manipolazione, anche incosciente, del dato, e quello di confondere dato e conoscenza, processo tanto più pericoloso quando altri ricercatori vogliano utilizzare dati elaborati in precedenza. È in questa "stratificazione di interpretazioni" che si rischia di perdere il valore autentico delle testimonianze e la corrispondenza tra oggetto e significato. L'informazione e, dunque, il significato nascono proprio dall'aggregazione di questi dati, ricorrendo ad una conoscenza implicita e quindi non codificabile. Le informazioni stesse non esistono senza una conoscenza e al tempo stesso la conoscenza non può essere trasmessa e codificata se non diviene esplicita. Nell'operazione, dunque, di codifica del dato, tenendo ben presenti le parole di Hodder *"[...] you cannot see 'what is there' until you know to look for it"*<sup>14</sup>, occorre innanzitutto definire in maniera chiara quali sono i presupposti di partenza, quale è la finalità della ricerca, l'accuratezza e la precisione dei processi, e come si è giunti a costruire, rappresentare e comunicare il dato. Anche in questo caso, però, possono intervenire altri fattori di incertezza, legati alle competenze del ricercatore e alla sua padronanza del tema trattato, che certamente influiscono sulle scelte, sulle decisioni e sulle valutazioni che intervengono nel processo di interpretazione dell'esistente e di cui spesso non resta alcuna traccia. Non che queste scelte non siano essenziali, per giungere ad una sintesi critica (che è il vero obiettivo della nostra disciplina), ma è necessario che queste siano documentate. A tutto questo si aggiunge il discorso sulle metodologie e tecniche di indagine. Spesso accade, infatti, che la scelta di una tecnica sia guidata dal proprio contesto di ricerca e non dalle proprietà dell'oggetto e questo conduce, qualche volta, a conclusioni errate. Diventa, in questo caso, la tecnica a suggerire le conclusioni e non il dato. Il discorso sulle tecniche e sulle metodologie di indagine sarà trattato in seguito, ma occorre qui sottolineare quanto la "sensibilità" del dato archeologico che abbiamo visto in precedenza e la sua "incertezza" nei processi di conoscenza e codificazione, renda questo campo particolarmente insidioso.

**Note**

<sup>1</sup> Manacorda D., *Prima lezione di archeologia*, Bari, 2004.

<sup>2</sup> Hodder I. (edited by), *Toward reflexive method in archaeology: the example at Çatalhöyük*. By Members of the Çatalhöyük teams, McDonald Institute for Archaeological Research, 2000.

<sup>3</sup> Viollet-Le-Duc E., “Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle”, Edition Bance, 1854-1868, pp.560-561, in Di Grazia V., *Rilievo e disegno nell'archeologia e nell'architettura, Tecniche, Opinioni e Teorie*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.

<sup>4</sup> Portoghesi P., in Di Grazia V. (a cura di), *Rilievo e disegno nell'archeologia e nell'architettura, Tecniche, Opinioni e Teorie*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.

<sup>5</sup> De Rubertis R., “Il rilevamento di Piazza Augusto a Roma”, *La conoscenza dell'architettura: il rilievo e le nuove tecnologie informatiche*, Bollettino della Biblioteca della Facoltà di Architettura dell'Università degli studi di Roma - “La Sapienza”, Gangemi Editore, 1999, pp. 25-32.

<sup>6</sup> Demonet, C., “Rilievo architettonico e archeologia, <<Architetti antiquari>> a Roma nel Quattrocento, Giornata di studi - Grand Tour del Terzo Millennio, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, 2011.

<sup>7</sup> Quici F., *Il disegno cifrato. Ermeneusi storica del disegno di architettura*, Officina Edizioni, 1996.

<sup>8</sup> Piggot S., *Antiquity Depicted: Aspects of Archaeological Illustration*, London, Thames and Hudson, 1978.

<sup>9</sup> Moser S., in Hodder I. (edited by), *Archaeological Theory Today*, Polity Press, 2012.

<sup>10</sup> *Ibidem*.

<sup>11</sup> Hodder J., *The archaeological process*, Oxford, 1999.

<sup>12</sup> Manacorda D., *Prima lezione di archeologia*, Bari, 2004.

<sup>13</sup> D'Andrea A., *Documentazione archeologica, standard e trattamento informatico*, Archaeolingua, 2006.

<sup>14</sup> Hodder J., *The archaeological process*, *Op.cit.*

CAPITOLO SECONDO  
**La rivoluzione digitale in archeologia:  
l'innovazione dei sistemi e delle procedure per la  
catalogazione, la registrazione e la rappresentazione del reale.**

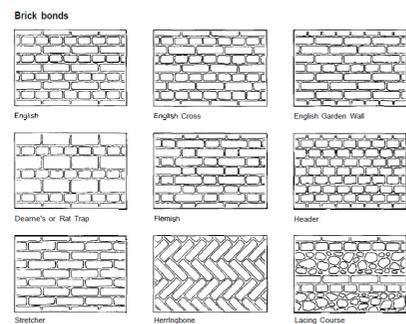
### **2.1 L'informatizzazione e la digitalizzazione dell'archeologia.**

La molteplicità dei temi che investono oggi qualsiasi indagine archeologica, parzialmente trattati nel capitolo precedente, sono frutto della complessità introdotta dagli avanzamenti teorici e pratici della disciplina dell'ultimo secolo. L'evoluzione nel riconoscimento del rapporto tra documentazione e conoscenza, in particolare, ha stimolato lo sviluppo di innovativi processi per la sistematizzazione, l'acquisizione, il trattamento e la diffusione dei dati.

Le sfide imposte da questo particolare campo di indagine, ormai già da alcuni anni, riguardano l'informatizzazione, la digitalizzazione e la condivisione dei risultati, oltre allo sviluppo ed all'integrazione di sistemi di produzione di conoscenza adeguati (da qui, l'interesse per le sperimentazioni delle tecniche della Geomatica e della Computer Grafica).

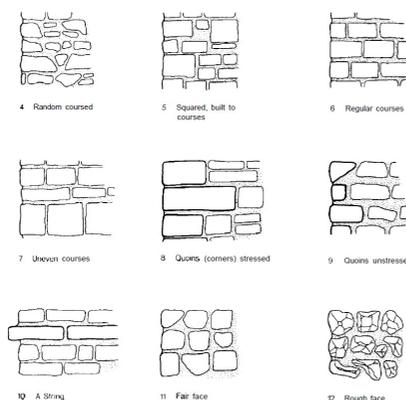
Nonostante le difficoltà, dovute ad atteggiamenti ostili e sospettosi nei confronti già delle prime strumentazioni informatiche sporadicamente utilizzate a partire dagli anni '60 nella disciplina, si riscontra, oggi, una grande attenzione a questi temi. Già da qualche decennio, infatti, si sono moltiplicati studi e ricerche che hanno profondamente innovato un ambito disciplinare fortemente legato a metodi e strumenti essenzialmente tradizionali (dalle sperimentazioni nel campo dei sistemi informativi territoriali, ai database, fino alle recenti tecniche di rilievo digitale tridimensionale talvolta accoppiato ad applicazioni di Realtà Virtuale).

L'avvento dell'era digitale ha introdotto una serie di questioni che hanno



condizionato ed orientato i diversi campi di ricerca coinvolti: tra tutti, la necessità di prevedere standard e protocolli comuni per i prodotti di un'indagine archeologica, l'accessibilità ai dati e l'interoperabilità, l'integrazione tra tipologie di dati differenziati e l'elaborazione di diversi *output* a partire dagli stessi dati di *input*.

Sulla normalizzazione e la standardizzazione dei dati, enormi passi in avanti sono stati compiuti negli ultimi anni grazie all'introduzione, già a partire dal 1990, delle schede catalografiche dell'ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione), aggiornate nel 2016<sup>1</sup>. Gli standard introdotti dall'ICCD tentano di definire le regole comuni da rispettare nell'attività di catalogazione e documentazione del patrimonio storico, artistico, archeologico, architettonico, paesaggistico ed etnoantropologico a livello nazionale. Le schede, definite da sigle identificative che rappresentano delle convenzioni terminologiche, contengono differenti tipologie di informazioni strutturate sul bene: dai dati descrittivi e tecnici che evidenziano il valore culturale dell'oggetto, alle informazioni geografiche che ne definiscono il contesto, fino ai riferimenti ad ulteriori fonti di documentazione iconografica, fotografica ed archivistica del bene. Nei futuri aggiornamenti, è prevista l'introduzione di maggiori specifiche e normative sulla definizione delle unità stratigrafiche e sulle tipologie murarie. Ad ogni modo, la normalizzazione e la standardizzazione dei contenuti non ha ancora riguardato i dati che, più specificatamente, vengono trattati in questa ricerca. Ancora nessuno standard è stato infatti proposto per i codici grafici e per le simbologie da adottare nella restituzione grafica di un'attività di documentazione ed, in particolare, per gli elaborati "caratterizzati". La "caratterizzazione", in ambito archeologico, è una pratica tradizionale che definisce graficamente la qualità, le caratteristiche materiche e costruttive dell'architettura. In assenza di un codice grafico unificato e normalizzato per questa tipologia di elaborati, alcuni operatori fanno riferimento alla proposta di unificazione dei simboli presente nel *Site Manual* prodotto dal *Department of Urban Archaeology di Londra*<sup>2</sup> (Fig. 2.1.1). L'obiettivo è quello di separare la rappresentazione dei dati metrici dall'insieme delle simbologie utilizzate per interpretare la realtà in riferimento a diversi tematismi. Per le scale di rappresentazione di dettaglio di edifici o di scavi, si ricorre in genere ad un tipo di simbologia definita "naturalistica", perché tende a rendere l'oggetto rappresentato verosimile, avvicinandosi alle sue forme reali. Per scale, invece, a più grande denominatore vengono solitamente utilizzate le cosiddette simbologie "astratte", che assumono uno schematismo maggiore, dovendo facilitare la lettura dell'oggetto, omettendone i dettagli. I simboli utilizzati fanno riferimento a classi principali, in cui è possibile trovare specificazioni su



2.1.1 - Alcuni esempi di caratterizzazione per diverse superfici murarie contenuti nel *Site Manual*.

materiali, strati o componenti degli strati.

Come per le simbologie da adottare, nessuno standard è stato finora prodotto per un'altra e sempre più diffusa tipologia di dato, ovvero i modelli dei rilievi digitali tridimensionali. Nessuna indicazione è, infatti, stata fornita a livello nazionale sui requisiti di qualità e di accuratezza che questi modelli dovrebbero rispettare, considerando soprattutto che la loro produzione è sensibilmente aumentata, negli ultimi anni, grazie ai costi di strumentazioni e software sempre più accessibili.

Sebbene, dunque, la procedura di standardizzazione non sia del tutto completa, un'importante novità nel processo di informatizzazione, digitalizzazione e diffusione dei dati sul patrimonio è già in atto con la pubblicazione dei primi "open archive". In Italia, un importante esempio è fornito dal Progetto MOD (*Mappa Open Data*)<sup>3,4</sup>. Ulteriori sviluppi si attendono nel campo dei *Linked Open Data*. Questi ultimi, in particolare, offrirebbero la possibilità di inserire sul Web dati grezzi collegabili tra loro, determinando immediate corrispondenze, consentendo l'accesso ad un pubblico più vasto alle informazioni ed ottimizzando l'uso delle risorse disponibili. I dati grezzi a cui si fa riferimento sono i dati che vengono prodotti contestualmente ad un'attività di indagine archeologica (fotografie, documentazione grafica e d'archivio, elaborati tecnici interpretativi, ...). Risulta evidente che la condivisione sul Web e l'accessibilità a questi dati (fruibili se inseriti all'interno di questi archivi aperti) è fondamentale per la conservazione dei dati e consentire quell'interoperabilità che può rendere un'indagine archeologica un processo aperto e dinamico. L'accesso a queste informazioni potrebbe infatti consentire la realizzazione di gruppi di ricerca che, a distanza, collaborano per l'interpretazione e la conoscenza di siti e manufatti archeologici. Anche in questo caso, si riscontra comunque la mancanza di standard di progettazione informatica. Fondamentale per la piena interoperabilità dei dati è ovviamente l'utilizzo di software *open-source*, sempre più diffusi e performanti.

Occorre sottolineare, che la realizzazione di archivi digitali aperti appare, soprattutto in Italia, un traguardo ancora difficile da raggiungere pienamente, a causa delle difficoltà di condividere dati grezzi, specialmente se non ancora pubblicati.

## 2.2 Il rilievo reality-based per l'archeologia: panoramica generale.

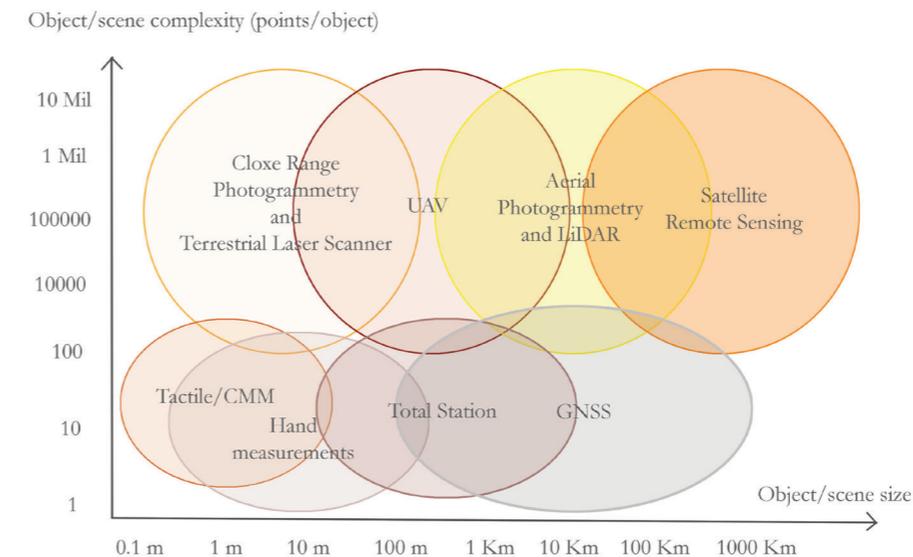
Il processo di innovazione digitale, come visto nel paragrafo precedente, sta contribuendo sotto diversi aspetti alla trasformazione nelle modalità di

conduzione delle attività di indagine archeologica.

L'innovazione più rilevante riguarda, ad ogni modo, le nuove modalità di produzione di dati metrici e semantici sul patrimonio culturale, grazie alle tecniche di rilievo *reality-based*<sup>6</sup>. I campi di applicazione dei modelli elaborati negli ultimi anni, utilizzando strumentazioni e procedure della Geomatica, sono diversi: dalla documentazione, monitoraggio ed analisi dei beni, al supporto per la produzione di ricostruzioni virtuali o per scopi di semplice visualizzazione virtuale di siti, manufatti ed oggetti. L'indiscusso vantaggio della visualizzazione in ambiente virtuale delle tre dimensioni del reale è la possibilità di trasmissione e comunicazione di una quantità maggiore di dati.

L'utilizzo di queste tecniche, per l'alta precisione delle informazioni metriche ottenibile e la descrizione colorimetrica e materica delle scene riprese, ha coinvolto i settori più diversi (da quello industriale, a quello navale, medicale,...). Nel settore archeologico, in particolare, l'interesse per la produzione di questi modelli digitali è connessa alle questioni della rappresentazione, della visualizzazione e della descrizione rigorosa di oggetti, manufatti e siti. L'attività di documentazione grafica, attraverso il rilevamento e la rappresentazione, è una pratica che, da secoli e con strumentazioni e tecniche in continua evoluzione, consente di conoscere le caratteristiche di un bene, analizzandone forme, colori, geometrie e posizioni. La ricerca di nuovi codici grafici, in grado di descrivere adeguatamente l'oggetto in relazione alle diverse finalità dell'attività di documentazione, si è infatti accompagnata al perfezionamento delle strumentazioni e delle tecniche di misura. La settorializzazione delle discipline (con la divisione tra discipline umanistiche e tecnico-scientifiche), legata all'evoluzione della tecnologia, ha comunque rappresentato per anni un ostacolo all'utilizzo diffuso e consapevole di queste nuove procedure e strumentazioni nel settore archeologico. L'attuale tendenza, invece, ad un approccio multidisciplinare nella documentazione archeologica, è frutto di una nuova consapevolezza sulle potenzialità di queste nuove tecnologie per la produzione di una documentazione completa e multi-scalare, utile alla conoscenza ed alla valorizzazione del patrimonio, oltre che alla programmazione di interventi di conservazione e restauro.

L'approccio multi-scalare<sup>6</sup> richiede che l'utilizzo di ogni tecnica venga valutato in termini di capacità intrinseche (precisione, accuratezza, forma, dimensione e posizione dell'oggetto,..) e delle possibili modalità di integrazione tra dati ottenuti da sensori e procedure diverse, in base agli obiettivi del lavoro<sup>7</sup>. L'impiego di più sensori e piattaforme rende ovviamente preferibile, dove possibile, che i risultati vengano inseriti in un comune sistema di riferimento. Questo è valido sia che si tratti di un rilievo



2.1.2 - Tecniche della Geomatica per l'acquisizione tridimensionale di dati, rappresentate in base alla dimensione della scena/oggetto ed alla complessità del modello digitale ricostruito.

a scala urbana e dei singoli manufatti (per scopi di mappatura, ricognizione o classificazione) o nel caso di scala architettonica e di dettaglio (per analisi e documentazione di manufatti) o per tutte e tre le scale.

Le tecniche utilizzate in un'indagine archeologica possono essere descritte in base alla scala del rilievo ed all'accuratezza desiderata (Fig. 2.1.2).

A scala regionale, le indagini sono principalmente orientate alla comprensione dei collegamenti tra un sito archeologico ed il suo contesto, per individuare le caratteristiche ambientali, culturali, sociali od economiche alla base del suo sviluppo e delle sue trasformazioni. Il principale prodotto di una mappatura con rilievi *reality-based*, in questo caso, è generalmente un modello DEM (*Digital Elevation Model*) da utilizzare su piattaforme GIS per condurre analisi differenziate sul territorio. Questi dati, ottenuti con sensori attivi o passivi o radar montati principalmente su satelliti o aeroplani, hanno permesso di individuare importanti siti e contesti archeologici. Le immagini da satelliti a bassa e media risoluzione, in particolare, grazie a sensori multi-spettrali, permettono di acquisire informazioni maggiori sulle caratteristiche del sottosuolo, facilitando il riconoscimento (in contesti molto vasti) di tracce archeologiche. Una risoluzione spaziale molto più elevata è ottenibile attraverso l'acquisizione di immagini o l'impiego di sensori LiDAR (*Light Detection and Ranging*) da piattaforme aeree. Questi ultimi, in particolare, registrando le diverse frequenze del segnale riflesso, sono in grado di acquisire dati e rappresentazioni sull'andamento del suolo anche in presenza di vegetazione, per la realizzazione di DTM (*Digital Terrain Model*).

A scala locale, un'indagine archeologica richiede la produzione di dati con risoluzione spaziale più elevata. L'utilizzo di piattaforme aeree per

L'acquisizione di dati a bassa quota, gli UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) o RPV (*Remote Piloted Vehicle*) su cui sono montati sensori passivi o attivi ha, negli ultimi anni, avuto un notevole sviluppo. La diffusione di questi sistemi (legata, soprattutto, ai costi che in alcuni casi piuttosto contenuti ed alla risoluzione dei dati ottenibili) ha introdotto notevoli vantaggi nella documentazione e ricognizione archeologica. In particolare, nel caso dei sistemi con sensori passivi, le prospettive più interessanti derivano dalla possibilità di condurre indagini multi-temporali a basso costo sullo stato delle strutture, documentare in maniera speditiva un'attività di scavo o restauro e compiere rapide ricognizioni utili alla foto-interpretazione archeologica. A scala locale, oltre a questi sistemi, per applicazioni terrestri sono disponibili soluzioni a Tempo di Volo (T.O.F.) a lungo raggio, che permettono addirittura di raggiungere distanze di 6 km.

Per l'acquisizione di singoli manufatti, invece, il *laser-scanning* terrestre e la fotogrammetria digitale sono le soluzioni, in genere, preferite. Un ampio approfondimento di queste tecniche è presentato nei capitoli 4 e 5. Il vantaggio principale nell'utilizzo di queste tecniche risiede nella velocità di acquisizione dei dati sul campo e l'alta risoluzione e densità spaziale dei modelli. La possibilità, con entrambe queste tecnologie o con la loro integrazione, di accoppiare ai dati metrici informazioni radiometriche e colorimetriche, ha un'enorme valore nelle indagini archeologiche. Questa può consentire, ad esempio, oltre una migliore visualizzazione del modello, di valutare a distanza di tempo le condizioni, i cambiamenti e l'usura dei materiali.

Alla scala del singolo reperto, infine, oltre alla fotogrammetria terrestre, l'utilizzo di scanner laser a triangolazione consente l'acquisizione di dati tridimensionali ad altissima risoluzione e precisione.

### 2.3 L'integrazione dei sensori per il rilievo delle strutture archeologiche.

Le sperimentazioni ed i progetti di documentazione archeologica, attraverso tecniche di rilievo *reality-based*, nell'ultimo decennio sono veramente numerosi. Limitando la discussione alla scala locale del sito e del singolo manufatto, alcuni lavori sono particolarmente rilevanti per l'attenzione alle procedure ed alle metodologie di acquisizione e trattamento dei dati. Gli esempi più interessanti adottano un approccio metodologico integrato, multi-scalare e multi-risoluzione<sup>9,10,11,12</sup>. Un approccio integrato e multi-risoluzione nell'acquisizione dei dati tridimensionali in contesti archeologici è preferibile considerando:

- la frequente eterogeneità delle superfici da acquisire. La scelta di più sensori può permettere di acquisire ogni porzione sfruttando la tecnologia ideale per i singoli casi;
- la necessità di completezza nella documentazione di un manufatto. Questo, spesso, richiede che ai dati terrestri vengano associate acquisizioni da piattaforme aeree;
- il bisogno di confrontare metricamente il dato acquisito con dati di altra natura e provenienti da sensori diversi;
- la necessità frequente di sopperire a vuoti nella documentazione precedentemente acquisita o per la presenza di evidenti errori locali del dato;
- l'esigenza di accoppiare all'accuratezza del dato metrico una buona rappresentazione colorimetrica. Questo è valido sia nel caso di prodotti elaborati per la semplice visualizzazione (dove è preponderante l'aspetto foto-realistico richiesto), sia nel caso di prodotti destinati ad ulteriori analisi materiche, sulla composizione delle superfici e sulle tecniche costruttive utilizzate.

La tipologia dei sensori da utilizzare ed, eventualmente, integrare è chiaramente funzione delle caratteristiche delle strutture da acquisire e della finalità del rilievo.

Ben diverso è ovviamente il caso di strutture archeologiche fuori terra, o scavi od ambienti ipogei, che pongono problematiche di acquisizione e trattamento dei modelli estremamente diversificate. Le peculiarità morfologiche, volumetriche ed ambientali di questi manufatti incidono fortemente sulla scelta e l'utilizzo dei sistemi disponibili.

Scelta che, come detto, dipende fortemente anche dalle finalità del rilievo, in base alla quale andrà valutata la precisione dei diversi sensori ed i sistemi ad essi, eventualmente, integrati per la riuscita del rilievo. Modelli multi-funzionali (e multi-risoluzione) possono essere, tuttavia, elaborati per diversi scopi ed in funzione delle diverse piattaforme di visualizzazione, in virtù soprattutto dello sviluppo di sistemi sempre più avanzati di fruizione, come presentato nel capitolo successivo.

**Note**

<sup>1</sup> <http://www.iccd.beniculturali.it/>

<sup>2</sup> Museum of London, Archeology Service, *Archaeological Site Manual*, Third Edition, London, 1994.

<sup>3</sup> <http://mappaproject.arch.unipi.it/mod/Index.php>

<sup>4</sup> Bartoli M., “Metodologie e strumenti di studio digitali per l’archeologia. Nuovi strumenti per la documentazione archeologica”, *Digitalia*, Vol.1, 2014.

<sup>5</sup> Remondino F., “Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse”, *DISEGNARECON*, Vol.4 n°8. 2011, pp.90-98. ISSN 1828-5961

<sup>6</sup> Guidi G., Remondino F., Russo M., Menna F., Rizzi A., “3D Modeling of Large and Complex Site Using Multi-sensor Integration and Multi-resolution Data”, *The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, M. Ashley, S. Hermon, A. Proenca, and K. Rodriguez-Echavarria (eds), 2008.

<sup>7</sup> Bitelli G., “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali”, *Atti 6a Conferenza Nazionale ASTTA*, IX-XXIV, Perugia, 2002.

<sup>8</sup> Lambers K., Remondino F., “Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications”. *Proc. Of 35th CAA (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology)*, Conference Berlin, April 2–6, 2007.

<sup>9</sup> Fiorillo F., Remondino F., Barba S., Santoriello A., De Vita C., Casellato A., “3D digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013

<sup>10</sup> Gabriele G., Remondino F., Russo M., Menna F., Rizzi A., Ercoli S., “A Multi-Resolution Methodology for the 3D Modeling of Large and Complex Archeological Areas”, *International Journal of Architectural Computing*, issue 01, volume 07, pp.39-55, 2009.

<sup>11</sup> Angelini A., Gabrielli R., “Laser scanning e photo-scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici ed archeologici”. *Archeologia e Calcolatori* 24, pp.379-394, 2013.

<sup>12</sup> Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini D., “3D survey and modeling of archaeological sites – some critical issues”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013.

CAPITOLO TERZO  
**La visualizzazione e la fruizione virtuale dei modelli digitali:  
principi, sistemi e sperimentazioni.**

**3.1 La “London Charter” ed i Principi della “Carta di Siviglia”.**

L'introduzione delle tecnologie digitali, nel campo del patrimonio culturale, ha segnato l'inizio di un processo di “virtualizzazione” della conoscenza e della conservazione dei beni. Il termine “Patrimonio Virtuale” fu definito nel 1999 da Stone, sul “*World Heritage Magazine*” dell'UNESCO, come “*the utilisation of technology for interpretation, conservation and preservation of Natural, Cultural and World Heritage*”<sup>1</sup>.

Nel 2003 la “*Charter on the Preservation of the Digital Heritage*”<sup>2</sup> definisce il patrimonio digitale come “*cultural, educational, scientific and administrative resources, as well as technical, medical and other kinds of information created digitally, or converted into digital forms from existing analogue resources*” includendo “*texts, databases, still and moving images, audio, graphics, software and web pages*”. Questo, di fatto, introduce un sistema di tutela del patrimonio digitale<sup>3</sup>.

Una delle innovazioni più importanti sul tema del patrimonio virtuale, della visualizzazione digitale e della comunicazione dei beni culturali verrà introdotta, nel 2006, con la “*London Charter for the Computer-based Visualization of Cultural Heritage*”<sup>4</sup>, concepita da Beacham, Denard e Niccolucci. La Carta definisce i principi per l'utilizzo di metodologie per la visualizzazione *computer-based* in relazione all'integrità intellettuale, l'affidabilità, la documentazione, la sostenibilità e l'accessibilità (Fig. 3.1.1). L'obiettivo principale della “Carta di Londra” è quello di spingere la comunità scientifica ad individuare ed utilizzare metodi di produzione e visualizzazione digitale che possiedano rigore scientifico ed intellettuale,



3.1.1 - I principi contenuti nella “London Charter”.

oltre a dover assicurare che i risultati possano essere compresi e valutati dagli utenti. I principi della “London Charter” riguardano:

- 1) “*Implementation*”, ovvero l’invito a recepire le indicazioni fornite dalla Carta;
- 2) “*Aims and methods*”. Lo sviluppo e l’utilizzo dei metodi di visualizzazione deve essere funzione di determinati obiettivi ed a essi coerente;
- 3) “*Research sources*”. Le fonti devono essere identificate e valutate in maniera strutturata per assicurare l’integrità intellettuale dei metodi e dei risultati della visualizzazione digitale;
- 4) “*Documentation*”. I metodi ed i risultati della visualizzazione digitale devono essere recepiti, compresi e valutati in modo appropriato dagli utenti, rispetto a scopi e contesti all’interno dei quali sono stati elaborati;
- 5) “*Sustainability*”. Si sottolinea l’importanza della definizione di strategie per assicurare la sostenibilità a lungo termine della documentazione e dei risultati di visualizzazione digitale per i beni culturali e prevenirne la perdita.
- 6) “*Access*”. Nella creazione e divulgazione delle visualizzazioni digitali, si dovrebbero tenere in considerazione le modalità con cui i risultati del lavoro possono contribuire allo studio, alla conoscenza, all’interpretazione ed alla gestione del patrimonio culturale.

Tra i settori che hanno recepito per primi queste indicazioni troviamo proprio quello archeologico, considerando la preponderante essenza visuale di questa disciplina (Cap.1). L’attenzione crescente su questi temi e gli sviluppi della “*Virtual Archeology*”, condurranno, nel 2009 a dar seguito alla “*London Charter*” con la “*Carta di Siviglia*” (Fig. 3.1.2). Scritta dai membri dell’*International Forum of Virtual Archeology*, istituito dalla SEAV (*Spanish Society of Virtual Archaeology*), la Carta vedrà la sua stesura definitiva nel 2011. La “*Carta di Siviglia*” contiene otto principi che cercano di rendere attuative le indicazioni fornite dalla “*London Charter*”:

- 1) Interdisciplinarietà;
- 2) Finalità;
- 3) Complementarietà;
- 4) Autenticità;
- 5) Rigore storico;
- 6) Efficienza;
- 7) Trasparenza scientifica;
- 8) Formazione e valutazione.

L’aspetto più innovativo della Carta è il ruolo centrale attribuito all’interdisciplinarietà nell’Archeologia Virtuale per una gestione integrata del patrimonio storico. Questo implica che i diversi attori coinvolti in un processo di documentazione ed interpretazione archeologica (architetti,

archeologici, esperti di geomatica,..) possiedano basi di linguaggio comuni, considerando l’enorme settorializzazione dei saperi e delle conoscenze. L’approccio multi-disciplinare della nuova archeologia digitale richiede, dunque, uno sforzo per l’approfondimento e la conoscenza, quanto meno, dei principi essenziali alla base di tecniche e metodologie specifiche delle diverse discipline coinvolte.

### 3.2 Virtual e Cyber-Archaeology.

Abbiamo finora parlato di “Archeologia Virtuale” o di “Archeologia Digitale”. Un’altra definizione di questi nuovi processi di produzione e visualizzazione dei prodotti digitali legati all’archeologia è quella di “*Cyber-Archaeology*”<sup>7</sup>. Se con “Archeologia Digitale” si fa riferimento, in genere, a tutta la categoria di applicazioni computerizzate per l’archeologia, non distinguendo tra strumentazioni, tecnologie o metodologie, maggiormente specifico è il riferimento agli altri termini. La distinzione più chiara tra “*Virtual and Cyber-Archaeology*” è fornita da Maurizio Forte: “*If VA has been ‘model oriented’, aimed at the 3D reconstruction of models of the past, CA is instead aimed at the development of interactive and immersive cyber worlds it is in the domain of hyperreality. I use hyperreality in its cybernetic sense, that is, a domain where the information is increased, interactive and simulated*”<sup>8</sup>.

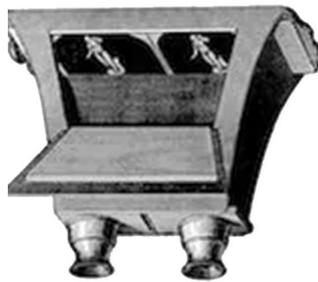
La “*Virtual Archeology*” nasce, negli anni ‘90, senza specifiche caratterizzazioni teoriche, ma con il solo obiettivo di mostrare il potenziale dell’utilizzo delle tecniche di *renderings* e delle applicazioni di Computer Grafica alla disciplina, grazie alla resa foto-realistica dei modelli tridimensionali elaborati. L’assenza di un vero contributo interdisciplinare rende il processo di costruzione dei modelli 3D, di fatto, separato da quello di interpretazione archeologica. Questo giustifica, in parte, l’iniziale atteggiamento di scetticismo della comunità scientifica nei confronti dell’utilizzo di questi strumenti nella ricerca sul materiale antico. Non erano stati ancora sviluppati, infatti, dei metodi di validazione, standardizzazione e di autenticazione scientifica di questi prodotti. Le iniziative portate avanti, nell’ultimo decennio, per colmare questa carenza metodologica e teorica si concluderanno con l’elaborazione di carte (le principali sono riportate nel paragrafo precedente), indicazioni e principi.

La “*Cyber-Archaeology*”, sviluppata negli ultimi anni, si distingue per l’uso avanzato dell’“*interaction design*” e delle piattaforme per i *computer games*, i *serious games*, gli *immersive environments* e le *virtual communities*.

Questo settore si focalizza non più sui modelli, ma sui sistemi di interazione umana con lo spazio virtuale. La “*hyperreal syndrome*”<sup>9</sup>, ovvero la paura che



3.1.2 - I principi contenuti nella “Carta di Siviglia”.



3.1.3 - Il "lenticular stereoscope" di David Brewster, 1849.

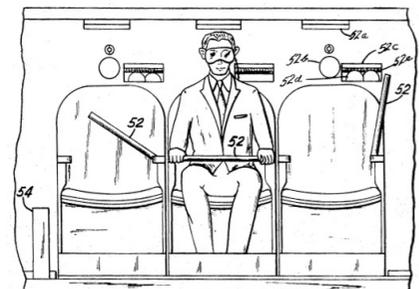
L'iper-realismo dei modelli ricostruttivi tridimensionali trasforma un dato interpretato in un'immagine unica e consolidata del passato, sembra oggi non trovare spazio nella *Cyber-Archaeology*. L'essenza del "cyber-spazio" è l'interazione, il coinvolgimento del fruitore e le risposte agli *input* forniti. Nel campo archeologico, l'interpretazione stessa avviene secondo nuovi processi. Nella *C.A.* il dato di partenza è già un dato digitale (acquisito con tecniche di *laser-scanning*, fotogrammetria digitale, *remote sensing*...), trasformato in altro dato digitale. L'interpretazione, che si esplicita nel passaggio tra il *datum* acquisito e la sua trasformazione virtuale, si tramuta in un processo di simulazione dinamica. Le critiche mosse alla "Cyber-era" ed i timori espressi da più parti sulla pericolosità di una potenziale perdita dei sistemi tradizionali di visualizzazione, analisi ed interpretazione archeologica, non tengono conto che il processo di trasformazione è ormai in atto ed è irreversibile. L'attenzione dovrebbe, invece, focalizzarsi sulla ricerca di sistemi in grado di tenere insieme le diverse metodologie di indagine e di divulgazione, considerando l'apporto tecnologico un arricchimento nel processo di conoscenza della realtà. Da questa prospettiva, l'iper-realismo (se strutturato all'interno di un processo di interpretazione/simulazione trasparente) può diventare non una minaccia alla comprensione del reale, ma la simulazione di una sua potenziale realtà.



3.1.4 - Il primo simulatore di volo, il "Link Trainer", 1929.

### 3.3 Sistemi e dispositivi per la fruizione virtuale.

La tipologia di ambiente virtuale è funzione del livello di immersione e del sistema di fruizione previsto. La progettazione di dispositivi in grado di simulare la tridimensionalità e la profondità dello spazio e, talvolta, il movimento, non è certamente una pratica recente. Dopo la realizzazione dei primi stereoscopi nell'Ottocento (Fig. 3.1.3) od il primo simulatore di volo nel 1929 (Fig. 3.1.4), la prima significativa esperienza è quella di Morton Heiling. Negli anni '50, Heiling dopo una prima sperimentazione sul "cinema esperienza" (Fig. 3.1.5) ("*Experience Theatre*"), ovvero il cinema capace di coinvolgere tutti i sensi in maniera realistica attraverso un sistema di proiezione su un grande schermo curvo, realizza il "Sensorama" (una cabina per osservare le immagini in tre dimensioni, dotata di simulatori di vento, profumi, odori e suoni) (Fig. 3.1.6). Lo stesso Heiling brevetta, inoltre, un dispositivo di visione stereoscopica ad uso individuale, il "Telesphere" (Fig. 3.1.7), nel 1960.



3.1.5 - "Experience Theatre", Morton Heiling.

Qualche anno più tardi e dopo diverse sperimentazioni<sup>10</sup>, nel 1968 Ivan Sutherland propone il primo sistema di realtà virtuale dotato di visore (Fig. 3.1.8). Il peso di questo dispositivo (definito "Spada di Damocle"), per

la prima volta collegato ad un computer e non ad una camera, costringe a tenerlo ancorato al soffitto con un braccio meccanico. Il dispositivo permette la visualizzazione delle stanze in *wireframe* e, tramite un sistema di *head tracking*, cambia la prospettiva di visione. La trasparenza delle lenti, che permette di visualizzare anche l'ambiente circostante, rende questo dispositivo un precursore dei moderni sistemi di realtà aumentata.

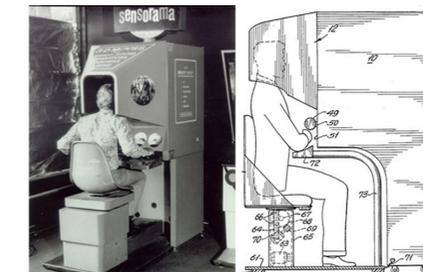
Nei laboratori del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), nel 1977, viene progettato il primo *hypermedia*, l' "Aspen Movie Map"<sup>11</sup> (Fig. 3.1.9), un tour virtuale interattivo in grado di simulare in diverse stagioni l'aspetto della città di Aspen (precursore di Google Street View). Il tour permette di visualizzare diversi scenari: la città in estate, in inverno ed in digitale, basandosi su fotografie o su modelli poligonali della città. L'interazione è resa possibile cliccando su alcune icone e visualizzando informazioni su edifici (foto storiche,...).

Da questi importanti progetti, le sperimentazioni proseguono nei decenni successivi, alla ricerca di soluzioni sostenibili in termini economici e contenute nelle dimensioni (il primo guanto "Sayre Glove" nel 1978, i dispositivi sviluppati per i *video-games* dagli anni '80, i "Virtuality Group" negli anni '90 - Fig. 3.2.1-, il primo sistema CAVE-*Cave Automatic Virtual Environment*- nel 1991 - Fig. 3.2.2,...).

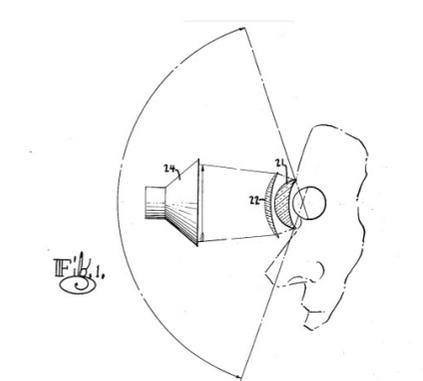
Molti dei dispositivi, tuttavia, resteranno dei prototipi, soprattutto per la difficoltà di implementare adeguate soluzioni software e hardware. L'avvento del nuovo secolo, con il miglioramento costante delle prestazioni della *Computer Technology* e lo sviluppo di soluzioni sempre meno invasive ed a basso costo, ha reso la "Virtual Reality" uno dei campi più promettenti per le possibili applicazioni in tutti i settori.

La distinzione tradizionale tra i diversi sistemi di realtà virtuale riguarda:

- ambienti non immersivi, in cui ad un *head mounted display* è sostituito un normale monitor, talvolta accoppiato ad un videoproiettore. In questi casi è in genere permessa anche una visione stereoscopica utilizzando occhiali speciali (che hanno lenti di colore diverso, rosse e verdi o rosse e blu). Recentemente sono stati introdotti degli occhiali che permettono di ottenere immagini diverse per i due occhi utilizzando otturatori a cristalli liquidi o polarizzazione della luce;
- ambienti semi-immersivi, come i cosiddetti CAVE (*Cave Audio Visual Environment*), ovvero delle piccole stanze le cui pareti, il soffitto ed il pavimento sono sostituite da schermi retroproiettanti. Alcuni sensori permettono di riconoscere il movimento dell'utente e di modificare l'ambiente tridimensionale che viene visualizzato;
- ambienti immersivi, in grado di creare una sensazione di isolamento sensoriale all'ambiente tridimensionale generato dal computer. Questo



3.1.6 - Il "Sensorama" di Morton Heiling, 1960.



3.1.7 - Il "Telesphere", Morton Heiling.



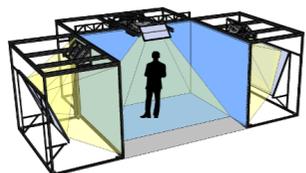
3.1.8 - La cosiddetta "Spada di Damocle", Ivan Sutherland, 1968.



3.1.9 - Aspen Movie Map, MIT, 1977.



3.2.1 - Cabinato arcade, Virtuality Group, 1991.



3.2.2 - Sistema di funzionamento del CAVE (Cave Visual Environment).

tipo di sistema si compone essenzialmente di due elementi:

- un *head mounted display* (un dispositivo di visualizzazione, come un casco), che ha il compito di creare l'isolamento e di permettere (nel caso di sistemi stereoscopici) la percezione della profondità degli spazi, le distanze ed i volumi.
- uno o più sensori di posizione, definiti "*tracker*" che rilevano i movimenti dell'utente e li comunicano al computer per la modifica dell'ambiente tridimensionale. Molti di questi sensori sono, in genere, posizionati all'interno dell'*head mounted display*, per identificare i movimenti della testa. Altri sistemi che permettono l'interazione sono, ad esempio, i "*data gloves*" (Fig. 3.2.3), le tute dotate di sensori di posizione, *Kinect*, *Leap Motion Controller* (Fig. 3.2.4), *mouse*, *joystick* o *trackball*.

In quest'ultima tipologia di ambiente, tra i dispositivi più recenti (Figg. 3.2.5 e 3.2.6) è possibile distinguere tra visori attivi (come HTC Vive, l'Oculus Rift od il Playstation VR – PS4 VR) e visori passivi (come il Google Cardboard, il Samsung Gear VR, ...). La differenza tra i due sistemi è semplice: i primi sfruttano un *Headset* con sistema di *head-tracking* collegato ad un computer, i secondi permettono la visualizzazione e l'interazione nell'ambiente virtuale tramite uno *smartphone*. Nei visori attivi un cavo HDMI permette alla sorgente video di trasmettere agli schermi collegati. In quelli passivi la sorgente è lo stesso *device*. Un visore per la "*Virtual Reality*" possiede due schermi separati dagli occhi da due lenti che permettono di ricreare l'effetto tridimensionale, mettendo costantemente a fuoco le immagini e modificandone l'angolo di proiezione per accompagnare la visuale di ciascun occhio. Poiché l'angolo visuale varia in ciascuna persona, molti di questi visori permettono di regolare la distanza delle lenti. L'ampiezza degli schermi è, inoltre, progettata per coprire l'intero spettro di visuale raggiungibile con l'occhio umano.

### 3.4 Campi di applicazione e sperimentazioni nel settore archeologico.

I settori principalmente coinvolti dallo sviluppo di applicazioni di realtà virtuale sono:

- il settore militare. Dai primi simulatori di volo per i piloti, negli anni '60, recentemente i governi hanno incentivato l'utilizzo di sistemi per l'addestramento delle forze di combattimento (composti da visori, guanti dati, tute aptiche, armi VR,..) e di sistemi di visori e telecamere montate sui carri armati per ampliare la visione dell'ambiente esterno;

- il settore aerospaziale, con, ad esempio, il progetto "*Mars 2030*" della NASA, che permetterà ad ognuno di navigare nell'ambiente simulato di Marte;
- il settore medico, soprattutto per la cura di disturbi post-traumatici da stress, per la riabilitazione o per la simulazione chirurgica;
- il settore automobilistico, per la possibilità di allestimento di *show-room* virtuali, per applicazioni di sicurezza e prevenzione degli incidenti, per la simulazione di piste e circuiti nella Formula 1,...
- il settore commerciale;
- il settore immobiliare;
- il settore dei beni culturali.

Il settore dei beni culturali è stato, negli ultimi, tra quelli maggiormente coinvolti in progetti e sperimentazioni di realtà virtuale<sup>12,13,14</sup>.

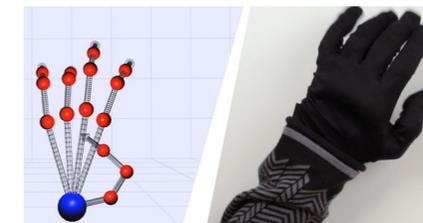
Nel settore specifico di cui qui ci occupiamo, quello archeologico, la "*Virtual Reality*" viene oggi impiegata principalmente per applicazioni di restauro o riconfigurazione virtuale, per navigazioni *web-based* o per la realizzazione di musei virtuali<sup>18</sup>.

Tra i progetti più significativi, sviluppati nel campo della "*Virtual Reality*" per l'archeologia troviamo:

- il progetto "*Villa di Livia Reloaded*" (Fig. 3.2.7), sviluppato dall'Istituto per le tecnologie applicate ai beni culturali del Consiglio Nazionale delle ricerche (Itabc-Cnr), in collaborazione con la Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma, Arcus, la rete europea V-Must (*Virtual Museum Transnational Network*) e l'azienda Evoca. Il progetto è un aggiornamento dell'originario Museo Virtuale della Via Flaminia Antica, realizzato tra il 2006 ed il 2008.

Una nuova fase del progetto, terminato nel 2013 e presentato nel 2014, prevede due principali prodotti<sup>19</sup>:

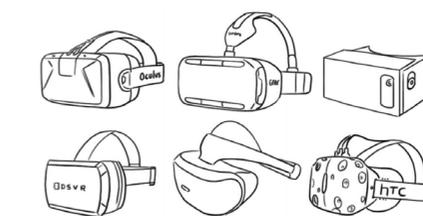
- 1) un'applicazione di realtà virtuale ed interazione naturale (con installazione nel Museo Nazionale Romano – Terme di Diocleziano);
  - 2) un'applicazione 3D online interattiva basata su WebGL, in cui i modelli tridimensionali sono interrogabili e collegati ai relativi metadati.
- Il progetto ha previsto una prima fase di acquisizione di dati tridimensionali attraverso tecniche integrate di rilievo *reality-based*, una seconda fase ricostruttiva del paesaggio e delle architetture in una dimensione diacronica ed infine lo sviluppo delle piattaforme virtuali. Nel cyber-spazio virtuale sono presenti tre diversi paesaggi: quello attuale, quello ricostruito con riferimento all'età augustea e quello "ibrido" o "interpretato" che sovrappone al contesto attuale una



3.2.3 - Esempio di *data gloves*, guanti dotati di sensori di movimento.



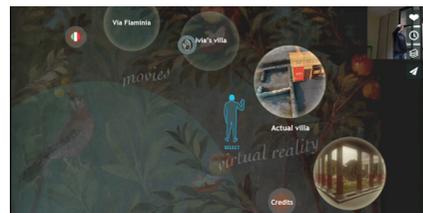
3.2.4 - Myo Armband, bracciale con *detector* di pose ed orientamento.



3.2.5 - Schemi dei principali visori attivi e passivi.



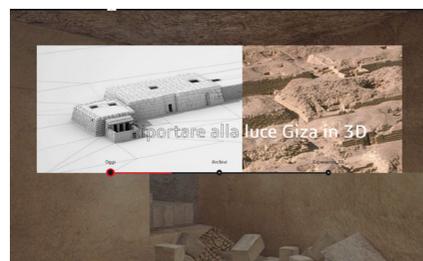
3.2.6 - VR Box, un esempio di visore passivo.



3.2.7 - Progetto "Villa di Livia Reloaded".



3.2.8 - "Digital Hadrian's Villa Project".



3.2.9 - "Giza 3D Project".

- rappresentazione stilizzata dell'ipotesi ricostruttiva. L'interazione nell'ambiente virtuale della prima piattaforma avviene con l'impiego di interfacce che utilizzano un linguaggio naturale, anziché *joystick*, tastiere,... Il corpo diventa il modo di esplorare l'ambiente virtuale proposto e di accedere alle informazioni aggiuntive proposte dalla narrazione. L'applicazione è stata sviluppata in "Unity 3D", il *Game Engine* utilizzato anche in questo lavoro, un sensore *Kinect* e *Microsoft SDK* per il tracciamento del movimento e la gestione dell'*input*.
- Il "Digital Hadrian's Villa Project" (Fig. 3.2.8) è un progetto portato avanti nella Villa Adriana a Tivoli dal *Virtual World Heritage Laboratory* della *University of Virginia* e dall' *Idia Lab* della *Ball State University* in collaborazione con diversi enti e diretto da Bernard Frischer, tra il 2007 ed il 2012. Il progetto prevede, anche in questo caso, una duplice piattaforma di fruizione, con una simulazione interattiva ed Avatar sviluppati sempre con "Unity 3D" ed un piattaforma *web-based*<sup>20</sup>. I contenuti di quest'ultima sulle strutture della villa sono piuttosto vari: fonti bibliografiche, interviste, paradata (informazioni sulle acquisizioni dei dati), immagini panoramiche, storiche, aeree, un database sui reperti, modelli 3D ricostruttivi (non interattivi) ed una mappa per la navigazione nel sito.
- Il "Giza 3D project"<sup>21</sup> (Fig. 3.2.9), promosso dalla *Harvard University* e *Dassault Systèmes*, è stato finanziato a partire dagli anni 2000. Il progetto ha due principali obiettivi: quello di creare un archivio digitale per tutta la documentazione sul sito archeologico e sviluppare un ambiente immersivo tridimensionale con navigazione in *real-time* dei modelli digitali (elaborati attraverso l'utilizzo anche di planimetrie, note, immagini storiche,...). La navigazione nell'ambiente virtuale, grazie a schermi parabolici e visori, è disponibile anche per la visualizzazione online<sup>22</sup>.
- Il progetto "MayaArch3D"<sup>23</sup> (Fig. 3.3.1), realizzato tra il 2011 ed il 2014 dall'unità *3DOM (3D Optical Metrology)* della Fondazione Bruno Kessler di Trento, in collaborazione con la *University of New Mexico*, *ETH Zurich*, *University of California*, *Merced* e *Graphitech*. Il progetto, oltre all'acquisizione di dati tridimensionali con un approccio integrato multi-sensore e multi-risoluzione del sito Maya di Copan (in Honduras), ha previsto la realizzazione di una piattaforma online per la fruizione dei modelli multi-risoluzione elaborati.

- Il progetto "Etruschi in 3D"<sup>24</sup> (Fig. 3.3.2), realizzato tra il 2009 ed il 2014 dall'unità *3D Optical Metrology* della Fondazione Bruno Kessler, in collaborazione con *Historia*, la Soprintendenza per i Beni Archeologia dell'Etruria Meridionale, *Graphitech*, *No Real*, *Art-Test* e il *Cineca*. Le tecniche di rilievo *reality-based* sono state impiegate nel progetto per l'acquisizione di diverse tombe etrusche (Tarquinia, Cerveteri, Vulci, Chiusi, Perugia...). Dai modelli foto-realistici sono stati realizzati dei tour virtuali che permettono di navigare all'interno di questi ambienti raramente accessibili.
- La valorizzazione e la fruizione dell'anfiteatro romano di Catania, iniziato nell'ambito del progetto "Ricerca & Competitività" 2007/2013 per le Regioni della convergenza DICET – INMOTO – ORCHESTRA e proseguito negli anni successivi. Il progetto<sup>25</sup> (Fig. 3.3.3) è stato realizzato dal *Catania Living Lab* in collaborazione con il team del Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimediale (LAIM) dell'istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Un primo *virtual tour*, disponibile anche online<sup>26</sup>, permette la navigazione nelle foto equirettangolari (anche nel settore inaccessibile), anche con visori VR. Dai modelli *reality-based* acquisiti è stato possibile ipotizzare un'ipotesi ricostruttiva della fase Giulio-Claudia, ri-contestualizzando l'intero complesso nel tessuto urbano. Alcune sperimentazioni di fruizione interattiva *web-based* (anche per visori VR) che mostrano il modello poligonale (proveniente dai rilievi *reality-based*) e l'ipotesi ricostruttiva sono oggi disponibili<sup>27</sup>.
- L'ultimo recente progetto di valorizzazione del patrimonio archeologico riguarda la riapertura del cantiere della Domus Aurea (Fig. 3.3.4). Il progetto, promosso dalla Soprintendenza Speciale per il Colosseo e l'area archeologica centrale di Roma con *Electa*, prevede due percorsi di visita in dodici tappe e due principali installazioni. Oltre ad una proiezione emozionale nella galleria d'ingresso, a breve sarà disponibile la fruizione virtuale (attraverso visori attivi VR) della ricostruzione della Sala della volta Dorata.



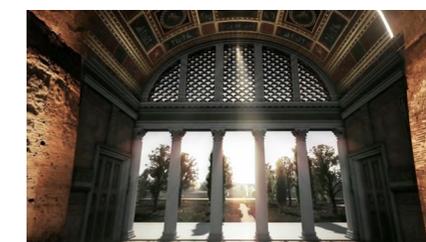
3.3.1 - "Maya 3D Project".



3.3.2 - Il Progetto "Etruschi in 3D".



3.3.3 - Il progetto per il Teatro di Catania.



3.3.4 - "Domus Aurea Project".

## Note

<sup>1</sup> Brusaporci S., Trizio I., “La Carta di Londra e il Patrimonio Architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione”, *SCIRES-IT, SCIENTIFIC RESEARCH and Information Technology*, Vol 3, Issue 2, pp.55-68, 2013. e-ISSN 2239-4303, DOI 10.24423/i22394303v3n2p55.

<sup>2</sup> [http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL\\_ID=17721&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL_ID=17721&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)

<sup>3</sup> Ch'ng E., Gaffney V., *Visual Heritage in the Digital Era*, Henry (Eds), 2013.

<sup>4</sup> <http://www.londoncharter.org/introduction.html>

<sup>5</sup> Beacham R., Denard H., Niccolucci F., “An Introduction to the London Charter”, *The e-volution of Information Communication Technology in Cultural Heritage: where hi-tech touches the past: risks and challenges for the 21st century*, in Ioannides M. et al. (eds), Short papers from the joint event CIPA/VAST/EG/EuroMed, Budapest: Archaeolingua, 2006.

<sup>6</sup> <http://www.arqueologiavirtual.com/carta/>

<sup>7</sup> Forte M., “Introduction to Cyber-Archaeology”, *Cyber-Archaeology*, Maurizio Forte (Eds), BAR International Series 2177, 2010.

<sup>8</sup> Forte, M., “Cyber archaeology: A post-virtual perspective”. *Between humanities and the digital*. Svensson & Goldberg (Eds).Cambridge, MA: MIT Press. 2015.

<sup>9</sup> Forte, M., “Cyber archaeology: A post-virtual perspective”, *Op.cit.*, pag.9.

<sup>10</sup> Sutherland I., “The Ultimate Display”, *Proceedings of IFIP Congress*, 1965. pp. 506-508.

<sup>11</sup> <http://www.naimark.net/writing/aspen.html>

<sup>12</sup> Gonizzi Barsanti S., Caruso G., Micoli L., Covarrubias Rodriguez M., Guidi G., “3D visualization of Cultural Heritage artefacts with Virtual Reality devices”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W7, 2015.

<sup>13</sup> Ben Kacyra O., “CyArk 500. 3D Documentation of 500 Important Cultural Heritage Sites”, in *Photogrammetric Week '09*, Dieter Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 2009.

<sup>14</sup> Jimenez Fernández-Palacios, B., Morabito, D., Remondino, F., “Access to complex reality-based 3d models using virtual reality solutions”. *Journal of Cultural Heritage*, in press, 2016.

<sup>15</sup> Sanchez M., “Propuesta de reubicación mediante reconstrucción virtual. Caso de estudio:Retablo Mayor de San Francisco de San Esteban de Gormaz (Soria)”, *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLÓGICA 2.0'*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016

<sup>16</sup> Sanchez M., “Propuesta de reubicación mediante reconstrucción virtual. Caso de estudio:Retablo Mayor de San Francisco de San Esteban de Gormaz (Soria)”, *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLÓGICA 2.0'*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016

<sup>17</sup> Agugiario G. , Remondino F., Girardi G., von Schwerin J., Richards-Rissetto H., De Amicis R., “A web-based interactive tool for multi-resolution 3D models of a Maya archaeological site”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W16, 2011.

<sup>18</sup> Melchora J., Martínez J., Bonafe C., Cabrera A., “La virtualización en el Museo Arqueológico de Burriana (Castellón – España). *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLÓGICA 2.0'*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016.

<sup>19</sup> Baldassari G. L., Demetrescu E., Pescarin S., Eriksson J., Graf H., “Behind Livia’s Villa: A case study for devolution of Large Scale Interactive ‘in-site’ to ‘on-line’Application. *Design, User Experience and Usability*. Second International Conference, DUXU 2013, Part IV, pp. 238-247.

<sup>20</sup> <http://vwhl.soic.indiana.edu/villa/mission.php>

<sup>21</sup> Der Manuelian P. “Giza 3D: Digital Archaeology and Scholarly Access to the Giza Pyramids: The Giza Project at Harvard University.” *Proceedings of DigitalHeritage*, France, October 28 - November 1, 2013, vol. 2: 727-734.

<sup>22</sup> <http://giza3d.3ds.com/#discover>

<sup>23</sup> <http://mayaarch3d.org/>

<sup>24</sup> <https://3dom.fbk.eu/projects/etruschi-3d>

<sup>25</sup> Malfitana D., Gabellone F., Leucci G., Cacciaguerra G., Ferrari I., Giuri

F., De Giorgi L., Pantellaro C., “Integrated methodologies for a new reconstructive proposal of the Amphitheatre of Catania”, *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLÓGICA 2.0'*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016.

<sup>26</sup> <http://itlab.ibam.cnr.it/index.php/teatro-di-catania/>

<sup>27</sup> <http://www.itlab.ibam.cnr.it/vranficatania/vrtour.html?xml=tour.xml>

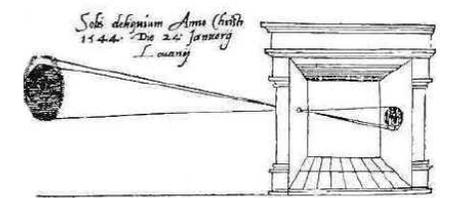


Parte Seconda  
Rilievo, Modellazione Digitale e Fruizione Virtuale

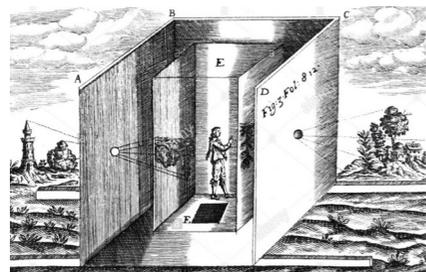
CAPITOLO QUARTO  
**Tecniche image-based.**  
**La tecnica fotogrammetrica: principi teorici,**  
**acquisizione ed elaborazione dei dati.**

**4.1 La tecnica fotogrammetrica: fondamenti teorici e definizioni**

La tecnica fotogrammetrica, benché basata sui principi ed i metodi della prospettiva sviluppati a partire dal Rinascimento (Brunelleschi, Piero della Francesca, Leon Battista Alberti e Leonardo da Vinci), trova le sue origini in un antico dispositivo, la camera oscura (Figg. 4.1.1 a 4.1.3). Dagli inizi del Novecento, questa tecnica subirà importanti e continui sviluppi, legati alla fotogrammetria aerea ed alle esigenze belliche di mappatura delle aree nemiche durante la prima guerra mondiale. L'evoluzione più rilevante si registra, tuttavia, a partire dagli anni '70, con l'introduzione dei calcolatori elettronici e la nascita della fotogrammetria analitica. Il termine "analitico" indica, in questo caso, la possibilità di un comportamento non ideale della camera, considerando distorsioni e disallineamenti tra pellicola ed obiettivo che possono essere corretti per via computazionale. Questo, di fatto, introduce l'utilizzo delle camere non metriche a costi molto più accessibili ed implica l'introduzione di nuovi sistemi di orientamento dei fotogrammi e di estrazione delle coordinate supportati dai computer, che riducono drasticamente i tempi di queste operazioni. Gli anni '90, infine, segnano l'inizio della fotogrammetria digitale e dell'estrazione automatica di misure tridimensionali da immagini. Con l'introduzione dei sensori CCD o CMOS, in grado di generare una griglia di campionamento dell'immagine solidale con l'ottica, si introduce, di fatto, un sistema di riferimento interno alla camera da poter utilizzare in fotogrammetria. La tecnica fotogrammetrica è una tecnica *image-based*, che consente di

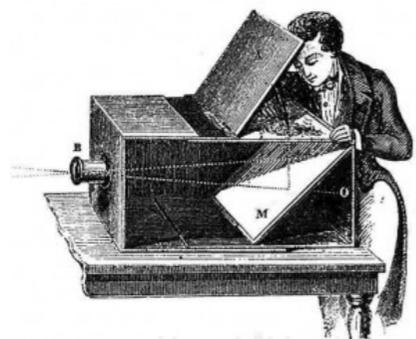


4.1.1 - Principio di funzionamento di una camera oscura. Illustrazione di Rainer Geinma Frisius, 1544



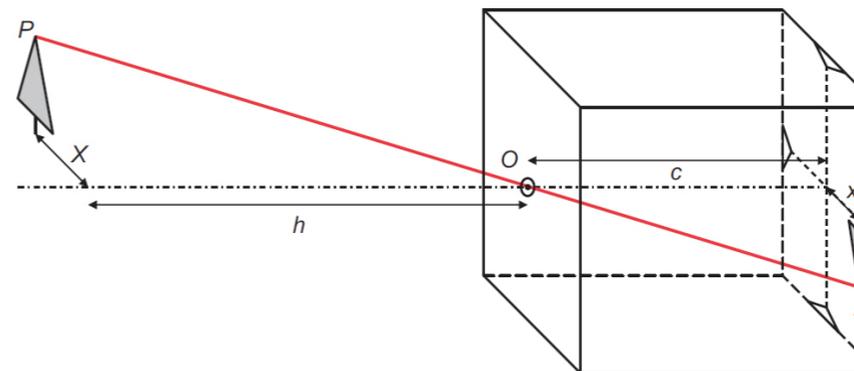
4.1.2 - Camera oscura, Athanasius Kircher, 1671.

acquisire informazioni metriche e semantiche accurate da immagini. Come nella visione umana, riprendendo un oggetto da diverse posizioni relative (parallasse) è possibile derivare informazioni tridimensionali della scena catturata nell'area di sovrapposizione delle immagini. Attraverso relazioni geometriche, possono essere derivate le coordinate nello spazio oggetto dei punti visibili in almeno due immagini, inserite in un opportuno sistema di riferimento nel piano di coordinate immagine. Il modello matematico usato in fotogrammetria per descrivere la geometria di un fotogramma è la prospettiva centrale. Forma e posizione dell'oggetto vengono ricostruiti determinando, per ogni immagine, la direzione spaziale di ogni raggio proiettivo che, collegando i punti P' nello spazio immagine e il corrispondente centro della prospettiva O', definiscono la posizione dei punti P nello spazio oggetto. L'intersezione di almeno due raggi proiettivi omologhi, appartenenti a diverse immagini, determinano la posizione tridimensionale di un punto dello spazio oggetto (Fig. 4.1.4).



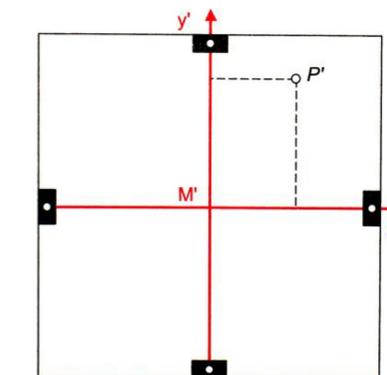
4.1.3 - Una camera oscura da disegno degli inizi dell'800.

Questo modello geometrico (Fig. 4.1.5) è derivato dal modello della camera oscura (o camera stenopeica). I parametri fondamentali sono la posizione del centro della prospettiva O' rispetto al sistema di coordinate immagine della camera e la distanza principale c tra il centro O' ed il piano di proiezione. Il punto P nello spazio oggetto, il centro della prospettiva O' e la sua immagine P' sul quadro di proiezione giacciono sulla stessa retta, definita "retta di collinearità".



4.1.5 - Modello della camera oscura.

I raggi proiettivi che partono dai diversi punti nello spazio oggetto e attraversano il centro della prospettiva, definiscono un fascio di raggi o "stelle proiettive" che materializzano un'immagine più piccola e capovolta sul quadro di proiezione. Questo rapporto di riduzione è definito dalla scala dell'immagine. Il fattore di scala m si definisce come un rapporto tra la distanza h dall'oggetto e la distanza principale c o alternativamente tra la distanza dall'oggetto X in una direzione parallela al piano immagine e la corrispondente distanza nello spazio immagine x'. Questo valore è particolarmente rilevante nella definizione del dettaglio e dell'accuratezza della misurazione fotogrammetrica, considerando che ogni errore di misurazione viene moltiplicato nello spazio oggetto in base al fattore di scala. Non potendo comunque determinare un fattore unico per l'intero fotogramma si definisce un fattore medio riferito ad una determinata area.

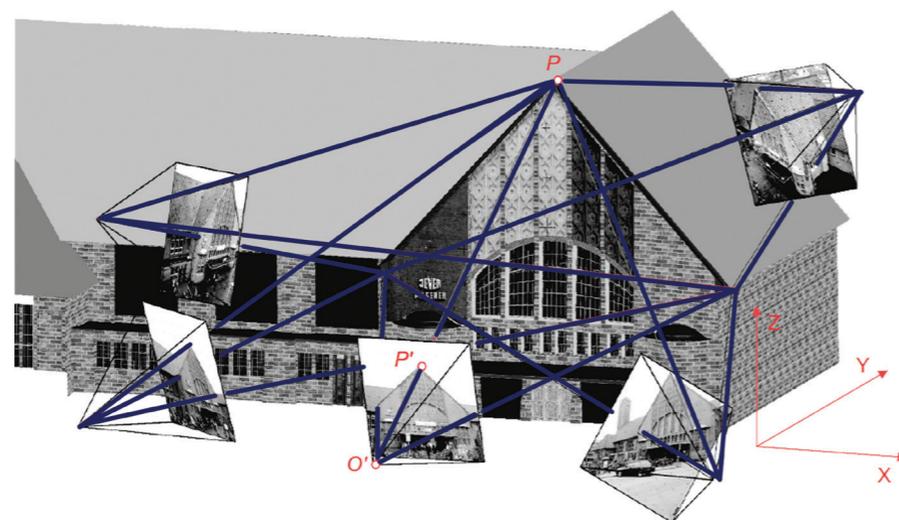


4.1.6 - Sistema di riferimento delle coordinate immagine.

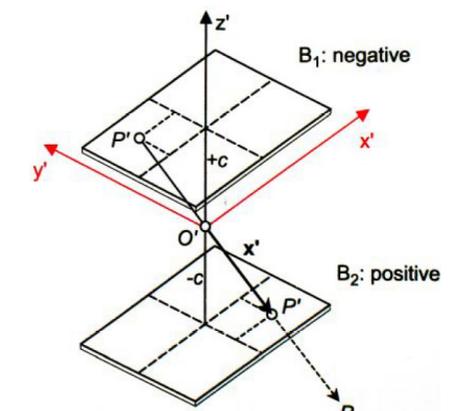
$$m = h/c = X/x' \quad (4.10)$$

#### 4.1.1 Coordinate immagine e risoluzione delle immagini digitali.

La tecnica fotogrammetrica consente di acquisire misure indirette delle tre dimensioni del reale attraverso misure eseguite su uno o più fotogrammi nello spazio bidimensionale dell'immagine. A questo scopo, il reale viene discretizzato secondo elementi geometrici vettoriali. Il vettore elementare è quello nullo, ovvero il punto, individuabile attraverso una terna di coordinate in un sistema di riferimento cartesiano. In fotogrammetria le coordinate oggetto dei punti vengono determinate attraverso le coordinate omologhe sulle immagini attraverso le equazioni di collinearità, descritte in seguito (Par. 4.3). La definizione di un sistema di coordinate proprio del fotogramma (Fig. 4.1.6) è fondamentale, dunque, per la costruzione di un quadro di proiezione.



4.1.4 - Principio della misurazione fotogrammetrica.



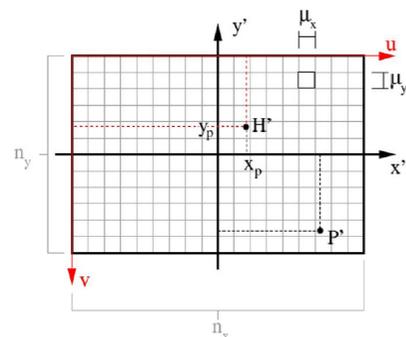
4.1.7 - Sistema di riferimento delle coordinate fotocamera.

Il Punto Principale di Autocollimazione (PPA), detto anche punto principale, è definito dall'intersezione dell'asse ottico con il piano dell'immagine. Definendo una terna cartesiana  $O'x'y'z'$  (Fig. 4.1.7), rappresentativa del sistema immagine, il piano  $x'y'$  è parallelo al piano immagine e l'asse  $z'$  coincide con l'asse ottico, è ad esso ortogonale e rivolto verso la parte negativa. Il Punto Principale coincide con il punto  $M'$ . La distanza del centro della prospettiva  $O'$  dal piano dell'immagine è detta *distanza principale*  $c$ . Il piano focale è invece il piano su cui viene proiettata l'immagine dello spazio oggetto. Nella fotogrammetria digitale, la misura delle coordinate immagine è sostituita dall'identificazione dei pixels all'interno della matrice. Le immagini digitali sono costituite da matrici bidimensionali, ovvero righe e colonne che identificano la radiometria dei pixels (*picture elements* che compongono l'immagine *raster*) corrispondenti. Ogni pixel è univocamente definito da due numeri interi ed indicati in genere con le lettere "u" e "v", che rappresentano la posizione riga ("u") e colonna ("v") all'interno della matrice. Per convenzione (Fig. 4.1.8), l'origine di questo sistema è localizzato in alto a sinistra dell'immagine digitale, con l'asse  $x$  parallelo al lato superiore ed orientato verso destra e l'asse  $y$  parallelo al lato sinistro ed orientato verso il basso. Il punto fiduciale (FC) è nelle immagini digitali definito dal pixel centrale con coordinate:

$$x_{FC} = \frac{width\ image}{2} \quad y_{FC} = \frac{height\ image}{2} \quad (4.11)$$

con *width* e *height image* misurate in pixels.

Un parametro che definisce la qualità di un'immagine digitale è la sua risoluzione. La *risoluzione radiometrica* di un'immagine digitale è legata alla quantizzazione, ovvero alla conversione da parte del sensore dell'intensità del segnale luminoso in un numero intero, associato a ciascun pixel dell'immagine. Se l'intensità è trasformata in 256 numeri, corrispondenti a 256 livelli cromatici compresi tra 0 (nero) e 255 (bianco), verrà restituita un'immagine in scala di grigio o a palette di colore. Nelle immagini digitali a tre canali, ogni colore è il risultato della sovrapposizione dei tre livelli fondamentali Rosso, Verde, Blu (RGB o true color), oppure Giallo, Ciano e Magenta (YCM). La radiometria è rappresentata quindi dalla somma dei tre numeri che esprimono le saturazioni dei tre colori fondamentali. La *risoluzione geometrica* è invece legata alle dimensioni del pixel e influisce grandemente sulla quantità dei dettagli di una scena. È legata all'operazione di campionamento o discretizzazione ed indica la quantità di pixel contenuti in una unità di lunghezza,



4.1.8 - Sistemi di riferimento di coordinate immagine per fotocamere digitali.

espressa in genere in dot per inch (dpi) o punti per pollice (2.54 cm).

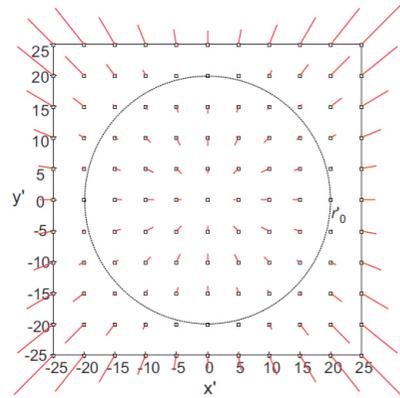
$$dpi = \frac{n^\circ\ pixel}{pollici} \quad (4.12)$$

#### 4.1.2 Parametri di orientamento interno ed esterno.

I parametri di orientamento interno (*interior orientation IO*) descrivono il modello geometrico interno della camera. Nel modello geometrico della camera oscura (Par. 4.1), la posizione del centro della prospettiva  $O'$ , attraversato dai diversi raggi proiettivi, è un riferimento essenziale. L'orientamento interno definisce la posizione relativa del centro della prospettiva riferito al sistema fisso di coordinate immagine, oltre alla sua divergenza, dovuta alle distorsioni dell'immagine, rispetto ad una proiezione centrale ideale. Il più importante parametro di orientamento interno è la distanza principale  $c$  tra il piano immagine ed il centro della prospettiva. Questi parametri vengono stimati nella procedura di calibrazione geometrica della camera (Par. 4.4). I parametri di orientamento esterno (*exterior orientation EO*) esprimono, invece, la posizione spaziale e l'orientamento della camera in un sistema di riferimento globale. In particolare, la posizione del centro della prospettiva  $O'$  e tre angoli di rotazione definiscono l'orientamento del sistema di coordinate immagine rispetto ad un sistema globale. Questi parametri vengono indirettamente calcolati, una volta misurate le coordinate di punti dell'oggetto ben identificabili in un sistema fisso di coordinate globali. La lunghezza del vettore direzione è infatti inizialmente sconosciuta ed ogni punto nello spazio oggetto che giace sulla stessa linea di questo vettore genera lo stesso punto nel sistema immagine. Ogni punto dello spazio oggetto può dunque essere univocamente determinato nello spazio immagine solo intersecando il raggio con una seconda direzione spaziale od un piano.

#### 4.1.3 Distorsioni.

Le distorsioni alterano l'aspetto delle immagini, tanto più quanto l'oggetto è lontano dall'asse ottico. Questa deformazione influisce sulla qualità della misura, incidendo sulla stima della posizione dei punti sul piano di proiezione. In particolare, la *distorsione radiale* è lo spostamento di un punto sull'immagine dalla sua posizione ideale e corrisponde ad una variazione dell'angolo tra il raggio e l'asse ottico (Fig. 4.1.9). I parametri  $K_i$ , chiamati Parametri Aggiuntivi (APs), vengono usati per definire la distorsione radiale  $\Delta r'$  e sono generalmente espressi in forma polinomiale di ordine dispari:



4.1.9 - Effetti della distorsione radiale simmetrica.

$$\Delta r' = k_1 r'^3 + k_2 r'^5 + k_3 r'^7 \quad (4.13)$$

Questo polinomio, dove  $r'$  è la distanza radiale, è noto come *curva caratteristica* a cui viene associata la distanza principale caratteristica  $c$ .  $r'$  è definito da:

$$r' = \sqrt{(x'_p - x'_o)^2 + (y'_p - y'_o)^2} \quad (4.14)$$

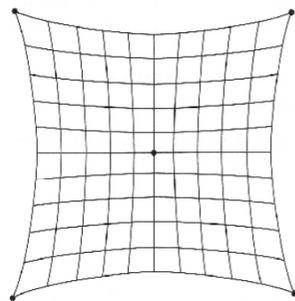
in cui:

$x'_p, y'_p$  sono le coordinate immagine di P.

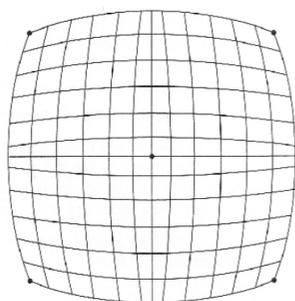
$x'_o, y'_o$  sono le coordinate immagine del Punto Principale.

La distorsione radiale si scompone poi secondo i due assi  $x'$  e  $y'$ :

$$\Delta x'_{radial} = x' \frac{\Delta r'}{r'} \quad \Delta y'_{radial} = y' \frac{\Delta r'}{r'} \quad (4.15)$$



Positiva



Negativa

4.2.1 - Deformazioni di un reticolo a maglia quadrata con distorsioni radiali simmetriche positive (teleobiettivi) e negative (obiettivi grandangolari).

$\Delta r'$  varia con la lunghezza focale, mentre i coefficienti  $K_i$  sono correlati principalmente alle aberrazioni delle lenti e solo legati ad una distorsione prevalentemente positiva. In genere il termine  $K_1$  è quello che ha maggiore incidenza. Questo tipo di distorsione (Fig. 4.2.1) può essere sia positiva (a “cuscino”) oppure negativa (a “barile”).

La distorsione radiale è generata da tutti gli obiettivi fotografici, anche se in misura diversa. Gli obiettivi che discorrono meno sono i cosiddetti normali (con angolo di campo di circa 55-60°). Agli obiettivi grandangolari (con angoli di campo maggiori) sono legate a distorsioni tipicamente negative o a barile, mentre ai teleobiettivi (con angoli di campo inferiori) quelle positive o a cuscino.

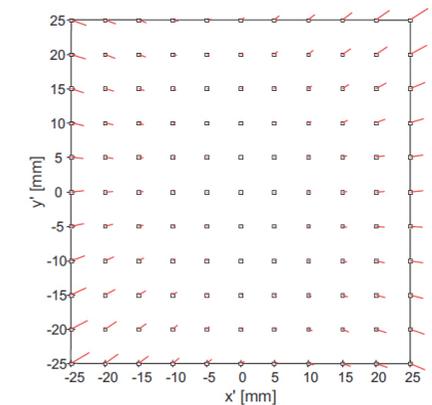
Un altro tipo di distorsione è la *decentering distortion* (Fig. 4.2.2), rappresentata dai parametri  $P_i$  e legata questa volta non ad una aberrazione delle lenti ma ad un difetto nell'allineamento dei gruppi ottici. E' molto frequente negli obiettivi commerciali con messa a fuoco non fissa o con zoom. I parametri  $P_i$  di *decentering distortion* sono correlati alle coordinate del Punto Principale ( $x_p, y_p$ ). Questa distorsione è in genere di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla distorsione radiale e varia con la messa a fuoco. La correlazione tra  $P_1$  e  $P_2$  e  $x_p$  e  $y_p$  aumenta all'aumentare della lunghezza focale, diventando critica nel caso di teleobiettivi. Tale correlazione può essere contenuta tramite un *array 3D* di punti e l'adozione di angoli più convergenti in fase di acquisizione delle immagini<sup>1</sup>.

L'*affinity* (Fig. 4.2.3) e la *shear distortion* descrivono invece le deviazioni dal sistema di coordinate immagine rispetto all'ortogonalità e alla scala uniforme degli assi delle coordinate.

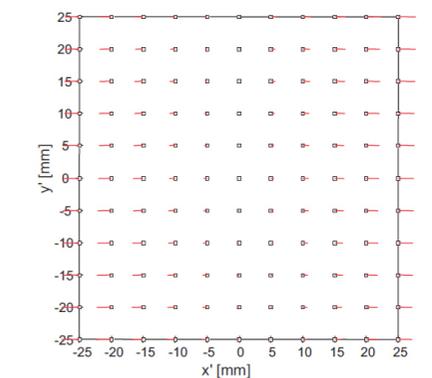
## 4.2 Pianificazione ed acquisizione delle immagini digitali.

La qualità delle immagini è il fattore che principalmente condiziona l'intero processo di ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. La pianificazione delle operazioni, la scelta del sensore e della strategia di acquisizione delle immagini<sup>2</sup> influenzano, dunque, fortemente il risultato finale. La qualità delle immagini digitali è funzione di diversi fattori:

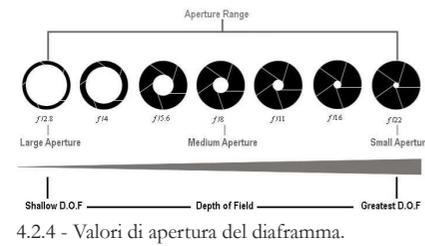
- La risoluzione del sensore. Le camere digitali catturano la luce su un sensore elettronico, che codifica le informazioni in una matrice di valori di luminanza. La risoluzione dei sensori in commercio per applicazioni di fotogrammetria terrestre, ovvero il numero di pixels che compongono l'immagine digitale, è ormai di milioni di pixels per le tre categorie principali, compatte, *reflex* e *bridge*.
- L'obiettivo. Oltre al sensore, è fondamentale la scelta della tipologia di obiettivo da utilizzare. Gli obiettivi sono composti da sistemi di lenti che si spostano reciprocamente in base alla distanza di messa a fuoco e possono essere a focale fissa o variabile (le camere compatte e le *bridge* montano obiettivi a focale variabile). La distanza focale e le dimensioni del sensore definiscono l'angolo di campo, ovvero l'angolo visivo inquadrato dall'obiettivo. Le tre categorie principali di obiettivi sono:
  - i grandangoli, con focali dai 18 ai 35 mm
  - gli obiettivi standard, con focali dai 38 a 50 mm
  - i teleobiettivi, con focali superiori a 90 mm.
- Il controllo delle impostazioni di scatto. Alcune impostazioni della fotocamera possono incidere in modo significativo sulla qualità dell'immagine digitale. In particolare:
  - La messa a fuoco, automatica o manuale.
  - Le modalità di esposizione dell'immagine. La quantità di luce che arriva al sensore, e che consente di acquisire l'immagine, è funzione di due fattori, ovvero l'apertura del diaframma (Fig. 4.2.4) e la velocità di otturazione. L'apertura del diaframma regola la quantità di luce che attraversa l'obiettivo. La velocità di otturazione è il tempo di esposizione



4.2.2 - Effetti della *decentering distortion*.



4.2.3 - Effetti della *affinity distortion*.



alla luce del sensore. Questi due fattori, se non ben bilanciati, possono generare un'immagine sotto-esposta o sovra-esposta (Fig. 4.2.5).

- Il bilanciamento dei bianchi (Fig. 4.2.6). L'illuminazione della scena da acquisire può influire sulla qualità delle gamme cromatiche acquisite, che possono discostarsi in maniera significativa da quelle reali. Alcune camere possono consentire una correzione ed un dosaggio dei colori presenti nell'immagine.

- La sensibilità (ISO) del sensore alla luce. Più alto è questo valore, maggiore risulterà la sensibilità alla luce. L'aumento dell'ISO è necessario in caso di ambienti con scarsa illuminazione. Tuttavia, un valore elevato amplifica il segnale ricevuto dal sensore ed il rumore in esso presente.

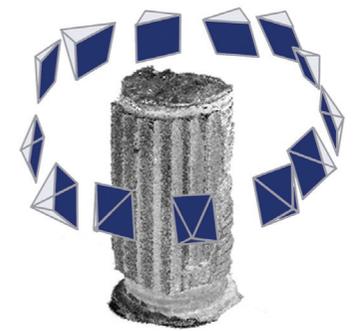
- La nitidezza. Il grado di nitidezza delle immagini può influire significativamente sulla ricerca delle corrispondenze dei punti omologhi e dipende dalla messa a fuoco e dalla velocità di otturazione (in genere si scelgono valori superiori all'inverso della lunghezza focale utilizzata). Il livello di nitidezza andrebbe controllata per ogni immagine acquisita durante una campagna di rilevamento.
- Il contrasto. Un buon grado di contrasto è fondamentale per la lettura di tutti gli elementi architettonici, cercando di evitare zone d'ombra o parti sovra-esposte. La correzione di questi difetti è spesso possibile anche in una fase successiva. Il contrasto è funzione dell'apertura del diaframma e della velocità di otturazione.
- L'illuminazione. Le condizioni di illuminazione della scena da acquisire, che dovrebbero risultare quanto più omogenee possibili, possono influire in modo significativo sulla qualità delle *texture*. Per acquisizioni all'aperto, la presenza di un cielo nuvoloso offre le migliori possibilità di ottenere *texture* omogenee. Il controllo dell'esposizione è altresì fondamentale in questi casi e soprattutto nelle acquisizioni ad assi convergenti. Accade, infatti, frequentemente di dover acquisire alcune immagini dello stesso oggetto da posizioni con illuminazione differente o contro-luce. In questo caso è possibile correggere l'esposizione in fase di post-produzione o di utilizzare in fase di acquisizione valori stabili e medi di esposizione per tutte le immagini.



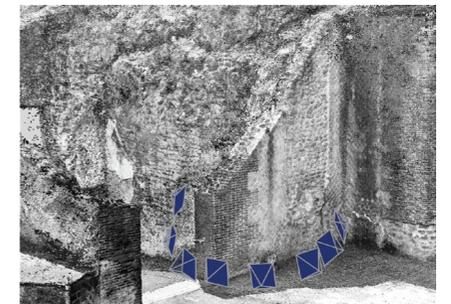
4.2.6 - Bilanciamento del bianco.

La qualità dell'immagine non è, ad ogni modo, l'unico fattore in grado di incidere significativamente sull'intero processo di ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. Come già detto, la tecnica fotogrammetrica consente di derivare le coordinate dello spazio oggetto dei punti visibili

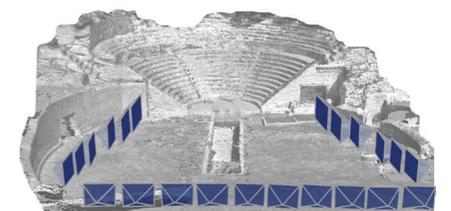
in almeno due immagini, inserite in un sistema di riferimento nel piano di coordinate immagine. Pianificare l'acquisizione delle immagini è fondamentale, in relazione alle caratteristiche morfologiche ed ambientali dell'oggetto da rilevare. La complessità geometrica e volumetrica del sito, manufatto od oggetto, e le condizioni di accessibilità, visibilità ed illuminazione dell'ambiente condizionano la scelta della modalità di acquisizione delle immagini. La tecnica di ripresa fotografica da utilizzare è dunque funzione delle relazioni geometriche da stabilire tra le immagini in fase di calibrazione ed orientamento delle camere, basate sulle caratteristiche dell'oggetto (dimensioni, complessità, condizioni ambientali). La distanza di acquisizione, la posizione e l'orientamento della camera e la quantità di immagini dovrebbero essere pianificati in modo da garantire che, almeno nel più generale caso teorico, l'oggetto venga ripreso nella sua interezza ed occupi gran parte della fotografia (per sfruttarne al massimo la risoluzione e poter estrarre quante più informazioni tridimensionali da ogni immagine). La complessità è, ad ogni modo, definita soprattutto dalla quantità di piani dominanti che lo compongono. La presenza, in genere, di diversi piani di profondità dell'oggetto, porta a prediligere punti di vista obliqui rispetto ai piani principali per acquisire un numero maggiore di informazioni tridimensionali. Possono definirsi dei casi generali ed ideali per diversi oggetti. Per quelli di piccola dimensione o manufatti liberi da particolari occlusioni (che consentano l'acquisizione anche a diverse quote), la configurazione ideale per le acquisizioni di diversi piani di profondità è quella mostrata in figura 4.2.7. Le posizioni e gli orientamenti della camera devono consentire, in questo caso, di coprire l'intero volume spostandosi intorno all'oggetto e ruotando rispetto al suo ideale baricentro. Nel caso più generale di manufatti definiti da un solo piano dominante, possiamo definire due tecniche di ripresa principali, frequentemente utilizzate insieme in una campagna di rilevamento. In una ripresa "ad assi convergenti" (Fig. 4.2.8), viene mantenuta costante la distanza dall'oggetto e le immagini vengono acquisite girando intorno all'oggetto, mirando al suo baricentro e posizionando l'asse di mira a circa 45° rispetto al piano dominante. In questi casi, comunque, è preferibile avere anche immagini scattate in modo parallelo al piano dominante, per garantire una qualità migliore della *texture*. In presenza di più piani dominanti, è fondamentale assicurarsi che siano presenti immagini di raccordo tra più blocchi di riprese convergenti. Quando invece siamo in presenza di manufatti con un piano dominante e l'obiettivo è la restituzione di un disegno di facciata e non la precisa rappresentazione di tutti i piani di profondità degli elementi decorativi, è preferibile adottare una ripresa "ad assi paralleli" (Fig. 4.2.9), ovvero



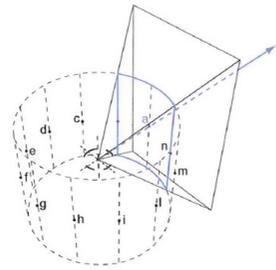
4.2.7 - Schema di acquisizione per oggetti di piccola dimensione o manufatti liberi da occlusioni.



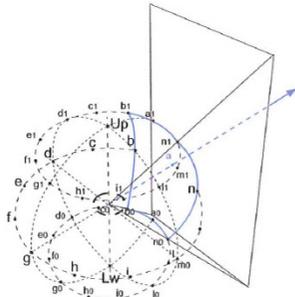
4.2.8 - Schema di acquisizione ad assi convergenti.



4.2.9 - Schema di acquisizione ad assi paralleli.



4.3.1 - Ripresa fotografica cilindrica.



4.3.2 - Ripresa fotografica sferica.

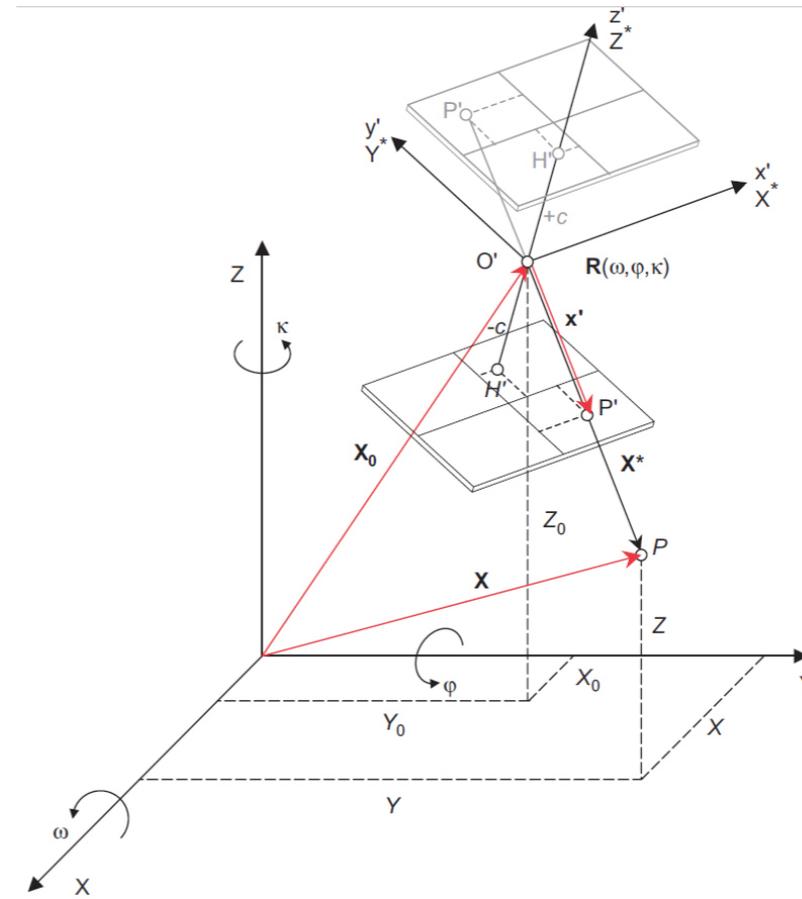


4.3.3 - Esempio di testa panoramica.

mantenendo il piano della camera parallelo al piano dominante. Questa tecnica, come abbiamo visto, offre l'orientamento ideale per l'estrazione delle *texture*, ma va ad ogni modo sempre associata a delle riprese ad assi convergenti. La distanza dall'oggetto per le acquisizioni e la sovrapposizione tra le immagini sono funzione della risoluzione finale scelta per il rilievo. L'ultima tecnica di acquisizione, per la restituzione di informazioni spaziali è la "ripresa panoramica" (Figg. 4.3.1 e 4.3.2). Questa tecnica permette l'acquisizione di informazioni spaziali da una sola posizione, restituite poi su uno sviluppo panoramico. Per questo tipo di ripresa è indispensabile l'utilizzo di un treppiedi e una testa panoramica (Fig. 4.3.3). Nonostante in commercio siano ormai disponibili diversi modelli (alcuni per foto panoramiche ed altre per foto sferiche, che consentono la rotazione solo sull'asse orizzontale o sui due assi), le più diffuse hanno tutte caratteristiche comuni. Una testa panoramica è in genere dotata di una rondella che consente di selezionare l'angolo di rotazione e, dunque, il numero di scatti in base alla lunghezza focale e l'angolo di campo dell'obiettivo utilizzato. Alcune piastre a slitta permettono il preciso posizionamento del punto nodale della camera, attorno al quale avviene la rotazione durante le riprese. Questo consente di evitare errori di parallasse che potrebbero impedire l'allineamento e lo *stitching* delle immagini. Una manopola, consente la rotazione della camera sull'asse verticale ed un'altra slitta permette di posizionare il centro della camera in asse con il centro del treppiedi.

### 4.3 Le equazioni di collinearità.

Ogni punto nello spazio immagine corrisponde ad una direzione spaziale materializzata dal raggio che congiunge il centro di proiezione ed il punto nello spazio oggetto. In ogni immagine viene così definito un fascio di raggi generati allo stesso tempo e passanti per il centro della prospettiva. Dall'intersezione tra raggi provenienti da diverse immagini è quindi generata una rete. Utilizzando il metodo della triangolazione dei raggi proiettivi, diverse immagini possono essere orientate simultaneamente, calcolando la posizione tridimensionale dei punti nello spazio oggetto. L'orientamento esterno di un'immagine è definito da sei parametri, tre traslazioni e tre rotazioni. Questi parametri descrivono i gradi di libertà e la posizione rispetto ad un sistema di coordinate  $O'x'y'z'$  (Fig. 4.3.4). In particolare, il vettore  $X_0$  definisce la posizione del centro di presa  $O'$  nel sistema  $OXYZ$ , mentre le tre rotazioni  $\omega, \varphi, \kappa$  indicano gli angoli tra il sistema di coordinate immagine ed il sistema di coordinate oggetto.



4.3.4 - Parametri di orientamento esterno tra sistemi di riferimento oggetto e immagine.

La matrice che risulta dal prodotto delle singole matrici di rotazione moltiplicate in ordine inverso è:

$$R = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \quad (4.16)$$

La posizione di  $P'$ , proiezione del punto  $P$  su un fotogramma, può essere ottenuta considerando le componenti di un vettore  $X$ , così definito:

$$X = X_0 + X^* \quad (4.17)$$

Il centro della prospettiva  $O'$ , il punto immagine  $P'$  ed il punto oggetto  $P$  giacciono sulla stessa retta, definita "retta di collinearità". Noti i parametri di orientamento interno ed esterno, le equazioni dei punti appartenenti ad una retta di collinearità sono:

$$X = X_0 + \lambda R x' \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

dove  $\lambda$  è un valore incognito che varia per ogni punto oggetto. Con una sola immagine, sarà definibile unicamente la distanza O'P ma non la posizione spaziale di P. Conoscendo, invece, i parametri di orientamento interno ed esterno, otterremo un sistema di tre equazioni in quattro incognite. L'univoca determinazione della posizione spaziale di P è allora possibile quando la direzione O'P interseca o un'altra retta di collinearità oppure un piano. Invertendo l'equazione precedente ed introducendo le coordinate del Punto Principale e i correttivi per le distorsioni radiali si otterrà:

$$X' - X'_o - \Delta x' = \frac{1}{\lambda} R^{-1} (X - X_o) \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} x'_p - x'_o - \Delta x' \\ y'_p - y'_o - \Delta y' \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Trasportando i termini correttivi delle distorsioni radiali e le coordinate del Punto Principale, dividendo poi la prima e la seconda equazione per la terza si ottengono le equazioni di collinearità (4.22), che definiscono una relazione univoca tra il centro della prospettiva, il punto nello spazio immagine ed il punto nello spazio oggetto:

$$\begin{aligned} x'_p &= x'_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x' \\ y'_p &= y'_o - c \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (4.22)$$

Il processo che in fotogrammetria consente di ricavare le coordinate 3D dei punti è chiamato "restituzione" (*plotting*). Come abbiamo detto, tutte le misurazioni effettuate su immagini digitali fanno riferimento a un sistema di coordinate pixels, mentre le equazioni di collinearità vengono applicate ad un sistema metrico di coordinate immagine. Conoscendo

le dimensioni del sensore e dei pixels, attraverso una trasformazione di affinità è possibile convertire i pixels in coordinate immagine. Una equazione di collinearità viene scritta per ogni punto nello spazio immagine misurato in almeno due immagini (*tie o homologues points*). La soluzione a questo sistema di equazioni si ottiene con il metodo iterativo di compensazione ai minimi quadrati (*Gauss-Markov model*) che richiede una approssimazione iniziale dei parametri di orientamento esterno sconosciuti. Questo metodo, chiamato *Bundle Adjustment*, fornisce non solo la determinazione di questi parametri ma anche il loro grado di affidabilità e la precisione. Se sono poi sconosciuti anche i parametri di orientamento interno insieme alle distorsioni, il metodo prende il nome di *Self-calibrating Bundle Adjustment*. In questo caso i parametri di orientamento interno e le distorsioni prendono il nome di Parametri Addizionali (*Additional Parameters, APs*). Il metodo iterativo dei minimi quadrati calcola le correzioni da apportare al sistema iniziale che rende minima la somma dei quadrati degli scarti. Per l'univoca risoluzione del sistema, è necessario che la configurazione della rete (*network configuration* – ovvero la configurazione geometrica dell'insieme di immagini e punti) sia legata ad un "datum" esterno, in grado di fornire i sette parametri della trasformazione conforme spaziale (*similarity transformation* – 3 traslazioni, 3 rotazioni e una scala). Questo problema è generalmente risolto attraverso l'introduzione di almeno tre *Ground Control Points (GCP)*, ovvero punti di controllo ben visibili e distribuiti all'interno dell'immagine. In questo modo, partendo dalle posizioni approssimate, i raggi proiettivi possono ruotare e traslare in modo da intersecare al meglio i raggi omologhi, passando per i *control points*. Alternativamente, è possibile risolvere il sistema di equazioni fornendo almeno una misura di distanza sull'oggetto per ricostruirne la scala corretta.

#### 4.4 La calibrazione geometrica della camera.

I parametri di orientamento interni vengono stimati con la procedura di calibrazione della camera, mentre quelli esterni con quella di orientamento delle immagini. Negli approcci di *Structure-from-motion*, generalmente queste due procedure non sono separate. La calibrazione di una camera prevede che siano noti la lunghezza focale, il Punto Principale e una serie di Parametri Addizionali (APs). Questa procedura si fonda sul modello della collinearità (4.22) e ne estende la portata, considerando gli errori sistematici dell'immagine e riducendo la geometria del sensore ad un modello prospettico. Il modello fisico di Brown<sup>4</sup> esprime le correzioni  $\Delta x$  e  $\Delta y$  da applicare alle coordinate immagine:

$$\begin{aligned} \Delta x &= -\Delta x_0 + \frac{\bar{x}}{f} \Delta f + \bar{x} S_x + \bar{y} a + \bar{x} r^2 k_1 + \bar{x} r^4 k_2 + \bar{x} r^6 k_3 \\ &\quad + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + (2x^{-2} + r^2) P_1 + 2\bar{x} \bar{y} P_2 \\ \Delta y &= -\Delta y_0 + \frac{\bar{y}}{f} \Delta f + \bar{x} a + \bar{y} a + \bar{y} r^2 k_1 + \bar{y} r^4 k_2 + \bar{y} r^6 k_3 \\ &\quad + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + (2y^{-2} + r^2) P_2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

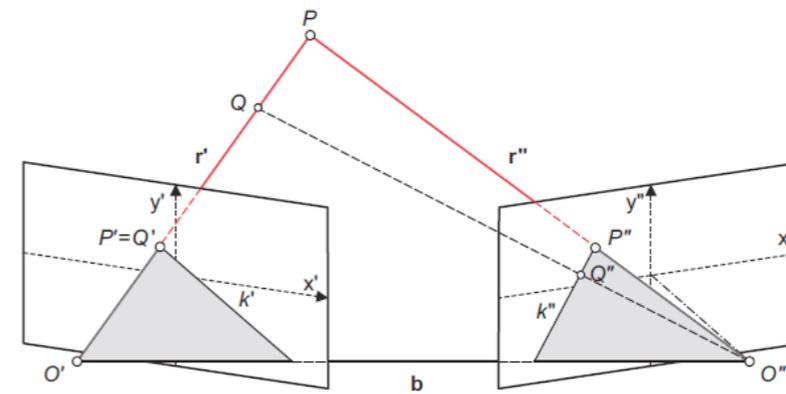
In cui:

- $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f$  sono gli elementi di correzione dei parametri di orientamento interno
- $K_i$  i parametri di *radial distortion*
- $P_i$  i parametri di *decentering distortion*
- $S_x$  fattore di scala in x (*affinity factor*) per compensare eventuali pixel non quadrati
- $a$  fattore di taglio (*shear factor*) per deformazioni geometriche e di non ortogonalità dei pixel.

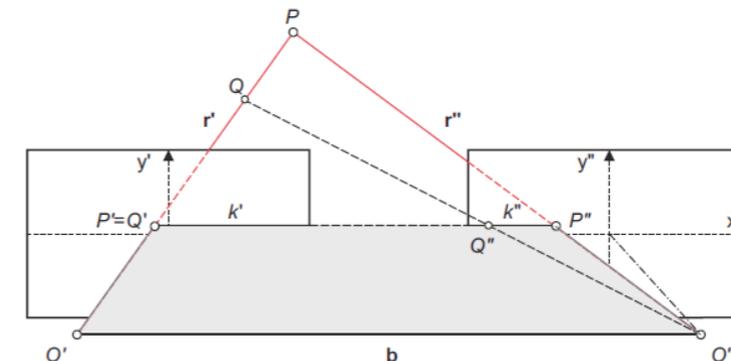
Questo sistema non è lineare e implica che per la sua risoluzione vengano scritte un numero di equazioni sovrabbondanti da risolvere in maniera iterativa, minimizzando lo scostamento tra la soluzione approssimata e quella esatta. Geometricamente questo indica un progressivo aggiustamento dei fasci di raggi che vengono proiettati sull'immagine. In modo pratico, una calibrazione può essere effettuata in vari modi. Un primo metodo consiste nel posizionare una serie di targets circolari, misurandone la posizione con strumenti diversi (ad es. un teodolite). Una alternativa è il posizionamento in un angolo di pannelli con stampate matrici di punti a cui poter attribuire valori noti. In ultimo è possibile calibrare la camera grazie a dei pannelli piccoli svincolati che contengono set di target di cui sono note le coordinate relative (rispetto al pannello), che consentono di operare anche sul campo. La procedura di calibrazione può inoltre essere effettuata grazie a dei pacchetti di software in commercio (PhotoModeler, Agisoft Lens...), che permettono di stimare i parametri interni della camera nella cosiddetta *Test Field Calibration*. Attraverso una serie di immagini scattate alla griglia di test, con procedure automatiche, vengono stimati l'orientamento della camera ed i parametri di calibrazione. Tra questi i più importanti sono quelli relativi alla distorsione radiale ( $k_1, k_2, k_3$ ), mentre quelli relativi alla *decentering distortion* e alla *affinity distortion* possono essere considerati nulli ed esclusi.

#### 4.5 Orientamento e calibrazione multi-immagine: Bundle Adjustment.

L'orientamento multi-immagine ed, in particolare, di una stereo-coppia è regolato da precise regole geometriche. Una stereo-coppia di immagini è definita da due immagini che riprendono l'oggetto da misurare. La geometria di presa per una stereo-coppia è generalmente quella ad assi paralleli, mentre con immagini troppo convergenti non è possibile osservare le immagini in stereoscopia. Per ottenere misure tridimensionali occorre conoscere almeno il sistema di riferimento globale o relativo di una delle due camere. Il modello fotogrammetrico è dunque la porzione di spazio oggetto ricoperta da una o più stereo-coppie orientate. Nella geometria epipolare<sup>5</sup>, in una stereo-coppia il piano passante per i due centri della prospettiva ed un punto  $P_i$  nello spazio oggetto si definisce "piano epipolare". Le rette epipolari  $k'$  e  $k''$  sono quelle generate dall'intersezione del piano con le due immagini. Queste rette saranno convergenti se la stereo-coppia è ad assi convergenti (Fig.4.3.5) oppure parallele nella direzione della base di presa  $b$  se le immagini sono parallele (Fig.4.3.6).



4.3.5 - Geometria epipolare per una stereo-coppia ad assi convergenti.



4.3.6 - Geometria epipolare per una stereo-coppia ad assi paralleli.

Il piano epipolare è intersecato inoltre dai raggi ottici  $r'$  e  $r''$  che congiungono il centro della prospettiva con un punto nello spazio oggetto nei punti  $P'$  e  $P''$ . Per ogni punto  $P'$  giacente su una retta epipolare  $k'$  l'omologo  $P''$  si troverà sulla retta epipolare  $k''$ . Questa proprietà è particolarmente importante nel processo di ricerca di punti omologhi nella fase di *image-matching*. La geometria epipolare stabilisce dunque una relazione geometrica tra due immagini dello stesso oggetto. Una volta nota questa geometria, è possibile stabilire un importante vincolo: per ogni punto in una immagine, il suo omologo sulla seconda immagine si troverà sulla corrispondente retta epipolare. Questo vincolo riduce il problema della ricerca di corrispondenze da una ricerca sulle due dimensioni dell'intera immagine ad una ricerca su una dimensione lungo esclusivamente la retta epipolare. Le rette epipolari vengono utilizzate in fotogrammetria per la ricostruzione delle posizioni di presa ad assi paralleli, nella cosiddetta "normalizzazione dei fotogrammi". Le immagini vengono ricampionate considerando che ogni riga deve essere parallela alla base di presa. Vengono con questo metodo ricreate le condizioni di stereoscopia dell'occhio umano, eliminando le parallassi verticali. Il procedimento di correlazione viene applicato così ad una sola dimensione (avendo i punti omologhi la stessa ordinata immagine), riducendo l'area di azione degli algoritmi di correlazione (Par.4.6). Tra le procedure di allineamento analitico di una stereo-coppia, quello maggiormente utilizzato nei software di fotogrammetria digitale è il *Bundle Adjustment* (triangolazione a stelle proiettive), che consente di orientare simultaneamente  $n$  immagini risolvendo un unico sistema di equazioni di collinearità e vincoli aggiuntivi. Questo sistema iperdeterminato permette di ottenere gli orientamenti esterni delle immagini grazie alla linearizzazione delle equazioni nell'intorno dei valori approssimati delle incognite (Metodo dei minimi quadrati – *Least Square Method*). Se nel sistema vengono inclusi anche gli orientamenti interni e le distorsioni, il metodo viene chiamato *Self-Calibrating Bundle Adjustment* e questi parametri definiti Parametri Addizionali (*Additional Parameters*, APs). Le coordinate dei punti omologhi delle immagini e i rispettivi fasci di raggi (stelle proiettive) sono le osservazioni per la compensazione. Almeno tre *Control Points* sono richiesti per eliminare il difetto di rango del sistema di equazioni. Partendo dalle posizioni approssimate, i fasci di raggi vengono traslati e ruotati in modo da migliorare l'intersezione con i *Control Points*. Nel *Bundle Adjustment*, come funzioni delle osservazioni, possono essere stimate le incognite ovvero:

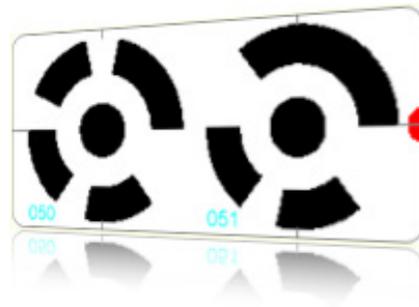
- 1) I parametri di orientamento esterno e coordinate oggetto dei *Tie Points* (conoscendo l'orientamento interno con  $k=1$ , nell'approccio chiamato *block invariant*)

- 2) I parametri di orientamento esterno ed interno e coordinate oggetto dei *Tie Points* (non conoscendo l'orientamento interno con  $k=1$ , nell'approccio chiamato *block invariant*)
- 3) I parametri di orientamento esterno ed interno e coordinate oggetto dei *Tie Points* (non conoscendo l'orientamento interno con  $k=n$ , nell'approccio chiamato *frame invariant*)

Dove  $k_i$  è l'indice della camera (prevedendo la possibilità di utilizzo di camere diverse o diversi obiettivi e focali).

La determinazione delle coordinate oggetto dei *Tie Points* può avvenire orientando alcune coppie di immagini e poi applicando ai modelli relativi le equazioni di collinearità. Attraverso una trasformazione conforme spaziale (*similarity transformation*, Helmert a sette parametri) le coordinate vengono dunque roto-traslate e riferite ad un sistema globale dell'oggetto. I parametri di orientamento interno da conoscere sono spesso semplicemente la focale e le dimensioni fisiche del sensore nelle camere digitali. Questo metodo consente di stimare, individuare ed eliminare possibili errori grossolani nelle osservazioni e stimare la precisione teorica del calcolo. Per quanto riguarda invece la configurazione della rete di immagini (*network configuration*)<sup>6</sup>:

- Affinchè la configurazione della rete risulti geometricamente forte, garantendo un rumore basso ed errori di misurazione limitati, è necessario definire un rapporto tra la base di presa delle immagini  $B$  (*baseline*) e la distanza media  $D$  tra la camera e l'oggetto da acquisire. Questo rapporto  $B/D$  per la fotogrammetria terrestre dovrebbe mantenersi intorno al valore di 0,5.
- In generale, possiamo affermare che maggiore è la base di presa tra le stereo-coppie (meglio se convergenti piuttosto che ad assi paralleli) e la distanza di queste dall'oggetto, più accurate risulteranno le coordinate dell'oggetto. Allo stesso tempo però, una base di presa molto larga potrebbe creare problemi nell'estrazione automatica dei punti omologhi, considerando anche che l'accuratezza di una rete aumenta all'aumentare delle immagini in cui un punto appare. La risoluzione di un'immagine influisce poi nell'accuratezza del calcolo delle coordinate, soprattutto se i punti misurati sono punti naturali più che targets artificiali.



4.3.7 - Esempi di targets codificati.

#### 4.6 Corrispondenze tra immagini.

Alcuni metodi di orientamento, tra cui il metodo del *Bundle Adjustment*, richiedono il riconoscimento e la collimazione di un certo numero di punti omologhi per l'orientamento delle immagini. Le procedure di collimazione dei punti possono essere di tipo:

- 1) Manuale: il riconoscimento e la collimazione dei punti omologhi viene effettuata da un operatore. Questo metodo è dispendioso in termini di tempo ma molto affidabile.
- 2) Manuale assistita e semiautomatica: i punti vengono collimati sfruttando la geometria epipolare (Fig. 4.3.7). In particolare, vengono collimati i punti che giacciono su entità lineari dell'oggetto, intersecate perpendicolarmente dalle linee epipolari oppure vengono utilizzati target artificiali codificati che vengono semiautomaticamente riconosciuti. Se il target è codificato (Fig. 4.3.8), occorre fornire solo una sua posizione approssimata e la sua dimensione per il suo riconoscimento automatico.
- 3) Semiautomatico con l'utilizzo di tecniche di correlazione lineare tra le immagini (metodi di *image-matching*). In questo caso, sfruttando le proprietà radiometriche dell'intorno del punto che viene riconosciuto e collimato sulla prima immagine, viene riconosciuto dal software l'omologo nella seconda immagine.
- 4) Automatica: viene usata per l'individuazione sia di target codificati che di punti naturali.

Abbiamo visto nel paragrafo 4.5 che il vincolo imposto dalla geometria epipolare facilita enormemente la ricerca di corrispondenze tra immagini, ma che, al tempo stesso, è necessario stimare questa geometria. Due principali classi di algoritmi offrono diverse soluzioni a questo problema. Partendo dall'ipotesi che i punti della scena devono essere visibili da due punti di vista e che le regioni corrispondenti delle immagini sono simili, abbiamo<sup>7</sup>:

- *Correlation-Based Methods*. Questi metodi rappresentano l'approccio più tradizionale e sono basati su una supposizione di continuità. Si suppone che la maggior parte della finestra di ricerca sull'immagine inquadri una porzione di un elemento di superficie planare e continuo. Quindi punti adiacenti nella finestra sull'immagine rappresenteranno punti contigui nello spazio oggetto. Gli elementi da correlare vengono così ricercati all'interno di una piccola finestra di pixels nell'immagine di riferimento, che viene comparata statisticamente con una di uguale dimensione nella seconda immagine. Il criterio di similarità è una misura della correlazione tra le due finestre: viene generata una corrispondenza che massimizza il



4.3.8 - Misura manuale assistita con linea epipolare (in rosso), dopo aver collimato il punto nella prima immagine.

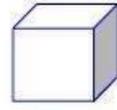
criterio di similarità o minimizza quello di differenza, entro certi valori. La deviazione tra le due finestre, una volta trovate le corrispondenze, viene computata e chiamata "disparità": Questi metodi sono molto efficaci ed accurati nel caso di immagini con buone *texture*, pur lavorando con finestre di piccole dimensioni. Diversi problemi nella ricerca di queste corrispondenze sorgono nei casi di aree di occlusione, aree prive di *texture* o se la superficie non rispetta il criterio di continuità.

- *Feature-Based Methods*. In questo caso, la ricerca delle corrispondenze avviene identificando delle caratteristiche (*features*) sull'immagine e la misura della similarità è la distanza tra i descrittori di queste caratteristiche. Questi metodi richiedono due fasi successive: nella prima fase, delle caratteristiche vengono individuate ed associate a dei descrittori per la loro rappresentazione; nella seconda, le caratteristiche corrispondenti vengono determinati attraverso misure di similarità che coinvolgono i descrittori. Partendo dalla prima fase, possono essere individuati:
  - Punti di interesse. Queste caratteristiche possono essere estratte basandosi su diverse procedure: metodi *contour-based*, metodi *signal-based* o metodi basati sul *template fitting*. Il vantaggio dell'utilizzo di questi metodi basati sull'estrazione di punti di interesse è correlato alla loro accuratezza, stabilità, controllabilità e velocità.
  - Bordi. In questo caso, l'estrazione delle *features* è basata sul cambiamento dell'intensità rappresentato dal gradiente dell'immagine. Questo approccio può essere poco efficace nel caso in cui la caratteristica lineare da estrarre è frammentaria.
  - Regioni. Si considerano qui aree omogenee delle immagini che hanno variazioni di intensità sotto una certa soglia.

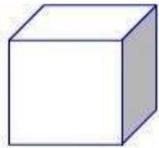
La configurazione della *baseline* tra le immagini da correlare può influire significativamente sulla ricerca di queste caratteristiche. Per superare questo problema, negli ultimi anni diversi algoritmi basati sui punti di interesse sono stati proposti. Questi approcci consentono di trovare corrispondenze sull'intera immagine anche quando la geometria epipolare non è ancora conosciuta. Tra questi, il descrittore di *features* SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) è in grado di identificare delle caratteristiche che non variano a seguito di traslazione, rotazione, variazione di scala o per alcuni cambiamenti di illuminazione delle immagini. L'altro importante descrittore è il SURF (*Speeded-Up Robust Feature*), che offre risultati simili al caso precedente ma con tempi di elaborazione inferiori.

### 4.7 La ricostruzione 3D.

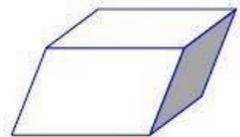
Abbiamo precedentemente affrontato la questione della correlazione tra immagini, legata ai principi della geometria epipolare. L'altro tema fondamentale è quello della ricostruzione della posizione tridimensionale dei punti dello spazio oggetto, ricostruendo la geometria di una scena catturata da due o più immagini. Differenti approcci (Fig.4.3.9) sono possibili, in questo caso, in base alla conoscenza o meno di alcuni parametri ed impostazioni della camera.



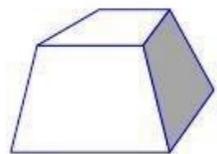
EUCLIDIAN



METRIC



AFFINE

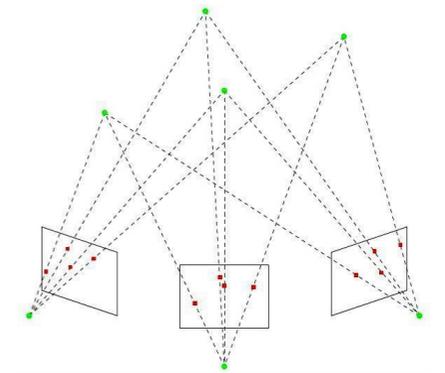


PROJECTIVE

- **Ricostruzione 3D Euclidea.** Questa è la procedura più semplice, che consente di ricostruire la posizione tridimensionale dei punti dello spazio oggetto conoscendo la posizione e l'orientamento della seconda camera rispetto alla prima ed entrambe sono internamente calibrate. La posizione della camera e l'orientamento della camera rispetto ad un sistema di coordinate assoluto non è in genere noto a-priori e non ricostruibile. Con delle equazioni proiettive è possibile riportare la ricostruzione della struttura della scena ad una trasformazione euclidea.
- **Ricostruzione 3D metrica.** Simile al caso precedente, questa volta la distanza tra le camere è sconosciuta. In questa procedura è dunque noto l'orientamento relativo della prima camera e la direzione lungo la quale si dovrebbe trovare la seconda camera. Il fattore di scala è sconosciuto, ma può essere ricostruito assegnando una misura di distanza tra punti della scena.
- **Ricostruzione 3D affine.** In questo caso, sono sconosciuti anche i parametri interni della camera. Allo stesso tempo, però, se i punti di fuga di tre direzioni indipendenti della scena possono essere individuati nelle immagini, possono essere utilizzate delle equazioni per la ricostruzione affine della scena.
- **Ricostruzione 3D proiettiva.** Nell'ultimo caso, non è noto nessun parametro di configurazione della camera. Questo approccio è tipico delle applicazioni di *Structure from Motion* e la scena è ricostruibile solo dopo una trasformazione proiettiva arbitraria, che non permette, ad ogni modo, di determinare le dimensioni della scena.

*Structure from Motion* si riferisce alla condizione in cui le immagini vengono catturate da una singola camera in movimento. Questo processo richiede che vengano registrati contemporaneamente le posizioni relative della camera e la ricostruzione tridimensionale della scena. Se assumiamo che la scena è statica, possiamo riconoscere diversi problemi. Innanzitutto, il problema

della corrispondenza, ovvero il riconoscimento di quali elementi di un'immagine corrispondono a quelli dell'immagine successiva. Il secondo problema riguarda, invece, la determinazione del movimento della camera per la ricostruzione della scena tridimensionale. Infine, il problema della segmentazione, dovuto all'acquisizione di oggetti in movimento (estranei alla scena), che devono essere rimossi. Il problema della corrispondenza, nei processi di *Structure from Motion*<sup>8</sup>, è immediatamente risolto attraverso una ricostruzione 3D proiettiva, che consente la ricostruzione della scena anche in assenza di informazioni sui parametri di calibrazione della camera. La necessità di avere però un modello in scala della scena catturata richiede la conoscenza di questi parametri e dunque una ricostruzione 3D metrica. Questo problema è in genere risolvibile attraverso una *Self-Calibration*. Una volta noti i parametri di orientamento interno, possono essere ricavati anche quelli di orientamento esterno e dunque le posizioni delle camere durante l'acquisizione. La conoscenza di questi parametri consente, infine, di ricostruire la struttura sparsa della scena. La ricostruzione della scena può diventare di tipo euclideo se vengono poi introdotte alcune distanze note nella scena. In molti approcci di *Structure from Motion*, il problema della ricostruzione tridimensionale è risolto con il metodo del *Bundle Adjustment*, che consente di ottimizzare la struttura tridimensionale della scena e, contemporaneamente, di stimare i parametri esterni della camera. In un caso ideale, conoscendo già la posizione della camera e dei punti dello spazio oggetto, la loro riproiezione sul piano immagine le caratteristiche dei punti estratti dovrebbe perfettamente coincidere. Nel caso reale, però, questo non avviene. Il *Bundle Adjustment* (Fig. 4.4.1) cerca di minimizzare questo errore di riproiezione, adattando iterativamente la posizione dei punti 3D ed i parametri esterni della camera.



4.4.1 - Il metodo del Bundle Adjustment.

### 4.8 Generazione del modello poligonale e texturizzazione.

Una volta ottenuta una nuvola di punti sparsa o densa (utilizzando, in questo caso, procedure automatiche di "*Dense Image Matching*") in grado di ricostruire la scena tridimensionale, questa può essere trasformata in un modello poligonale<sup>9</sup>. Le procedure di *meshing* variano in base ai dati di *input*. Nel caso di una nuvola di punti sparsa, viene adottata una procedura interattiva, definendo prima linee, poi poligoni ed infine superfici. Con nuvole di punti dense e strutturate la procedura è, invece, diretta. Nel caso di nuvole non strutturate il processo non è immediato. In questo caso, uno dei sistemi più comuni di *meshing* adotta l'algoritmo di Delaunay (o

4.3.9 - Approcci per la ricostruzione della posizione tridimensionale dei punti nello spazio oggetto.

simile), che prevede la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano, l'identificazione di quelli con distanza minima ed il loro collegamento (Par. 5.3.4). Una volta determinate le connessioni, il set di potenziali triangoli viene riproiettato nello spazio 3D e topologicamente verificato. Per nuvole di punti generate con processi ed algoritmi di *Structure from Motion*, la fase di *meshing* si attua su una nuvola di punti unica e non strutturata. A differenza delle nuvole di punti non strutturate ottenute da alcuni sistemi a scansioni laser, in questo caso non è necessaria la fusione di entità 2.5D per ridurre i dati nelle aree di sovrapposizione e per generare una *mesh* uniforme. Gli approcci più comuni di *meshing*, più complessi di un semplice Delanauy si basano su:

- a) Interpolazione di superfici, che costruiscono una maglia con più elementi di quelli necessari per poi eliminare i triangoli non coerenti con la superficie<sup>10</sup>;
- b) Superfici di approssimazione, in cui l'*output* deriva da una triangolazione di una funzione di *best-fit* dei dati grezzi tridimensionali. Una volta generato il modello poligonale, una rappresentazione fotorealistica dell'oggetto rilevato tridimensionalmente può essere ottenuta attraverso procedure di *texture mapping*. Nel caso di modelli poligonali in cui sono noti i parametri di orientamento della camera, come nel caso di modelli fotogrammetrici con immagini orientate, la procedura di *mapping* è automatica. Con sensori attivi ed immagini ottenute da sensori separati, invece, è richiesto un processo interattivo. Alcuni punti omologhi tra la *mesh* 3D e l'immagine 2D devono essere, in questo caso, individuati per stabilire la trasformazione da applicare per attribuire informazioni di colore alla *mesh*. Non sono state, infatti, ancora proposte delle soluzioni commerciali in grado di automatizzare questa procedura.

Il modello texturizzato è, ad ogni modo, il prodotto che meglio risponde alle esigenze di documentazione e visualizzazione del reale. Favorire la semplice fruizione ed interazione con questi modelli tridimensionali (anche con visualizzazioni *real-time*), considerando i limiti delle soluzioni hardware, è oggi uno dei principali obiettivi della comunità scientifica.

## Note

- <sup>1</sup> Remondino F., Fraser C., "Digital camera calibration methods. Considerations and comparison". *ISPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September, 2006*.
- <sup>2</sup> De Luca., *La fotomodellazione architettonica*, Dario Flaccovio Editore, 2011.
- <sup>3</sup> Remondino F., Campana S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*. BAR International Series 2598, 2014.
- <sup>4</sup> Brown D.C., 1971, "Close-range camera calibration". *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866.
- <sup>5</sup> Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing, 2011.
- <sup>6</sup> Remondino F., El-Hakim S., "Image-based Modelling: a Review". *The photogrammetric record*. 21: 269-291. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x
- <sup>7</sup> Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A., Zhang, L., "Turning images into 3-D models". *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(4), 2008, pp. 55-65.
- <sup>8</sup> Moons T., Van Gool L., Vergauwen M., "3D Reconstruction from Multiple Images, Part 1: Principles". *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 4(4):287-404, 2008. DOI: 10.1561/0600000007.
- <sup>9</sup> Remondino F., Campana S., *Op.cit*, pp. 68-70.
- <sup>10</sup> Amenta N., Bern M., "Surface reconstruction by Voronoi filtering". *Discrete and Computational Geometry*. Vol. 22 (4), 1999, pp. 481-504.
- <sup>11</sup> Cazals F., Giesen J., "Delaunay triangulation based surface reconstruction". *Effective Computational Geometry for Curves and Surfaces*, J.-D- Boissonnat and M. Teillaud (Eds), Springer-Verlag, Mathematics and Visualization, 2006, pp. 231-276.

CAPITOLO QUINTO  
**Tecniche range-based:**  
**principi teorici, strumentazioni e classificazioni**

### 5.1. I sistemi ottici attivi: classificazioni.

I sistemi ottici attivi<sup>1</sup>, in particolare a luce laser, permettono l'acquisizione di misure e distanze di oggetti grazie al riconoscimento, da parte di un sensore elettronico, di una luce codificata diversa dalla luce ambiente. Le tecniche passive (come la fotogrammetria) permettono la misurazione delle coordinate tridimensionali dei punti ben identificabili nelle immagini grazie a variazioni di luminanza dei punti ripresi nello spazio oggetto. In quelle attive, questa condizione non è necessaria. In una scansione 3D la scena, inquadrata e proiettata sul sensore, viene scomposta in elementi di immagine simile ai pixels di un'immagine digitale, di cui vengono valutate le coordinate spaziali ed il colore corrispondente.

Uno strumento che utilizza una tecnologia attiva per l'acquisizione tridimensionale di punti è chiamato *range camera*. In particolare quelli basati su luce laser, di cui qui ci occupiamo, sono gli scanner 3D. Il funzionamento di queste strumentazioni è legato alle dimensioni dell'oggetto da acquisire ed alla distanza tra il sensore e l'oggetto. In particolare, per volumi generalmente inferiori al metro cubo, gli scanner si basano sul principio della triangolazione, mentre, per volumi superiori, sul Tempo di Volo o *Time of Flight*. L'utilizzo della luce laser negli scanner 3D è dovuto alle sue particolari proprietà, che la rendono in grado di generare spot luminosi anche su distanze molto elevate. Si tratta innanzitutto di una luce monocromatica (formata da un'unica lunghezza d'onda), ma anche coerente (i cui quanti di energia elettromagnetica sono tutti in fase tra loro). Questo significa, in primo luogo, che le lenti ottiche utilizzate possono

essere progettate per una sola lunghezza d'onda e risultare in questo modo molto più efficaci. La coerenza poi della luce consente di canalizzare molta più energia per unità di superficie.

Se si utilizza poi una lente cilindrica, il raggio può essere espanso e trasformarsi in una lama di luce. Questo è in particolare il sistema più utilizzato, per la maggiore velocità di acquisizione del dato tridimensionale. Un ulteriore sistema, denominato *flash LADAR* (*LAsER RaDAR*) o TOF con piani focali, proietta la luce sull'oggetto attraverso un sistema a matrice di sorgenti LED o Laser e viene riflesso su una serie di piani focalizzati. Ogni singolo pixel è in grado di registrare il dato di distanza indipendentemente dagli altri, calcolando il tempo di andata e ritorno della luce.

### 5.1.1 Sistemi basati sulla triangolazione

I sistemi ottici attivi a triangolazione, nella maggior parte dei casi, sono costituiti da un emettitore di onde luminose e da uno o più sensori passivi (CCD o CMOS) posti ad una distanza nota (base). In questi sistemi, un insieme di componenti meccaniche e specchi consentono al segnale luminoso di essere emesso in una direzione e di essere poi acquisito, dopo la riflessione, su un sensore. In alcuni casi, un sistema meccanizzato permette le tre traslazioni per il movimento. In altri, attraverso specchi inclinati e sistemi meccanizzati, viene permesso il movimento del raggio laser con traslazioni, rotazioni o codificatori di movimento (CMM). Talvolta, nel caso di piccole distanze di acquisizione è invece l'oggetto che su apposite piattaforme viene fatto ruotare e il sistema di scansione resta fisso.

Vediamo, quindi, i diversi sistemi:

#### 1) Singolo spot laser.

La misurazione avviene tramite un singolo fascio di luce che produce un puntino luminoso sull'oggetto. L'immagine del punto ripreso viene acquisita da un sensore di ripresa, posto in una differente posizione rispetto alla sorgente di luce. Si crea in questo modo un triangolo tra la sorgente, il punto da acquisire ed il punto riflesso ed acquisito dal sensore. La distanza tra la sorgente luminosa ed il sensore si definisce *baseline* *b*. La distanza focale o distanza principale *f* è invece quella tra il piano di ripresa del sensore ed il foro di ingresso della luce. La distanza *p* invece indica uno spostamento rispetto al centro ottico del sistema del raggio riflesso. Nel

caso di preventiva calibrazione dello strumento sono noti l'angolo  $\alpha$  e la base *b*. Calcolando la posizione del punto riflesso sul sensore e dunque la quantità *p* è possibile risalire all'angolo  $\beta$ , poichè:

$$\tan \beta = \frac{p}{f} \quad (5.10)$$

e conoscendo *b*,  $\alpha$  e  $\beta$  a tutti gli altri parametri e coordinate in un sistema locale *x,y,z*.

Considerando la profondità di campo dell'intero sistema e la distanza dall'oggetto è possibile valutare il volume di ripresa utile. In questo caso, il volume è definito dall'area ripresa tra due assi paralleli al sensore e dalla direzione *z*, ortogonale al sensore. Inclinando poi il sensore rispetto al piano dell'ottica è possibile aumentare il range di distanze utili.

#### 2) Lama di luce laser.

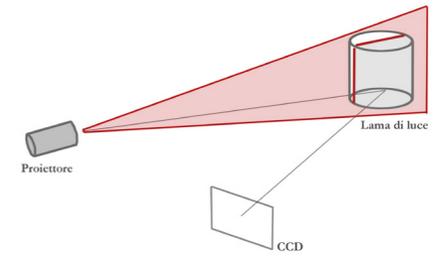
Questo tipo di misurazione può essere vista come un'estensione del caso precedente, in cui al singolo punto luminoso si sostituiscono un insieme di punti che compongono un segmento. Viene in questo modo stimata la posizione di tutti i punti osservati da un sensore bidimensionale (come un CCD), generati da una lama di luce laser riflessa da uno specchio rotante od una lente cilindrica che colpiscono la superficie da acquisire (Fig. 5.1.1).

#### 3) Lama di luce laser in movimento.

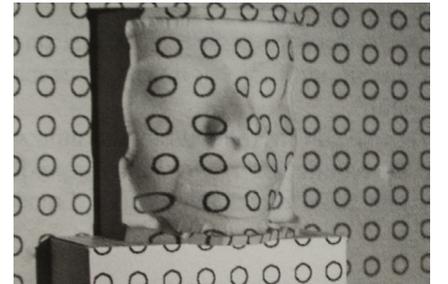
Per ottenere una *range map*, ovvero un'immagine tridimensionale, è necessario che questi sistemi utilizzino una meccanica controllata per acquisire dati in movimento. Il controllo degli spostamenti è fondamentale per ottenere risultati con ottimi livelli di accuratezza ed una bassissima deviazione standard dai valori nominali. In genere per le lame di luce i movimenti previsti sono rotazioni o traslazioni della testa dello strumento.

#### 4) Proiezione di pattern.

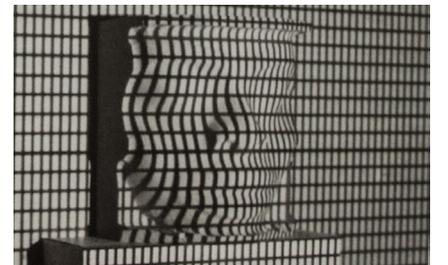
A differenza del caso precedente, gli scanner a proiezione di pattern (Figg. 5.1.2 e 5.1.3) non richiedono complessi e costosi sistemi di movimento per acquisire dati, sfruttando una proiezione di luce che investe le aree da acquisire. Si tratta in questo caso di sistemi a campo intero, in cui l'immagine è acquisita con una camera digitale. I pattern (ad esempio, con strisce bianche e nere), proiettati sulla superficie, mettono in evidenza cambiamenti della stessa superficie nel caso in cui questa non risulti piana, attraverso transizioni tra le strisce dei due colori. Per ottenere migliori risoluzioni,



5.1.1 - Sistema di misurazione tridimensionale tramite una lama di luce laser.



5.1.2 - Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (cerchi).



5.1.3 - Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (griglia rettangolare).

una serie di pattern diversamente codificati vengono conseguentemente proiettati ed acquisiti. Partendo dal più semplice, con una codifica che preveda una sola transizione bianco/nero (acquisita e memorizzata), le strisce verticali vengono di volta in volta raddoppiate progressivamente, fino ad ottenere una massima frequenza di alternanza tra i due colori. In tutti i casi di proiezione di pattern (cerchi in bianco e nero, strisce verticali colorate, griglie rettangolari...) il principio di funzionamento è basato sull'analisi della deformazione della loro geometria nota a priori e proiettata sull'oggetto.

### 5.1.2 Sistemi basati sulla misura di distanza.

I sistemi a triangolazione possono generare risultati con accuratze molto elevate (anche di 0,1 mm), ma sono utilizzabili per acquisizioni di oggetti di piccola volumetria. Questo perchè il rapporto tra la *baseline*  $b$  e la distanza di presa è molto importante per stabilire la precisione di una misurazione. Il rapporto ottimale  $d/b$  ideale è di 1, con precisioni decrescenti all'aumentare di questo valore.

I sistemi invece basati sulla misura di distanza sono i Laser Radar o LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Questi sistemi permettono l'acquisizione di oggetti di dimensioni maggiori e sono basati sulla misurazione del tempo di andata e ritorno del segnale luminoso, ovvero il cosiddetto Tempo di Volo (*Time of Flight*)<sup>2</sup>. Conoscendo il tempo è possibile determinare distanza ed angoli tra il sensore ed i punti della superficie e, dunque, le coordinate tridimensionali dei punti acquisiti. I tempi estremamente ridotti di acquisizione, dovuti alla velocità della luce, si traducono in un aumento di incertezza nella stima, che non è quasi mai sotto i 2 mm. La stima delle coordinate dei punti può avvenire con due procedimenti fondamentali:

- Attraverso la misura diretta del Tempo di Volo;
- Attraverso la misura indiretta offerta dalla modulazione dell'intensità luminosa e dagli sfasamenti di segnale.

In questi sistemi T.O.F. il raggio laser è riflesso da due diversi specchi ortogonali. L'inclinazione dei due specchi stabilisce la direzione del raggio emesso. Oltre a questo movimento, l'intero sistema di scansione ruota e può eventualmente essere integrato con un sistema di traslazione.

#### Sistemi a Tempo di Volo (T.O.F.).

I sistemi a Tempo di Volo sfruttano un breve impulso luminoso per la stima delle distanze. Le procedure di trasmissione di questi strumenti vengono, per questo, definite *Pulsed Wave (PW)*. Il segnale riflesso dalla superficie

acquisita viene trasformato dal rivelatore da un segnale luminoso in uno elettrico. La misura del tempo (e dunque della distanza) avviene, in questo caso, considerando le frazioni di secondo che intercorrono tra il momento di emissione del segnale e quello della sua ricezione da parte del ricevitore, che acquisisce informazioni sui segnali luminosi che superano una certa soglia di valori.

La distanza risulterà quindi pari a:

$$r = \frac{TOF \cdot c}{2} \quad (5.11)$$

In cui:

- $r$  è la distanza effettiva che intercorre tra il sensore e la superficie da acquisire;
- T.O.F. è il tempo di andata e ritorno del segnale luminoso
- $c$  è la velocità della luce (assunta pari a  $3 \times 10^8$ )

L'elemento che influenza la precisione della misurazione è il T.O.F., la cui precisa stima è funzione del rumore (per cause ottiche ed elettroniche) del segnale di ritorno. Rumore dovuto all'irregolarità del raggio luminoso riflesso, una volta che ha colpito la superficie e ha generato contributi multipli di luce con diverse lunghezze e quindi interferenze tra i raggi luminosi (componente ottica). L'altra componente, quella elettronica, è legata all'influenza del rumore nella stima esatta dei tempi di emissione e ricezione del segnale luminoso.

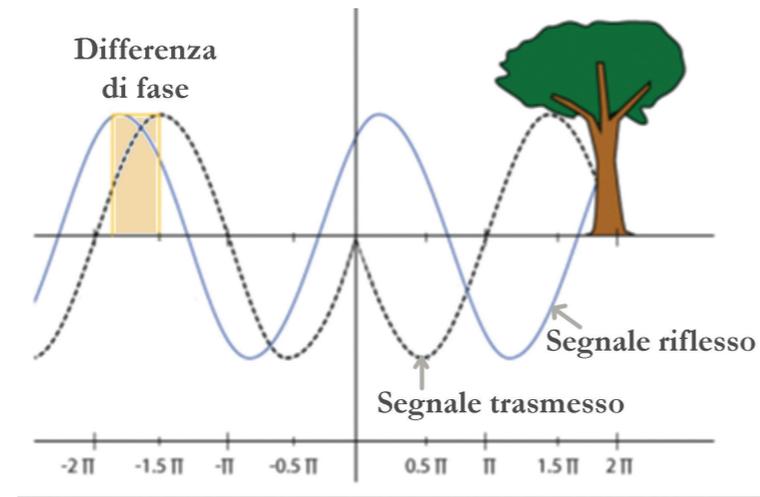
#### Sistemi a Modulazione di Fase.

Quando il segnale emesso non è un impulso luminoso ma una radiazione continua, una *Continuous Wave (CW)* regolata in intensità, il sistema è definito a Modulazione di Fase<sup>3</sup> (Fig. 5.1.4).

#### Stima indiretta del T.O.F. : Modulazione AM

Nel sistema in cui la frequenza resta fissa e l'ampiezza dell'onda, indicata come *Amplitude Modulation (AM)*, varia nel tempo, si sfrutta una combinazione di due onde sinusoidali sfasate. Si ottiene in questo modo un risultato proporzionale allo sfasamento. Il segnale viene emesso verso il bersaglio e, una volta colpito, viene riflesso ed acquisito dal sensore. Nella retrodiffusione del segnale, questo acquista una componente di rumore. Il prodotto dei due segnali (quello emesso e quello riflesso) presenta due

5.1.4 - Schema di funzionamento di una strumentazione a Modulazione di Fase per l'acquisizione dei dati.



contenuti: una fase che è la somma delle due ed una che è la differenza tra le due. Una volta filtrato questo risultato, si ottiene il contributo proporzionale alla fase. Poiché la fase è direttamente proporzionale al ritardo temporale del T.O.F., si può ottenere la distanza  $r$  come nel caso precedente.

In questo tipo di sistemi, la distanza a cui si produce ambiguità nel risultato è inversamente proporzionale alla frequenza di modulazione. Al contrario, la risoluzione spaziale migliora all'aumentare della frequenza di modulazione. Per risolvere i problemi di ambiguità dovuti alla distanza, si utilizzano generalmente frequenze diverse, aumentandone progressivamente i valori.

#### Stima indiretta del T.O.F. : Modulazione FM

Nei sistemi Laser Radar si agisce su un'alterazione dell'intensità luminosa secondo una modulazione di frequenza o *Frequency Modulation (FM)* e sulla demodulazione coerente nella ricezione per ottenere un segnale triangolare denominato *chirp*. In questo caso le frequenze vengono aumentate linearmente, aumentando (come nel caso precedente) sia il *range* di ambiguità che la risoluzione. Questo sistema, considerando di poter raggiungere un'incertezza di misura fino a soli  $10 \mu\text{m}$ , è particolarmente indicato per distanze che vanno dai 2 ai 20 metri. Queste strumentazioni sono state affiancate recentemente da nuovi sistemi migliorati AM che, coprendo la stessa distanza, consentono di ottenere incertezze al di sotto del millimetro.

## 5.2 Caratterizzazione dei sensori tridimensionali.

Le caratteristiche ottiche ed elettroniche dei sistemi utilizzati determinano la qualità del prodotto digitale. Qualità che viene misurata in riferimento a tre parametri: risoluzione, incertezza e accuratezza. Nel 2007 l'ISO (*International Standard Organization*)<sup>4</sup> ha definito questi parametri nel VIM<sup>5</sup> (Vocabolario Internazionale di Metrologia). La stima di questi parametri serve a definire il grado di incertezza delle coordinate spaziali acquisite, considerando tutti i fattori di incertezza che possono intervenire nel processo di acquisizione e processamento dei dati (Schema pag. 124). La conoscenza di questi valori serve a definire la cosiddetta "tracciabilità metrologica"<sup>6</sup> del processo e l'affidabilità di quella "approssimazione discreta tridimensionale" delle superfici rilevate con questi sistemi. Per controllarne il comportamento è necessario controllare i parametri caratteristici interni di funzionamento del sistema. Questo è possibile quando questi parametri sono riducibili a "modelli matematici". Nel caso di sensori passivi, come abbiamo visto, ottimi risultati in termini di precisione sono raggiungibili attraverso la calibrazione delle camere. Nel caso invece dei sistemi attivi, la calibrazione non è possibile, poiché i sensori vengono venduti come sistemi chiusi non calibrabili. L'unica possibilità è quella di valutare allora le caratteristiche interne del sensore e le prestazioni a diverse distanze di acquisizione.

### 5.2.1 La risoluzione.

Il primo parametro che definisce il livello di dettaglio del modello finale è la "risoluzione". La risoluzione è riferita al più piccolo dettaglio geometrico che può essere catturato nella scena, ottenuto discretizzando una superficie continua in base ad un passo di campionamento, *sampling step*, che viene definito in fase di programmazione delle prese. La capacità di una *range camera* di acquisire dettagli dipende dalle sue caratteristiche ottiche, meccaniche ed elettroniche. In particolare, più il sistema di lenti è in grado di focalizzare la luce, maggiore sarà la quantità di pixels delle immagini generate dal sensore e dunque la risoluzione. In genere si distingue tra una "risoluzione orizzontale (o laterale)" e una "risoluzione in profondità", considerando il diverso comportamento che può assumere la strumentazione sui tre assi.

La "risoluzione orizzontale" è definita dalla frequenza di campionamento spaziale dell'area inquadrata dalla *range camera*, considerando che per piano orizzontale (xy) si intende il piano ortogonale all'asse ottico. Le risoluzioni in x e y potrebbero coincidere (come avviene ad esempio quasi sempre nei sistemi a proiezione di pattern in cui la *range camera* ha un pixel quadrato)



5.1.5 - Intensità della luce riflessa all'interno dello spot luminoso generato da un'apertura di dimensioni ridotte rispetto alla lunghezza d'onda.

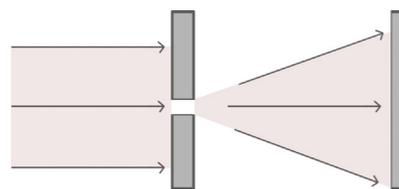
oppure no (come nel caso in genere dei sistemi a triangolazione). La loro stima, conoscendo le dimensioni della *range map* acquisita e dell'area inquadrata equivalente, è data dal semplice rapporto tra le rispettive dimensioni lungo gli assi x e y.

La “risoluzione in profondità” è invece riferita al valore lungo l'asse z.

La “risoluzione massima” di una *range camera* è legata alla diffrazione della luce ed alla generazione di interferenze e divergenze della luce quando questa si trova a passare attraverso una piccola apertura. In particolare, più piccola sarà questa apertura, maggiore sarà questo fenomeno. Questo implica che la proiezione di uno spot luminoso attraverso un'apertura circolare genererà una macchia dai confini non netti ed una sfumatura dal centro verso l'esterno. La circonferenza centrale maggiormente luminosa e distinguibile è definita *Airy Disk*, seguita da cerchi concentrici via via più sfocati (Fig. 5.1.5). La variazione di questi valori di luminosità è detto “pattern di diffrazione”.

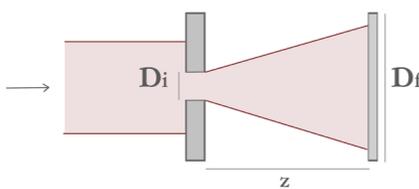
Nelle schede tecniche delle strumentazioni, viene indicato il valore della divergenza del fascio luminoso, definito *Beam Divergence (BD)* ed espresso in percentuale rispetto alla dimensione iniziale dello spot luminoso ( $D_i$ ), la distanza tra apertura e punto di proiezione ( $z$ ) e la dimensione dello spot rispetto alla  $z$  ( $D_f$ ) (Figg. 5.1.6 e 5.1.7).

$$BD = \frac{D_f - D_i}{z} \quad (5.12)$$



5.1.6 - Fenomeno della diffrazione, con allargamento del raggio e generazione di un pattern di diffrazione.

Negli scanner laser la risoluzione massima indica il minimo passo di campionamento possibile. Una considerazione è però necessaria riguardo alla distinguibilità tra due spot adiacenti, che è funzione della dimensione dello spot stesso e della distanza di acquisizione. Il “criterio di Rayleigh” definisce questa “distinguibilità”: due punti possono considerarsi separati quando il centro di una delle due macchie si sovrappone al primo anello scuro del pattern di rifrazione della seconda. La stima di questa sovrapposizione è legata alla capacità risolutiva dell'occhio umano ed è dunque una sottostima del valore acquisibile da un apparecchio elettronico. La risoluzione massima sul piano orizzontale è legata al sistema di ottica utilizzato. Il miglioramento di questo valore è ottenibile sfruttando tecniche di focalizzazione dinamica, che rifocalizzano il laser per ogni punto misurato fino ad ottenere le minime dimensioni dello spot. Questo ovviamente implica un aumento dei tempi di acquisizione. La risoluzione in profondità ( $z$ ) è legata invece ad un fenomeno chiamato *laser speckle*. Quando lo spot viene acquisito da un sensore CCD, esso appare come una macchia luminosa con all'interno una serie di puntini scuri. Questo effetto “punteggiato” limita la capacità di identificazione dell'esatta posizione



5.1.7 - Fenomeno di divergenza del raggio laser.

luminosa nel raggio laser che introduce degli errori nella determinazione del centroide sul sensore digitale.

### 5.2.1 L'accuratezza e la precisione.

In ogni misurazione, il valore ottenuto è sempre un'approssimazione del valore reale dell'oggetto. Quest'approssimazione è legata a componenti di errore che sistematicamente o casualmente intervengono nella stima del valore. La parte sistematica dell'errore è determinata dalla differente condizione di funzionamento degli strumenti rispetto ad una situazione teorica ideale, mentre quella casuale da componenti aleatorie di alcuni parametri. L' “accuratezza” è definita dall'errore sistematico della misurazione, e può essere aumentata diminuendo lo scarto medio rispetto al valore vero attraverso operazioni di taratura della strumentazione.

La “precisione” o “incertezza di misura” è legata all'errore casuale che abbiamo visto essere legato a componenti aleatorie che intervengono nella misurazione. Non potendo ovviamente definire e misurare questa grandezza, l'unica operazione possibile in questo caso diviene la descrizione della variabilità tra misure diverse. La distribuzione dei valori di una variabile aleatoria è in genere approssimata e rappresentata con una curva Gaussiana:

$$p(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}} \quad (5.13)$$

dove  $\sigma$  è la “deviazione standard” e  $\bar{n}$  il “valore medio” della variabile aleatoria  $n$ .

La “deviazione standard” è la radice quadrata della “varianza” definito da:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - \bar{n})^2}{k}} \quad (5.14)$$

Mentre la media aritmetica  $\bar{n}$  è definita da:

$$\bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i \quad (5.15)$$

La “deviazione standard” indica dunque la dispersione del valore rispetto a quello atteso. (Tabella pag. 145).

La stima del valore di incertezza della misura può avvenire a posteriori, applicando un'analisi statistica ad un insieme di misure omogenee. Utilizzando ad esempio un piano di test rettificato di forma nota, si è

dello spot sul sensore e crea un'incertezza di misura in  $z$ . L'impossibilità di diminuire oltre una certa soglia la dimensione dello spot luminoso sull'oggetto, genera infatti una distribuzione disomogenea dell'intensità in grado di stimare dal dato grezzo quale è l'entità della deviazione di ogni punto dovuto all'incertezza di misura. Partendo dalle coordinate 3D dell'oggetto di test viene dunque calcolata l'equazione matematica del cosiddetto piano di *best-fitting*, ovvero il piano che minimizza la somma del quadrato degli scarti tra ogni punto misurato ed il riferimento planare. Il calcolo dello scarto quadratico medio (la somma dei quadrati di tutte le distanze punto-piano), ottenuto dal piano di *best-fitting*, determina la misura della "varianza" secondo l'asse  $z$  e della "deviazione standard" (la sua radice quadrata). Proprio questo valore  $\sigma_z$  in millimetri indica la misura dell'incertezza della strumentazione.

### 5.2.3 Altri parametri che incidono in una scansione tridimensionale.

Tra i tanti parametri che intervengono a definire la qualità finale di un progetto di scansione abbiamo innanzitutto la velocità di acquisizione. La scelta e la definizione di questo parametro in fase di programmazione delle acquisizioni è fondamentale per assicurare un buon risultato finale. Il tempo infatti che si ritiene di aver risparmiato od acquistato sul campo, non tiene talvolta conto delle problematiche che potrebbero intervenire nella fase di elaborazione in laboratorio, con la restituzione di dati parziali od al contrario difficilmente gestibili per l'eccessiva ridondanza.

Un ulteriore parametro che potrebbe generare un'incertezza della misura è legato alla presenza di transazioni cromatiche che potrebbero generare salti di quota inesistenti nello spazio oggetto. Questa variazione è presente in maniera sistematica nella misurazione ed è proporzionale all'intensità luminosa utilizzata. Questo cosiddetto "artefatto" della misura è legato alla modalità del processore dello scanner di rilevare la posizione dello spot luminoso a partire dall'immagine registrata dal sensore. Attraverso una media pesata (considerando come fattore peso l'intensità luminosa) delle coordinate oltre le quali la luce registrata supera la soglia di rumore, è possibile applicare l'algoritmo del centroide per calcolare il baricentro dello spot luminoso. Il fattore peso stimato è quello che indica l'errore nella stima della parallasse e porta alla nascita dell'"artefatto" che incide sulla stima della  $z$ .

Tra i tanti fattori che influenzano la riuscita del rilievo, va inoltre ricordata la traslucidità del materiale da acquisire. L'alone che si genera attorno allo spot, dovuto alla riflessione interna della luce laser, provoca infatti una

riduzione della precisione in funzione della risoluzione utilizzata e della dimensione dello spot. La parziale penetrazione poi del raggio all'interno di questi materiali, come ad esempio il marmo, provoca inoltre una variazione dei valori in profondità acquisiti.

Occorre infine ricordare che temperatura, condizioni atmosferiche e radiazioni luminose naturali o artificiali possono influire sulla misura di valori di distanza riducendone l'accuratezza.

## 5.3 Il Reverse Modeling: dall'oggetto reale al modello digitale.

La modellazione tridimensionale inversa (*Reverse Modeling*) parte dall'oggetto reale e ha come prodotto finale il modello digitale (Fig. 5.1.8). Il dato reale, acquisito attraverso procedure di rilievo *reality-based*, viene descritto da una serie di punti (a densità e risoluzione variabile in base ai parametri di acquisizione ed alla strumentazione utilizzata) che discretizzano la superficie continua dell'oggetto. Questo dato è successivamente trasformato in un insieme di superfici poligonali (*mesh*) che approssimano l'andamento delle superfici dell'oggetto acquisito. Le fasi di acquisizione e trasformazione del reale in un modello digitale, la "*3D acquisition pipeline*"<sup>7</sup>, vengono di seguito approfondite.

### 5.3.1 La pianificazione e l'acquisizione dei dati.

Con riferimento ai sensori attivi, diversi sono i fattori che intervengono nella scelta delle tecniche e delle strumentazioni di un rilievo tridimensionale *reality-based*. La scelta è innanzitutto condizionata dagli obiettivi e dall'utilizzo finale dei prodotti digitali. Il caso di modelli realizzati per la semplice visualizzazione sarà, ovviamente, ben diverso da quello di modelli da utilizzare per analisi dimensionali e metriche, il cui primo obiettivo risulterà la congruenza e l'accuratezza del dato ottenuto. Oltre alla finalità del rilievo, altri elementi che fortemente influiscono sulla



5.1.8 - Processo di elaborazione digitale tridimensionale di un volto.

scelta delle procedure e delle tecniche da utilizzare sono la geometria, le dimensioni ed i materiali che caratterizzano l'oggetto da acquisire. Se i triangolatori permettono di ottenere modelli digitali anche molto accurati di oggetti di piccole dimensioni, le strumentazioni a Tempo di Volo ed, in particolare, quelle a Modulazione di Fase, sono indicate per l'acquisizione tridimensionale di oggetti architettonici di medie e grandi dimensioni. La complessità morfologica dei manufatti e degli elementi decorativi potrà indicare la necessità di integrazione tra le diverse tecniche, qualora venga richiesta una rappresentazione complessiva e di dettaglio degli elementi presenti. La complessità materica ed, in particolare, la presenza di superfici riflettenti e traslucide sono elementi che possono influire fortemente sulla qualità del risultato e che richiedono particolari accorgimenti e scelte di acquisizione.

L'acquisizione di diverse *range maps* è in genere necessaria per garantire la completezza del dato digitale. La scelta di una buona sovrapposizione tra *range maps* è fondamentale per ottenere un modello accurato. La stessa geometria delle parti in sovrapposizione può influire sulla riuscita dell'allineamento. Superfici irregolari e complesse assicurano in genere risultati migliori, rispetto a superfici pressochè lisce e prive di particolari e riconoscibili variazioni morfologiche. L'incertezza di misura della strumentazione utilizzata influirà in modo particolarmente negativo in quest'ultimo caso, creando possibili artefatti che inducono ad errori nell'allineamento. L'ottimizzazione dell'incertezza della misura e l'integrazione di diverse tecniche per il controllo del risultato sono in questo caso necessari per la correttezza del risultato.

Le tecniche di acquisizione delle immagini da utilizzare per i processi ricostruttivi della fotogrammetria digitale è già stato mostrato nel paragrafo 4.2. In questo caso, la qualità dell'immagine, l'attenzione ai tempi di esposizione in base alle condizioni di illuminazione è particolarmente rilevante per ottenere un buon modello digitale tridimensionale. Nel caso dei sensori attivi, invece, la luce non influenza in genere la qualità del dato, se contenuta entro certe soglie. Se l'acquisizione riguarda, tuttavia, oggetti dalle dimensioni contenute in ambienti chiusi, condizioni controllate di illuminazione possono garantire risultati migliori. La riduzione eccessiva del contrasto tra le superfici da acquisire, dovuta ad intense fonti di luce, può infatti causare una perdita di informazioni nel modello finale. Le tecniche di acquisizione con questi sensori variano ovviamente in base alla strumentazione, alla complessità ed alle caratteristiche dell'oggetto. Il risultato contiene sempre, ad ogni modo, informazioni sulle coordinate tridimensionali dei punti della scena acquisita X,Y,Z. In alcuni casi, oltre ad essere acquisiti anche i valori di riflettanza delle superfici, al

dato spaziale sono associate informazioni di colore (R,G,B). Questi dati, oltre a migliorare la visualizzazione del modello, possono aiutare la fase di allineamento delle scansioni aumentando la riconoscibilità delle caratteristiche comuni nelle diverse *range maps*. Nel caso di acquisizioni con uno scanner a triangolazione è richiesta una buona sovrapposizione tra le *range maps* contigue (almeno 30-40%). Con strumentazioni a Tempo di Volo è, in genere, richiesto un numero inferiore di scansioni ed una minore sovrapposizione, potendo usufruire anche di targets esterni per l'orientamento delle singole prese rispetto a punti noti<sup>8</sup>. Un'importante distinzione tra le procedure di acquisizione riguarda i sistemi e le modalità di acquisizione statica e dinamica:

- **Procedure di acquisizione statica.** Nel caso di acquisizioni con sensori terrestri da postazioni statiche, è indispensabile adottare strategie che tendano a:
  - Ridurre al minimo il numero delle acquisizioni, ottimizzando i tempi di lavoro sul campo ed evitando di acquisire una mole sovrabbondante di dati difficili da gestire in fase di processamento;
  - Verificare che tutte le superfici vengano acquisite e non risultino zone non campionate a causa di elementi di occlusione;
  - Garantire un'area di sovrapposizione sufficiente (di almeno il 20%) tra scene contigue;
  - Assicurarsi che i piani dell'oggetto vengano acquisiti anche da posizioni quanto più ortogonali possibili alle superficie, evitando angolazioni troppo spinte che potrebbe inficiare l'accuratezza della misura.

La fase di acquisizione è in genere molto semplice, impostati i parametri che definiranno la qualità del dato (in generale la risoluzione, il numero di punti ed i tempi e la velocità di acquisizione). Una volta acquisite le coordinate polari dei punti vengono trasformate in coordinate cartesiane (x, y, z). Il sistema di riferimento è proprio dello strumento e di ogni stazione di misura. Nella fase di processamento del dato, delle trasformazioni spaziali consentono di ricostruire la posizione dei punti dello spazio oggetto rispetto al sistema di riferimento adottato. La trasformazione è una roto-traslazione rigida a sei parametri, dove la traslazione indica il vettore spostamento dell'origine del sistema di riferimento e la rotazione determina i tre angoli di rotazioni attorno ai tre assi. Nei rilievi terrestri, il calcolo di questi sei parametri avviene ai minimi quadrati sulla base di un certo numero di punti corrispondenti. La precisione della trasformazione viene valutata calcolando lo scarto quadratico medio (RMSE – *Root Mean Square Error*) dei residui rispetto



5.1.9 - TIMMS - Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions.



5.2.1 - iMS3D, Viامتريس.

agli n punti corrispondenti.  
Alcuni sensori che permettono di acquisire dati da postazioni statiche possono, tuttavia, lavorare anche in modalità cinematica. In questo caso, il sensore (generalmente montato su una piattaforma) lavora secondo la modalità di “profilometro 2D”. In generale, nel caso tradizionale di sensori montati su piattaforma, è indispensabile che siano presenti anche dei dispositivi di georeferenziazione per il posizionamento spaziale della piattaforma e per la definizione del tempo assoluto.

- Procedure di acquisizione dinamica.** Un sistema basato sull’integrazione di una piattaforma mobile e sensori di misura, in grado di restituire la posizione della piattaforma ed i dati metrici 2D/3D georeferenziati, prende il nome di *Mobile Mapping System (MMS)*<sup>9</sup>. Le tre principali componenti hardware di un MMS sono i sensori ottici, i sensori di navigazione e posizionamento (IMU/GNSS) ed un’unità di controllo e sincronizzazione. Tutti i sistemi (indipendentemente dal tipo di piattaforma e dalle applicazioni) sono basati su una rigorosa sincronizzazione del flusso di dati tramite l’integrazione dei diversi processi di misura, che permette di ridurre i tempi di lavoro nella fase di post-processamento dei dati. Nel campo delle applicazioni terrestri, i sistemi più recenti utilizzano la tecnologia LiDAR, da cui anche il nome di *Mobile Laser Scanning (MLS)*. Il principale vantaggio derivante dall’utilizzo di questi sistemi è la possibilità di acquisire nuvole di punti dense (spesso anche in tempo reale), oltre alla velocità di acquisizione dei dati (e la riduzione dei tempi di lavoro e dei costi sul campo) e l’elevata densità spaziale dei punti misurati. La maggior parte dei sistemi di *Mobile Mapping* terrestri, sviluppati per applicazioni outdoor di rilievo urbano o impieghi catastali vengono posizionati su autovetture<sup>10</sup>. L’assenza di segnale GNSS e di dati di posizionamento nel caso di strutture *indoor* ha, recentemente, spinto lo sviluppo anche di nuove soluzioni, che sfruttano una piattaforma inerziale (*Inertial Navigation System – IMU*) ed un algoritmo di *Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM)* per la definizione della traiettoria e la ricostruzione tridimensionale delle scene acquisite<sup>11</sup>. In alcuni sistemi, come “TIMMS – Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions”<sup>12</sup> (Fig. 5.1.9), “iMS3D” della Viامتريس<sup>13</sup> (Fig. 5.2.1) o “Leica ProScan”<sup>14</sup>, i diversi componenti sono montati su dei carrelli. In questi casi, l’acquisizione è piuttosto problematica in caso di ambienti particolarmente stretti od in presenza di scale o altri salti di quota. Ulteriori sistemi, invece, sfruttano il posizionamento di tutte od alcune componenti su zaini, rendendo più agevole la fase di acquisizione di dati tridimensionali camminando all’interno

delle strutture, come “Leica Pegasus”<sup>15</sup> (Fig. 5.2.2), “Zeb1”<sup>16</sup> e “Zeb-Revo”<sup>17</sup> della Geoslam (Fig. 5.2.3). Le procedure di acquisizione, nel caso di sistemi di *mobile mapping*, sono per lo più funzione del sistema considerato. Tempi e velocità di acquisizione, aree di sovrapposizione tra *range maps* consecutive e modalità di mappatura degli ambienti possono essere piuttosto variabili nelle diverse soluzioni disponibili.

### 5.3.2 Il filtraggio

La fase di filtraggio delle nuvole di punti è spesso necessaria, considerando che non sempre la strumentazione che si ha a disposizione è la più idonea all’acquisizione del dato e che le condizioni ambientali di un rilievo influiscono sempre sul risultato digitale.

Con questa operazione è possibile innanzitutto l’eliminazione di dati e di elementi incompatibili con la geometria rilevata. Questo avviene grazie ad opportuni algoritmi automatici o semi-automatici (preferibili per il controllo del dato che offrono). Gli algoritmi operano secondo valori di soglia di altezza oppure riconoscendo determinate caratteristiche morfologiche degli oggetti acquisiti. Mentre i primi risultano molto più rapidi ma con risultati non sempre accettabili, i secondi richiedono operazioni più complesse e tempi di processamento maggiori. L’eliminazione (con procedure più o meno automatiche o manuali) delle incoerenze visibili nelle scansioni, è particolarmente importante per la definizione della qualità dell’allineamento. La presenza di elementi incoerenti, infatti, non solo peggiora la qualità dell’allineamento finale, ma soprattutto condiziona ed aggrava il lavoro in fase di post-processamento.

Un’altra tipologia di filtraggio dei dati consente non di eliminare ma di modificare i dati acquisiti. Quest’operazione è necessaria qualora il dato non risulti geometricamente coerente con l’oggetto reale e il rilievo richieda un prodotto che abbia errori di misura contenuti.

In entrambi i casi, comunque, la necessità di filtrare i dati di un rilievo si presenta connessa alle specificità dell’oggetto e dal caso. Per questo, molto spesso, diverse tipologie di filtri vengono sviluppate da programmatori in modo da rispondere alle esigenze che si manifestano nelle particolari e specifiche condizioni.

### 5.3.3 L’allineamento dei dati.

Le coordinate di ciascuna *range map* acquisita sono riferite ad un sistema di riferimento strumentale (*reference system, RS*) con orientamento ignoto ed



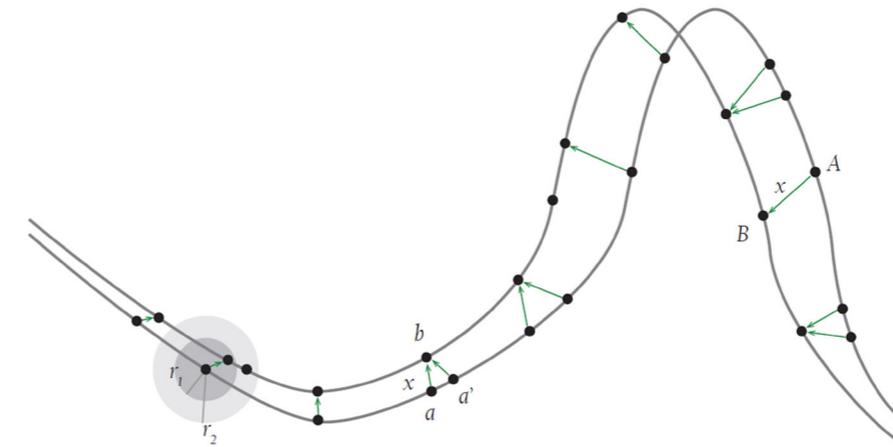
5.2.2 - Leica Pegasus.



5.2.3 - Zeb Revo.

ha sei gradi di libertà nello spazio. Ogni nuvola di punti richiede, dunque, una roto-traslazione a sei parametri per consentire l'unione delle singole scansioni. Se includiamo anche il parametro di scala, ci ritroviamo nel caso della trasformazione a sette parametri (*similarity transformation*). Tre principali procedure consentono di roto-traslare i dati acquisiti dal sistema di riferimento locale ad un unico sistema di riferimento:

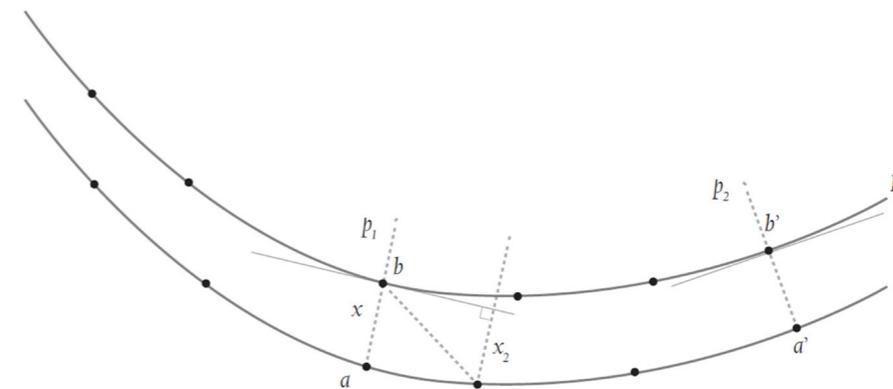
- Orientamento con CMM: I laser scanner 3D più complessi possono essere integrati con apparati CMM (*Coordinate Measurement Machine*). Questi apparati sono costituiti da una sonda di misura (funzionante in genere per contatto, con spostamenti manuali o meccanici) collegata a dei meccanismi che consentono di calcolare i suoi spostamenti nello spazio. Quando alla sonda viene sostituita una testa laser, la nuvola di punti, ottenuta ed inserita nel sistema di riferimento dello strumento può essere successivamente orientata grazie alle informazioni fornite dal CMM. A causa dei vincoli di movimento imposti dal meccanismo, queste strumentazioni permettono l'acquisizione di oggetti di limitate dimensioni. Un'alternativa al CMM meccanico è rappresentato dai CMM *wireless*, che permettono la trasmissione di informazioni grazie alla comunicazione tra una base e una testa di scansione mobile. Tra questi, i sistemi più evoluti (ma anche più costosi) sono dotati di un CMM laser (*laser tracker*) accoppiato ad un laser scanner e consentono l'acquisizione di oggetti dalle dimensioni maggiori.
- Orientamento con riferimenti fissi sulla scena. In questo caso, l'orientamento avviene misurando degli elementi presenti sulla scena catturata. Nel caso di acquisizioni con una *range camera*, le coordinate dei punti di controllo possono essere ricavate anche con altri metodi (ad esempio topografici o fotogrammetrici). Questa procedura è utilizzata soprattutto nel caso delle strumentazioni a Tempo di Volo, in grado di catturare ad alta risoluzione questi elementi. Identificando un certo numero di corrispondenze nelle *range maps* (almeno 3) è possibile assegnare le roto-traslazioni necessarie in base ai punti di controllo utilizzati. Per targets volumetrici (sfere, coni, piramidi...), attraverso procedure di *best-fitting* o con tecniche derivate dall'*image processing* (ad esempio il centroide) vengono misurate sulla nuvola le coordinate dei punti di riferimento. Nel caso di targets piani sono richieste ulteriori informazioni radiometriche. L'utilizzo di questi metodi di "registrazione con *reference points*" è particolarmente opportuno ed indicato in presenza di superfici lisce. La registrazione mediante targets è inoltre necessaria quando l'area di sovrapposizione tra le nuvole di



5.2.4 - Metodo "punto-punto". La ricerca del punto avviene tramite una sfera di raggio decrescente ( $r_1$ ) fino a contenere un solo punto.

punti risulta ridotta o insufficiente. Negli altri casi è invece sufficiente l'allineamento con metodi automatici o relativi tra coppie.

- Orientamento con algoritmi semi-automatici (ICP). Gli algoritmi semi-automatici di allineamento sono basati sulla ridondanza dei dati e sfruttano la forma stessa dell'oggetto come riferimento da far corrispondere nelle diverse prese. Sono semi-automatici perchè richiedono una fase iniziale di pre-allineamento manuale ed una di raffinamento che utilizza un algoritmo di ottimizzazione. Quelli maggiormente implementati nei software per la registrazione globale delle *range maps* sono basati sull'ICP (*Iterative Closest Point*). Questo algoritmo consente di determinare per ogni punto della nuvola il punto più vicino (*closest point*). Collimando manualmente un numero minimo di punti omologhi (almeno 3) nelle aree di sovrapposizione tra due scansioni per introdurre un'approssimazione iniziale, applica iterativamente una roto-traslazione rigida alla nuvola di punti mobile per sovrapporla a quella fissa. In una seconda fase, l'allineamento automatico tra i dati avviene in un processo iterativo che tende a minimizzare la distanza media. Problemi di allineamento locale con



5.2.5 - Metodo "punto-piano".

questo metodo di orientamento potrebbero insorgere nel caso in cui non siano visibili nelle scansioni elementi geometrici ben distinguibili da collimare. Questo metodo è noto come metodo “punto-punto” (Fig. 5.2.4), in cui viene scritta una funzione che è definita dalla somma dei quadrati delle distanze tra i punti omologhi delle nuvole. Per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati i punti contenuti all’interno di una sfera, il cui raggio è convenzionalmente il doppio della distanza media dei punti di una nuvola. Tra i punti così individuati, viene scelto quello più vicino come corrispondente. Un altro metodo, definito “punto-piano” (Fig. 5.2.5), minimizza le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani di *best-fit* passanti per i punti dell’altra nuvola. In particolare, la funzione che viene scritta in questo caso è definita dalla distanza tra il punto nella prima nuvola ed il piano tangente al suo corrispondente nella seconda, nella direzione normale al primo. Rispetto al metodo precedente, in questo caso il processo di convergenza verso la distanza minima è più veloce, potendo interagire su uno spazio bidimensionale. Nel caso comunque della sovrapposizione di superfici quasi piate o di una curvatura quasi uniforme è preferibile utilizzare il primo metodo. Gli approcci ICP “punto-punto” e “punto-piano” sono i più utilizzati per l’allineamento dei dati. Entrambi sono validi anche in caso di allineamento di sistemi di punti triangolati (*mesh*). In questo caso, l’elaborazione ed il calcolo saranno più rapidi rispetto a nuvole non triangolarizzate, potendo sfruttare le informazioni che possono essere estratte dai singoli poligoni. Quando l’allineamento avviene tra nuvole di punti, il modello risultante finale può essere trasformato in mesh. Si otterrà in questo caso un unico modello poligonale in cui le informazioni ridondanti vengono eliminate durante l’operazione di fusione. Questa operazione viene svolta in maniera completamente automatica e, per questo motivo, è necessario verificare che nessun dato importante sia stato perso o modificato durante il processo e che si siano effettivamente ridotti gli errori topologici e le lacune del modello. Questa fase può richiedere un dispendio considerevole di tempo qualora il modello richieda nuove elaborazioni con diversi parametri, a causa della perdita della coerenza geometrica e morfologica con l’originale al termine del processo.

La scelta dell’approccio di allineamento è fortemente dipendente dalla tipologia di strumentazione utilizzata per l’acquisizione dei dati. Nel caso dei sistemi a triangolazione, spesso si ricorre all’utilizzo di approcci che sfruttano l’ICP. Nei sistemi a Tempo di Volo, invece, può essere scelto sia un qualsiasi approccio ICP che il riconoscimento semi-automatico di targets. Questa tecnologia, riuscendo ad acquisire scene molto ampie,

consente in genere di restituire oggetti anche estesi e complessi con un numero piuttosto limitato di acquisizioni. L’utilizzo dell’ICP è in questo caso limitato ai casi in cui non sono stati utilizzati targets sul campo. In diversi casi e, soprattutto, nel caso in cui si ritenga necessario riferire il rilievo ad un sistema convenzionale, le coordinate dei targets acquisiti nelle scene vengono acquisiti anche con strumentazioni topografiche.

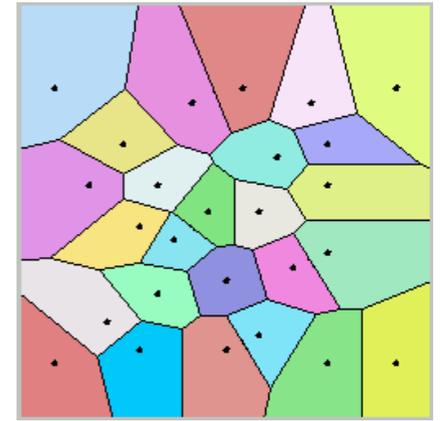
### 5.3.4 Il meshing

Una volta ottenuta una nuvola di punti tridimensionale registrata, è possibile ricostruire l’andamento delle superfici dell’oggetto acquisito attraverso la costruzione di una maglia di poligoni (*mesh*). Questa operazione si differenzia se si considera una nuvola di punti strutturata (*structured point cloud*) o non strutturata (*unstructured point cloud*).

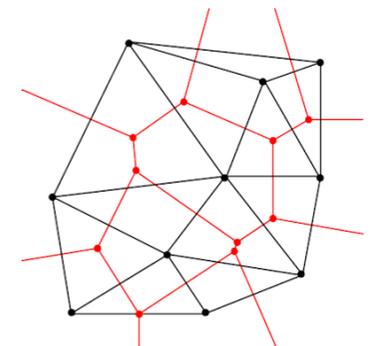
Una nuvola di punti strutturata, come quella ottenibile con un sensore che utilizzi una lama di luce laser, permette la creazione immediata di una maglia triangolare. In questo caso, infatti, ad ogni segmento acquisito con la scansione corrisponde una matrice semplice contenente informazioni x,y,z di una serie di punti equidistanti. La maglia sarà dunque composta, nel caso di nodi pari, da un punto, dal punto alla sua destra e da quello sottostante. Al contrario, nei nodi dispari, da un punto, da quello sottostante e da quello sottostante a sinistra.

In una nuvola di punti non strutturata, quella ottenibile ad esempio con una strumentazione a Tempo di Volo, non è sempre garantito l’allineamento verticale tra i punti appartenenti a diverse linee di scansione, nè una loro uguale distribuzione. Nel caso di una nuvola non strutturata il *meshing* è in genere realizzato utilizzando l’algoritmo di Delaunay (o simile), derivato dal diagramma di Voronoi. L’algoritmo prevede la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano, l’identificazione di quelli con distanza minima ed il loro collegamento. Una volta trovati i collegamenti, vengono verificati nello spazio. Devono essere fissate in questo caso dei valori di soglia e dei limiti per consentire il mantenimento dei soli collegamenti coerenti con le condizioni fissate. Affinchè questa verifica sia possibile, è necessario che la nuvola di partenza sia una entità non propriamente 3D ma 2,5 D, ovvero che ad ogni punto sul piano orizzontale sia associato un solo punto in elevazione.

Diagramma di Voronoi (Fig. 5.2.6). Questo diagramma è una delle più importanti rappresentazioni di un reticolo irregolare. Ogni poligono è definito dai segmenti che bisecano le congiungenti tra i diversi punti e sono ad esse perpendicolari. Le regioni del diagramma di Voronoi ricoprono



5.2.6 - Diagrammi di Voronoi.



5.2.7 - Triangolazione di Delaunay.

tutto il piano senza intersecarsi. I poligoni alle estremità restano invece aperti.

Triangolazione di Delaunay (Fig. 5.2.7). Dal diagramma di Voronoi deriva la costruzione del reticolo di Delaunay: “un reticolo di Delaunay in due dimensioni è formato da triangoli che non si sovrappongono, dove nessun nodo del reticolo è incluso dai cerchi che circoscrivono i triangoli”. Questo algoritmo prevede dunque la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano ed il collegamento tra quelli a distanza minima. La verifica di questa condizione avviene considerando i cerchi che li circoscrivono. Se tre punti appartengono ad ogni cerchio del reticolo, la triangolazione è unicamente definita. I centri degli stessi cerchi che rispettano la condizione corrispondono ai vertici dei poligoni di Voronoi. Stabiliti questi triangoli “potenziali” vengono ulteriormente verificati proiettandoli nello spazio e imponendo ulteriori valori di soglia.

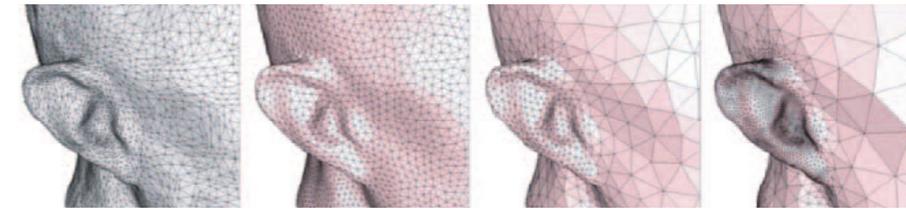
### 5.3.5 La correzione e l’ottimizzazione del modello.

Un modello che ha subito un’operazione di fusione presenta in genere tre diverse tipologie di errore.

Una prima tipologia riguarda gli errori topologici. Questi errori riguardano la creazione di connessioni tra elementi che non rispettano le reali caratteristiche topologiche dell’oggetto che è stato acquisito. In questo caso è necessario “ripulire” le *mesh* con modalità semi-automatiche. Molti degli errori generati (ad esempio, la generazione di triangoli con stessi vertici, bordi condivisi tra triangoli, triangoli adiacenti con normali invertite,...) possono essere riconosciuti e corretti con le opportune funzioni offerte dalle soluzioni software più comuni.

La seconda tipologia di errore, comune in seguito alla fusione del modello, riguarda la presenza di lacune in alcune aree. Queste possono essere ricostruite con procedure manuali molto onerose in termini di tempo. Le lacune sono in genere dovute alla presenza di zone d’occlusione, alla presenza di zone d’ombra (che interrompono la connessione fonte luminosa-sistema ottico di acquisizione) od alla riflessione del materiale. Questa mancanza di dati può presentarsi in aree dalle caratteristiche diverse, che richiederanno approcci integrativi diversi. In zone planari o con curvatura costante la ricostruzione è piuttosto semplice e speditiva. Dove invece le superfici hanno andamenti complessi e cambi di curvatura è necessario intervenire con l’uso di superfici di *fitting* che prolungano ed interpolano le superfici presenti.

L’ultima tipologia di anomalia riscontrabile dopo la fusione è la presenza



5.2.8 - Esempio di decimazione del numero di poligoni, senza variazione della geometria.

di “rumore” nel modello. Un’altra operazione che talvolta può essere utile per il miglioramento del risultato finale è la lisciatura del modello tramite specifici algoritmi che consentono di procedere iterativamente e progressivamente. Non sempre tuttavia è indicata, poichè potrebbe implicare una modifica sostanziale della geometria del modello.

Prima di terminare la fase di elaborazione del modello poligonale, altre due operazioni possono ottimizzare il risultato ottenuto.

Innanzitutto, la decimazione del numero di poligoni generati (Fig. 5.2.8). Quest’operazione è particolarmente indicata per la rimozione di informazioni sovrabbondanti ed in caso di un sovra-campionamento dei poligoni che rendono difficilmente gestibile il modello finale. La riduzione delle informazioni e della complessità del modello deve ovviamente essere svolta compatibilmente alle finalità per le quali il modello stesso è stato elaborato. Altre operazioni che possono migliorare il modello poligonale sono la suddivisione ed il *re-meshing*, ovvero la redistribuzione dei poligoni. Con la suddivisione vengono localmente aumentati il numero di poligoni. Attraverso il *re-meshing* i vertici, in genere disordinati dopo l’*editing* e l’ottimizzazione, vengono regolarizzati. Anche questa operazione, tuttavia, generando una perdita dei dettagli delle superfici nella redistribuzione dei poligoni, deve essere utilizzata solo quando compatibile con le finalità del rilievo.

### 5.3.6 Il texture mapping.

Nel processo di creazione del modello digitale, ulteriori informazioni su materiali e colori delle superfici possono essere aggiunti attraverso la proiezione di immagini digitali (*texture*) sul modello geometrico<sup>18</sup>. L’aspetto materico dell’oggetto può essere visualizzato associando al modello uno *shader*, sia su un modello realizzato in CAD che su un modello rilevato tridimensionalmente. La restituzione visiva di queste caratteristiche è possibile nella fase di *rendering*, che può avvenire semplicemente in qualsiasi software di *editing* tridimensionale o in applicazioni avanzate di realtà virtuale, grazie al motore di *rendering*. All’interno di questi motori,

attraverso la modifica dei “canali” (ovvero parametri rappresentati da numeri), è possibile definire una serie di caratteristiche dell’oggetto e della scena ( trasparenze, rugosità, colori, illuminazione...).

Le *texture* sono immagini digitali che possono essere acquisite con diverse strumentazioni. Tra queste, il metodo ovviamente migliore è quello di utilizzare una camera fotografica. Una prima distinzione tipologica può essere effettuata tra texture ripetibili e texture *ad hoc*. Nelle prime, la ripetizione della tessitura sulle superfici permette una visualizzazione senza giunture (*seamless*). La ripetibilità di queste immagini senza limiti non impone problemi di risoluzione. Nelle texture *ad hoc*, invece, ogni parte è strettamente connessa alle caratteristiche ed alle variazioni geometriche del modello. Il risultato è in questo caso vincolato alla risoluzione delle stesse immagini. In alcuni casi, può essere utilizzata una tecnica mista che consenta di ottimizzare il modello in base alle necessità.

Nella acquisizione di *texture* con una fotocamera digitale, in modo da garantire un’unione tra i fotogrammi senza discontinuità, è necessario prestare attenzione ad alcuni fattori. Controllando manualmente, ad esempio, il bilanciamento del colore e l’esposizione è possibile ottenere un’immagine unica in cui siano quasi del tutto invisibili le giunture tra i fotogrammi uniti. In ambienti esterni, l’acquisizione delle immagini dovrebbe di norma avvenire in giornate nuvolose per limitare il numero di ombre portate sull’oggetto. Qualora non sia possibile, è preferibile acquisire le immagini nelle ore centrali della giornata. Il salvataggio delle immagini in formato Raw consente in genere di poter post-processare i dati grezzi acquisiti in maniera più estesa prima dell’elaborazione dell’immagine finale. Fondamentale è poi la scelta della risoluzione delle immagini. Una risoluzione inferiore può essere sicuramente utilizzata per visualizzazioni *real-time* (ad esempio, per videogiochi), non sufficienti però nel caso di visualizzazioni statiche. Un altro fattore incidente sulla qualità della *texture* finale è l’ottica utilizzata per l’acquisizione dei fotogrammi. Le ottiche a focale fissa sono sicuramente quelle che assicurano distorsioni minori dell’immagine, ma non sono sempre disponibili od utilizzabili. Nel campo dei Beni Culturali vengono spesso utilizzati sistemi grandangolari, che permettono di avere un campo visivo ampio nonostante le distorsioni tuttavia rilevanti nelle immagini. Con l’aumentare della focale, ed in particolare con i teleobiettivi, si ottiene una riduzione delle distorsioni ma anche una maggiore complessità nell’operazione di cucitura delle immagini (poiché il campo inquadrato è molto meno ampio). Una soluzione di compromesso tra le due è in genere consigliabile. Una volta ottenuta la *texture*, vanno stabilite le “regole di corrispondenza” che indicano le modalità in cui questa immagine deve essere proiettata

sull’oggetto. La regola più semplice è quella della “proiezione planare”, in cui la superficie su cui proiettare l’immagine è perpendicolare all’asse di proiezione. Inclinando la superficie, appariranno in questo caso degli effetti di “stiramento” dell’immagine proiettata.

Il secondo caso è quello della “proiezione cilindrica”, in cui l’immagine si avvolge lungo un asse attorno all’oggetto. Nel caso di modelli poligonali e quindi superfici triangolari, l’effetto di proiezione è simile all’esempio precedente.

L’ultimo caso è quello delle “proiezioni cubiche”. I software selezionano automaticamente le facce in base al loro orientamento prevalente e ad esso associano appropriate proiezioni planari.

Poiché gli oggetti di cui ci occupiamo sono spesso oggetti complessi e non descrivibili attraverso geometrie semplici, vengono definite quasi sempre delle “sub-proiezioni”, ovvero delle proiezioni parziali. I software consentono così di sviluppare automaticamente con funzioni specifiche gli oggetti e di poter poi intervenire nell’ottimizzazione del risultato in maniera manuale.

Nell’associazione di una *texture* ad un oggetto, delle componenti aggiuntive (“U” e “V”) vengono assegnate a ciascun vertice dei triangoli della *mesh*. Queste componenti descrivono le coordinate dell’immagine proiettata e vengono distinte da quelle X,Y,Z del modello geometrico. Quando viene impostata la ripetizione dell’immagine nelle parti esterne all’area della *texture*, ulteriori componenti “U” e “V” possono essere assegnate e la *texture* proiettata in queste aree.

## Note

- <sup>1</sup> Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, 2010.
- <sup>2</sup> Remondino F., Campana S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*. BAR International Series 2598, 2014.
- <sup>3</sup> Bawden G., Howle J., Bond S., Shriro M, Buck P., “ Three-Dimensional Imaging, Change Detection, and Stability Assessment during the Centerline Trench Levee Seepage Experiment Using Terrestrial Light Detection and Ranging Technology, Twitchell Island, California, 2012”, *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1092*, 28 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141092>.
- <sup>4</sup> [www.iso.org](http://www.iso.org)
- <sup>5</sup> JCGM, “International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), France, 2008.
- <sup>6</sup> Guidi G., “Metrological characterization of 3D imaging devices”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2013. DOI: 10.1117/12.2021037
- <sup>7</sup> Bernardini F., Rushmeier H. “The 3D Model Acquisition Pipeline”, *Computer Graphics Forum*, NCC Blackwell, Vol. 21(2), pp.149-172, 2002.
- <sup>8</sup> Russo M., Remondino F., Guidi G., “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico”, *Archeologia e calcolatori*, Vol.22, 2011, pp. 169-198
- <sup>9</sup> Remondino F., Toschi I., Orlandini S., “Mobile Mapping Systems: recenti sviluppi e caso applicativo”, *Geomedia*, Vol. 19 n°4, 2015
- <sup>10</sup> Gandolfi S., Forlani G., “Catasto stradale, mobile mapping e navigazione geodetica nelle reti di stazioni permanenti”, *PRIN 2004: I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government*, Cap. 6.
- <sup>11</sup> Vosselman G., “Design of an indoor mapping system using three 2D laser scanners and 6 DOF SLAM”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. II-3, 2014.
- <sup>12</sup> [http://www.applanix.com/pdf/TIMMS\\_2\\_spec\\_sheet.pdf](http://www.applanix.com/pdf/TIMMS_2_spec_sheet.pdf)
- <sup>13</sup> <http://viametris.info/iMS3D/EN/#home>
- <sup>14</sup> [http://www.leica-geosystems.us/downloads123/zz/Mobile%20Map/proscan/brochures-datasheet/Leica\\_ProScan\\_DS\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.us/downloads123/zz/Mobile%20Map/proscan/brochures-datasheet/Leica_ProScan_DS_en.pdf)
- <sup>15</sup> [http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/Mobile%20Map/Pegasus/brochures/leica\\_pegasus\\_one\\_BRO\\_en.pdf](http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/Mobile%20Map/Pegasus/brochures/leica_pegasus_one_BRO_en.pdf)
- <sup>16</sup> <http://geoslam.com/hardware-products/zeb1/>
- <sup>17</sup> <http://geoslam.com/app/uploads/2015/11/ZEB-REVO-Brochure-v1.0.2.pdf>
- <sup>18</sup> Guidi G. et al., *Op.cit.*, pp-279-303.

CAPITOLO SESTO  
**Unity 3D : il “gaming” per l’archeologia****6.1 Strutture formali delle piattaforme virtuali.**

Con il termine “realtà virtuale” si fa riferimento oggi ad un gran numero di tecnologie che permettono di ricreare in modo sintetico alcune caratteristiche di oggetti più o meno reali e fenomeni. Dalle più semplici soluzioni di immagini generate e visualizzate su un computer, ai più complessi sistemi che permettono simulazioni di ambienti che creano illusioni spazio-temporali<sup>1</sup>.

Alla base dello sviluppo di ogni ambiente virtuale vi è un processo di simulazione digitale, che risponde alle principali convenzioni comunicative. La simulazione non è altro che una trasposizione di un modello concettuale ed interpretato di una realtà o di un fenomeno, al fine di riprodurre alcune caratteristiche. Pur potendo potenzialmente riproporre qualsiasi aspetto di queste realtà, la simulazione è essenzialmente basata su rappresentazioni visive ed acustiche, per i vantaggi che queste forme offrono in termini sia computazionali che comunicativi. La generazione, la codificazione ed il trasferimento di informazioni audio-visive risulta, infatti, più semplice ed efficace rispetto a quelle da percepire con gli altri sensi. In questo studio è approfondito solamente l’aspetto visuale. L’introduzione di tecnologie simulate ed interattive ha, negli ultimi anni, condotto alla nascita di studi e campi di ricerca sulla cognizione spaziale. Questi studi dimostrano che l’interazione con ambienti virtuali è in grado di creare una conoscenza spaziale in modo analogo a quello ottenibile da un ambiente non simulato, riuscendo a preservarne le caratteristiche visuo-spaziali ed interattive<sup>2</sup>. Molto spesso la simulazione consente di conservare una prospettiva egocentrica



6.1.1 - Esempio di navigazione in ambiente completamente immersivo con prospettiva egocentrica.

durante la navigazione (Fig. 6.1.1). Questo permette di acquisire una sostanziale conoscenza spaziale utilizzando le stesse modalità cognitive utili a mantenere l’orientamento anche in ambienti non simulati. Nel processo di generazione di un ambiente virtuale, l’immagine mentale di un modello reale o di un fenomeno vengono tradotti in una sequenza di informazioni numeriche. I modelli matematici, creati dai software, vengono presentati all’utente sotto forma di immagini. L’immagine sintetica digitale utilizzata negli ambienti virtuali è discreta e modulare. Discreta perché scomponibile in elementi puntiformi (*pixels*), che contengono informazioni di posizione, colore e luminosità memorizzati all’interno dell’immagine stessa. Modulare perché assemblabile in sistemi più complessi. Lo stesso concetto è applicabile non solo all’immagine digitale ma anche a tutti i “*media elements*” (*voxels, characters, scripts,...*) che compongono l’ambiente virtuale e che, se pur assemblati su più larga scala conservano la propria identità autonoma. Da un punto di vista comunicativo e culturale, l’interfaccia, che permette l’interazione tra l’utente e l’ambiente virtuale è proprio l’immagine digitale. Veicolando le informazioni da trasmettere, l’interfaccia non è mai un elemento neutrale<sup>3</sup>. In ogni progetto di simulazione virtuale, l’elemento fondamentale e fondativo è l’interazione. L’interazione tra l’utente ed il sistema computerizzato (HCI – *Human Computer Interaction*) è un processo complesso, che richiede una mediazione tra i due rispettivi sistemi di conoscenze<sup>4</sup>. In particolare, all’utente è richiesto un adattamento dei propri strumenti di comprensione del reale ed alla macchina di reagire agli stimoli forniti da quest’ultimo per ri-organizzare le informazioni. Questa interazione può svolgersi secondo diverse modalità, consentendo la scelta diretta dei contenuti informativi da visualizzare, oppure permettendo di esplorare liberamente l’ambiente, fino alla possibilità di manipolare e rielaborare l’ambiente<sup>5</sup>. La progettazione di un ambiente interattivo deve tener conto di tre elementi fondamentali: la presenza, l’immersione e la navigazione.

La presenza è una sensazione che deriva da processi cognitivi e percettivi che aiutano l’utente a comprendere ed a partecipare alla realtà simulata proposta (Fig. 6.1.2). Per stimolare la sensazione di presenza è necessario coinvolgere la principale interfaccia che consente l’interazione, ovvero il corpo, e, al tempo stesso, progettare una robusta struttura narrativa. Parlando di componenti percettive, che variano da individuo ad individuo, gli ambienti virtuali vengono solitamente progettati in base a classi tipologiche di potenziali utenti.

Il concetto di immersione è legato invece al realismo della simulazione proposta ed all’ampiezza del campo visivo coinvolto.

Un ambiente semi-immersivo è, ad esempio, quello ricreato nei *Cave*



6.1.2 - Navigazione in ambiente immersivo, in cui la sensazione di presenza viene ampliata dalla visualizzazione del corpo virtuale.

*Authomatic Virtual Environment* (CAVE), ovvero ambienti chiusi in cui le immagini stereoscopiche vengono proiettate su tutte le pareti (Fig. 6.1.3). Sistemi, invece, immersivi sfruttano soluzioni desktop o schermi e dispositivi di visione stereoscopica, come gli *head mounted display* (ad esempio, nei sistemi di tipo *workbench* – tavoli retroproiettati con piano di lavoro trasparente (Fig. 6.1.4), o nei più evoluti sistemi CADWALL. La completa immersione nell’ambiente virtuale implica che l’utente venga completamente coinvolto nella scena simulata ed interagisca esclusivamente con esso. Questo accresce, ovviamente, il senso di presenza. La simulazione, invece, richiede uno spostamento dell’utente all’interno dell’ambiente, che deve essere in grado di rispondere e ri-organizzarsi in base agli *input* di movimento forniti. L’ambiente virtuale, con la navigazione, diventa spazio navigabile, e può così consentire di raggiungere i diversi contenuti presenti nelle scene ricorrendo ad apposite traiettorie e percorsi progettati.

La scelta delle modalità di interazione (e, dunque, del livello di presenza, immersione e navigazione) è, in definitiva, funzione di due fattori:

- le caratteristiche dell’utente finale, che incidono fortemente sullo sviluppo del progetto e nella scelta della piattaforma;
- la tipologia dei contenuti da inserire nella piattaforma e da rendere fruibili.

Nel campo del “*Virtual Heritage*”, lo scopo della realizzazione di ambienti virtuali di simulazione di scenari interattivi è quello di rappresentare contemporaneamente e su una stessa piattaforma una molteplicità di informazioni. La caratteristica principale degli ambienti virtuali è, infatti, l’integrazione di dati di natura diversa (rappresentazioni iconografiche, informazioni testuali, modelli tridimensionali,...) in un unico prodotto digitale. La complessità di gestione di dati così eterogenei richiede quell’approccio multi-disciplinare esplicitato nei principi della “Carta di Siviglia” (par. 3.1). La particolarità di questo tipo di ambiente è lo sviluppo di processi non lineari di apprendimento, legati alla natura digitale dei dati utilizzati, alla simulazione della percezione spaziale ed all’esperienza emozionale degli utenti.

La validità scientifica di un “*Cultural Virtual Environment*” dipende, in primo luogo, dall’inserimento nel progetto virtuale di “metadati” (per lo più informazioni didascaliche per catalogare una fonte storica consultata) e “paradati” (ovvero dati sulle procedure di documentazione utilizzati). La trasparenza del processo di analisi ed, eventualmente, ricostruzione tridimensionale, è quello che distingue questa tipologia di produzione virtuale da altri progetti destinati all’intrattenimento od alla valorizzazione del patrimonio culturale.



6.1.3 - Esempio di ambiente semi-immersivo. CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*).



6.1.4 - Sistema di navigazione con *workbench* e *head mounted display*.

## 6.2 La progettazione della “struttura narrativa”.

La prima e fondamentale fase per la realizzazione di ambienti virtuali è la progettazione della “struttura narrativa” (il “*Virtual Reality Storytelling*”<sup>6</sup>), che definisce cosa, come e quando verrà visualizzato dall’utente finale. Ad essere definito è, in questo modo, il processo comunicativo, che spesso risulta complesso e multi-dimensionale. La definizione di una struttura, come già anticipato, parte dall’identificazione degli obiettivi del progetto e dei possibili fruitori. Ad ogni tipologia di utente corrispondono, infatti, diverse esigenze, conoscenze pregresse, capacità interpretative ed interessi che richiedono, dunque, differenti approcci, contenuti e livelli di interazione. La definizione di questi ultimi condiziona la scelta della piattaforma da utilizzare per la visualizzazione finale dei prodotti.

La struttura della visita virtuale deve tener conto non solo dei contenuti da inserire ma, soprattutto, delle relazioni che intercorrono tra essi. Affinché la navigazione risulti un’esperienza di arricchimento cognitivo e percettivo di taluni aspetti del reale o di alcuni fenomeni, deve risultare chiara l’organizzazione spazio-temporale dei contenuti, la loro strutturazione sistemica ed il codice narrativo utilizzato. La dimensione spaziale è definita dalla progettazione dello spazio navigabile. Questo può prevedere, ad esempio, passaggi tra ambienti che ripropongono la realtà percepita nel mondo reale ed ambienti immaginati o ricostruiti. Allo stesso tempo, l’ambiente può riproporre delle scene del reale arricchite di altri contenuti digitali. La dimensione temporale è, invece, definita dalla progressione delle scene e dei contenuti visualizzabili, stabiliti dalla struttura narrativa che guida la lettura e la comprensione della visita virtuale. Questo aspetto è particolarmente rilevante nel caso del *Virtual Heritage*, in cui una visualizzazione diacronica e dinamica delle scene, dei modelli e degli eventi è un fattore essenziale.

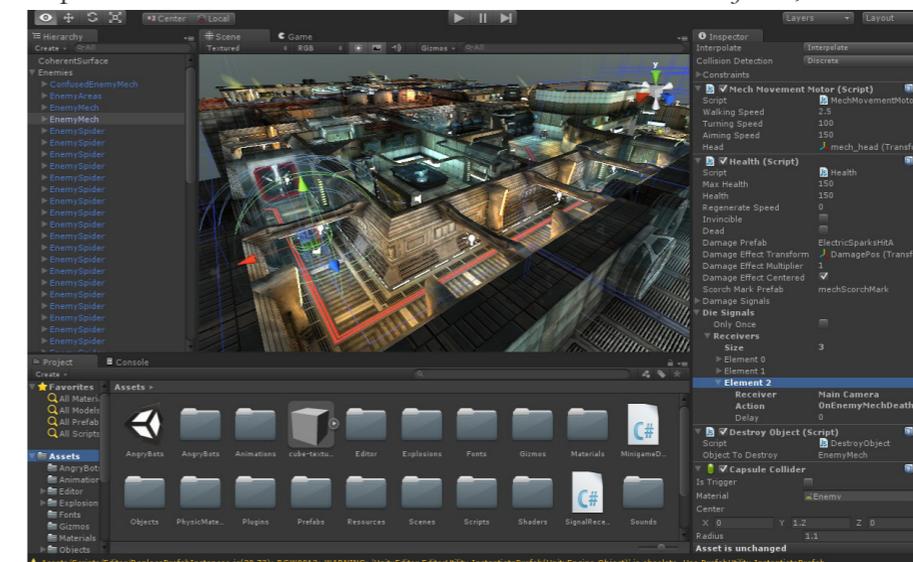
L’interazione consentita nella navigazione può rendere, allo stesso tempo, la struttura narrativa estremamente flessibile e centrale il ruolo dell’utente. Al fruitore può infatti essere consentito di definire liberamente il proprio percorso di visita virtuale, all’interno delle opzioni e dei limiti previsti. Questo richiede, ovviamente, che all’interno del progetto siano realizzate interconnessioni multiple tra i contenuti e le scene.

## 6.3 Lo sviluppo di un ambiente virtuale.

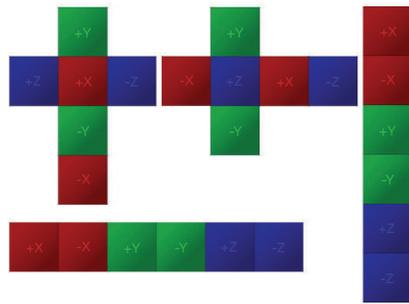
### 6.3.1 Caratteristiche e struttura del Game Engine “Unity 3D”.

“Unity 3D”<sup>7</sup> è un *Game Engine* che ha avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni, soprattutto per la progettazione di video-games. “Unity 3D” è essenzialmente composto da un motore grafico 3D (che consente la visualizzazione *real-time* della grafica, oltre ad avere un motore di *rendering*), un motore fisico, un rilevatore di collisioni (che permette di collidere oggetti fisici) alcuni componenti per l’audio e per l’animazione, un IDE grafico per la gestione dei progetti ed offre la possibilità di comporre i propri *scripts* utilizzando diversi linguaggi di programmazione. Questo *Engine* permette di realizzare progetti per una grande varietà di piattaforme (sistemi operativi desktop, quasi tutti quelli *mobile* e le principali *console*). L’interfaccia ed il layout di base di Unity 3D è composta da diversi elementi (Fig. 6.1.5):

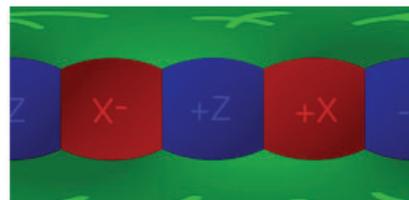
- 1) il “*Project*”, che rappresenta la struttura del progetto e che ne contiene tutti gli elementi fisici e non. I diversi componenti sono generalmente raggruppati in cartelle in base alle diverse funzioni (*materials, textures, scripts, characters,...*);
- 2) la “*Scene*”, ovvero la rappresentazione della scena corrente, che permette una visualizzazione interattiva degli elementi presenti nell’ambiente (o livello del progetto) che si sta sviluppando;
- 3) la “*Hierarchy*”, ovvero l’elenco degli elementi presenti nella scena corrente. In questo caso, sono presenti non solo oggetti fisici, ma anche componenti virtuali (come la camera, fonti di luce, *audio-listener,...*). Gli elementi possono essere qui organizzati in gruppi in base alla loro tipologia o funzione, creando un “*Parent Object*” e dei “*Child Object*”, a cui verranno assegnate le stesse caratteristiche.
- 4) L’ “*Inspector*”, utile a visualizzare ed a modificare le proprietà e le impostazioni dei diversi elementi. Nel caso di “*GameObjects*”, ovvero di



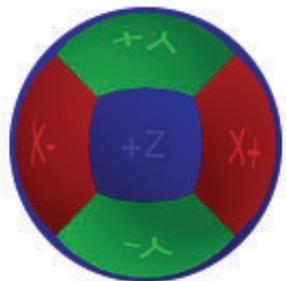
6.1.5 - Esempio di interfaccia di un progetto per la realizzazione di un ambiente virtuale in Unity 3D.



6.1.6 - Formati supportati da Unity 3D per la generazione di “Cubemaps”. Layout con righe e colonne.



6.1.7 - Formati supportati da Unity 3D per la generazione di “Cubemaps”. Immagini equirettangolari.



6.1.8 - Formati supportati da Unity 3D per la generazione di “Cubemaps”. Spheremaps.

dei materiali, oltre all’eventuale presenza di *scripts* per i comandi ad essi associati ed assegnati.

5) La “*Game View*”, che offre una visualizzazione renderizzata in *real-time* della scena, ripresa dalla camera impostata e che rappresenta una preview del risultato finale.

Oltre a questi elementi, il layout di base presenta una barra degli strumenti che consente, tra le altre cose, di spostare, ruotare o scalare gli oggetti, di inizializzare la visualizzazione dinamica della scena nella “*Gaming View*” e di impostare il sistema di riferimento da utilizzare. Gli elementi importati nel progetto conservano, infatti, un sistema di riferimento locale, che può essere utilizzato o sostituito da quello globale presente nell’*Engine*.

Quasi tutti gli elementi visibili nel progetto sono in “Unity 3D” dei “*GameObject*” (modelli, piani, sfere e perfino la camera che inquadra la scena), possono essere visibili o meno, emettere suoni o essere interattivi. Queste entità (composte da *mesh*, *scripts*, audio ed altri elementi) sono definiti da alcuni “*Components*”, che possono essere aggiunti e modificati per ognuno di essi.

I “*Prefabs*” (letteralmente “prefabbricati”) sono anch’essi essenzialmente dei “*GameObjects*” che vengono creati all’interno di “Unity 3D”. Questi ultimi sono utili nel caso in cui si voglia instanziare un oggetto, permettendo che ogni modifica apportata a quest’oggetto venga applicata a tutti i duplicati (a differenza di quanto accade con i “*GameObjects*”). Gli oggetti creati a partire dal “*Prefab*” saranno, dunque, delle istanze di questo prototipo ed avranno caratteristiche simili.

Per assegnare, invece, delle istruzioni agli elementi presenti in una scena e far eseguire delle azioni è necessario utilizzare gli *scripts*. Gli *scripts* sono delle porzioni di codice, che una volta assegnati agli oggetti diventano a tutti gli effetti dei loro “*Components*”. Uno *script* è composto da alcune funzioni, ovvero dei blocchi di istruzioni. Le funzioni vengono eseguite quando sono richiamate in qualche parte del programma (in Unity “*start*” e “*update*”). Le variabili sono dei “contenitori” che hanno dei valori raggruppati in diverse classi.

### 6.3.2 La navigazione in foto sferiche equirettangolari: metodologie per l’acquisizione delle immagini, elaborazione ed utilizzo in “Unity 3D”.

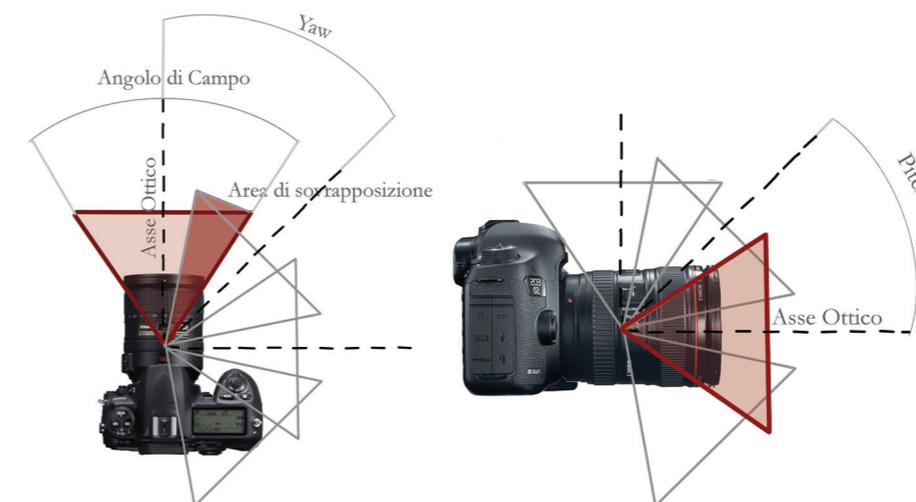
Una struttura narrativa che parta dalla visualizzazione di un ambiente reale richiede l’utilizzo di espedienti e tecniche in grado di simularne l’apparenza visiva. Con “Unity 3D” questo è possibile adottando diverse strategie. Quella di seguito approfondita, ed utilizzata in questo lavoro per lo

sviluppo dell’ambiente virtuale, prevede la realizzazione di “*Cubemaps*” da semplici textures. Le “*Cubemaps*” sono, in genere, utilizzate per descrivere l’ambiente che circonda un oggetto (*skybox*) come sfondo dell’universo virtuale o possono essere assegnate ad oggetti, creando condizioni di illuminazione e riflessi particolari. Nella Computer Grafica si fa spesso uso di immagini panoramiche equirettangolari, anche in HDR, per questi scopi. I formati principali supportati da “Unity 3D” per la generazione di “*Cubemaps*” sono, oltre alle immagini equirettangolari (che devono avere un rapporto larghezza/altezza di 2 a 1), dei formati *mirror* e *ball* circolari e *six sided* (Figg. 6.1.6 a 6.1.8).

Le immagini equirettangolari vengono, in genere, acquisite o con fotocamere digitali a 360° o con l’ausilio di una testa panoramica montata su un treppiedi (Fig. 6.1.9). Quest’ultima soluzione è preferibile, in molti casi, per la possibilità di correggere in fase di post-produzione l’esposizione delle singole immagini acquisite.

Come già visto nel par. 4.2, una testa panoramica è composta da una rondella che consente di selezionare l’angolo di rotazione ed il numero di scatti in base alla lunghezza focale ed all’angolo di campo dell’obiettivo utilizzato. Le ottiche fisse restituiscono risultati migliori, ma sono una soluzione meno flessibile in fase di acquisizione. Le modalità di scatto<sup>8</sup> prevedono che i fotogrammi vengano acquisiti facendo ruotare l’asse ottico ed imponendo che:

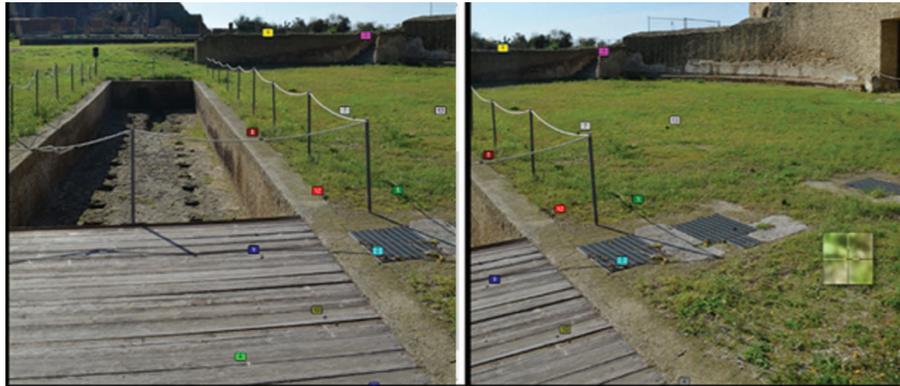
- 1) il centro di rotazione in direzione orizzontale (*Yaw*) e verticale (*Pitch*) coincida con il punto nodale;
- 2) la sovrapposizione tra due immagini consecutive risulti di circa il 30%. (Fig 6.2.1).



6.1.9 - Sistema di acquisizione di immagini panoramiche equirettangolari con una testa panoramica montata su un treppiedi.

6.2.1 - Schema di acquisizione delle immagini con rotazioni intorno al punto nodale.

6.2.2 - Elaborazione dell’immagine equirettangolare con software di *stitching*. Procedure automatiche e manuali di individuazione di punti corrispondenti nelle aree di sovrapposizione tra le fotografie.



A parità di risoluzione del sensore, la risoluzione finale è funzione della lunghezza focale e dell’angolo di campo scelto (e, dunque, della porzione di scena inquadrata). Una volta acquisite le immagini, possono essere processate con software di *stitching*, che utilizzano algoritmi per individuare i punti corrispondenti tra le immagini (Fig. 6.2.2), individuare le lunghezze focali, correggere le distorsioni ed allineare il mosaico.

Una volta ottenuta l’immagine panoramica equirettangolare (Fig. 6.2.3) può essere importata in “Unity 3D” e trasformata in una “*Cubemap*”. Creando una nuovo materiale, come texture può essere assegnata la “*Cubemap*”. Creando un nuovo “*GameObject*”, in particolare una sfera, è possibile assegnare all’oggetto tridimensionale il materiale realizzato. Questa procedura consente, una volta posizionata la camera del *gaming* al centro della sfera, di visualizzare l’immagine panoramica dal suo punto esatto di acquisizione e di ricreare, in questo modo, una visualizzazione immersiva della scena.



6.2.3 - Immagine equirettangolare finale allineata.

### 6.3.3 L’importazione di modelli tridimensionali.

“Unity 3D” importa modelli tridimensionali nei principali formati .fbx e .obj, ma supporta anche file proprietari come “3D Studio Max” (.max) o “Blender” (.blend). Riesce, dunque, a gestire un gran numero di modelli tridimensionali (realizzati con tecniche di rilievo *reality-based* o con modellazione basata su metodi CAD). Se al modello *mesh* è associata una texture, importata nell’*Asset* del progetto può essere applicata all’oggetto. I modelli tridimensionali importati conservano il proprio sistema di riferimento locale. Nel sistema locale od in quello globale il modello può essere scalato od applicata una trasformazione che ne consenta lo spostamento.

Il modello *mesh* può essere visualizzato nella “*Scene*” con tre diverse modalità:

- *Shaded*: permette una visualizzazione del modello simile a quella finale, con luci, texture,...;
- *Wireframe*: viene visualizzata la sola maglia di poligoni;
- *Textured Wire*: vengono mostrate entrambe le visualizzazioni precedenti.

Nell’ “*Inspector*” sono visualizzabili e modificabili le proprietà di importazione. In particolare, le normali dei vettori delle *mesh*, possono essere importate o ricalcolate dal software. “Unity 3D” permette, inoltre, di comprimere od ottimizzare le *mesh* (riordinando gli indici dei vertici e dei poligoni) per migliorare le prestazioni del *gaming*.

### 6.3.4 La navigazione interattiva.

Importati tutti gli oggetti e gli elementi (modelli 3D, texture, immagini panoramiche,...) all’interno di “Unity 3D” organizzati nelle diverse scene o livelli che andranno a comporre la visita virtuale, per rendere dinamico ed interattivo il *gaming* è necessario fornire al software delle istruzioni attraverso gli *scripts*. Per alcune funzioni, “Unity 3D” mette a disposizione dei “*Prefab*” ovvero dei prefabbricati da poter importare nell’*Asset* ed utilizzare nelle diverse scene. Tra questi componenti nativi abbiamo il “*Character Controller*”, definito da una parte grafica e dalle specifiche della “*main camera*” ad esso associato. In particolare, è possibile utilizzare un “*First Personal Controller (FPS)*” o un “*Third Personal Controller (TPC)*”, che definiscono il tipo di interazione tra l’utente e l’ambiente virtuale. Intuitivamente risulta chiaro che, nel primo caso, il fruitore risulterà il maggior attore della scena realizzata, in grado di definire, attraverso i propri movimenti od *input*, gli elementi da visualizzare o con cui interagire

6.2.4 - Esempio di un *Character Controller*.



intorno alla propria posizione. Nel secondo caso, l’utente potrà definire i movimenti e le azioni da far compiere ad un oggetto, un personaggio,... I “*Character Controller*” (Fig. 6.2.4) definiscono, principalmente, i movimenti possibili nello spazio virtuale di ogni scena in base agli *input* forniti dal fruitore (da tastiera, da mouse, ...) e la porzione di ambiente inquadrato dalla camera associata. Gli *scripts* nativi possono essere, ad ogni modo, modificati, in base alle esigenze del progetto. Ulteriori *scripts* servono a definire le azioni da compiere (ad esempio, in che modo cambiare scena, come interagire con gli elementi o come accedere a contenuti ed a collegamenti presenti nell’ambiente virtuale).

## Note

- <sup>1</sup> Ceconello M., “Rappresentazione virtuale: interfacce e tecniche di interazione”. *DDD – Rivista trimestrale di Disegno Digitale e Design* edita da Poli. Design, Anno 2, n°8, 2003.
- <sup>2</sup> Morganti F., Riva G., *Conoscenza, comunicazione e tecnologia. Aspetti cognitivi della realtà virtuale*. LED Edizioni Universitarie, 2006.
- <sup>3</sup> Manovich L., *The language of New Media*, MIT Press, 2001.
- <sup>4</sup> Bettetini G., *La simulazione visiva*, Bompiani, Milano, 1991
- <sup>5</sup> Botta M., *Design dell’informazione*, Artimedia Valentina Trentini Editore, 2006.
- <sup>6</sup> Swartjes I., Theune M., “The Virtual Storyteller: Story Generation by Simulation”. *Proceedings of the 20th Belgian-Netherlands Conference on Artificial Intelligence*, 2008.
- <sup>7</sup> <https://unity3d.com/learn>
- <sup>8</sup> Mastroiaco M., Fangi G., Nardinocchi C., Sonnessa A., “Un’esperienza di rilievo fotogrammetrico basata su panorami sferici”, *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA*, L’Aquila, 21-24 ottobre, 2008.



Parte Terza  
Il Parco Archeologico di Pausilypon

CAPITOLO SETTIMO  
**La villa del Pausilypon  
e le strutture del Parco Archeologico.**

### **7.1 Le architetture romane marittime in Campania.**

A differenza della *domus* urbana (Figg. 7.1.1 e 7.1.2), con una struttura architettonica che segue uno schema distributivo-funzionale piuttosto canonico, la progettazione della “villa suburbana” romana non è soggetta alle stesse regole. L’adattamento all’ambiente naturale, lo sfruttamento delle risorse naturali e la valorizzazione delle bellezze paesaggistiche guidano, in questo caso, le scelte distributive e condizionano la definizione funzionale degli spazi<sup>1</sup>. Una distinzione classica di questa tipologia di abitazione riguarda la “villa rustica” e la “villa marittima”.

Nei primi sviluppi della “villa rustica”, la predilezione che i ricchi senatori e borghesi romani mostrano, con l’espandersi delle conquiste dell’Impero, per la vita agreste è solo in parte legata ai piaceri di una vita lontana dagli impegni della vita nella città. Le prospettive di guadagno, legate ai bisogni crescenti delle città in espansione, rappresentano uno dei principali stimoli ad investire nella produzione agricola. Le prime “ville rustiche”, pensate quasi esclusivamente per lo sfruttamento e la trasformazione dei prodotti agricoli, hanno una struttura piuttosto semplice, con l’abitazione al centro della tenuta adattata alle esigenze produttive. Questa conformazione sarà ben presto sostituita da strutture molto più complesse e sontuose (Figg. 7.1.3 e 7.1.4), soprattutto quando le conquiste in Oriente porteranno i romani a conoscere e ad emulare le regge ellenistiche<sup>2</sup>. Nel corso del I sec. a.C. la tradizionale corte viene sostituita da un giardino, il nucleo abitativo si amplia e trasforma, viene aggiunto il settore servile associato



7.1.1 - Schema ricostruttivo della Domus romana urbana.



7.1.2 - Altro schema ricostruttivo esemplificativo dell'organizzazione di una Domus romana urbana.



7.1.3 - Schema ricostruttivo della "villa rustica" romana.

all'attività produttiva. L'evoluzione di questa tipologia, con la realizzazione di giardini, porticati e vedute scenografiche sul paesaggio circostante, veste di sontuosità e lusso la componente produttiva di queste strutture. Il culto dei giardini, in particolare, grazie alle relazioni commerciali con l'Oriente attraverso i traffici portuali, arriverà per primo in Campania. La cura nella progettazione delle strutture, in modo da garantire sempre un rapporto diretto con il paesaggio (attraverso aperture, scorci, peristili), è una novità di importanza fondamentale per lo sviluppo di questa tipologia abitativa (Figg. 7.1.5 e 7.1.6). Paesaggio che diviene in parte anche artificiale, attraverso la realizzazione di boschetti, fontane e grotte. Questa nuova forma di abitazione, intesa come luogo in cui rifugiarsi per far cessare gli affanni della vita lavorativa, diventa così il luogo privilegiato per la pratica dell'*otium*. Si afferma sempre più una distinzione tra le strutture destinate all'*otium* (ovvero ai piaceri della vita del tempo libero) e quelle dedicate al *negotium* (ovvero ai doveri). Nei luoghi dell'*otium*, letture, banchetti, conversazioni, bagni nelle terme private, esercizio fisico e passeggiate, allietano il corpo e lo spirito. Un clima politico più disteso, a partire dalla I sec.a.C., fino alla ritrovata pace portata da Augusto, favorirà lo sviluppo e l'evoluzione di una tipologia particolare di villa d'*otium*: la "villa marittima". Le coste campane saranno predilette per il particolare clima mite e la straordinaria bellezza paesaggistica dei luoghi. Una serie di lussuose ville dalla configurazione "a fronte aperto"<sup>3</sup> e a "nuclei sparsi", costruite principalmente su terrazze degradanti verso il mare, occuperanno la costa da Miseno a Punta Campanella. Molte di queste diventeranno demanio imperiale, come le ville di Lucullo a Pizzofalcone e a Miseno, il "*palatium*" di Baia di Giulio Cesare, la Villa di Pausilypon appartenuto a Vedio Pollione. Ogni terrazza ospitava in genere un settore della villa con una specifica destinazione funzionale. L'adattamento all'ambiente naturale ma anche la "modellazione" del paesaggio, con la costruzione di terrazzamenti, sostruzioni e tagli nella roccia, mostra le straordinarie capacità degli architetti dell'epoca, chiamati a confrontarsi con problematiche progettuali nuove. La stessa distribuzione funzionale degli ambienti interni delle singole strutture che compongono la villa è frutto di un nuovo modo di percepire il rapporto con il paesaggio. Le aperture e gli scorci che si aprono dall'interno verso le bellezze della natura ridefiniscono il ruolo delle finestre. Laddove non possono essere presenti, vengono sostituite da dipinti murari a carattere naturalistico. Il portico diventa un filtro indispensabile tra interno ed esterno, oltre che collegamento tra i diversi settori. I porticati circondano soprattutto i vasti ed interminabili giardini delle ville, organizzati in diverse cellule, ognuna con un proprio schema geometrico essenzialmente simmetrico. Un elemento costante

nei giardini è l'acqua. Fontane, cascate, vasche (per lo più abbellite da statue) sono presenti pressoché in ogni giardino. La progettazione della distribuzione degli ambienti interni è funzione non solo delle vedute sul paesaggio ma anche del clima. Non avendo limiti urbanistici, vengono realizzati quartieri da utilizzare in diverse stagioni. La "villa marittima" è frequentemente descritta nelle fonti antiche quale luogo di assoluta improduttività, diametralmente opposta e complementare dunque alla realtà della "villa rustica", simbolo degli investimenti della classe senatoria nella produzione agricola. L'attività produttiva della "villa rustica" serviva proprio a generare quella ricchezza da sperperare nella lussosità delle residenze marittime, basate sostanzialmente sulla rendita del proprietario. Nella realtà però dichiarata dai resti archeologici, i fondi agricoli erano per lo più annessi alla stessa villa, considerando la sua notevole estensione su colline e promontori, dove frequentemente venivano prodotti vino ed olio. La produttività dei terreni e la presenza di risorse naturali da sfruttare (cave, miniere, ...) era proprio uno dei requisiti principali nella scelta dei luoghi in cui costruire. Anche la totale improduttività di queste residenze, così come raccontata dalle fonti, è smentita dalla frequente presenza di vasche e vivai per l'itticoltura. I vivai, in opera cementizia o scavati nella roccia, erano protetti da frangiflutti visibili in molti casi ancora oggi. Queste strutture, indicate dalle fonti come un inutile lusso simbolo del potere e dei vizi dei proprietari, assumono talvolta dimensioni tali da ritenere che fossero in realtà un elemento fondamentale dell'economia della villa, oltre a poter potenzialmente alimentare mercati esterni. Le peschiere sulla costa tirrenica erano di frequente contraddistinte da una miscelazione di acqua di mare con acqua dolce proveniente da cisterne. Questa caratteristica consentiva soprattutto l'ossigenazione del vivaio e dunque un allevamento intensivo, riuscendo ad aumentare di molto la quantità di pesce presente nelle vasche. Le poche notizie ricavabili dalle fonti riguardo a questa attività ed i relativi profitti è dovuta principalmente alla predilezione dell'attività agricola nel mondo romano quale fonte di investimento considerato sicuro ed onorevole. L'esaltazione del valore produttivo della "villa rustica" è causa e conseguenza dunque della prevalente immagine della villa marittima quale luogo deputato esclusivamente al lusso. Da un punto di vista formale, le peschiere ed i vivai rispondevano ai criteri di organizzazione spaziale e decorativa di questi complessi. Il pessimo stato di conservazione di queste strutture rende difficile oggi identificare a pieno il codice formale di queste strutture e soprattutto il loro apparato decorativo. Ad ogni modo, poiché visibili da diverse zone della villa, andava ricreato un apparato scenografico in grado di rispondere alle stesse regole compositive dell'intero complesso: porticati o pergole, statue, colonne e pilastri. In prossimità dei vivai,



7.1.4 - Altro schema ricostruttivo dell'organizzazione della "villa rustica" romana.



7.1.5 - L'architettura ed il paesaggio.



7.1.6 - Ricostruzione della "Casa del Poeta Tragico" (Pompei). Rapporto tra architettura e giardini.



7.1.7 - Veduta di alcune strutture marittime in un dipinto negli scavi archeologici di Stabiae.

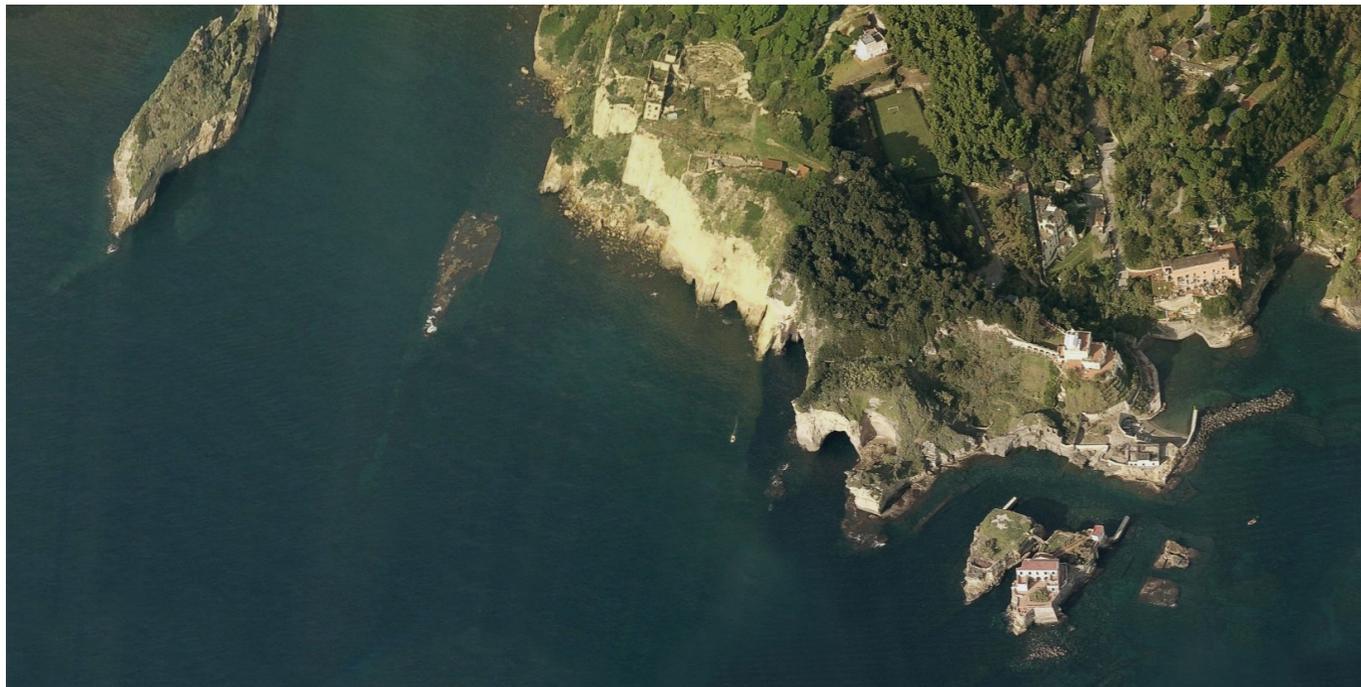


7.1.8 - Veduta di alcune strutture marittime in Villa San Marco (Stabiae).

spesso venivano realizzate anche delle piattaforme per banchetti (*cenationes*). La vicinanza alle strutture produttive serviva, ancora una volta, ad esaltare e spettacolarizzare il potere ed il lusso del proprietario (Figg. 7.1.7 e 7.1.8).

## 7.2 La villa di Publio Vedio Pollione.

La costa campana, grazie alla particolare mitezza del clima, le acque termali ed i costumi saldamente ancorati alla tradizione ellenistica, era dunque uno dei luoghi privilegiati dai ricchi senatori ed aristocratici romani per la pratica degli *otia*. Il ritratto della vita condotta in queste lussuose ville è offerto da illustri fonti: tra tutte i racconti di Cicerone, Seneca, Orazio, Varrone. Da Punta Campanella a Capo Miseno, furono costruite un considerevole numero di residenze appartenenti ai più importanti personaggi politici romani (Mario, Silla, Crasso, Cesare, Lucullo, Cicerone e molti altri)<sup>4</sup>. Tra queste ville, una in particolare ieri come oggi mostra un fascino del tutto particolare nel Golfo di Napoli. Parliamo della villa appartenuta all'ex liberto Publio Vedio Pollione (Fig. 7.1.9), sul promontorio di Pausilypon, dal greco "luogo che fa cessare gli affanni". Alcune fonti descrivono questo primo proprietario attraverso aneddoti di certo poco nobilitanti. Comportamenti esagerati ed immorali e l'ostentazione del lusso, porteranno addirittura Cicerone ad affermare "*numquam vidi hominem nequiores*".

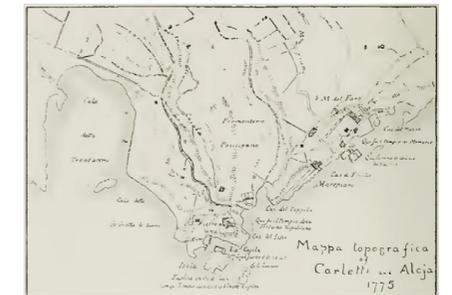


7.1.9 - Veduta aerea di alcune strutture del Parco Archeologico di Pausilypon.

Tra scandali e frequentazioni illecite con donne illustri (raccontate nell'episodio del ritrovamento tra i suoi bagagli di cinque medaglioni, pegno d'amore di altrettante matrone dell'alta società romana) e racconti di vicende di rilevante crudeltà, Pollione (Fig. 7.2.1) non era certamente una figura particolarmente apprezzata nell'ambiente romano. L'episodio più celebre riguarda un incontro con l'imperatore Augusto, con cui ebbe una controversa amicizia, proprio nella villa di Posillipo. Seneca racconta, nel suo "*De Ira*"<sup>5</sup>, che durante un banchetto un servo rompe una coppa di cristallo. La pena inflitta da Pollione fu del tutto particolare: il servo venne condannato ad essere gettato nella vasca delle murene per diventarne il pasto. Augusto, che aveva assisto alla scena ed all'assurda e crudele condanna, ordinò l'immediata liberazione del servo e la distruzione di tutte le altre coppe di cristallo. Quest'episodio mette in luce i contrasti che, almeno da un certo momento in poi, nasceranno tra Pollione e l'imperatore, a causa dei comportamenti eccessivi del liberto in contrasto con la sobrietà dei costumi voluta da Augusto. Ad ogni modo, Pollione lascerà la sua villa più grandiosa, il Pausilypon, in eredità alla sua morte proprio all'imperatore, chiedendo in cambio l'erezione di un monumento funebre costruito a spese pubbliche. Augusto non solo non approverà la costruzione del monumento, ma ordinerà anche la distruzione di una magnifica villa di Pollione a Roma sull'Esquilino per far spazio al portico eretto in onore della terza moglie Livia.



7.2.1 - Moneta in bronzo con effigie di Publio Vedio Pollione.



7.2.2 - Mappa Topografica Carletti ed Aloja, 1775.



7.2.3 - Mappa delle principale strutture della Villa Imperiale e dell'area della Gaiola (Günther, 1913).



7.2.4 - La Grotta di Seiano ad inizio Novecento.



7.2.5 - Il Teatro nella *pars publica* della Villa.



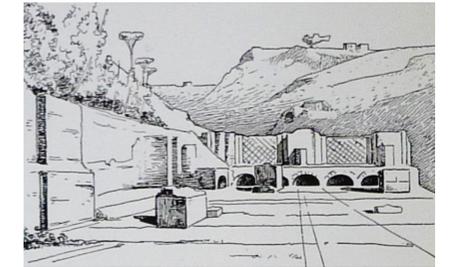
7.2.6 - L'Odeon nella *pars publica* della Villa.

La villa del Paesilypon (Figg. 7.2.2 e 7.2.3), divenuta così residenza imperiale e quindi ulteriormente ampliata e trasformata, è uno straordinario esempio di costruzione “a nuclei sparsi”. La Villa, come sempre accadeva per le costruzioni annesse al demanio pubblico, venne amministrata da liberti a partire dalla morte di Pollione nel 15 a.C.. A differenza degli altri patrimoni però, alla morte di Augusto, non venne restituita ai legittimi proprietari (come aveva disposto lo stesso imperatore nel suo testamento per tutti i beni acquisiti). Il ritrovamento di una fistula in cui è inciso il nome dell'imperatore Adriano e di alcune monete testimonia infatti che la Villa del Paesilypon rimase una proprietà imperiale fino al periodo tardo imperiale e fino alla caduta dell'impero romano<sup>6</sup>. Se consideriamo i diversi resti rinvenuti, non solo con destinazione prettamente residenziale, possiamo ipotizzare una estensione della villa su circa venti ettari, includendo i resti visibili nella Baia di Trentaremi e Marechiaro. Una serie interminabile di giardini, criptoportici, fontane e piscine, collegava le diverse strutture che si estendevano sul promontorio. Probabilmente in età imperiale, la Villa verrà dotata di un monumentale accesso terrestre, oltre a quello marittimo, scavato nel banco tufaceo della collina di Posillipo. Parliamo della cosiddetta “Grotta di Seiano” (Fig. 7.2.4), un camminamento ipogeo di quasi 800 metri che collega Coroglio con il Vallone della Gaiola. Organizzata su grandi terrazzamenti degradanti verso il mare, ad ogni settore della villa corrispondeva una precisa destinazione funzionale. Il primo settore, sul terrazzamento più alto con affaccio sulla baia di Trentaremi da un lato e sul Vallone della Gaiola dall'altro, ospita le strutture della *pars publica* e di rappresentanza. Qui i resti di un Teatro (Fig. 7.2.5) ed un Odeon (Fig. 7.2.6) sono le testimonianze più rilevanti e meglio conservate. Sul terrazzamento intermedio alcuni resti di strutture in opera reticolata e laterizia, solo parzialmente visibili oggi, appartenevano alla parte residenziale della Villa. Di questa *pars privata* e della vera e propria domus (a cui pochi avevano accesso), composta probabilmente da una successione di ambienti rettangolari voltati ed affrescati, si conservano solo due stanze non visitabili. L'ultimo settore è rappresentato dalle strutture marittime, parzialmente visibili oggi, con i resti dell'antico approdo, le peschiere, le terme inferiori ed un ninfeo. Vediamo dunque brevemente le diverse strutture che compongono oggi la Villa, per poi approfondire la descrizione di alcune strutture oggetto di questo studio.

Il terrazzamento superiore accoglieva le strutture utili ad accogliere i visitatori della Villa ed intrattenerli con spettacoli e giochi. Avvenivano probabilmente qui anche riti politici quotidiani tipici di una corte imperiale, come la *salutatio* al *princeps* da parte degli aristocratici, i senatori e i cavalieri che popolavano

le ville della costa. Gli ospiti accedevano alla parte rappresentativa della villa percorrendo la Grotta di Seiano (Par. 8.2) ed attraverso appositi percorsi che permettevano l'ingresso solo ai settori consentiti. L'accesso a questo terrazzamento avveniva probabilmente attraverso una grande aula poggiata su sostruzioni (oggi quasi completamente crollate). Quest'ambiente rettangolare con parete occidentale absidata è definito da R.T. Günther<sup>7</sup>, il maggiore studioso del sito che condurrà le sue ricerche agli inizi del Novecento, “Tempio” o “Sacrarium” (Figg. 7.2.7 e 7.2.8). Il cosiddetto “Tempio”, in *opus latericium* e con semicolonne intonacate, è absidata nella parte occidentale. Alcuni pilastri dividono lo spazio interno in tre navate. L'ingresso principale era probabilmente dotato di un colonnato monumentale e l'intero ambiente riccamente decorato con marmi. Le attuali condizioni di questa struttura, riadattata ad uso cantina e deposito di attrezzi agricoli utili alla destinazione a vigneto di quest'area a inizio Novecento, rendono molto complesso capire l'originaria distribuzione ed aspetto di questo edificio. Dagli spazi ricavati dalle sostruzioni, utilizzati come magazzini e alloggi servili, una ripida scala consentiva di raggiungere la grande aula senza essere visti dagli ospiti. Le sostruzioni, oggi solo parzialmente visibili, consentivano di ampliare il terrazzamento che dalla grande aula si estendeva sul Vallone della Gaiola, dove probabilmente si aprivano altri ambienti raggiungibili attraverso gradoni. Da questo edificio, attraverso una scala (solo parzialmente scavata) si accedeva alla grande piazza pubblica, racchiusa da due pareti ad emiciclo in continuità con la cavea del Teatro. La piazza è dominata a nord dal Teatro e a sud dall'Odeon nascosto da un ampio porticato colonnato, meglio descritti in seguito (Par. 9.3). Ad est del Teatro sono stati riportati alla luce agli inizi del secolo i resti di un ambiente absidato con pavimento in *opus sectile*, di cui restano le impronte. Quest'ambiente si ripete in modo speculare nella parte occidentale dell'emiciclo. L'emiciclo termina con una scala che doveva condurre ad un ampio terrazzamento, oggi occupata da una costruzione ottocentesca, la “Casa Rossa” (Fig. 7.2.9).

Su questo terrazzamento sorgeva un altro imponente edificio, in parte distrutto da questa costruzione ed in parte franato nella baia di Trentaremi, i cui resti sono stati coperti dalla vegetazione. Si tratta di un edificio rettangolare absidato dalla funzione incerta. Negli scavi ottocenteschi, a causa del ritrovamento di resti di tubazioni, si ipotizzò che si trattasse di un Ninfeo (Fig. 7.3.1). Interpretazioni successive riconducono la struttura ad un auditorium, un peristilio o addirittura, come sostenuto da Giuseppe Vecchio, ad uno stadio<sup>8</sup>. La parte absidata è composta da tre muri concentrici in opera reticolata disposti su gradoni (alti rispettivamente 183, 376 e 549 centimetri rispetto al piano inferiore e con spessore di



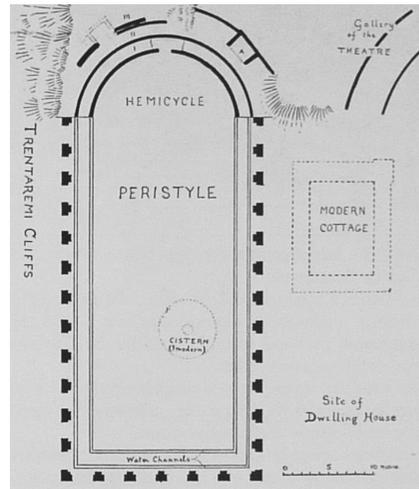
7.2.7 - Il cosiddetto “Tempio” in un'incisione di Achille Gigante, 1845.



7.2.8 - Il cosiddetto “Tempio” nella *pars publica*.



7.2.9 - La “Casa Rossa”.



7.3.1 - Il rilievo del cosiddetto "Ninfeo" di Günther ad inizio Novecento.



7.3.2 - Resti del colonnato della Porticus, alle spalle della scena dell'Odeon.



7.3.3 - Copia dei marmi della zoccolatura rinvenuti nel salone di rappresentanza ad est dell'Odeon.



7.3.4 - Rampe e scale che conducono alle terrazze panoramiche sopra l'Odeon.

circa 80 centimetri). Tredici pilastri con semicolonne sui lati lunghi e sette su quelli brevi vengono documentati a partire dall'Ottocento per i porticati. I porticati erano probabilmente sviluppati su due livelli: il piano inferiore voltato con un prospetto ad arcate, quello superiore con colonne (di cui però non resta testimonianza). La parte ad emiciclo era invece probabilmente priva di porticati e destinata ad ospitare statue, fontane e ad altri oggetti (come nell' "edificio a pilastri dorici" della Villa Adriana di Tivoli<sup>9</sup>, ispirata tra l'altro proprio alla villa del Pausilypon).

Questo edificio doveva essere visibile dalla parte opposta della grande piazza, sul terrazzamento inferiore che ospitava il lungo porticato colonnato che nascondeva la scena dell'Odeon e gli altri ambienti che si sviluppano sul lato meridionale della piazza (Fig. 7.3.2). Ai lati di questo piccolo teatro, infatti, sono visibili i resti di diverse stanze di rappresentanza. L'ambiente più rilevante si apre ad est dell'Odeon, dove sono stati rinvenuti i resti della pavimentazione con marmi intarsiati, presenti anche su un'alta zoccolatura che circonda la stanza (Fig. 7.3.3). Una serie di corridoi e scale conducono ad altri ambienti, parzialmente crollati nella baia sottostante soprattutto nella parte occidentale. Altre rampe e scale consentivano l'accesso a delle terrazze panoramiche nella parte superiore, da cui si poteva godere del panorama del Golfo da un lato e della piazza dall'altro (Fig. 7.3.4).

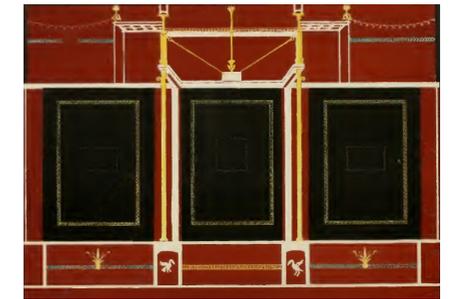
Dal porticato principale, proseguendo verso est, si accede ad un secondo porticato ad L, realizzato in opera reticolata e arricchito con pavimentazione in *opus sectile*. Zoccolature in marmo e pitture parietali completavano questa parte del complesso. Dall'angolo di questo porticato, partiva poi una rampa che consentiva l'accesso all'area residenziale della villa e ad altri vani di servizio. Da questa zona doveva poi svilupparsi il settore residenziale, di cui si conosce davvero molto poco. Una serie di resti sparsi, coperti per lo più da vegetazione, rendono complessa una riconfigurazione di questa area. L'unica porzione documentata da Günther è la cosiddetta "Casa di Pollione", arricchita da pitture in IV stile (Fig. 7.3.5). I resti di questa struttura, rilevati da Barone Lumaga tra il 1989 e il 1993, mostrati in figura 7.3.6, mostrano i resti dei muri di contenimento e delle sostruzioni ad arco, che servivano a sorreggere una struttura di notevoli dimensioni. Le murature dei piani superiori sono quasi del tutto scomparse, mentre al piano più basso si conservano i resti di alcune stanze. Tra queste, una stanza le cui dimensioni sono state ridotte dall'introduzione di tre pilastri ed archi in laterizio e che indica una fase di interventi successivi su questa struttura. Sotto la Casa di Pollione, Günther rileva i resti di un tunnel, che si apre lì dove il vallone subisce una rapida discesa. L'autore ritiene che, considerate le dimensioni della struttura, si possa trattare di un'antica strada che dalla Grotta di Seiano permetteva il collegamento alle strutture della Gaiola. Il

tunnel è in calcestruzzo rivestito con opera reticolata, lastricato in pietra e con un solaio di copertura in mattoni spezzati. Alcune stanze con volta a botte ad est e ad ovest dell'uscita, furono probabilmente utilizzate per ospitare carri o animali oppure, considerato lo spessore delle murature, come sostruzione delle strutture superiori.

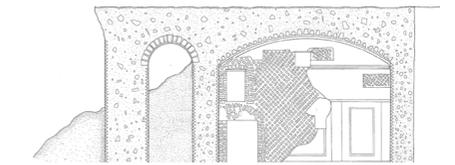
Proseguendo lungo il sentiero che conduce ad un suggestivo belvedere da cui è possibile osservare l'isolotto della Gaiola (ad una quota inferiore rispetto alle strutture descritte), nascosta dalla vegetazione si trova un'altra importante struttura. Si tratta delle "Terme Superiori" (Figg. 7.3.7 e 7.3.8), frutto di diverse fasi costruttive e di cui la più significativa è attribuibile all'età adrianea (117-138 d.C.). La parte meglio conservata è il *calidarium*, ovvero un'antica piscina per i bagni caldi con struttura circolare. Il sistema di riscaldamento adottato è detto "a samovar": la temperatura era mantenuta alta e costante grazie ad un contenitore bronzeo innestato nella parte circolare più bassa, collegato attraverso un cunicolo laterale ad un forno. Le terme, così come l'intero sistema di fontane, piscine e vasche dell'intera villa, venivano alimentate dall'acquedotto del Serino, attraverso un complesso sistema di cisterne e condotti. Questa struttura doveva articolarsi, secondo Günther (che ne offre un'attenta descrizione e restituzione grafica, oltre ad avanzare ipotesi sulla sua ricostruzione) su più livelli, oggi quasi completamente ricoperti dalla vegetazione ed in parte inglobati nell'adiacente villa ottocentesca Villa Bechi.

Oltre a queste strutture, Günther rileva e documenta i resti di del cosiddetto "Belvedere" (Fig. 7.3.9), una struttura che sovrasta la Grotta dei Tuoni e che presenta una muratura curva, delle terrazze ad est del complesso e di alcune stanze adibite a cisterne.

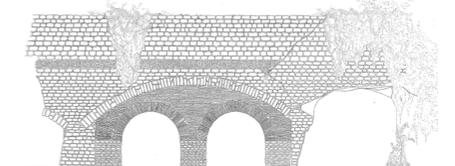
La lettura dei rapporti tra le strutture sul promontorio e quelle marittime si presenta oggi estremamente difficile. Le cave realizzate dal Marchese del Tufo, così come l'impianto della villa del Cavalier Bechi sull'isolotto della Gaiola, porteranno infatti alla perdita definitiva di gran parte delle strutture a mare, di cui restano solo alcune tracce. Sono visibili oggi i resti di alcuni ambienti con nicchie semicircolari e di un quello che doveva essere un grande ninfeo, la cosiddetta "Scuola di Virgilio" (Fig. 7.4.1) e alle Terme Inferiori, un'altra struttura che doveva articolarsi su più livelli. Altri resti sono riconducibili alle strutture dell'approdo, ai moli, le banchine e i frangiflutti (Fig. 7.4.2). Le costruzioni che avanzavano sulla costa (triclini, loggiati, porticati) dovevano occupare un tratto ininterrotto di costa, di cui restano alcune tracce, fino al "Palazzo degli Spiriti" (Fig. 7.4.3). Questa straordinaria struttura, dalla funzione incerta, si sviluppava su tre piani, di cui il primo è ormai quasi totalmente sommerso a causa dell'abbassamento del piano di costruzione di tre metri rispetto all'età romana<sup>10</sup>.



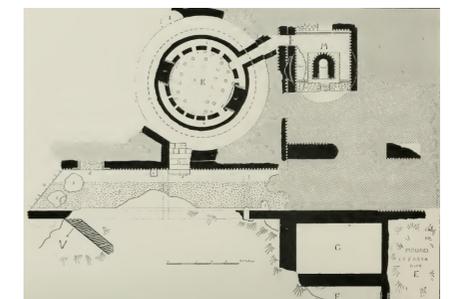
7.3.5 - Una decorazione pittorica di una parete della "Casa di Pollione" rilevata da Günther.



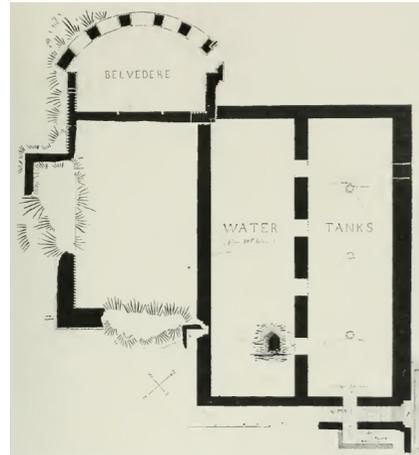
7.3.6 - Alcune sezioni dai rilievi di Barone-Lumaga della "Casa di Pollione", 1989-1993.



7.3.7 - Rilievo planimetrico di Günther delle "Terme Superiori".



7.3.8 - Rappresentazione in alzato di Günther delle "Terme Superiori".



7.3.9 - Il rilievo del cosiddetto “Belvedere” di Günther ad inizio Novecento.

### 7.3 Gli scavi e le ricerche archeologiche.

Gli scavi dell’antica Villa di Pausilypon, già testimoniati nel XVI secolo da Fabio Giordano e da Celano<sup>11</sup>, furono vere e proprie operazioni di prelievo di qualsiasi materiale fosse trasportabile, dalle statue ai marmi e perfino dei mosaici di cui la residenza era ricca. Di seguito, la proprietà passerà alla famiglia Maza (o Mazza), intorno al 1680, e le attività di recupero e trasporto, purtroppo non documentate, proseguiranno con la conseguente perdita definitiva di questi reperti. L’opera più intensiva di scavo si avvierà con l’acquisto della proprietà da parte del cavaliere Guglielmo Bechi, verso il 1820, e proseguirà per circa 50 anni. Purtroppo anche in questo caso, la ricerca archeologica fu mirata più al ritrovamento di oggetti ed al profitto personale proveniente dalla loro vendita, che basata su un interesse storico. Morto il cavaliere, la proprietà passerà ad un tale de Negri, intenzionato ad installarvi una sede della “Società di Piscicoltura”. Non riuscendo nel progetto, una parte del terreno verrà venduta al marchese del Tufo, che deciderà di aprire cave di pozzolana (tuttora visibili dal mare) in prossimità dello “Scoglio di Virgilio”, con la conseguente distruzione delle strutture archeologiche che occupavano il terrazzamento più basso. Durante queste operazioni verranno rinvenuti, oltre ad una statua muliebre, alcuni tubi di piombo, immediatamente venduti dal marchese. L’unico sfuggito a questo destino è un importante testimonianza, grazie ad un’iscrizione, dell’utilizzo della Villa o di lavori di trasformazione in epoca adrianea. Con il passaggio della proprietà al monsignor Camillo di Pietro, arcivescovo di Barrito e nunzio apostolico della corte di Ferdinando II, nel 1841, furono avviati le prime intense e sistematiche attività di scavo, supervisionate dall’architetto Pietro Bersani. L’amenità del luogo e la volontà di seguire da vicino gli scavi, spinsero di Pietro ad iniziare la costruzione della propria residenza proprio nell’area dei teatri e su parte delle strutture antiche del Teatro, la cosiddetta “Casa Rossa”. Durante le attività di scavo, documentate soprattutto da Luigi Lancellotti<sup>12</sup>, riemergeranno i resti del Teatro, dell’Odeon, del tempio e della struttura rettangolare absidata (attribuita ad un Ninfeo), a cui erano collegate una serie di canalette per il trasporto dell’acqua. Le strutture della Villa erano, infatti, quasi certamente alimentate da un ramo dell’acquedotto del Serino, che da Sant’Elmo giungeva alla Crypta Neapolitana (Par. 8.1) e proseguiva poi in direzione della collina di Posillipo verso la Gaiola, mentre un altro ramo raggiungeva Nisida. Considerando le necessità di alimentare così tante strutture (terme, piscine, vasche, ninfei...), le ville erano, tuttavia, dotate anche di ampie cisterne per acqua piovana, opportunamente canalizzate, per far fronte ad eventuali carenze idriche<sup>13</sup>. I lavori di scavo della Villa del 1841 terminarono pochi mesi dopo



7.4.1 - Alcuni resti archeologici nell’area della Gaiola in un’incisione ottocentesca.



7.4.2 - Alcuni resti archeologici sommersi nell’area della Gaiola.

l’inizio. I ritrovamenti iscrizioni, monete, fregi e molto altro materiale archeologico, testimoniati da Fusco e Gianpietri<sup>14</sup> furono trasportati nella residenza del monsignore e, successivamente, mai più ritrovate. Le attività di scavo e documentazione, da quel momento, riprenderanno solo nel 1988 e dureranno ben poco. Ripresi nel 1993, in occasione del G7, verranno nuovamente interrotti nel 1994. L’accesso al sito sarà consentito sporadicamente tra il 1999 ed il 2002 e nel 2005, con nuovi lavori terminati nel 2009 fino all’attuale definitiva riapertura e restituzione di quest’immenso patrimonio alla città di Napoli.



7.4.3 - Il cosiddetto “Palazzo degli Spiriti” ripreso dal mare.

## Note

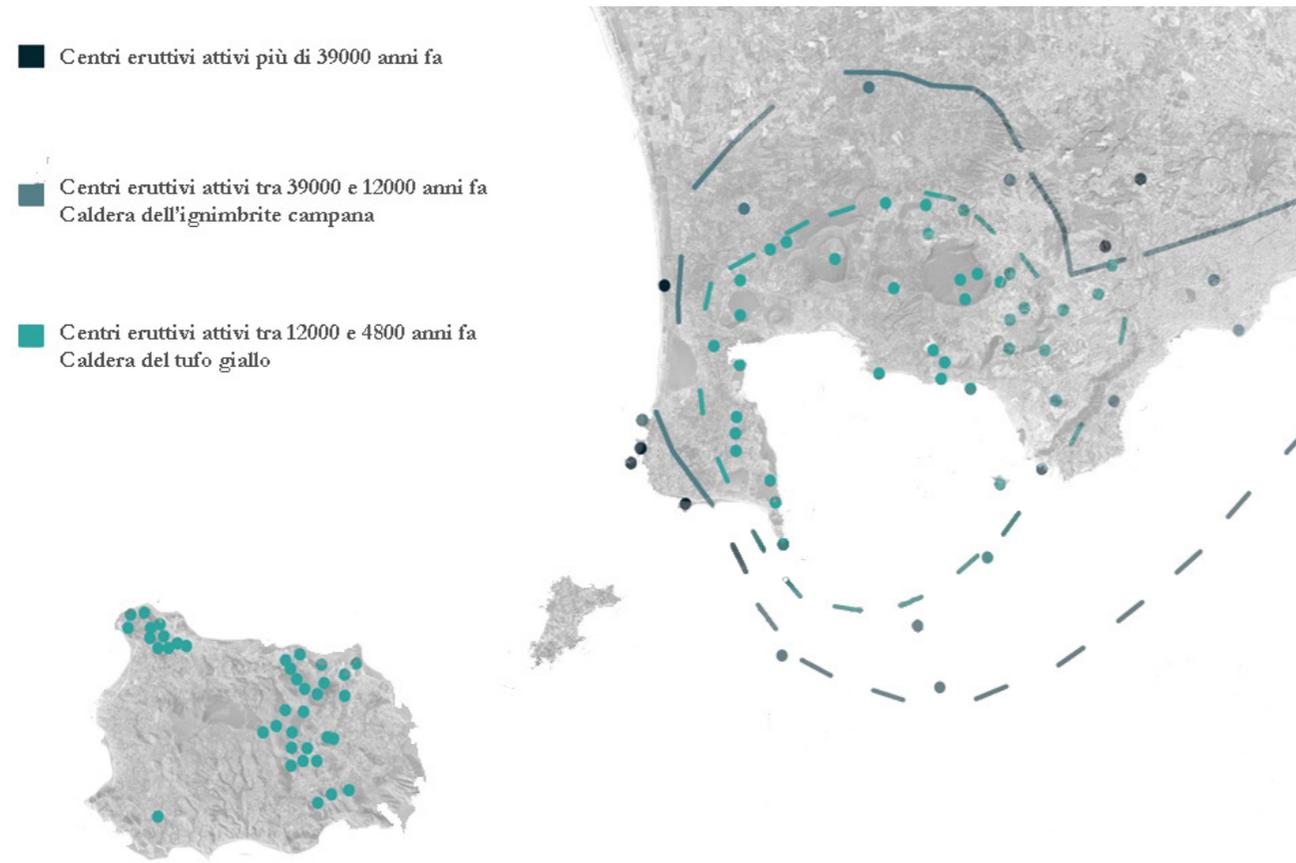
- <sup>1</sup> Tessaro Pinamonti A., “Rapporti fra ambiente naturale ed ambiente architettonico nella villa romana del I sec. d.C. in Italia”, *Rivista di Archeologia* VIII, 1984.
- <sup>2</sup> Foresta S., Pacetti P., *Le ville romane della Costa d'Amalfi*, Soprintendenza per i Beni Archeologici delle Province di Salerno, Avellino, Benevento e Caserta, 2012.
- <sup>3</sup> Marzano A., *Le ville marittime dell'Italia Romana tra Amoenitas e Fructus*, Roma, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 2010.
- <sup>4</sup> *Gaiola: Il Parco Archeologico e il Parco Sommerso*. Mondadori Electa, Verona, 2009.
- <sup>5</sup> Seneca, *De Ira*, III,40
- <sup>6</sup> Diana A., *Pausilypon e Dintorni*, Luciano Editore, 2006.
- <sup>7</sup> Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.
- <sup>8</sup> Varriale I., *Posillipo.Storia e Mito*, Valtrend Editore, 2011, pag.83.
- <sup>9</sup> Rizzi M., *Hadrian and the Christians*, Walter de Gruyter GmbH&Co, Germany, 2010, pp.36-37
- <sup>10</sup> Varriale I., *op.cit.*, pp.72-98.
- <sup>11</sup> Celano C., *Notizie del bello dell'antico e del curioso della città di Napoli*, Vol.5, Tipolitografia di L.Chiurazzi, 1870, pp.645-647
- <sup>12</sup> Iuliano M., *Promenade a Posillipo*. Edizioni Simone, 2002.
- <sup>13</sup> Diana A., *op.cit.*, pp.23-26.
- <sup>14</sup> Fusco M., Trojano Gianpieri A., Fusco G.V., “Giunta al commento critico archeologico sul frammento inedito di Fabio Giordano intorno alle grotte del promontorio di Posilipo”. *Bullettino Archeologico Vesuviano*. Tipografia Tramer, Napoli, 1843, pp. 29, 30, 37.

CAPITOLO OTTAVO  
**La Grotta di Seiano**

### **8.1 I collegamenti ipogei nel contesto napoletano e flegreo.**

Tra le grandi opere realizzate in epoca romana, le gallerie ed i passaggi sotterranei lungo percorsi stradali pubblici e privati, rappresentano una delle più importanti testimonianze delle conoscenze ingegneristiche e tecnologiche di questo popolo. La costruzione di queste strutture si concentra nel breve arco temporale tra la fine della Repubblica e l'inizio dell'età imperiale e quasi esclusivamente tra Lazio e Campania. Le più imponenti sono, ad ogni modo, concentrate tra Napoli, Pozzuoli, Cuma ed il lago d'Averno, attribuite all'architetto Lucio Cocceio Aucto (I sec.a.C – I sec. d.C.).

Nell'area napoletana e flegrea, le maggiori gallerie ipogee si collocano in luoghi considerati in epoca romana particolarmente strategici. Il profondo cambiamento della linea di costa e dell'orografia di questi luoghi, dovuto alla loro natura vulcanica (Fig. 8.1.1) e soprattutto al fenomeno del bradisismo (Fig. 8.1.2), rende in alcuni casi complesso identificare la loro condizione al momento della costruzione. L'area flegrea interessa un vasto territorio ad ovest di Napoli, da Capo Posillipo a Fusaro e Cuma, comprendendo anche le isole di Procida, Vivara ed Ischia. La conformazione dei Campi Flegrei deriva dall'intensa ed antichissima attività vulcanica, trovandosi all'interno del "graben", ovvero una depressione della piana campana interessata da molteplici fenomeni eruttivi a partire da almeno 50000 anni fa. Le eruzioni più importanti all'interno della caldera (tra i 5000 e i 3700 anni fa) porteranno alla formazione degli apparati vulcanici degli



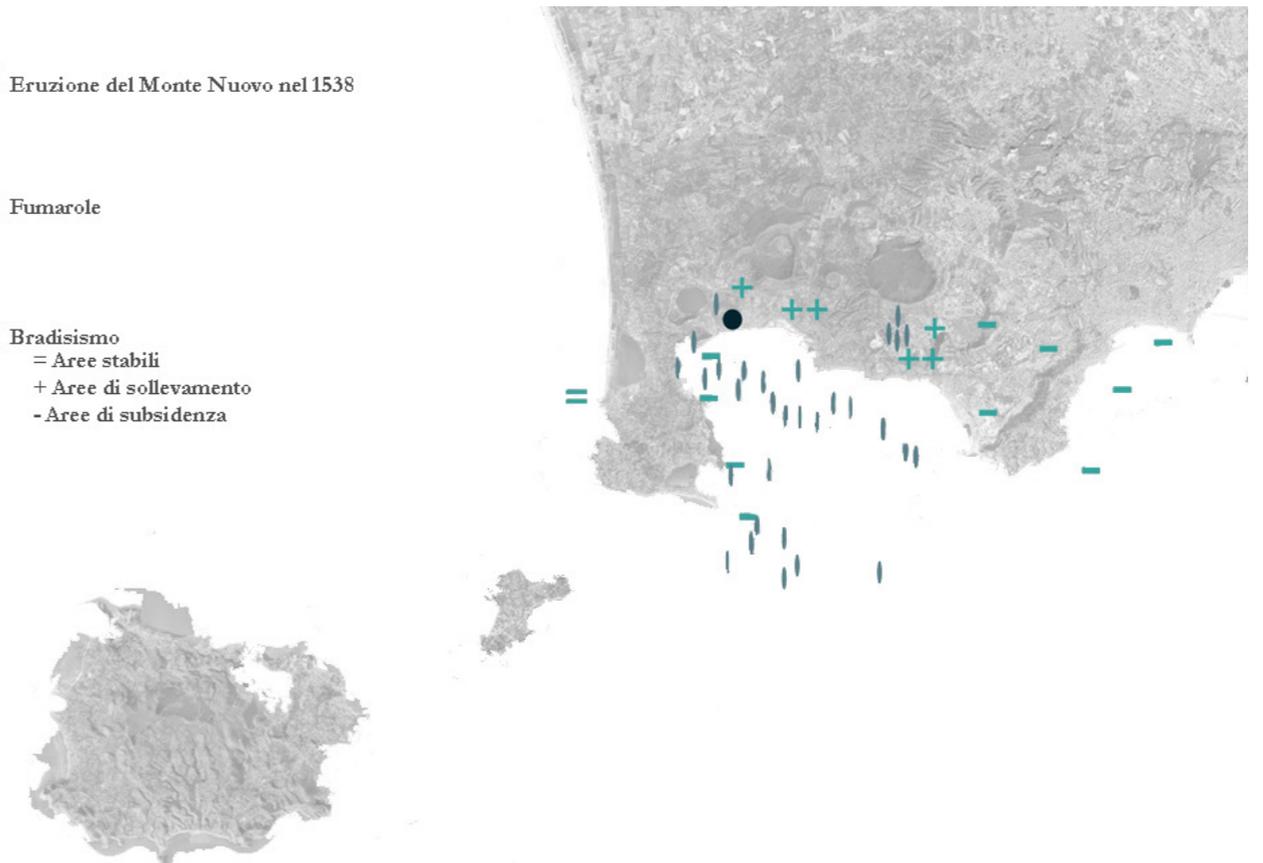
8.1.1 - I principali fenomeni eruttivi nell'area flegrea.

Astroni, dell'Averno e della Solfatara. I prodotti di quest'attività eruttiva riempiranno la caldera di prodotti diversi: i tufi gialli, i tufi grigi incoerenti e la pozzolana flegrea i depositi di lapilli e pomici. Il tufo, in particolare, materiale tenero al taglio e leggero, diventerà protagonista delle vicende edilizie ed urbanistiche flegree e napoletane, in cui verranno scavate le stesse gallerie ipogee. L'ultimo grande evento eruttivo nel 1538 porterà in una sola notte alla formazione del Monte Nuovo, nei pressi del lago d'Averno, e ridisegnerà completamente l'aspetto di questi luoghi. Un esempio emblematico di quest'intensa attività è quello che ha interessato il lago di Lucrino. Il lago, in età romana, aveva una superficie molto più ampia dell'attuale e formava un unico complesso con l'Averno, a cui fu unito sul finire del I sec.a.C. con la costruzione di un canale navigabile. Intorno al X-XI sec. il lago venne lentamente sommerso dal mare, in seguito all'abbassamento del suolo e all'arretramento della linea di costa alla riva dell'Averno. In seguito però, la situazione muterà nuovamente, con il risollevarsi del suolo e la riemersione di un tratto di costa, causato da una serie di fenomeni tettonici e conclusi proprio con l'eruzione

■ Eruzione del Monte Nuovo nel 1538

■ Fumarole

■ Bradisismo  
= Aree stabili  
+ Aree di sollevamento  
- Aree di subsidenza



8.1.2 - Il fenomeno del bradisismo nell'area flegrea.

che formerà il Monte Nuovo. La parte orientale dell'antico Lucrino, fu colmata con i materiali eruttati ed il lago d'Averno tornò al suo isolamento con la scomparsa del canale che lo collegava al mare. Questa vicenda è emblematica delle profonde trasformazioni subite da tutta l'area flegrea a cui si aggiungono i fenomeni bradisismici che contribuiranno a ridefinire l'intera linea di costa, coinvolgendo anche il Promontorio di Posillipo. Questi cambiamenti, d'altronde, offrono una spiegazione alla particolare localizzazione di alcuni di questi camminamenti ipogei<sup>1</sup>, dovendo immaginare una condizione orografica del tutto differente dall'attuale.

Le principali gallerie, realizzate probabilmente nello stesso periodo (I sec.a.C. - I sec. d.C.), che testimoniano la poderosa attività costruttiva ed il genio ingegneristico dei Romani in questa vasta area sono (Fig. 8.1.3):

- la Crypta Neapolitana (di collegamento tra Mergellina e Fuorigrotta);
- la Grotta di Cocceio (di collegamento tra il settore nord-ovest dell'Averno con quello sud-est di Cuma);
- la Crypta Romana (alla base dell'acropoli di Cuma, collegava il Foro della città con il porto);



8.1.3 - Individuazione dei principali camminamenti ipogei nell'area napoletana e flegrea.

- la pseudo-grotta della Sibilla (di collegamento tra l'Averno ed il *Portus Julius*);
- la Grotta di Seiano a Napoli (di collegamento tra Coroglio e il vallone della Gaiola).

Queste direttrici ed infrastrutture di collegamento vennero realizzate per lo più con finalità tattiche e di difesa militare, migliorando i collegamenti durante le operazioni belliche. Per scopi commerciali o sociali, venivano invece preferiti i percorsi all'aperto. La spiegazione, fornita da diverse fonti antiche, si lega alla comune percezione negativa di questi tunnel, il cui attraversamento (oltre ad essere pericoloso) era piuttosto fastidioso soprattutto per la perenne assenza di luce (Fig. 8.1.4). Le gallerie vennero costruite soprattutto su percorsi secondari o alternativi rispetto alla viabilità principale. Se quelle dell'area flegrea conservano un forte carattere di servizio locale e militare, principalmente di collegamento a strutture residenziali e private sono la Grotta di Seiano e la Crypta Neapolitana. Quest'ultima, che collegava Mergellina a Fuorigrotta, pur rappresentando un collegamento importante che evitava di percorrere la più lunga via "per colles" per chi voleva raggiungere l'area flegrea, venne infatti utilizzata soprattutto come collegamento alle sontuose ville situate sul litorale.

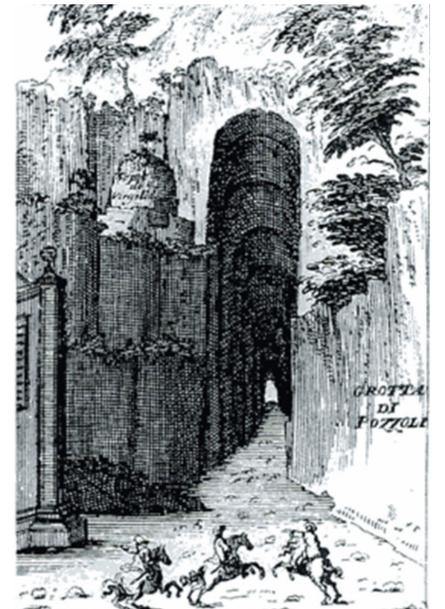
Con la pace romana, molti di questi tunnel con funzione militare subirono trasformazioni. Alcuni vennero utilizzati come cave o riempiti, altri consolidati, ampliati e decorati con statue, marmi ed altri simboli



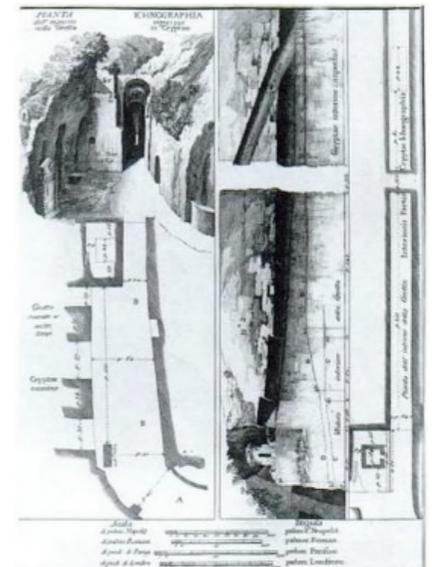
8.1.4 - L'interno della Crypta Neapolitana in un'incisione di Giovan Battista Piranesi.

del prestigio imperiale. Dopo un periodo di abbandono a seguito della caduta dell'Impero, l'interesse per queste strutture ipogee si manifesterà nuovamente a partire dal Medioevo. In quest'epoca, si era da tempo persa la funzione delle cosiddette "grotte", non distinguendo di fatto tra quelle di origine naturale o scavate a mano. I resti di queste imponenti strutture alimenteranno, infatti, nei secoli la curiosità degli studiosi, affascinati soprattutto dai miti e dalle leggende ambientati in questi luoghi bui e suggestivi. La descrizione dei tunnel, spesso accompagnata da illustrazioni, a carattere evocativo delle credenze e dei misteri ispirati da questi luoghi o a carattere maggiormente scientifico a partire dal primo Umanesimo (con il riconoscimento della reale funzione di questi passaggi), sono fondamentali testimonianze dello stato di questi manufatti prima del loro degrado, rifacimento o distruzione. Considerando la principale funzione pratica di queste strutture, di collegamento tra gli impianti portuali, gli insediamenti o per facilitare l'accesso a proprietà private, non troviamo invece raffigurazioni di questi tunnel in epoca romana. Verso la metà dell'Ottocento, le nuove conoscenze sul mondo antico e i progressi della ricerca archeologica portarono alla nascita di indagini dal carattere maggiormente scientifico sulle grotte flegree, con l'intensificazione degli scavi e la pubblicazione, in alcuni casi, di lavori a carattere monografico<sup>2</sup>.

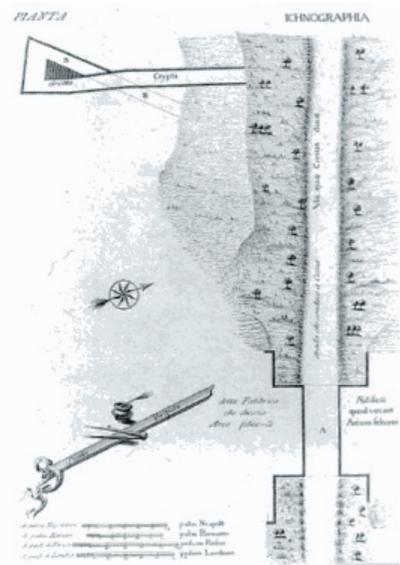
La **Crypta Neapolitana**. Scavata nel banco tufaceo della collina di Posillipo (Figg. 8.1.5 e 8.1.6), tra Mergellina e Fuorigrotta, questa galleria rimase sostanzialmente in uso dall'età antica fino al secolo scorso. La scarsa manutenzione, il progressivo degrado e diversi crolli nei tratti interni rendono oggi questo camminamento inaccessibile. Già in epoca antica, questa galleria venne utilizzata come luogo di culto mitraico, poi convertito a sede di un piccolo santuario dedicato alla Vergine Maria (come testimoniato dalle due nicchie visibili all'ingresso da Piedigrotta). Diverse leggende e superstizioni popolari sopravvivono anche oggi intorno a questa galleria, denominata anche "Grotta di Posillipo", risalenti soprattutto al Medioevo e collegate alla figura di Virgilio ed alla sua presunta tomba in prossimità dell'ingresso da Piedigrotta. Allo stesso poeta era addirittura attribuita la costruzione della Crypta, da cui anche la denominazione, a partire dal XIII secolo di "Grotta Virgiliana". La galleria è lunga 711 metri con orientamento est-ovest. All'interno sono presenti due lunghi pozzi di areazione inclinati. La configurazione attuale della galleria è frutto di diversi interventi a seguito dei numerosi crolli che hanno interessato i tratti interni. Il camminamento originario, non pavimentato, poteva permettere il passaggio di due carri (4,5 metri di larghezza) con un'altezza compresa tra i 3,5 ed i 4 metri. Gli interventi, a



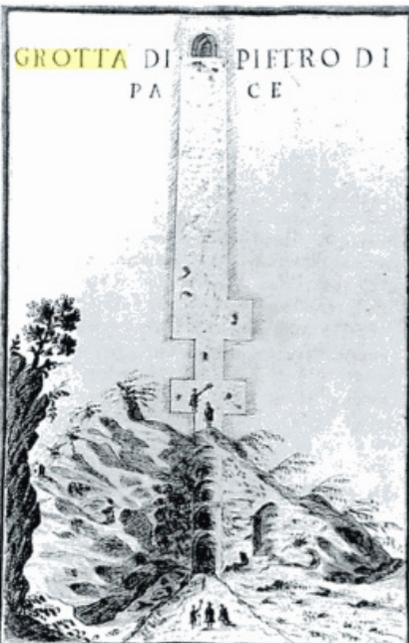
8.1.5 - Il traforo di Posillipo da Piedrigrotta, nella *Guida de'Forestieri* del Sarnelli (1685).



8.1.6 - La Crypta Neapolitana da Piedigrotta nell'*Antichità di Pozzuoli* di Paoli (1768).



8.1.7 - La Grotta di Cocceio nell' *Antichità di Pozzuoli* di Paoli (1768).



8.1.8 - La "Grotta di Pietro di Pace" in un disegno di F.A. Letizia nel XVIII secolo.

partire dal XV secolo (voluti da Alfonso d'Aragona, don Pedro de Toledo e Carlo III di Borbone, fino alla municipalità di Napoli nell'Ottocento) hanno determinato un progressivo ampliamento ed abbassamento della quota stradale, oltre alla pavimentazione della galleria e la costruzione di archi di sostruzione in muratura in alcuni tratti interni. Con l'ultimo grande intervento di sistemazione dell'area circostante l'ingresso orientale, nel 1930, e il parziale riempimento della parte orientale del tunnel, la quota del pavimento è stata portata a circa 9 metri e sono stati costruiti diversi archi di sostegno in muratura. Lavori simili sono stati condotti nel XIX secolo anche nella Grotta di Seiano. A seguito degli ultimi crolli, che hanno interrotto il camminamento, la larghezza della galleria varia dai 5 ai 12 metri e l'altezza dai 5 ai 14 metri.

La **Grotta di Cocceio**. Insieme alla Crypta Romana, la Grotta di Cocceio (nota anche come "Grotta della Pace") era parte delle vie di comunicazione sotterranee volute da Agrippa, nell'ambito del potenziamento militare dell'area flegrea durante le guerre civili. Scavata sotto il Monte Grillo (Figg. 8.1.7 e 8.1.8), la galleria consentiva il collegamento tra il lago d'Averno ed il settore sud-est di Cuma, da cui, attraverso la Crypta Romana, si raggiungeva il porto di Cuma. La galleria, a differenza della Crypta Romana, ha un andamento perfettamente rettilineo e non condizionato dalla sistemazione urbanistica preesistente. Scavata nel banco tufaceo del Monte Grillo per 1 km circa, ampia 5-6 metri, ed orientata nord-ovest sud-est, rappresenta un caso interessante per gli espedienti tecnici utilizzati per l'illuminazione della galleria, con dei pozzi di luce scavati nella volta. Dal lato di Cuma, la galleria è in pendenza, probabilmente per aumentare la portata di luce, mentre le pareti tufacee più fragili sono rivestite di opera reticolata. Sul lato nord, parallelamente alla galleria, a circa metà percorso, correva un acquedotto in direzione di Cuma, accessibile da pozzetti ed alimentato da quello augusteo del Serino. Durante la seconda guerra mondiale, la galleria venne temporaneamente adibita a deposito di ordigni bellici. Oggi il monumento, utilizzato come normale via di comunicazione fino al 1940, non è più visitabile proprio a causa dell'esplosione di uno di questi ordigni nel tratto centrale ed il conseguente crollo della volta.

La **Crypta Romana**. La Crypta Romana<sup>3</sup>, di collegamento tra il Foro della città di Cuma ed il porto, è completamente scavata nel banco tufaceo alla base del Monte di Cuma (Fig. 8.1.9). La galleria, lunga circa 300 metri, è orientata ovest-est ed è composta da quattro tratti rettilinei raccordati ad angolo. Questo singolare andamento è dovuto a condizionamenti esterni: la necessità di avere uno sbocco sul porto in un punto protetto, la presenza

di grandi cisterne preesistenti e delle fondazioni del sovrastante Santuario di Apollo sull'Acropoli ed infine il necessario raccordo con il sistema viario urbano dalla parte del Foro. L'uso militare della Crypta cesserà con l'avvento dell'Impero, quando verrà convertita ad uso civile. In questa occasione, verrà innalzato il piano di calpestio di circa 2,30 metri (forse per motivi statici) e realizzati vestiboli monumentali ai due ingressi. Sulle fasi successive è noto che, almeno per un breve periodo, la galleria ospiterà una piccola basilica paleocristiana (oggi crollata) e verrà destinata parzialmente ad uso cimiteriale (come testimoniato dalla presenza di circa venti loculi sul lato orientale). A seguito di alcuni crolli nei tratti interni che ne avevano interrotto il camminamento, la galleria verrà ripristinata in epoca bizantina con la costruzione di alcune sostruzioni in muratura. Nel 552, lo scavo di alcune gallerie di mina da parte di Totila provocheranno il crollo del vestibolo occidentale ed il riempimento della galleria, riscoperta e liberata dai detriti solo nel Novecento.

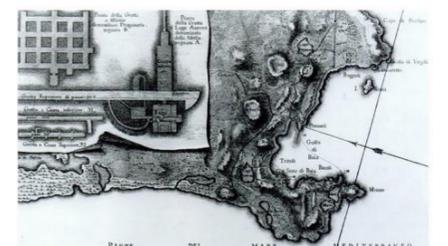
La **pseudo-grotta della Sibilla**. Questa galleria (Fig. 8.2.1), di collegamento tra l'Averno e l'antico *Portus Julius*, per la vicinanza ad altri luoghi leggendari connessi al mito degli Inferi e del mondo ultraterreno, fu identificata nel Medioevo come sede della Sibilla, la celebre profetessa dell'Eneide. Questa leggenda si diffuse con tale forza da far perdere memoria della principale funzione di passaggio di questo tunnel. Già nel Cinquecento, ad ogni modo, molti autori rifiutarono la denominazione di "Grotta della Sibilla" per la galleria sull'Averno, considerando soprattutto la distanza dal sito di Cuma. Questo porterà a suggerire un diverso sito quale sede della leggendaria profetessa. Il camminamento non va confuso con il cosiddetto "Antro della Sibilla" sotto l'acropoli di Cuma (una struttura che dovrebbe risalire ad un periodo precedente rispetto a quelli descritti) scoperto solo nel '900. La pseudo-grotta della Sibilla, il cui ingresso è oggi parzialmente interrato, si estende nel banco tufaceo per circa 200 metri. Ha un'ampiezza di 3,80 metri per un'altezza di 4 metri. L'ambiente è privo di rivestimenti murari e di pozzi di luce. Verso l'estremità si apre un piccolo vestibolo ed un braccio laterale che conduce ad alcuni ambienti sotterranei probabilmente utilizzati a scopi termali. Oggi questi ambienti sono sommersi d'acqua per effetto del bradisismo.

## 8.2 La Grotta di Seiano.

La Grotta di Seiano (Figg. 8.2.2 e 8.2.3), un monumentale collegamento ipogeo di circa 800 metri tra Coroglio ed il vallone della Gaiola, è di incerta



8.1.9 - La Crypta Romana in un'incisione di Morghen (*Le Antichità*, 1769).



8.2.1 - Mappa dei Campi Flegrei con rilievo della "Grotta della Sibilla" (*Le Antichità*, 1769).



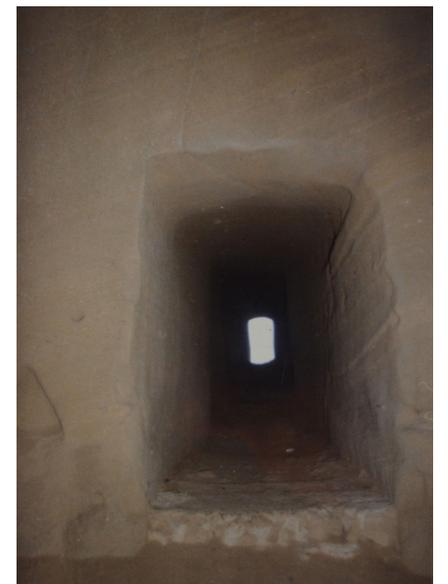
8.2.2 - Ingresso della Grotta di Seiano dal lato di Coroglio, incisione di Achille Gigante, 1845.



8.2.3 - Ingresso della Grotta di Seiano dal lato di Coroglio, stato attuale.

datazione. L'attribuzione di questa galleria a Lucio Elio Seiano (20 a.C. - 31 d.C.), prefetto del pretorio di Tiberio, è opera di Giovanni Pontano (1429-1503) che riporta quest'ipotesi nel suo "*De Magnificentia*". Indagini successive hanno, però, dimostrato che la galleria doveva essere già stata costruita prima che questi arrivasse al potere. Altri autori antichi attribuiscono la realizzazione di quest'imponente opera a Silla (138-78 a.C.), senza considerare però che il generale romano aveva la propria residenza tra Cuma e Pozzuoli e non a Posillipo. L'ipotesi più accreditata resta, dunque, quella di R.T. Günther<sup>4</sup>, secondo cui il nome "Seiano" deriva da Lucio Sillano, che ne guidò lo scavo durante il suo consolato (37 a.C.). La realizzazione di questo camminamento potrebbe così inserirsi tra quelle grandi opere di collegamento e potenziamento viario tra Neapolis ed i Campi Flegrei, forse precedente alla destinazione della Villa di Pausilypon a residenza imperiale. Il frammento di un'epigrafe ritrovata nella galleria e databile al IV sec. d.C. cita, infatti, un intervento di restauro di questa "*via publica*", il che induce ad ipotizzare che il tunnel servisse in origine a raggiungere diverse ville che si sviluppavano tra la collina e la costa. Tuttavia, come sottolineato da Giuseppe Vecchio<sup>5</sup>, la galleria potrebbe essere stata realizzata per consentire un facile accesso alla Villa in epoca imperiale e che ne avessero poi beneficiato anche le altre residenze lungo la costa. Dal lato del vallone della Gaiola, infatti, più che pensare ad una via costiera (come supposto da Günther) scomparsa per effetto del bradisismo, è plausibile supporre l'esistenza di un percorso più a valle rispetto all'attuale via Posillipo, raggiungibile per vie secondarie dalle diverse residenze. Dal lato di Coroglio, invece, una biforcazione permetteva di raggiungere da un lato Fuorigrotta e, dall'altro, attraversando Bagnoli ed Agnano, si ricollegava alla via *Puteolis-Neapolim*. La lunga galleria, di circa 770 metri ed in pendenza verso Coroglio, presenta sezioni variabili nelle due dimensioni principali ed ha un andamento sostanzialmente rettilineo. Una deviazione, a circa metà percorso, è attribuirle allo scavo della galleria in contemporanea sui due fronti, con successivo raccordo nella parte centrale. La sezione media della galleria è pressoché quadrata, con volte a tutto sesto. In prossimità degli ingressi e per consentire una migliore illuminazione ed areazione del lungo camminamento, si assiste ad un aumento delle sezioni, sia in altezza che in larghezza. Considerando la notevole dimensione della galleria e per garantire una maggiore salubrità all'ambiente, sul lato meridionale vennero scavati tre lunghi cunicoli secondari (rispettivamente 40, 29 e 129 metri), che trovano sbocco sulla cala di Trentaremi e garantiscono il ricircolo dell'aria (Fig. 8.2.4). Lo scavo del tunnel è probabilmente successivo ad un iniziale sfruttamento della collina come cava (da cui fu prelevato il materiale per la costruzione della Villa). L'esecuzione del traforo fu, ad ogni modo,

complessa, considerando la diversa compattezza dei tufi. Dal lato della Gaiola, dopo aver incontrato, infatti, un tufo di media compattezza, venne messo in luce un terreno pozzolanico misto a parti tufacee. Questo costrinse ad intervenire con uno scavo a sezione completa, realizzando allo stesso tempo lo scavo ed il rivestimento delle pareti. La costruzione delle pareti verticali ed il loro rivestimento, con funzione di piedritti, precedeva la realizzazione della volta con centine in legno, di cui si possono osservare in alcuni tratti i fori delle travi di sostegno (Fig. 8.2.5). Sono ancora visibili, inoltre, i segni delle "ripresе di getto", ovvero i tratti di congiunzione delle murature realizzate nelle diverse giornate lavorative (in media 5-7 metri al giorno). Le pareti hanno una muratura interna in tufo con rivestimento "a sacco" fino alle sezioni scavate, e sono rivestite quasi interamente in opera reticolata od incerta. Le volte presentano una muratura regolare nelle parti a vista e, superiormente, il riempimento con malta e pietrame aderisce alle superfici scavate nel tufo o nel terreno pozzolanico. Il ritrovamento di alcune tracce di intonaco inducono a ritenere che l'intera galleria fosse in origine intonacata. Le citazioni del XV secolo (Pontano e Giordano) testimoniano che l'esistenza di questo tunnel era ancora nota, nonostante il camminamento fosse quasi del tutto impercorribile a causa di alcuni crolli. Il ripristino della Grotta, considerata la sua importanza per i collegamenti con Bagnoli, fu avviato nel 1456 da Alfonso I d'Aragona e terminato durante il regno di Ferrante d'Aragona. Nuovi crolli, tuttavia, condannarono la galleria ad un lungo abbandono fino alla sua riscoperta nel 1826. Testimonianza di questo ritrovamento e di un primo tentativo di ripristino ci viene offerta da Canonico De Jorio<sup>6</sup>, ripreso da Luigi Lancillotti<sup>7</sup> nel 1840: "In occasione del proseguimento della strada nuova di Posillipo, per la parte di Bagnoli, alcuni Ufficiali Tedeschi, per loro particolare curiosità, non solo vi si introdussero, fin dove era trafficabile, ma anche, a proprie spese, ne vuotarono un buon tratto. Questo si poté eseguire pel comodo di due spiragli laterali, che puntavano verso il mare, e che diedero bastante corrente d'aria ai lavoratori; ma, essendosi avanzati più dentro, dove la grotta diverge verso la dritta, per andare a terminare verso la parte più stretta della collina, l'aria cominciò a mancare, o come dicono, incontrarono una mofeta e furono forzati ad abbandonare il lavoro. Oltre ciò l'impresa sarebbe stata di niuna utilità e perciò il nostro sovrano (Ferdinando IV n.d.r.) non ha creduto proseguirla". La pianta del duca di Noja del 1775 (voluta da Carlo III e pubblicata da Ferdinando IV) testimonia, del resto, che il tracciato dell'antica galleria era già noto. Il racconto di una nuova "riscoperta" (la cui memoria ed il cui parziale utilizzo era, ad ogni modo, ben vivo tra gli abitanti del luogo) e l'avvio dell'intensa attività per il ripristino del collegamento ipogeo è



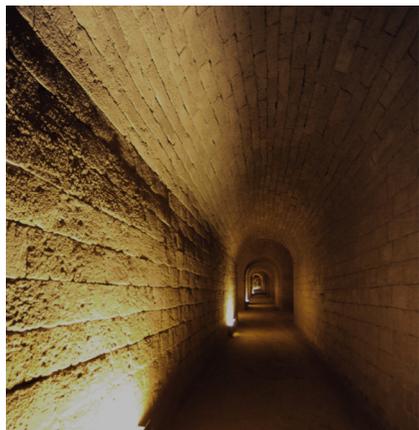
8.2.4 - Cunicoli laterali di areazione, archivio fotografico della Soprintendenza, 1987.



8.2.5 - Fori lasciati dalle travi di sostegno per la realizzazione delle volte con centine di legno.



8.2.6 - Tratto interno con alternanza tra muratura di epoca romana in *opus incertum* e sottarchi in muratura realizzati in epoca borbonica.



8.2.7 - Tratto interno interamente rivestito di nuova muratura nell'Ottocento.

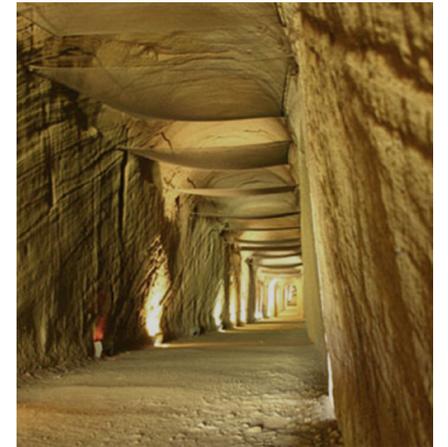
ricostruibile attraverso le parole del già citato Lancellotti: “Correva il 5 maggio di quest’anno e mentre sua maestà (Ferdinando II n.d.r.) percorreva la traccia della nuova strada (discesa di Coroglio n.d.r.) osservando il modello quasi alla fine, Michele, ragazzo di quei luoghi conoscitore profondissimo, perché in quei luoghi abitante, volendo fare cosa gradita al Re, entra in uno dei cunicoli nella grotta ed esce all’improvviso dalla bocca sul vallone. Fu allora che Sua Maestà volle sapere dall’ingegnere (Ambrogio Mendia n.d.r.) come Michele lo avesse preceduto per quel tenebroso tratto; su di che, avendo inteso essere quello parte di una antica grotta, avanzo della Romana potenza e da cui testè uscito lo stesso Ingegnere, ad onta del gran volume di polvere che ingombrava la grotta, la cui altezza vedesi ora notata da una bianca linea, disdegnoso di ogni ostacolo, di ogni difficoltà, al fioco lume di una debolissima luce, quasi barcollando volle penetrarvi: e fu allora che, ammirandone la grandezza e la struttura, per un tratto di Sovrana clemenza, ne ordinò tantosto il totale sgombrò, degnandosi di nominare il sig. Ingegnere a Direttore dei lavori. Così essa da una mano reale è stata tratta dall’oblio, sotto cui era sepolta e scossa da lunghissimo sonno di morte in cui giaceva.” La Grotta, dunque, era a quell’epoca parzialmente agibile dal lato della Gaiola (dove il tufo è maggiormente consistente) ed aveva subito crolli verso l’ingresso di Coroglio (dove è presente soprattutto terreno pozzolanico). Dopo il poderoso intervento realizzato in questo periodo, con la costruzione di numerosi sottarchi di sostegno in muratura ed il rivestimento di interi tratti (Figg. 8.2.6, 8.2.7 e 8.2.8) che hanno ridotto la sezione della galleria, la Grotta di Seiano rimase in funzione fino alla seconda guerra mondiale. Dei lavori eseguiti una dettagliata testimonianza è offerta da Francesco Alvino<sup>8</sup> nel 1845: “... oggi lo sgombramento è già eseguito e libera può traversarsi interamente, ma immensa pena, nobile perseveranza ed infinite cure furono praticate per riuscirvi; chè l’aere rinchiusa della grotta per tanti anni, nociva al respiro rendeva difficoltoso il lavoro e lo sgombramento, pure la fermezza dell’ingegnere Mendia fece veder finita l’opera e fra qualche mese sarà anche terminato il rinforzo di fabbrica e sicura da qualche disgrazia. Questo cammino sotterraneo è tutto incavato nel sasso, solo le due estremità sono nel tufo e per breve tratto, la parte media veniva quasi interamente sostenuta da volte e mura romane di opere reticolate, e tuttora ne rimane a testimonianza qualche tratto; taluni siti erano rinforzati con fabbriche di tufo e di mattoni d’epoche posteriori...è mio dovere però dare l’esatta misura di quest’opera interessantissima...”. Durante la guerra, l’utilizzo come rifugio antiaereo per gli abitanti della zona è sottolineato dalle latrine visibili in un cunicolo laterale verso la Gaiola e la costruzione di alcune sedute sul lato di Coroglio. In seguito, divenuta covo di contrabbandieri ed avendo accertato la presenza

di esalazioni di anidride carbonica negli anni ‘70 (la cosiddetta “mofeta”) si decise di murarne gli ingressi (Figg. 8.2.9 e 8.3.1). In occasione del Vertice dei Capi di Stato e di Governo (il G7), nel 1994 furono iniziati i lavori per la riapertura del camminamento che, tuttavia, terminarono dopo poco per insufficienza di risorse finanziarie. I lavori riprenderanno solo nel 1998 (con la realizzazione anche dell’impianto di illuminazione) e dopo alcuni anni restituiranno alla città di Napoli ed al mondo intero questa straordinaria testimonianza del genio e delle capacità costruttive della civiltà romana.

### 8.3 Il rilievo tridimensionale della Grotta di Seiano.

Il rilievo tridimensionale della Grotta di Seiano, considerando le particolari condizioni ambientali di questa struttura, ha richiesto l’utilizzo di una metodologia diversa rispetto al caso, in seguito descritto, del Teatro e dell’Odeon della antica Villa di Pausilypon (Par. 11.3). Trattandosi, infatti, di un antico camminamento ipogeo, si è reso necessario individuare una tecnologia in grado di acquisire e restituire dati tridimensionali in un ambiente caratterizzato da:

- superfici complesse, discontinue e talvolta frammentarie. Come per ogni struttura archeologica, la maggiore complessità nell’acquisizione di informazioni metriche e semantiche (rispetto al caso di manufatti architettonici) è dovuta, infatti, alla mancanza di superfici nette e continue, in grado di descrivere compiutamente la sagoma e la volumetria degli spazi. Degrado, corrosione e perdita di materiale (che mettono spesso in luce l’articolazione stratigrafica delle strutture), dovuta all’azione del tempo e agli interventi dell’uomo che accompagnano la vita di queste strutture, influenzano la scelta delle tecniche e la quantità dei dati da acquisire;
- condizioni di illuminazione scarsa, disomogenea od inesistente. In tutti i casi di ambienti ipogei, anche precedente descritti, la scarsità o l’inesistenza di un’illuminazione naturale od artificiale è fortemente vincolante per l’impiego di tecniche tradizionali di acquisizione di informazioni metriche e colorimetriche. Gli espedienti messi in atto in epoca romana per garantire, se pur minime, condizioni di circolazione dell’aria e l’ingresso di luce naturale in questi camminamenti, risultano, tuttavia, molto spesso insufficienti. Nel caso della Grotta di Seiano, in particolare, non era stato previsto lo scavo di alcun pozzo verticale (come riscontrabile nel caso, ad esempio, della Crypta Romana a



8.2.8 - Tratto in corrispondenza dell’ingresso dalla Gaiola, scavato nel banco tufaceo più compatto e non rivestito di muratura.



8.2.9 - Ingresso murato dal lato della Gaiola, immagini dall’archivio fotografico della Soprintendenza, 1987.



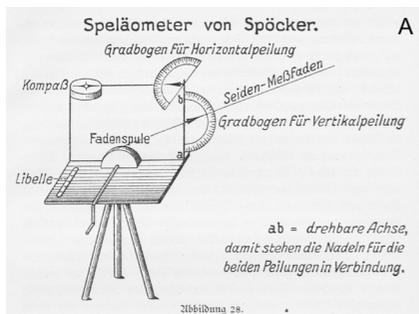
8.3.1 - Ingresso murato dal lato di Coroglio, immagini dall’archivio fotografico della Soprintendenza, 1987.



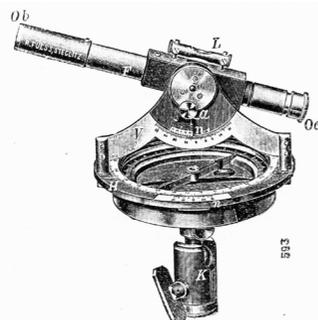
8.3.2 - Raffigurazione antropomorfa di una cava, Georg Buchholtz, 1723.



8.3.3 - Raffigurazione antropomorfa di una cava, Sebastian Rosenstingl, 1747.



8.3.4 - Uno strumento realizzato da Richard Spöcker per il rilievo di cave, nel 1920.



8.3.5 - Un teodolite realizzato da R. Fuess, intorno al 1910.

Cuma, in cui l'illuminazione naturale della galleria era molto più efficace). La presenza dei soli tre cunicoli laterali (concentrati tra la parte centrale e l'ingresso verso la Gaiola) non permette, in questo caso, l'illuminazione di gran parte del camminamento. Oggi la galleria è percorribile grazie all'impianto di illuminazione artificiale posizionato, tuttavia, principalmente su un solo fronte del tunnel e che genera una condizione di luce disomogenea nei singoli tratti;

- altri vincoli di acquisizione. L' "incertezza" del dato archeologico (Par. 1.4) aumenta nel caso di strutture con forti vincoli di acquisizione, come ambienti sotterranei, sviluppati principalmente lungo una sola direzione o fortemente suddivisi in diverse partizioni da elementi interni. Di frequente, considerando anche altre condizioni imposte da questi tunnel (terreni scoscesi ed in pendenza, ambienti poco ampi, difficoltà di accesso a tutti gli elementi per il prelievo di misure, ...), si richiede l'utilizzo di una strumentazione leggera e facilmente trasportabile;
- dimensioni del camminamento ipogeo. Le condizioni ed i vincoli su esposti sono molto più rilevanti se si considerano le dimensioni di questa galleria. Oggi il tunnel si sviluppa all'interno della collina, infatti, per quasi ottocento metri (ma, probabilmente, in origine era ancora più estesa e verrà ridimensionata con il taglio della discesa Coroglio), con una sagoma fortemente allungata. Il primo rischio, in questi casi, è quello di ottenere un dato metrico poco accurato, con facili errori di allineamento di scansioni tridimensionali o di prelievo delle misure con metodi diretti. Vanno, inoltre, considerati i lunghissimi tempi di acquisizione delle informazioni di distanza nel caso di strutture di tali dimensioni con tecnologie e metodologie tradizionali o di elaborazione nel caso di utilizzo di sensori ottici (considerando la quantità di dati da acquisire in questi casi).

Il rilievo di grotte ed ambienti ipogei non è, di certo, una pratica recente (Figg. 8.3.2 e 8.3.3). Lo sviluppo, già intorno al XVIII sec. di apposite metodologie per il prelievo di misure e la rappresentazione cartografica di queste strutture naturali od artificiali in campagne ed attività speleologiche ne è una testimonianza<sup>9</sup>. La mappatura di questi ambienti, ritenuta un indispensabile strumento di controllo del territorio dal XIX secolo, si caratterizza, dunque, nella storia per la ricerca di metodi sempre più scientifici, standardizzati ed accurati di documentazione, sviluppati soprattutto all'interno di quella che diventerà una vera e propria disciplina, la speleologia. Gli strumenti utilizzati

nel lavoro sul campo con procedure tradizionali, bussole con inclinometri, teodoliti speciali e stazioni totali, spesso frutto dell'evoluzione di strumenti più antichi (Figg. 8.3.4 e 8.3.5), hanno permesso di documentare molte di queste strutture nelle lunghe e spesso pericolose attività di mappatura. Con l'introduzione dei sensori ottici e del rilievo digitale, oltre che i progressi nel campo della robotica, scenari inediti si sono configurati anche per l'acquisizione di queste particolari strutture (Fig. 8.3.6), con l'abbattimento dei tempi di lavoro sul campo, il superamento di alcuni dei vincoli su descritti e la possibilità di ottenere informazioni di distanza nelle tre dimensioni. Non tutte le metodologie del rilievo *reality-based* sono, ad ogni modo, in questo caso indicate o appropriate in base al tipo di risultato atteso. Le metodologie e le relative strumentazioni descritte nei capitoli 4 e 5, sono, generalmente, utilizzabili sia nel caso di strutture *outdoor* che *indoor*, tenendo comunque in considerazione i relativi limiti di ciascuna strumentazione. Le scarse condizioni di illuminazione e lo sviluppo per lo più longitudinale di questi ambienti (con sezioni in larghezza non molto ampie), rendono, infatti, difficoltoso l'utilizzo di tecniche *image-based* per una mappatura tridimensionale completa di strutture di queste dimensioni. Le tecniche *range-based*, al contrario, e soprattutto gli scanner laser terrestri, hanno si sono dimostrate spesso efficaci per la restituzione di informazioni dimensionali accurate in ambienti ipogei<sup>10,11,12,13,14,15,16,17,18</sup>, condotta quasi simultaneamente all'acquisizione con il sensore attivo. Il vantaggio nell'utilizzo di simili strumentazioni è legato, in molti casi, al peso piuttosto contenuto ed alla facilità di trasporto, oltre alla possibilità di acquisire milioni di punti anche su superfici complesse e lavorando in condizioni di illuminazione scarse o disomogenee. Tuttavia, con strumentazioni ad acquisizione statica, in caso di un'articolazione complessa degli spazi interni o particolarmente frazionati, è indispensabile acquisire dati da numerose postazioni per ottenere una mappatura completa della struttura. Questo comporta, ovviamente, l'aumento dei tempi di acquisizione sul campo ma, soprattutto, la produzione di un'enorme mole di dati, poi difficilmente gestibili in fase di elaborazione e spesso inutili considerando le scale di rappresentazione richieste per la documentazione di questo tipo di strutture. Per questi motivi, e considerando che l'obiettivo di questo lavoro è la restituzione dell'andamento e dell'articolazione volumetrica generale della Grotta di Seiano, si è deciso di sperimentare un sistema di scansione laser portatile che consente di acquisire dati in movimento, lo Zeb1 della GeoSlam<sup>19</sup>. L'accuratezza dei risultati ottenuti e dell'allineamento tra le scansioni acquisite è stata poi verificata



8.3.6 - Alcune soluzioni per il rilievo di ambienti sotterranei. a) scanner laser terrestri; b) GPR (Ground Penetrating Radar); c) Mining Drone; d) Mobile Mapping Solutions.



8.3.7 - Zeb1 della Geoslam: componenti principali.

sulla base dei dati ottenuti da una campagna di rilievo topografico, condotta quasi simultaneamente all'acquisizione con il sensore attivo.

### 8.3.1 Un sistema a scansione laser portatile per il rilievo tridimensionale: lo Zeb1 della Geoslam.

La strumentazione utilizzata per questa campagna di acquisizione, lo Zeb1 della Geoslam (Fig. 8.3.7), è un sensore attivo portatile che consente di ottenere informazioni tridimensionali tenendo in mano la testa dello strumento e camminando all'interno degli ambienti. Il sensore è composto da un profilometro laser bidimensionale ed una piattaforma inerziale (IMU – *Inertial Measurement Unit*) montati su una molla. Lo scanner laser UTM-30LX emette degli impulsi ad alta frequenza con lunghezza d'onda di 905 mm che, riflessi dalle superfici colpite, tornano al sensore dove il segnale è convertito in informazioni di distanza basate sul principio del Tempo di Volo (Par. 5.1.2). Le misure di velocità angolare e di accelerazione lineare acquisite dall'IMU permettono di stimare la traiettoria percorsa dalla strumentazione. Un magnetometro triassiale registra le interferenze magnetiche, comuni negli ambienti sotterranei. Lo scanner laser e la piattaforma inerziale sono collegati ad un micro-computer ed una batteria posizionati nello zaino da indossare. La strumentazione, dal peso molto contenuto, è in grado di acquisire fino a 43000 punti al secondo, con un campo visivo di 270° ad una distanza massima di 30 metri in ambienti *indoor* e di 15 metri *outdoor*<sup>20</sup>. La precisione del sensore è di circa 3 centimetri, condizionata dalla distanza di acquisizione, dall'angolo di incidenza e dalla capacità di riflessione della superficie. Il campo visivo del sensore è incrementato dal meccanismo di oscillazione della testa grazie alla molla e che permette di generare profili tridimensionali dell'ambiente grossolanamente acquisito in ogni secondo. Nello Zeb1, la testa può oscillare nelle due direzioni principali:

- oscillazione “avanti e indietro” (*front-back*)(Fig. 8.3.8)
- oscillazione “laterale” (*side by side*)(Fig. 8.3.9)

Per unire i diversi profili acquisiti, stimando la posizione tridimensionale dello scanner e gli orientamenti, il sensore utilizza un algoritmo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), sviluppato da CSIRO<sup>21</sup>(*Australia's National Science Agency*) ed utilizzato nello scanner Zeb1. Gli strumenti che utilizzano, infatti, sistemi tradizionali basati su GPS (*Global Positioning*



8.3.8 - Zeb1: oscillazione “avanti e indietro” (*front-back*).



8.3.9 - Zeb1: oscillazione “laterale” (*side by side*).

*Systems*) o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) hanno limiti di funzionamento quando vengono impiegati in ambienti *indoor*, rendendo complessa la mappatura di edifici o strutture chiuse. La soluzione SLAM, studiata ed applicata anche nei casi di cave e miniere<sup>22</sup>, richiede che la stessa scena venga osservata in tempi differenti. Lo Zeb1 acquisisce grossolanamente una scena al secondo. Le viste locali delle scene, ottenute grazie all'oscillazione della molla, contengono la posizione e la direzione normale ad ogni elemento registrato. L'accoppiamento tra elementi di superficie acquisiti in momenti diversi, permette di stimare la traiettoria attraverso la relazione tra le diverse geometrie. Le nuvole di punti tridimensionali e le rispettive traiettorie vengono poi restituite nei formati standard, come .laz e .ply. Il dato fornito non contiene informazioni semantiche ma solo geometriche (coordinate 3D dei punti misurati).

### 8.3.2 Test preliminari per la verifica delle prestazioni del sensore.

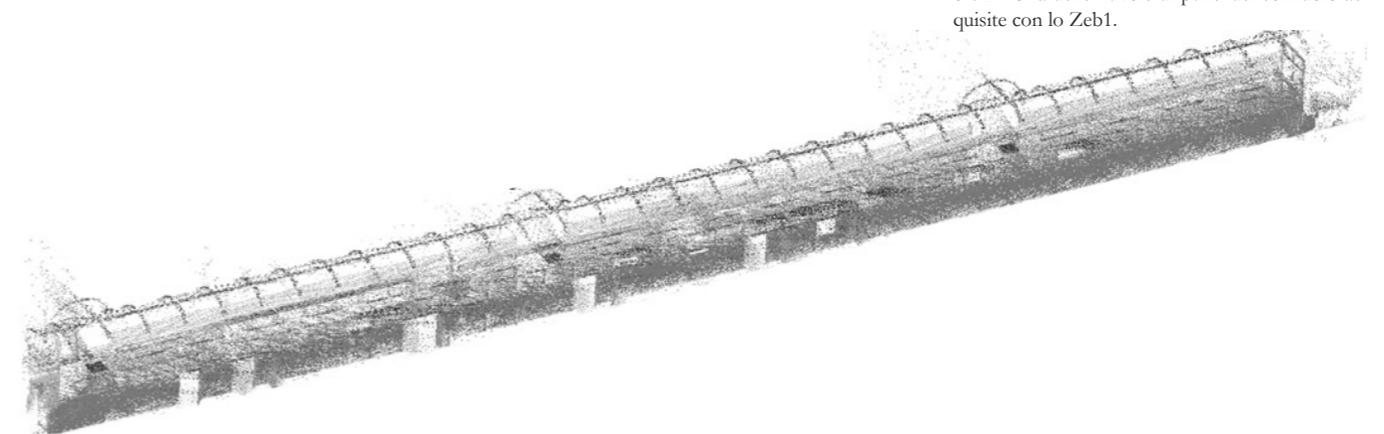
Per testare preliminarmente le capacità del sensore (da utilizzare poi per la mappatura tridimensionale dell'ambiente ipogeo oggetto di studio), alcuni test sono stati condotti su un caso di struttura *indoor* con particolari caratteristiche (Fig. 8.4.1 e 8.4.2):

- un lungo corridoio orizzontale (piano X,Y) con pareti lungo la direzione Z;
- pareti pressoché lisce e prive di particolari variazioni geometriche lungo la direzione principale.

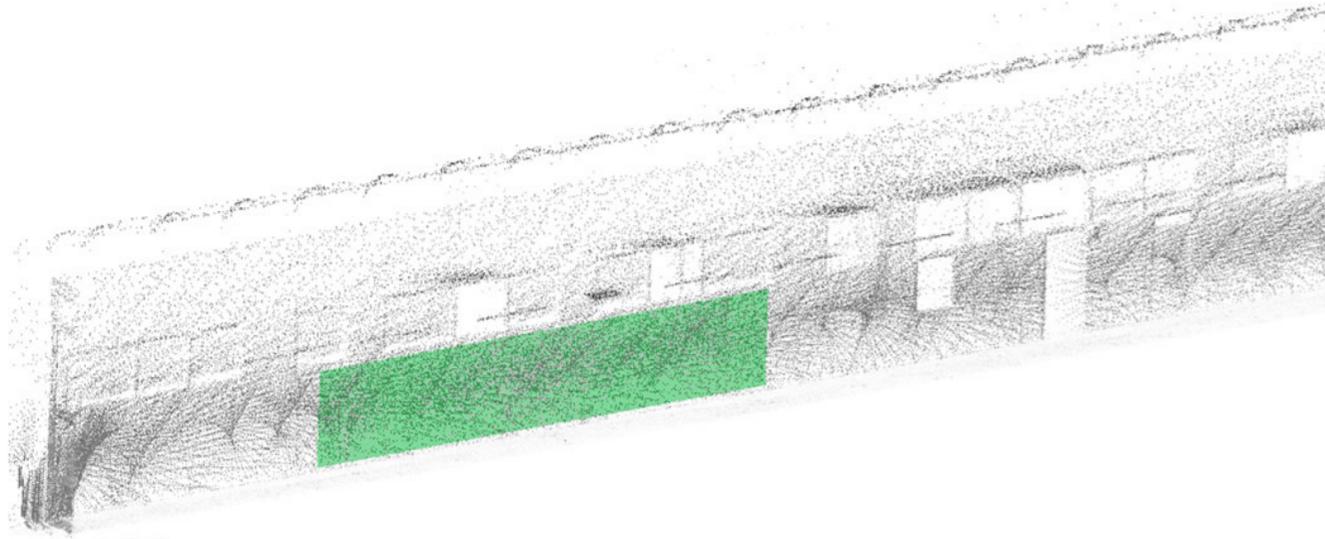
Una prima verifica sul “rumore” delle superfici acquisite (Fig. 8.4.3), attraverso procedure di *fitting* dei piani, ha restituito un errore medio (RMSE – *Root Mean Square Error*) di circa 1 cm.



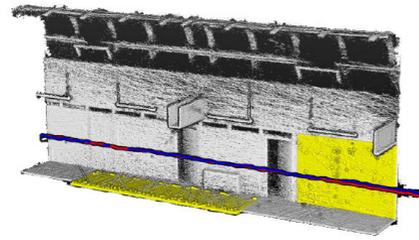
8.4.1 - Corridoio su cui sono stati effettuati test preliminari per la verifica delle prestazioni del sensore.



8.4.2 - Una delle nuvole di punti del corridoio acquisite con lo Zeb1.



L'obiettivo principale di questo test è, tuttavia, quello di individuare potenzialità e limiti del sensore in un ambiente *indoor* privo di rilevanti variazioni geometriche delle superfici e di identificare la migliore strategia di acquisizione.

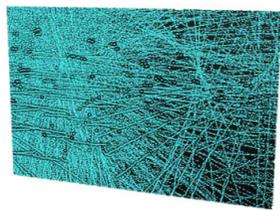


Il test è stato condotto utilizzando quattro diversi protocolli di acquisizione:

1) acquisizione “*round-trip*” - “*front-back*” (terminando l’acquisizione nel punto di partenza e facendo oscillare la testa del sensore in modalità *front-back*);



2) acquisizione “*one-way*” - “*front-back*” (terminando l’acquisizione al termine del corridoio, in posizione diversa rispetto a quella di partenza, e facendo oscillare la testa del sensore in modalità *front-back*);



3) acquisizione “*round-trip*” - “*side by side*” (terminando l’acquisizione nel punto di partenza e facendo oscillare la testa del sensore in modalità *side by side*);

4) acquisizione “*one-way*” - “*side by side*” (terminando l’acquisizione al termine del corridoio, in posizione diversa rispetto a quella di partenza, e facendo oscillare la testa del sensore in modalità *side by side*).

La lunghezza del corridoio, per il necessario confronto dei risultati ottenuti con le diverse procedure di acquisizione, è stata misurata con un distanziometro laser Leica, restituendo un valore di 52,77 metri. La tabella 8.1 mostra i valori

8.4.3 - Procedure di *fitting* di piani per la verifica del “rumore” della nuvola di punti acquisita.

di distanza e le variazioni sull’asse Z ottenute con i diversi protocolli utilizzati. I risultati evidenziano che, con superfici lisce e senza rilevanti variazioni geometriche:

- 1) Il protocollo 1 produce una misura di distanza per la lunghezza del corridoio significativamente inferiore rispetto al dato registrato dal distanziometro.
- 2) Il protocollo 2 registra una sensibile variazione del valore lungo l’asse Z, dovuto ad una divergenza del valore stimato dall’algoritmo di SLAM.
- 3) Il protocollo 3 offre risultati coerenti con l’accuratezza dichiarata del sensore di circa 3 cm.
- 4) Il protocollo 4 registra anch’esso una sensibile variazione lungo l’asse Z.

Acquisition protocol	Corridor length	$\Delta Z$ variation
1	52.51 m	< 0.02 m
2	52.79 m	≈ 0.60 m
3	52.74 m	< 0.02 m
4	52.78 m	≈ 0.60 m

Tab. 8.1 - Variazioni della lunghezza e dell’altezza del corridoio ottenute con i quattro diversi protocolli di acquisizione.

### 8.3.3 Il rilievo della Grotta di Seiano: acquisizione e processamento dei dati.

La Grotta di Seiano si caratterizza oggi per la presenza (a seguito dei lavori di ripristino condotti in epoca borbonica) di tratti interamente rivestiti dalla nuova muratura alternati a tratti in cui i sottarchi di sostegno rappresentano elementi dalle forti caratteristiche geometriche. A seguito dei test condotti e considerando che i maggiori errori erano attesi proprio per le superfici murarie prevalentemente lisce, nel caso studio proposto è stato utilizzato un approccio ibrido di acquisizione. In particolare, un approccio “*round-trip*” - “*front-back*” (Fig. 8.4.4) nel caso di strutture maggiormente collaborative (in prossimità dei sottarchi in muratura) ed un approccio “*round-trip*” - “*side by side*” nel caso dei tratti interamente rivestiti, che



8.4.4 - Fase di acquisizione dei dati con lo Zeb1 con oscillazione *front-back* della testa del sensore.



8.4.5 - Targets circolari in legni acquisiti con lo Zeb1 ed il cui centro è stato misurato con stazione totale.

presentano superfici essenzialmente lisce e regolari nella direzione principale. La possibilità di acquisire dati in movimento rende il lavoro sul campo estremamente veloce. Questo ha permesso di mappare tridimensionalmente l'intera galleria e le aree prospicienti i due ingressi in una sola giornata di lavoro. Per ridurre possibili divergenze della stima (dovute allo SLAM) è consigliato un limite per l'acquisizione di ogni dataset di circa 20 minuti. Utilizzando, dunque, un approccio ibrido "round-trip" (ovvero terminando le acquisizioni in ogni posizione di partenza nelle diverse scansioni) e considerando in media tratti da mappare di circa 150 metri e circa 40 metri di sovrapposizione tra scansioni successive, l'intera grotta è stata suddivisa ed acquisita in otto parti separate, dette sezioni. Per semplificare le procedure di allineamento in fase di elaborazione dei dati e per verificarne poi i risultati, sono stati realizzati diversi targets circolari in legno con diametro di circa 30 cm (Fig. 8.4.5), il cui centro è individuato da un foro di circa 2 millimetri. I targets sono stati posizionati in diversi punti della galleria (e soprattutto nell'area di sovrapposizione tra le sezioni) ed acquisiti durante le scansioni, mantenendo fissa la loro posizione durante la scansione di tratti successivi (Fig. 8.4.6). Il centro degli stessi targets, oltre a diversi punti naturali, è stato rilevato topograficamente con una stazione totale, per poter verificare (ed eventualmente correggere) l'allineamento delle scansioni nella fase di elaborazione dei dati. Il rilievo topografico è stato condotto quasi simultaneamente all'acquisizione delle diverse scansioni, utilizzando una stazione totale TOPCON GPT 700i, le cui specifiche tecniche sono descritte nella tabella 8.2.

Topcon GPT700i	
Range measurement accuracy (non-prism)	±5 mm
Range (non-prism)	1.5 to 250 m
Angle measurement accuracy (non-prism)	1"
Tilt correction	Dual axis
Compensating range	±4"

Table 2. Main technical specifications of the total stations used for the topographic survey of the *Grotta*.

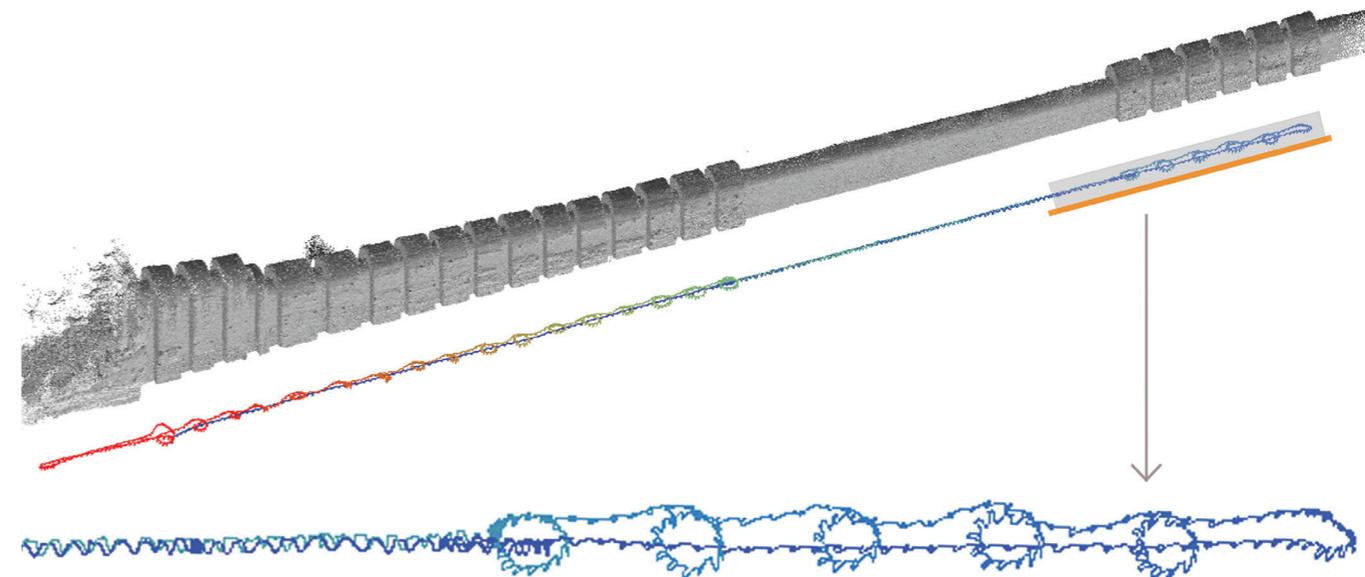
Tab. 8.2 - Principali specifiche tecniche della stazione totale utilizzata per il rilievo topografico della Grotta di Seiano.



8.4.6 - Acquisizione dei targets circolari in legno durante la campagna di rilevamento con lo Zeb1.

### 8.3.4. Processamento dei dati e valutazione dei risultati.

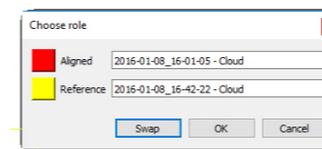
Una volta acquisite le scansioni grezze, l'elaborazione dei dati provenienti dal sensore attivo avviene online, attraverso il caricamento su "GeoSLAM Cloud", dove il software di Localizzazione e Mappatura Simultanea (SLAM)

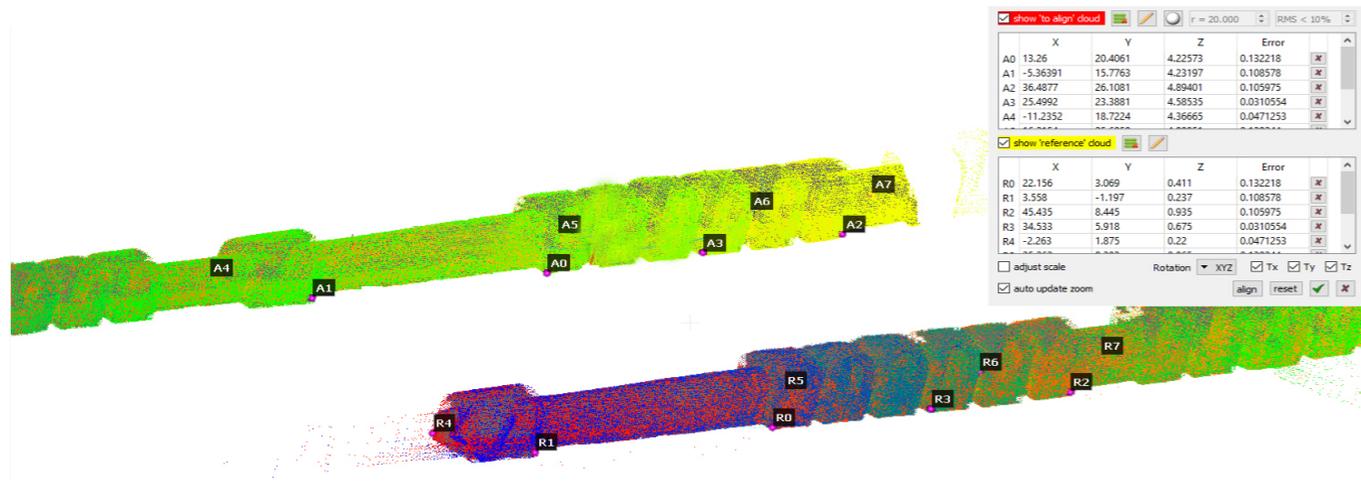


8.4.7 -Nuvola di punti e traiettoria del percorso seguito durante l'acquisizione dei dati.

trasforma le misure di rilievo in una nuvola di punti interamente registrata (Fig. 8.4.7). Per l'allineamento e l'unione delle otto nuvole di punti registrate è stato, invece, utilizzato il software *open-source* CloudCompare<sup>23</sup>. Importate le nuvole di punti nel software, una prima trasformazione rigida manuale ha consentito di ottenere un approssimativo allineamento tra le prime due scansioni consecutive, scegliendo il *dataset* da utilizzare come "reference" per la procedura di registrazione (Fig. 8.4.8). L'orientamento relativo tra le nuvole di punti è stato, dunque, ottenuto utilizzando l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*), descritto precedente (Par. 6.5) ed implementato nel software. Quest'algoritmo permette di determinare per ogni punto della nuvola il punto più vicino (*closest point*) sulla seconda nuvola da allineare. Collimando manualmente almeno 5 punti omologhi per ogni sezione (il numero di punti minimo da individuare è 3) nelle aree di sovrapposizione tra due

8.4.8 - Procedura di allineamento relativo tra nuvole di punti. Selezione del *dataset* da utilizzare come "reference".

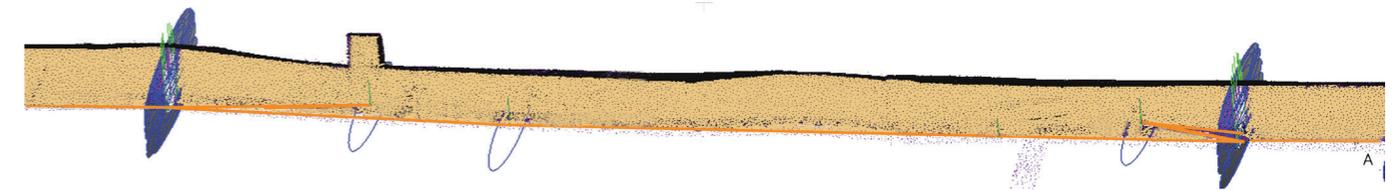
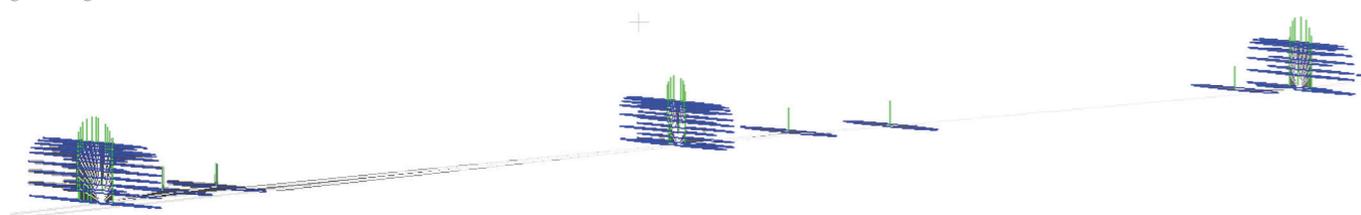




8.4.9 - Collimazione manuale di punti omologhi tra scansioni adiacenti nelle aree di sovrapposizione.

scansioni adiacenti, viene calcolata una prima trasformazione approssimata, a partire dalla quale l'ICP calcola iterativamente una nuova roto-traslazione rigida per minimizzare la distanza media tra le due scansioni (Fig. 8.4.9). Una volta allineate le prime di due scansioni, il processo è stato ripetuto fino ad allineare in sequenza tutte le otto sezioni. Questa procedura è risultata piuttosto semplice nei tratti caratterizzati dalla presenza dei sottarchi in muratura (che presentano elementi geometrici ben distinguibili da collimare) e più complessa nel caso dei tratti interamente rivestiti (ad andamento lineare e regolare). La nuvola di punti finale, allineata ed unita, conta circa 25 milioni di punti.

8.5.1 - Tratto della rete topografica realizzata per l'intera galleria, con misurazione dei centri dei targets in legno.

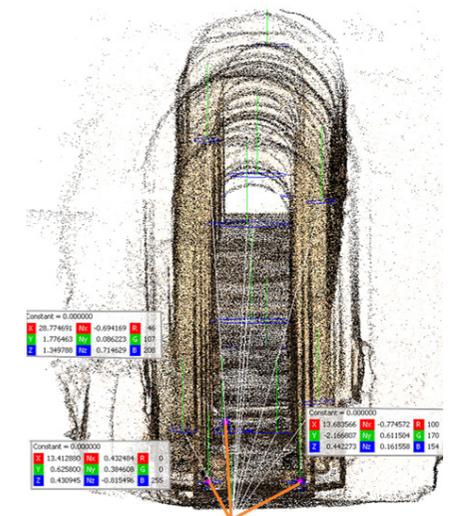


Il dato topografico ed, in particolare, le coordinate tridimensionali dei targets circolari misurati con stazione totale sono stati considerati il riferimento, rispetto cui è stato possibile valutare e verificare il risultato dell'allineamento delle scansioni (Figg. 8.5.2 e 8.5.3). Per poter procedere al confronto, i targets visibili nella nuvola di punti dello ZEB1 sono stati isolati per calcolarne le coordinate dei centri. Le nuvole di punti sono state importate in PolyWorks, dove, attraverso procedure di *best-fitting* (Par. 6.5) sono state ricavate le coordinate dei centri dei 25 targets circolari acquisiti. A questo punto, utilizzando le coordinate dei targets ottenute dal rilievo topografico come “reference”, in CloudCompare è stata applicata una trasformazione rigida (*similarity transformation*), riscontrando un errore di allineamento RMSE (*Root Mean Square Error*) tra i due set di dati di circa 9,44 metri. Un errore così elevato può avere due spiegazioni possibili:

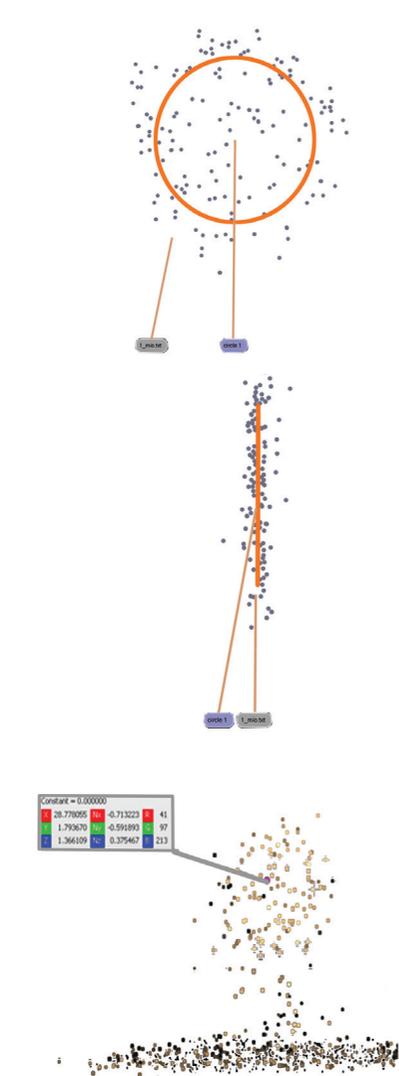
- sono stati commessi errori nell'identificazione dei centri dei targets (dovuti al forte “rumore” delle nuvole di punti ottenute con lo Zeb1);
- sono presenti delle deformazioni (*block deformation*) nelle scansioni acquisite.

Per escludere la prima ipotesi, le procedure di *best-fitting* (Fig. 8.5.4) in PolyWorks sono state ripetute più volte, restituendo, ad ogni modo, risultati molto simili al primo. La seconda verifica, ovvero la ricerca di eventuali deformazioni delle nuvole di punti registrate, ha richiesto un approccio diverso. Considerando come “reference”, ancora una volta, la rete topografica, è stato verificato l'allineamento delle singole nuvole di punti (utilizzando i corrispondenti targets visibili in ciascuna) rispetto alla rete topografica. Gli errori ottenuti sono mostrati nella tabella 8.3. Questa procedura ha consentito di evidenziare i *datasets* con maggiori errori di allineamento (RMSE), riscontrando valori più elevati nei tratti della galleria caratterizzati da murature omogenee, lisce e prive di elementi geometrici caratterizzanti, ovvero quelli interamente rivestiti in epoca borbonica. La registrazione tra le singole scansioni è stata, dunque, ripetuta, dopo un'operazione

8.5.2 - Procedura di allineamento attraverso una trasformazione rigida tra la nuvola di punti allineata e la rete topografica.



8.5.3 - Estrazione delle coordinate dei centri dei targets per il confronto con i dati della rete topografica.



8.5.4 - Procedure di *best-fitting* per l'estrazione delle coordinate dei centri dei targets.

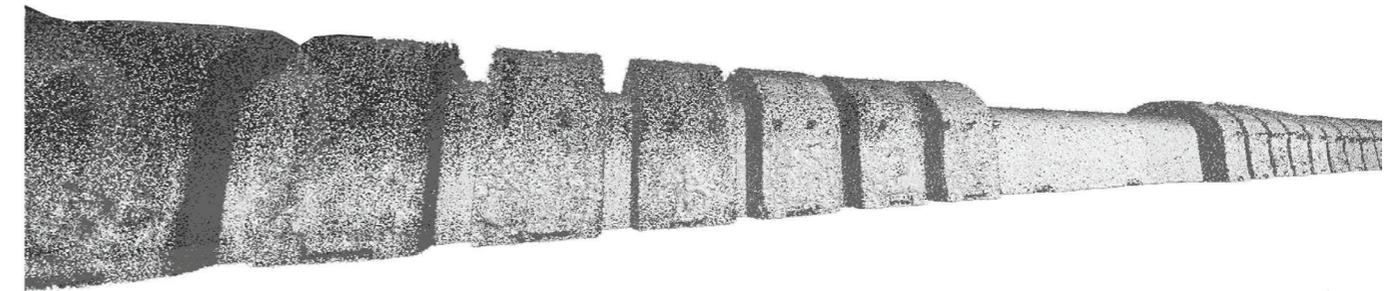
di segmentazione delle scansioni e considerando i soli tratti che presentavano minori valori di errore nell'allineamento con il dato topografico. L'ampia area di sovrapposizione tra i *datasets*, considerata in fase di acquisizione, ha permesso di ottenere, nonostante l'esclusione delle parti più deformate delle scansioni, una rappresentazione completa della galleria. L'allineamento finale delle nuvole di punti, con questa nuova procedura, ha fornito valori di errore molto più contenuti, mostrati in tabella 8.4. La verifica finale dell'allineamento, considerando la nuvola allineata ed unita e la rete topografica, ha restituito un errore medio per l'intera galleria di 0.13 metri (Figg da 8.5.5 a 8.5.9). Il dato, così ottenuto, è stato utilizzato innanzitutto per analisi metriche e geometriche nei diversi tratti della galleria e per elaborare rappresentazioni bidimensionali caratterizzate (identificando la muratura di epoca romana e quella ottocentesca). Infine, l'analisi dell'andamento della galleria rispetto allo sviluppo della collina soprastante è stato reso possibile dall'inserimento della Grotta di Seiano nel Modello Digitale del Terreno realizzato (Fig. 8.6.1).

DATASET	RMSE of single complete scan (m)
1	3.266
2	0.607
3	0.042
4	5.824
5	2.027
6	0.041
7	0.023
8	0.862

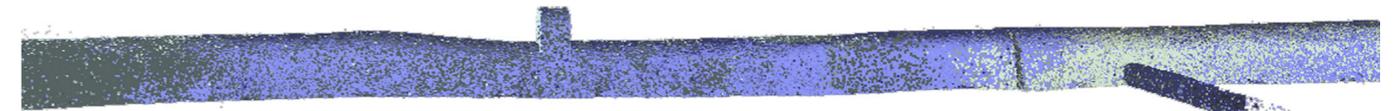
Tab.8.3 - RMSE della trasformazione rigida tra i punti rilevati con stazione totale (centri dei targets) e i punti corrispondenti acquisiti con lo Zeb1 in ogni singola scansione.

DATASET	RMSE of single segmented scan (m)
1	0.072
2	0.637
3	0.050
4	0.082
5	0.109
6	0.089
7	0.034
8	0.051

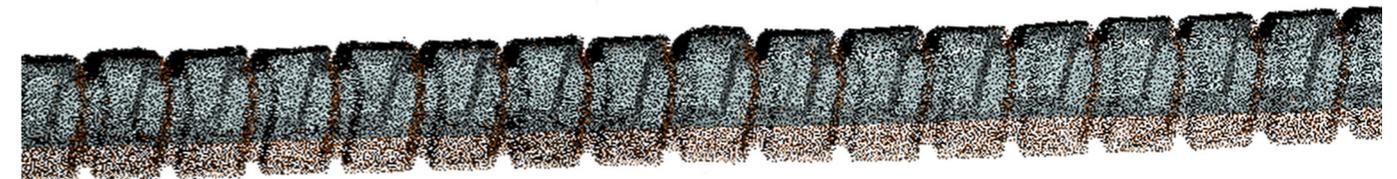
Tab.8.4 - RMSE della trasformazione rigida tra i punti rilevati con stazione totale (centri dei targets) e i punti corrispondenti acquisiti con lo Zeb1 nelle scansioni segmentate.



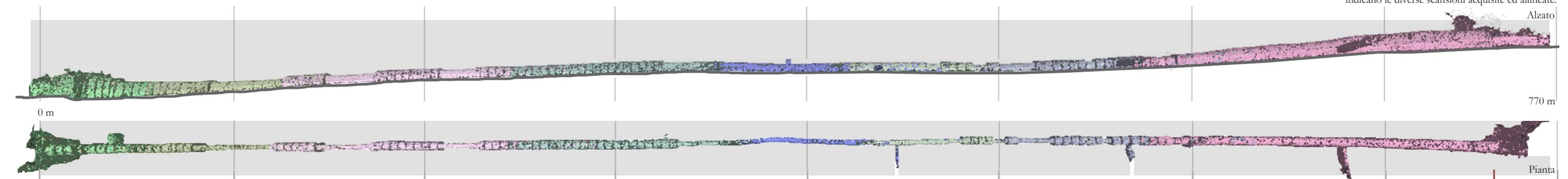
8.5.5 - Un tratto della nuvola di punti finale registrata. Si noti l'alternanza tra segmenti con murature prevalentemente lisce e tratti segnati dalla presenza dei sottarchi in muratura.



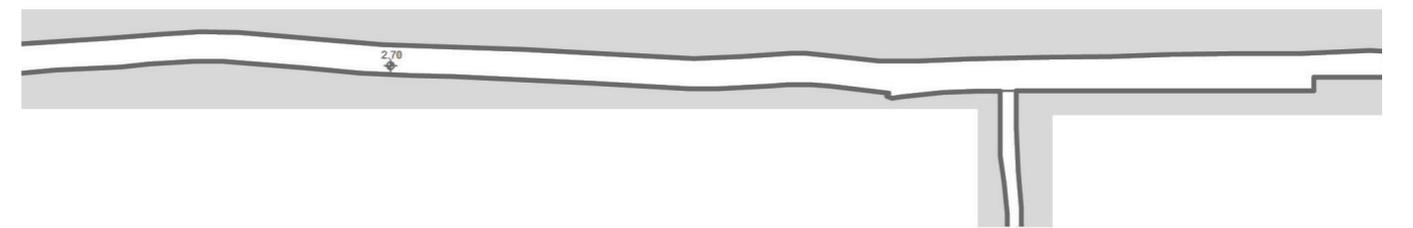
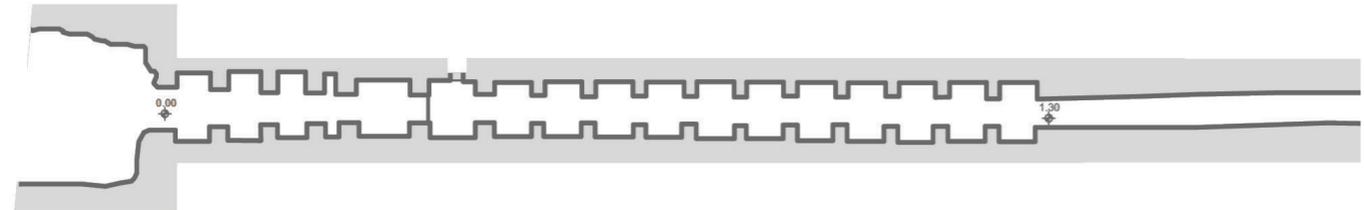
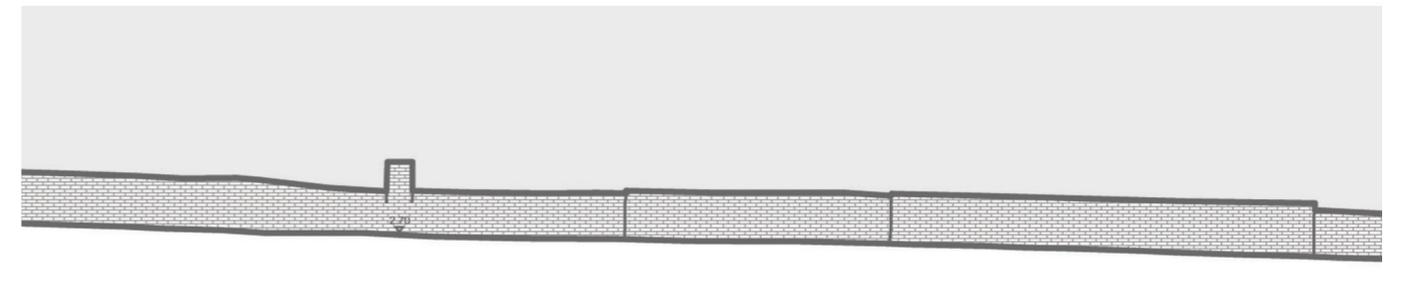
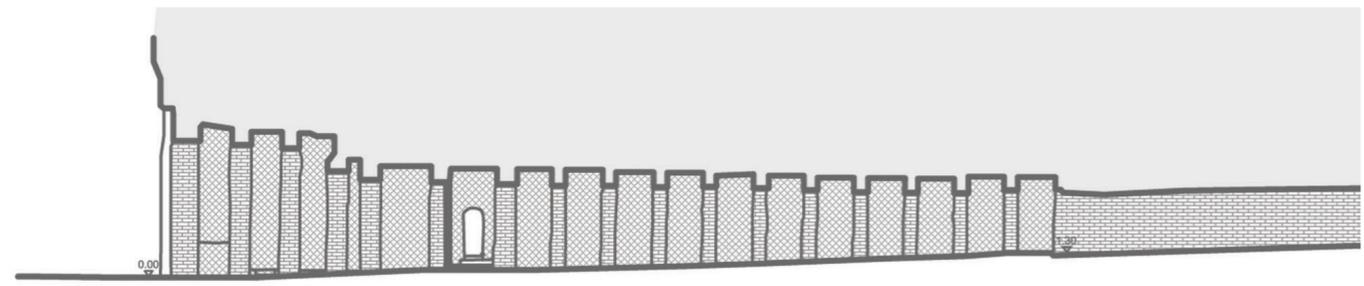
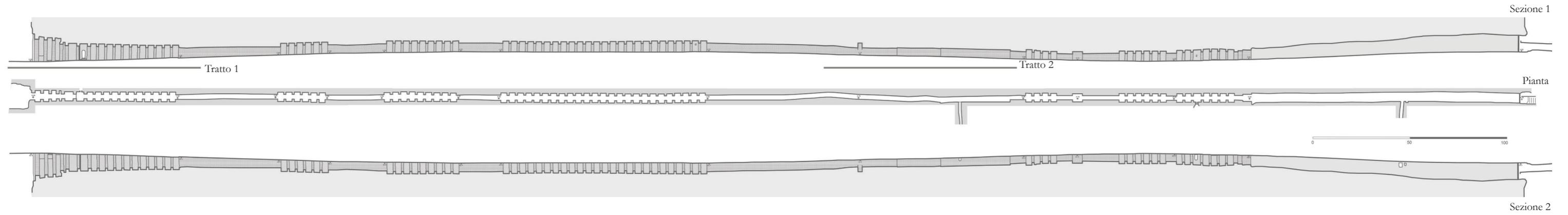
8.5.6 - Tratto centrale con muratura prevalentemente liscia, da cui si accede ad uno dei cunicoli laterali.



8.5.7 - Tratto con numerosi sottarchi in muratura.

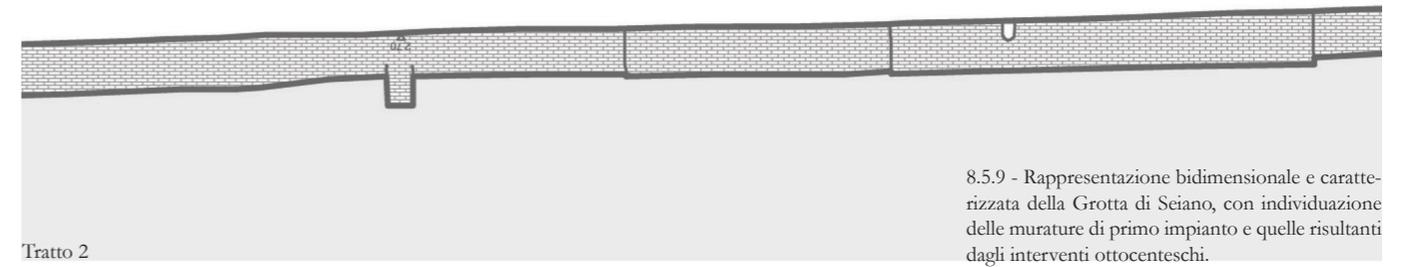
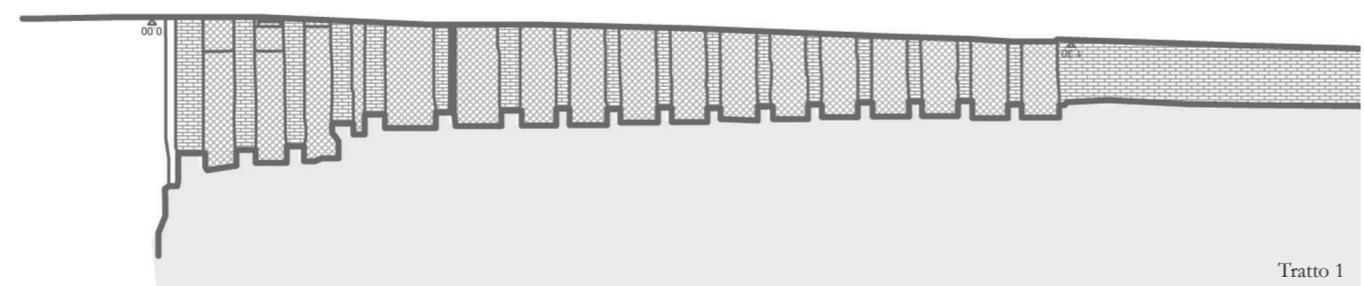


8.5.8 - Rappresentazione in pianta ed in alzato dell'intero sviluppo della galleria. I diversi colori indicano le diverse scansioni acquisite ed allineate.



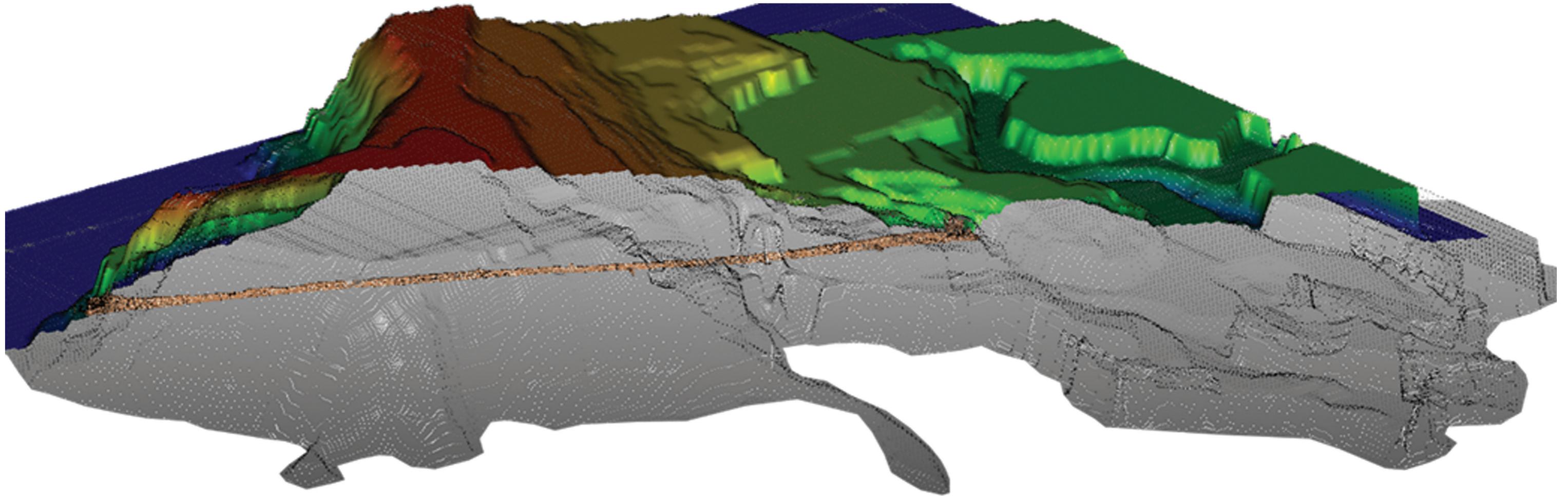
Muratura di epoca romana (Opus Reticulatum e Opus Incertum)

Muratura di epoca borbonica (sottarchi in muratura od interi tratti rivestiti)



8.5.9 - Rappresentazione bidimensionale e caratterizzata della Grotta di Seiano, con individuazione delle murature di primo impianto e quelle risultanti dagli interventi ottocenteschi.

8.6.1 - Integrazione della nuvola di punti acquisita con lo Zeb1 con un Modello Digitale del Terreno, per la lettura dei rapporti tra l'ambiente ipogeo e la collina soprastante.



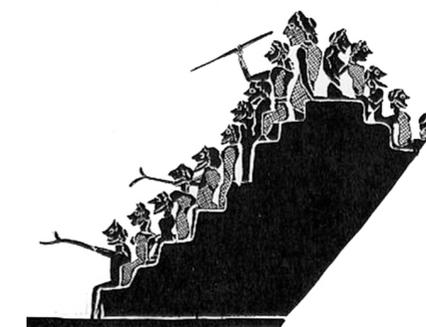
## Note

- <sup>1</sup> Caputo P., “Viabilità e insediamenti nell’Italia antica”, *Atlante tematico di Topografia antica Atta 13*, L’Erma di Bretschneider, 2004.
- <sup>2</sup> Basso P., *Via per monte excisa: strade in galleria e passaggi sotterranei nell’Italia romana*. L’Erma di Bretschneider, 1997.
- <sup>3</sup> Caputo P., Regis C., “L’Anfiteatro cumano e le cavità artificiali di Cuma”, Cuma, *ACIS tMG r XLV III*, 2008.
- <sup>4</sup> Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.
- <sup>5</sup> Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta., *La Grotta di Seiano ed il Parco Archeologico di Pausilypon*. Electa Napoli, 1999.
- <sup>6</sup> De Jorio A., *Guida di Pozzuoli e contorni col suo atlante*. Napoli dalla Stamperia Francese, 1830.
- <sup>7</sup> Lancellotti L., *Sullo scavo della Grotta di Seiano e sulla nuova strada di Coroglio*, Tipografia del Vesuvio, Napoli, 1840.
- <sup>8</sup> Alvino F., *La collina di Posillipo*, con 42 tavole di Achille Gigante, Grimaldi & C. Editori, Napoli, 2001.
- <sup>9</sup> Mattes J., “Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century.”, *International Journal of Speleology*, Vol.44, pp. 251-266.
- <sup>10</sup> Beraldin, J.-A., Picard, M., Bandiera, A., Valzano, V., Negro, N., 2011: Best Practices for the 3D Documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy. *Proc. SPIE*, Vol. 7864, pp. 78640J-78640J-15.
- <sup>11</sup> Caputo P., Farella E.M., Mauriello F., 2011. La Crypta Romana di Cuma. *Spazi e Culture del Mediterraneo*. PRIN 2009-2011. La scuola di Pitagora editrice.
- <sup>12</sup> Roncat A., Dublyansky Y., Spötl, C., Dorninger P., 2011 – Full-3D surveying of caves: A case study of Marchenhöhle (Austria). *Proc. LAMG2011 Conference*, pp. 1393-1403.
- <sup>13</sup> Laurent J., 2014. Use of 3D scanning technology for automated inspection of tunnels. *Proc. World 309 Tunnel Congress 2014*.
- <sup>14</sup> Nocerino E., Fiorillo F., Minto S., Menna F., Remondino F., 2014. A non-conventional procedure for the 3D modeling of WWI forts. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, pp. 457-464.
- <sup>15</sup> Wang W., Weisen Z., Huang L., Vimarlund V., Wang Z., 2014. Applications of terrestrial laser scanning for 281 tunnels: A review. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering* Vol. 1, pp. 325-337.
- <sup>16</sup> Gallay M., Kaňuk J., Hofierka J., Hochmuth Z. & Meneely J., 2015 – *Mapping and geomorphometric analysis of 3-D cave surfaces: a case study of the Domica Cave, Slovakia*. In: Zwoliński Z., Jasiewicz J., Mitasova H. & Hengl T. (Eds.), *Geomorphometry 2105*, pp. 69-73 (available at: <http://geomorphometry.org/2015>)
- <sup>17</sup> McFarlane D.A., Roberts W., Buchroithner M., Van Rentergem G., Lundberg J. & Hautz S., 2015. Terrestrial LiDAR-based automated counting of swiftlet nests in the caves of Gomantong, Sabah, Borneo. In: *International Journal of Speleology*, Vol. 44(2), pp. 191-195.
- <sup>18</sup> Rodríguez-González, P., Nocerino, E., Menna, F., Minto, S., Remondino, F., 2015. 3D surveying & modeling of underground passages in WWI fortifications. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40(5), pp. 17-24.
- <sup>19</sup> <http://geoslam.com/>
- <sup>20</sup> Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckes, E., Robert, J., 2013. Efficiently capturing of large, complex Cultural Heritage sites with a handheld 3D mobile laser mapping system. In: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 15(6), pp. 670-678.
- <sup>21</sup> <http://www.csiro.au/>
- <sup>22</sup> Zlot, R., Bosse, M., 2014. Three-dimensional mobile mapping of caves. In: *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 76(3), pp. 191–206.
- <sup>23</sup> CloudCompare, 2015. EDF R&D, Telecom ParisTech. <http://www.cloudcompare.org/>
- <sup>24</sup> Čepek, A., 2002. “The GNU Gama project-adjustment of geodetic networks”. *Acta Polytechnica*, Vol. 42(3).

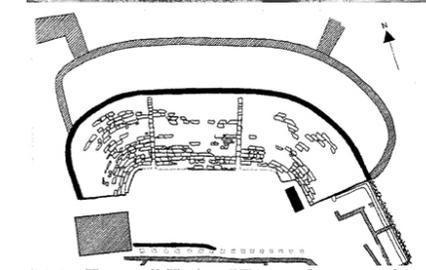
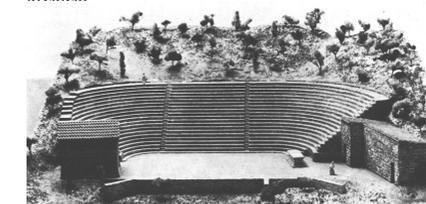
CAPITOLO NONO  
I Teatri del Pausilypon

9.1 I teatro antico: struttura greca e romana.

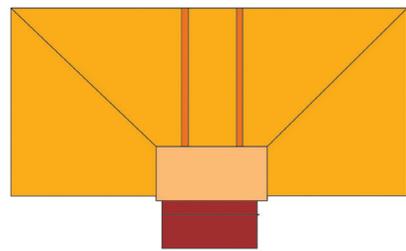
Alle origini del teatro antico, non esisteva un vero e proprio contesto architettonico per le rappresentazioni. Un pendio naturale per accogliere gli spettatori, un piazzale per il coro ed una struttura provvisoria come scena potevano essere sufficienti. Rappresentazioni arcaiche sono testimoniate sull'isola Creta dove, sulle gradinate dei palazzi minoici, venivano messe in scena le *taurokatapsie*, ovvero delle acrobazie rituali sui tori. Le strutture per le assemblee popolari potevano ugualmente accogliere gli spettacoli. Lo sviluppo di forme più compiute della struttura teatrale rappresentano uno dei più significativi momenti di sperimentazione architettonica del mondo greco. “Teatro” (*théatron* in greco) dal verbo *theàomai*, ovvero “vedo”<sup>1</sup>, era letteralmente “il luogo in cui si vede”. Dalla Grecia continentale questa struttura vede ben presto la sua diffusione nelle vastissime colonie elleniche. La continua ricerca della perfezione delle forme si traduce in raffinate sperimentazioni che contribuiscono all'arricchimento dell'arredo urbano delle diverse città colonizzate. Le prime rappresentazioni teatrali, in queste strutture dedicate a Dioniso, si svolgevano esclusivamente in occasione di alcune festività religiose. Gli elementi principali di cui si compone l'edificio teatrale<sup>2</sup> sono essenzialmente tre, con caratteristiche differenti nelle diverse evoluzioni di questa tipologia architettonica: l'orchestra, la cavea e la scena. L'orchestra (da *orcheomai*, “danzo”) era il “luogo delle danze”; la cavea (in greco *Kòilon*), ospitava le gradinate per gli spettatori; la scena (*skéné* ovvero “tenda”), era il fondale delle rappresentazioni.



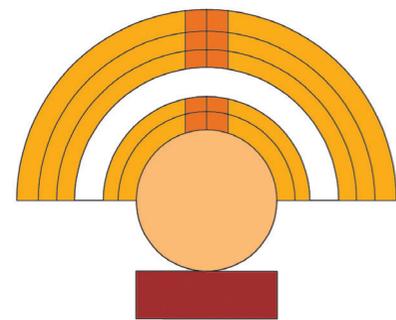
9.1.1 - Frammento di vaso ateniese (VII sec.a.C.) che mostra la disposizione del pubblico durante gli spettacoli, dall'alto verso il basso, già in una fase arcaica.



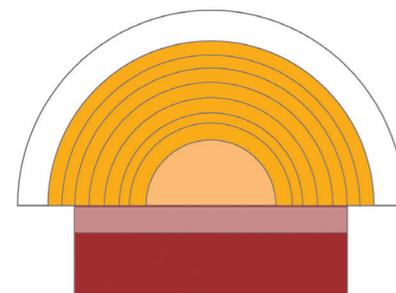
9.1.2 - Teatro di Torico, VI sec.a.C., con orchestra rettangolare adattata alla curva del pendio. Ricostruzione (in alto) e pianta (in basso)



- Orchestra
- Cavea
- Scale
- Scena



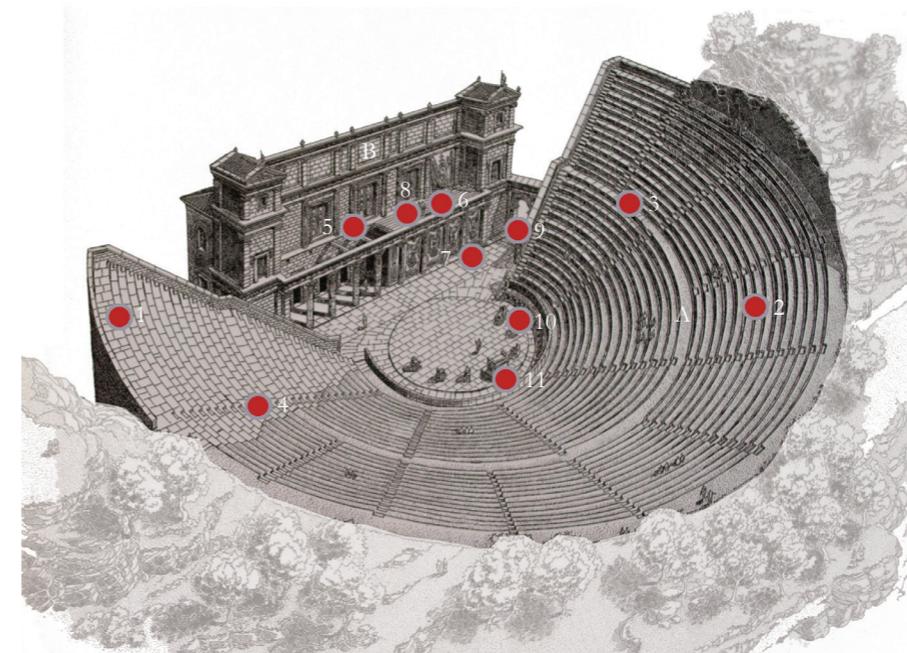
- Orchestra
- Cavea
- Scale
- Corridoio
- Scena



- Orchestra
- Cavea
- Portico
- Proscenium
- Scaenae Frons

9.1.3 - Schematizzazione dell'organizzazione e dell'evoluzione dell'edificio teatrale antico.

**Il teatro greco.** La struttura del teatro greco assume una conformazione sempre più standardizzata a partire dal V-IV sec.a.C. (Fig. 9.1.1). L'elemento che maggiormente evidenzia le differenze dalle strutture più antiche è la forma dell'orchestra. La forma a noi più familiare, quella semicircolare, è infatti frutto di un'evoluzione o di un'intuizione che ha contribuito al miglioramento sostanziale delle qualità visive ed acustiche di questi edifici. Testimonianze di forme più arcaiche mostrano, invece, soluzioni diverse: il teatro di Torico in Attica (VI sec.a.C.), ad esempio, presenta un'orchestra di forma trapezoidale adattata alla curva del pendio (Fig. 9.1.2), quello di Trachones vicino Atene (V sec.a.C.) una più regolare forma rettangolare. A partire dal IV sec.a.C. la forma prevalente dell'orchestra diventa quindi quella semicircolare con un diametro medio di 20 metri. Alcune variazioni (ad esempio, il teatro di Epidauro) presentano una forma pienamente circolare (Fig. 9.1.3). Il rivestimento dell'orchestra con lastre di marmo appartiene ad esempi più evoluti, considerando che i primi esempi sono in terra battuta. In costruzioni più tarde (Fig. 9.1.4), è possibile ritrovare al centro dell'orchestra un piccolo altare circolare (*thymele*), dedicato a Dioniso. In alcuni casi (ad esempio Eretria, Segesta e Siracusa) sotto l'orchestra sono stati ritrovati dei deambulatori e le cosiddette "scale di Caronte", utili per le apparizioni improvvise di defunti e fantasmi. Ai lati dell'orchestra, invece, comunemente erano situati gli accessi per gli spettatori (*parodoi*) e per il Coro. Per la costruzione della cavea, soprattutto nelle forme più antiche, veniva sfruttato un pendio naturale (anche se si ritrovano alcune eccezioni di costruzioni su terrapieni artificiali o muraglioni, come ad Eretria e Dion in Macedonia o a Dodoma). La cavea era divisa in settori o "cunei" da scalette ("*klimakes*") ed interrotta orizzontalmente da alcuni corridoi ("*diazoma*"), mentre i sedili erano inizialmente in legno ("*ikria*"). Con l'introduzione della pianta circolare, questa soluzione divenne insufficiente. La cavea cominciò quindi ad essere scavata o intagliata nella roccia, aggiungendovi ai lati delle strutture di sostegno realizzate con il materiale di riporto. Per quanto riguarda invece la scena, si può supporre che nelle forme più antiche questa fosse una struttura assolutamente provvisoria e principalmente in legno o addirittura in taluni casi assente. Nell'evoluzione che l'intero organismo architettonico subisce, in conformità con le nuove esigenze drammaturgiche, la struttura della scena comincia a divenire anch'essa sempre più complessa. Ricostruire con certezza l'aspetto e l'evoluzione della "*skene*" è tutt'altro che semplice, soprattutto per l'esiguità delle testimonianze materiali pervenuteci. Dalle poche fonti storiche si può comunque ipotizzare che la sua struttura nel V sec.a.C. doveva apparire non particolarmente complessa, anche se non è chiaro se si trattasse già di un edificio su pianta rettangolare o ancora di una



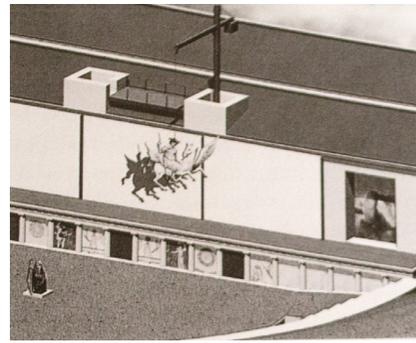
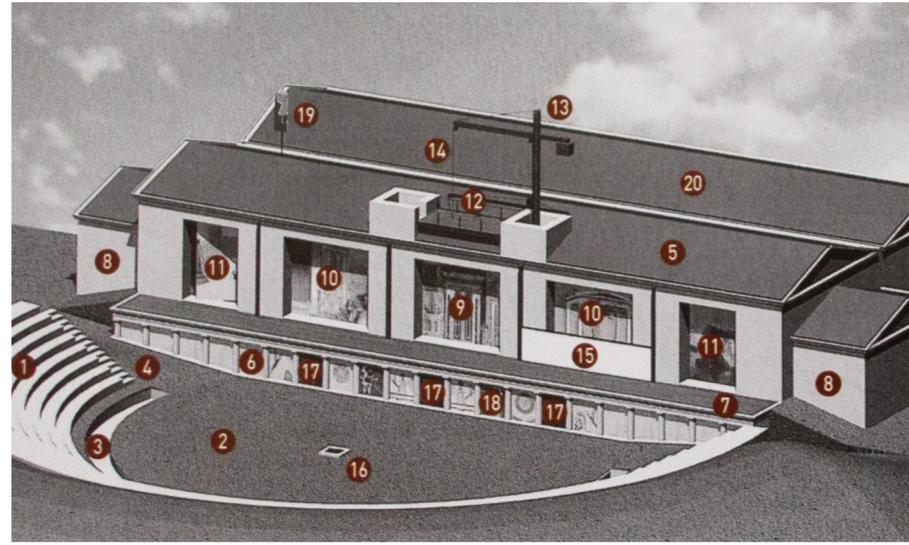
9.1.4 - Il teatro greco: struttura ed organizzazione.

- A. Koilon (cavea)
- 1. Analemma
- 2. Kerkides
- 3. Diazoma
- 4. Klimakes
- B. Scena
- 5. Skené
- 6. Proskenion
- 7. Pinakes
- 8. Thyromata
- C. Orchestra
- 9. Parodoi
- 10. Proedria
- 11. Altare di Dioniso (thymele).

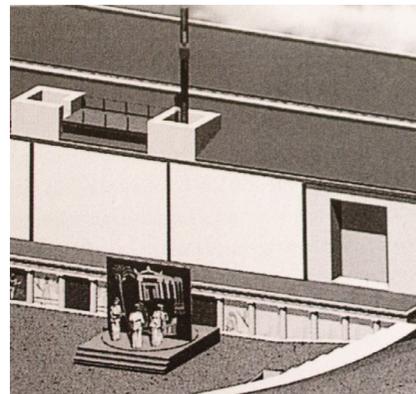
semplice struttura ad intelaiatura lignea. All'occorrenza potevano essere sostituite le tavole di legno mobili dipinte ("*pinakes*") per i cambi di scena. La rappresentazione avveniva in questo caso su un "*logheion*" ("luogo in cui si pronuncia il discorso") ovvero un palcoscenico basso, in modo da consentire una maggiore interazione tra l'attore ed il coro. Sulla fase successiva, tardo-classica e proto-ellenistica (Figg. 9.1.5, 9.1.6, 9.1.7), i dati archeologici aiutano a comprendere l'evoluzione di quest'organismo, che si lega comunque sempre ai cambiamenti ed alle nuove esigenze sceniche introdotte dalla "Commedia di Mezzo" e dalla "Commedia Nuova"<sup>3</sup>. In questo caso, infatti, la riduzione di importanza del ruolo del Coro, ridotto ad intrattenimento durante gli intermezzi, favorirà lo sviluppo di due nuove tipologie di scena: quella "a parasceni" e quella "con proscenio". Nel primo caso, alla lunga sala centrale si affiancheranno due vani laterali sporgenti, detti "parasceni". La seconda tipologia presentava invece una sala allungata e dinanzi un avancorpo, il "proscenio" ovvero un palcoscenico rialzato. Il "proscenio" era in genere un portico in ordine dorico o ionico, con pilastri e semicolonne. Tra i pilastri, dove non erano presenti le porte, erano posizionate le tavole di legno mobili dipinte ("*pinakes*"). Con il tempo verranno introdotte anche quinte girevoli ("*periaktoi*"), che consentivano un immediato cambio di scena. Queste macchine sceniche erano poste all'interno delle porte laterali e ruotavano intorno ad un asse bloccato da grossi blocchi di pietra. Una struttura talvolta presente è il "*theologeion*", una piattaforma che sovrastava la scena raggiungibile tramite scale interne

9.1.5 - Teatro Ellenistico

1. Cavea
2. Orchestra
3. Canale di scolo
4. Parodo
5. Edificio scenico
6. Proscenio
7. Palcoscenico
8. Parascenio
9. Porta regia
10. Porte laterali
11. Periaktoi
12. Theologeion
13. Mechané, gru
14. Imbracatura
15. Sipario
16. Scale di Caronte
17. Porta del proscenio
18. Quadri (pinakes)
19. Keraunoskopeion
20. Portico



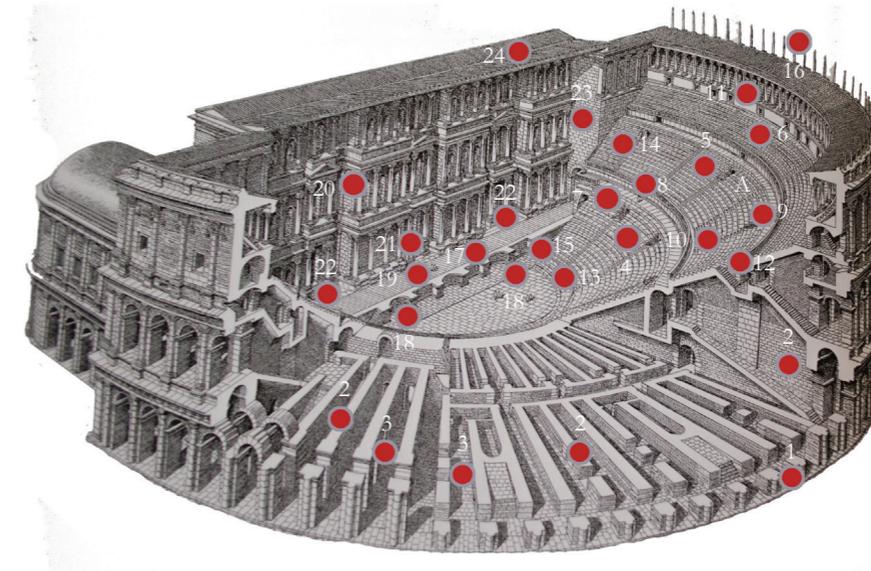
9.1.6 - Ricostruzione del funzionamento della “*machina*” (gru) e dell’apparizione di personaggi attraverso le “Scale di Caronte”.



9.1.7 - Ricostruzione dell’“*encicema*”, uno dei meccanismi girevoli per il rapido cambio di scena.

e dalla quale nelle rappresentazioni parlavano gli dèi. La messa in scena del celebre “*deus ex machina*” era reso possibile grazie a una gru, il “*geranos*” o genericamente “*machina*”, che permetteva di sorreggere non solo gli attori ma anche dei carri con più persone. Questa struttura era probabilmente composta da un asse verticale ruotante ed un braccio mobile, messo in movimento da cavi a cui erano fissati dei ganci. Altre macchine sceniche potevano consentire di riprodurre tuoni e fulmini. Il “*bronteion*” riproduceva il tuono attraverso l’utilizzo di un tamburo con della pelle tesa oppure un vaso di bronzo contenente sfere di piombo. I fulmini venivano riprodotti con il “*keraunoskopeion*”, uno specchio metallico girevole. Il “*proscenio*” poteva avere diverse configurazioni e gradi di complessità. Poteva infatti estendersi ai lati della scena ed essere collegato da varie porte che arricchivano la rappresentazione scenica o avere addirittura delle rampe di accesso che consentivano l’ingresso in scena passando sotto gli spettatori. L’aspetto del fondale poteva essenzialmente essere di tre tipologie. La prima, più semplice, prevedeva la presenza di tre porte. Generalmente, nella rappresentazione, da quella di destra entravano i personaggi provenienti dalla città, dall’agorà o dal porto, mentre da quella di sinistra chi proveniva dalla campagna. La seconda tipologia di facciata prevedeva la presenza di ampie aperture (“*thyromata*”) ed era una delle più diffuse. La presenza, in questo caso, di strutture puntuali come pilastri (invece che un muro continuo tagliato dalle porte) consentiva maggiore flessibilità nell’organizzazione e nei cambi delle scene, oltre a consentire la rappresentazione di ambienti interni. L’ultima tipologia prevedeva una decorazione architettonica maggiormente complessa, che anticipa la “*scaenae frons*” di tipo romano.

9.1.8 - Il teatro romano: struttura ed organizzazione.

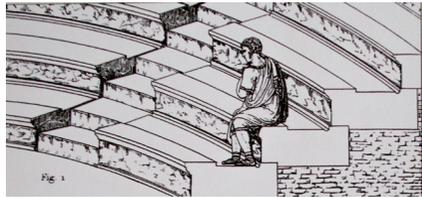


- A. Cavea
1. Ambulacro
  2. Sostruzioni
  3. Fornici
  4. Ima cavea
  5. Media cavea
  6. Summa cavea
  7. Precinzioni
  8. Balteo
  9. Cunei
  10. Scalaria
  11. Porticus in summa cavea
  12. Vomitori
  13. Proedria
  14. Tribunalia
  15. Parodoi
  16. Sostegni del velarium

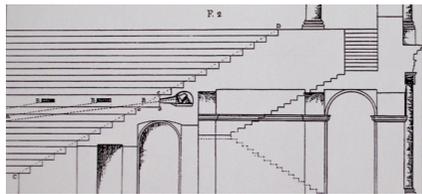
- B. Scena
17. Pulpito
  18. Frons pulpiti
  19. Aulaeum
  20. Scaenae frons
  21. Porta regia
  22. Portae hospitales
  23. Aulae
  24. Postscenium

**Il teatro romano.** La costruzione del primo edificio teatrale stabile a Roma, e non una struttura lignea provvisoria, richiese tempi piuttosto lunghi. Alcuni precedenti sono attestati in Campania con i teatri di Pompei, Sarno, Pietrabbondante e Teano. La più grande innovazione di questo nuovo edificio architettonico, testimoniato in questi esempi, riguarda due particolari elementi: l’eliminazione della separazione tra cavea e struttura scenica; la costruzione dell’intera struttura su sostruzioni a volta. In particolare, nel caso di Teano è riconosciuta la prima costruzione interamente su sostruzioni, inglobata in un santuario. Nel caso di Pietrabbondante, viene per la prima volta configurata una struttura unitaria per la cavea e la scena. I teatri campani, che segnano la nascita di una nuova tipologia architettonica, dipendono in parte da alcuni esempi precedenti realizzati in Sicilia (ad esempio, il teatro romano di Tindari). Il problema degli accessi, generato proprio dalla pianta unitaria, venne risolto attraverso passaggi voltati coperti.

Questa nuova tipologia edilizia (Fig. 9.1.8) si caratterizza inoltre per i ricchi motividecorativi che caratterizzano l’intero impianto architettonico, oltre che per la complessità nell’articolazione degli spazi<sup>4</sup> collegati attraverso arcate, scalinate e “*vomitoria*” (gli accessi laterali principali destinati agli spettatori). Oltre agli edifici di nuovo impianto, molti sono anche i riadattamenti e le trasformazioni delle strutture ellenistiche e tardo-ellenistiche. Le dimensioni delle cavee aumentano (e di conseguenza la capienza dei teatri), vengono costruiti “*tribunalia*” (palchi d’onore per le persone di alto rango), realizzati portici semianulari che concludono superiormente la cavea e talvolta anche dei “*porticus post scaenam*” (un portico alle spalle dalla *scaenae frons*).

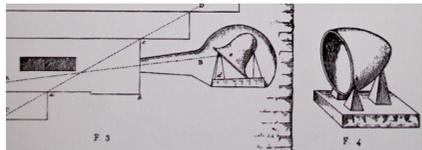


I teatri di epoca imperiale vennero costruiti soprattutto in epoca augustea. Poche sono le testimonianze tra il I sec.d.C. e il II sec.d.C. tra cui ricordiamo quello di Villa Adriana a Tivoli e il teatro di Benevento, mentre l'ultimo costruito in Italia è quello di Ventimiglia (terminato agli inizi del III sec.d.C.). Molti teatri sorsero in epoca augustea anche nelle province romane, dalla Spagna alle Gallie, mentre in Grecia furono soprattutto riadattati i teatri esistenti con la costruzione di *scaenae frons* di tipo romano. I teatri romani erano spesso coperti da cortine, chiamate “*velaria*”<sup>5</sup>, già in uso probabilmente dall'80 a.C.. Le fonti testimoniano ad esempio la presenza di un “*velaria*” di colore blu in lino finissimo, sul cui centro era ritratto il volto di Nerone nel Colosseo.

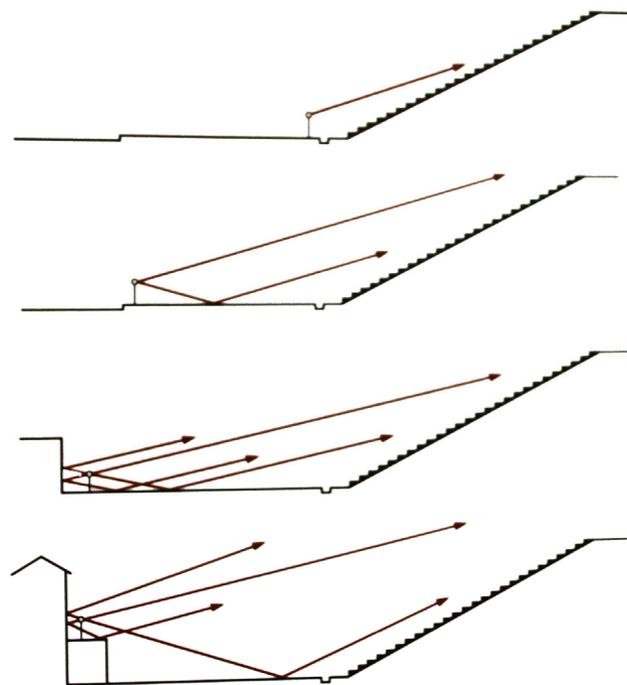


## 9.2 Il teatro romano nel “De Architectura” di Vitruvio.

Nell'opera in dieci libri, scritta probabilmente tra il 23 ed il 27 a.C., l'architetto romano Marco Vitruvio Pollione dedica il quinto libro alla costruzione del teatro romano. Il libro è un vero e proprio manuale, sebbene non illustrato, che affronta nei diversi capitoli i temi della scelta del luogo in cui edificare, dei principi di armonia acustica e dei sistemi di amplificazione (Figg. 9.1.9 e 9.2.1), delle forme e delle proporzioni dell'edificio teatrale e degli apparati scenici. Sulla scelta del luogo, nel terzo capitolo Vitruvio consiglia di costruire



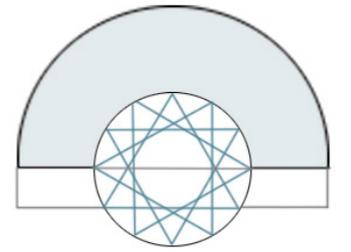
9.1.9 - Schemi per determinare la posizione dei vasi in bronzo per l'amplificazione del suono.



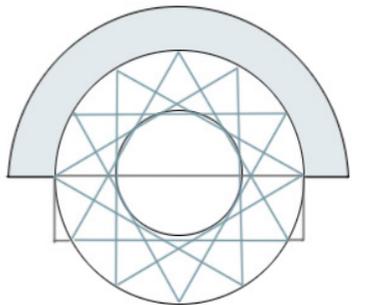
9.2.1 - Schemi di amplificazione del suono naturale attraverso la riflessione sonora.

i teatri in zone salubri e non esposte a mezzogiorno, per proteggere gli spettatori dalla calura eccessiva, e di controllare che il sito abbia una buona acustica che consenta una facile propagazione del suono. Ricordando, infatti, i meccanismi di propagazione del suono in orizzontale ed in verticale, sottolinea l'importanza delle teorie e delle leggi acustiche che avevano portato alla realizzazione della struttura a gradinata nei primi teatri. Il tema dell'acustica è ripreso anche nel quarto e quinto capitolo del libro, in cui consiglia l'utilizzo di vasi di bronzo da posizionare in apposite cellette tra i sedili, rovesciate, rivolte verso la scena e poggiate su una base a forma di cuneo. Questo sistema, diffuso soprattutto in Grecia, poteva essere comunque sostituito da vasi in terracotta od omesso nel caso di sedili in legno (come erano a quel tempo la maggior parte dei teatri in Italia), considerando le proprietà di questo materiale nella propagazione del suono. Il capitolo, ad ogni modo, più interessante e che ha spinto architetti ed umanisti a confrontarsi fin da Rinascimento con la restituzione grafica di queste indicazioni, è il settimo, in cui Vitruvio affronta le norme per l'organizzazione della struttura del teatro. Nello schema proporzionale vitruviano, il cerchio di partenza è l'elemento geometrico principale da cui derivare le dimensioni delle varie parti. Dalla divisione modulare del cerchio, infatti, sono determinati i rapporti tra la scena, il proscenio e l'orchestra. La diversa definizione ed interpretazione della circonferenza<sup>6</sup> può condurre, ovviamente a diverse soluzioni dimensionali, su cui si sono confrontati nel tempo umanisti ed architetti. Vitruvio infatti parla di “*perimetros imi*”, che potrebbe coincidere o meno con l'area dell'orchestra. Vengono riportati gli schemi elaborati tra il Quattrocento ed il Cinquecento, che rimandano a tre schemi fondamentali, in cui il cerchio (“*perimetros imi*”) viene fatto coincidere con la *summa*, la *media* e l'*ima cavea*. Le principali indicazioni di Vitruvio, una volta definita la circonferenza di base, vengono di seguito sintetizzate (Fig. 9.2.2):

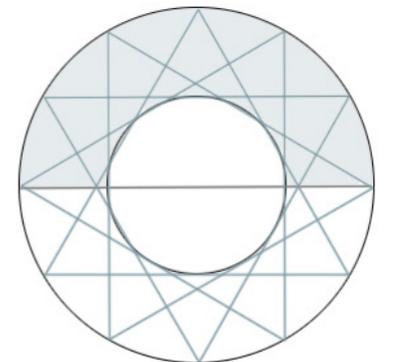
- all'interno della circonferenza vanno inscritti quattro triangoli equilateri<sup>7</sup>;
- di questi triangoli, quello che ha il lato più vicino alla scena definisce la posizione di quest'ultima;
- il palcoscenico ha una lunghezza maggiore rispetto alla tipologia greca, poiché tutti gli attori operano sulla scena;
- i cunei della cavea sono suddivisi da scale di accesso alla prima precinzione in corrispondenza dei vertici dei triangoli inscritti alla circonferenza, mentre nella parte superiore i cunei sono divisi a metà dalle scalinate disposte in senso alterno;
- per quanto riguarda la scena, la direzione del vertice centrale definisce la posizione della *porta regia*, quelli di destra e di sinistra indicano le porte degli *hospitalia*;



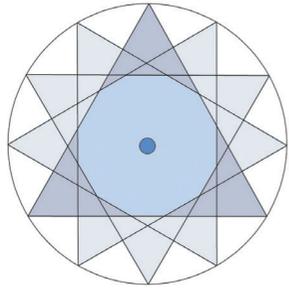
Perimetros imi - Ima cavea



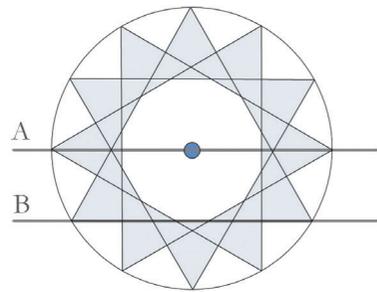
Perimetros imi - Media cavea



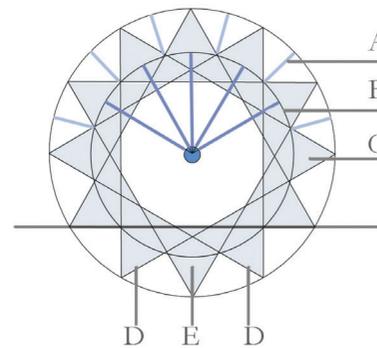
Perimetros imi - Summa cavea



Individuazione dei triangoli da inscrivere nella circonferenza di base.



A. Linea del proscenio  
B. Fronte della scena



A. Scale  
B. Praecinctio  
C. Cunei  
D. Hospitalia  
E. Porta regia

Fig. 9.2.2 - Schemi di organizzazione di un edificio teatrale romano secondo le indicazioni di Vitruvio.

- le gradinate non devono avere un'altezza inferiore ad un piede ed un palmo (circa 37 cm), e non superare il piede e sei pollici (circa 44,36 cm), mentre la loro ampiezza deve essere compresa tra i due piedi e i due piedi e mezzo (circa 59,2 - 74 cm);
- il tetto del portico deve avere la stessa altezza della scena per evitare la dispersione del suono;
- gli ingressi vanno collocati in corrispondenza del primo sesto di diametro della circonferenza, considerato dalla fine delle gradinate e nella parte inferiore del cerchio, da entrambi i lati.

Lo stesso Vitruvio, ad ogni modo, sottolinea che queste proporzioni non possono essere applicate indistintamente in tutti i casi, suggerendo di adattarle in base alla natura del luogo ed alla mole della costruzione. Un ulteriore capitolo del libro è dedicato agli schemi proporzionali adottati per la costruzione dei teatri greci. In questo caso, all'interno della circonferenza sono inscritti quattro quadrati e la linea del proscenio è definita dal lato del quadrato più vicino alla scena. La parallela che interseca la circonferenza in corrispondenza dei vertici inferiori, definisce la posizione dell'edificio scenico. Le scale comprese tra i cunei sono orientate verso gli angoli dei quadrati fino alla prima precinzione. Nel settore superiore, il loro numero va raddoppiato. Il confronto con le prescrizioni vitruviane è, tuttora, un valido supporto per la comprensione delle regole proporzionali e dimensionali che hanno guidato la progettazione e la costruzione di queste strutture. L'incongruità, talvolta riscontrabile, in alcuni resti archeologici (rispetto a questi canoni) è perfettamente giustificabile, considerando che il trattato di epoca augustea non tiene conto dei grandi cambiamenti nella pratica edilizia avviati a partire da questo momento storico. Proprio in questo nuovo periodo di sperimentazione architettonica e di ricerca di nuove soluzioni si collocano i teatri del Paesilypon, rari esempi di strutture teatrali in ville private e, per questo, solo in parte rispondenti ai canoni classici.

### 9.3 I teatri del Paesilypon.

Il numero così elevato di architetture pubbliche come i teatri romani, rintracciabili in quasi tutte le città conquistate, mostra oggi l'estensione e la forza di questo Impero. Molto più rari sono invece i ritrovamenti di queste strutture all'interno di ville private. Come già anticipato, tra le strutture di cui permangono tracce della Villa del Paesilypon, i teatri sono sicuramente tra le architetture meglio conservate e più rappresentative. Parliamo, in particolare, di un Teatro e di un Odeon. Il Teatro ha una diametro di circa

47 metri per un'altezza di 13 metri. La capienza stimata di questa struttura è di circa 2000 spettatori. Esempi di architetture private simili, appartenenti a ville imperiali, sono i teatri della residenza di Domiziano a Castel Gandolfo (Fig. 9.2.3) ed il teatro greco di Villa Adriana a Tivoli (Fig. 9.2.4). Il Teatro (Figg. 9.2.5, 9.2.6 e 9.2.7) venne costruito sfruttando la naturale pendenza della collina, utilizzando, dunque, una tecnica tipica delle costruzioni greche. L'orientamento nord-sud di questa struttura permetteva di avere una cavea aperta sulla straordinaria baia di Trentaremi. L'ima cavea ha oggi dodici ordini di sedili (circa 70 centimetri di profondità e 45 centimetri di altezza). Quattro scale dividono l'ima cavea in quattro settori o "cunei", che terminano in corrispondenza di un ripiano chiamato "praecinctio" di circa 120 centimetri. Da questo ripiano, ed attraverso sette doppie scale, era possibile accedere alla media cavea. Anche la media cavea, con sei ordini di sedili, è attraversata da scale che la dividono in sette settori. Le strutture superiori sono oggi perdute, ma con molta probabilità il Teatro terminava con una galleria porticata. A questa galleria era possibile accedere dalle scale laterali, ma forse anche dalla parte posteriore della galleria. Le scale laterali, parzialmente conservate, potevano probabilmente consentire l'accesso anche al primo ripiano. I sedili hanno uguale dimensione e decorazione, denunciando una sostanziale uguaglianza di tutti gli invitati di fronte all'imperatore. All'imperatore stesso non era destinato un "pulvinar", ovvero un palco imperiale, ma probabilmente il princeps occupava uno dei due "tribunalia" che dovevano trovarsi in prossimità dell'ottava gradinata. Sotto i tribunalia sono visibili i resti di due ambienti coperti con volta a botte. Questi ambienti dovevano essere riccamente affrescati (con dipinti in III stile) come parzialmente visibile oggi dai resti della stanza ad est. La funzione di questi spazi è incerta, ma potrebbero essere serviti come camerini



Fig. 9.2.3 - Teatro nella residenza di Domiziano a Castel Gandolfo.



Fig. 9.2.4 - Il teatro greco della Villa Adriana a Tivoli.

Fig. 9.2.5 - L'area dei teatri sul terrazzamento superiore della Villa del Paesilypon.





Fig. 9.2.6 - Il Teatro dalla Porticus.



Fig. 9.2.7 - Una cavea del Teatro dalla prima precisazione.



Fig. 9.2.8 - Ambiente voltato sotto il tribunalia.



Fig. 9.2.9 - Ambiente rettangolare che interrompe l'orchestra.

per gli attori (Fig. 9.2.8). Dall'orchestra ed in direzione dell'Odeon (Fig. 9.2.9), è stato da pochi anni completamente scavato un ambiente (26,35 x 3,80 metri). La funzione è ancora una volta incerta. Si è ritenuto fino ad oggi che si possa trattare di una "kolymbetra", ovvero una piscina per lo svolgimento di giochi e spettacoli acquatici. Un'altra ipotesi è che si tratti di una antica cassa di risonanza. Quest'ambiente in opera reticolata ha sul fondo quaranta fori rettangolari, disposti su due file, in cui erano probabilmente posizionati altrettanti pilastri che sorreggevano un piano. L'ipotesi della vasca sembra essere avvalorata dal ritrovamento di una canaletta per l'adduzione dell'acqua, visibile sul lato meridionale. Alle spalle dell'orchestra (sulla linea del proscenio mancante), sono stati ritrovati alcuni ambienti sotterranei e sei pozzetti (profondi circa sei metri), che probabilmente ospitavano i macchinari per sollevare pennoni e pali lignei ed a cui veniva ancorato il *velarium*. La presenza di questa copertura sembra essere confermata dal ritrovamento nell'Ottocento di alcune mensole in pietra che appartenevano alla struttura. In base al ritrovamento di un frammento di ceramica inglobata nella muratura, è stato possibile datare la vasca e l'intero teatro all'età tiberiana e flavia (od almeno gli ultimi interventi effettuati).

A sud del Teatro, ad una distanza di circa 45 metri, sono visibili i resti di altre strutture, inclinate rispetto alla direzione perpendicolare al Teatro di circa 15°. La struttura principale è un Odeon, ovvero un *theatrum tectum*. L'Odeon (Fig. 9.3.1), di dimensioni inferiori e destinata a spettacoli di poesia, retorica e musica, presenta la cavea rivolta verso il Teatro, composta da quattro gradinate intere e due interrotte nella parte centrale (Fig. 9.3.2), dove si apre un ambiente absidato. Da qui, altri tre ordini di gradinate (più piccole e poste all'estremità dell'emiciclo) concludono le sedute. L'ambiente absidato, identificato come un *pulvinar*, ovvero un palco imperiale da cui il *princeps* poteva assistere agli spettacoli, reca sul fondo i resti di un podio su cui doveva essere collocata una statua. L'intera struttura era completamente rivestita di marmi policromi, come testimoniato dai frammenti ritrovati e dai resoconti a partire dall'Ottocento, mentre gli ambienti secondari o di passaggio erano intonacati. La parte antistante il palcoscenico in *opus latericium*, ha davanti tre nicchie semicircolari e due rettangolari (Fig. 9.3.3). Ai lati, due piccoli ambienti, venivano probabilmente utilizzati come camerini. La parte centrale della scena, frutto (come il porticato) di un intervento successivo, è un emiciclo, in cui dovevano essere alloggiate colonne in marmo cipollino (come testimoniato ad inizio Novecento da R.T. Günther). Il corridoio che separa la cavea dalla scena conduce alle estremità a delle scale, che consentono di raggiungere le gradinate più alte. Sotto queste scale,

sono visibili i resti di due vani in *opus reticulatum* dalla forma trapezoidale. La scena dell'Odeon era nascosta da una lunga *porticus triplex*, con colonne scanalate in laterizio intonacate. La *porticus* (Fig. 9.3.4), lunga oggi nella parte visibile più di 70 metri, aveva anche la funzione di fondale scenografico per il Teatro, a cui era probabilmente collegata attraverso un sistema di giardini che dava continuità a tutte le strutture del complesso. Un grande salone di rappresentanza è un ambiente suggestivo ad est dell'Odeon, dove restano le tracce di una raffinata pavimentazione e zoccolatura in marmo. Altri ambienti, corridoi e rampe sono oggi parzialmente visibili su questo terrazzamento. Quelli nella parte occidentale dell'Odeon sono in parte crollati nella sottostante cala di Trentaremi. Ulteriori rampe conducono a terrazzamenti e ambienti sopraelevati, anch'essi in parte crollati e dalla difficile riconfigurazione. Ad est dell'Odeon, un ulteriore porticato a due ali, in opera reticolata e con pavimentazione in *opus sectile*, nasconde un ulteriore rampa che doveva consentire all'imperatore di accedere direttamente dal palco imperiale alla zona residenziale.

#### 9.4 Il rilievo dell'area dei teatri: metodologie, acquisizione e processamento dei dati.

L'avvento del digitale ha incrementato in maniera significativa le informazioni ottenibili da un prodotto di rilievo. Nel campo dei Beni Culturali, in particolare, sono stati proposti per questi dati molteplici utilizzi: dalla realizzazione di più efficienti forme di catalogazione digitale, alla simulazione di interventi strutturali e di manutenzione, fino al restauro virtuale dei manufatti ed interventi di valorizzazione e promozione del patrimonio. Le possibilità offerte da questi prodotti digitali in termini di comunicazione e di informazione sono il frutto dei progressi della Computer Grafica e dello sviluppo delle nuove tecnologie finalizzate al rilievo ed alla rappresentazione. Per un prodotto compatibile con la principale finalità di documentazione, la necessità di accoppiare dati metricamente sempre più accurati ad una resa realistica dell'oggetto (tessitura e colore) ha incentivato l'integrazione tra dati provenienti da tecnologie diverse. L'integrazione, in particolare, tra dati da scansioni laser tridimensionali e da fotogrammetria digitale, garantisce il controllo e l'affidabilità della misura oltre all'arricchimento del dato colorimetrico ed è particolarmente indicata nel caso di strutture archeologiche all'aperto<sup>8</sup>. Le strutture descritte (Par. 9.3), che occupano la parte del terrazzamento superiore dell'antica villa oggi visibile, si estendono su un'area di circa un ettaro. L'area dei teatri è oggi raggiungibile percorrendo la Grotta di Seiano



Fig. 9.3.1 - L'Odeon dalla Porticus. Di fronte alla scena, è visibile il pulvinar.

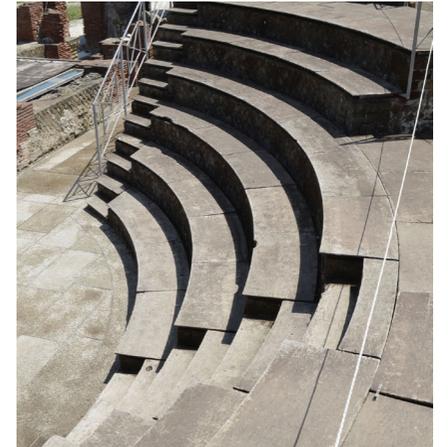


Fig. 9.3.2 - La cavea dell'Odeon.

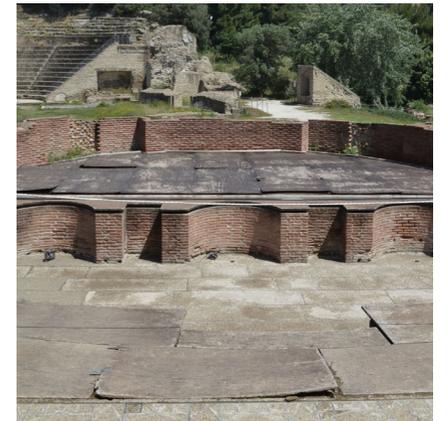


Fig. 9.3.3 - Il palcoscenico dell'Odeon.



Fig. 9.3.4 - Resti del colonnato della Porticus.

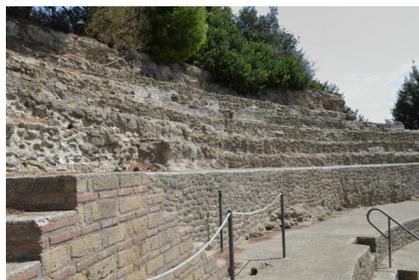


Fig. 9.3.5 - Primo praecinctio con doppie scale.



Fig. 9.3.6 - Scale ad est del Teatro.



Fig. 9.3.7 - Scale ad ovest dell'Odeon che conducono alle gradinate superiori.

da Coroglio ed attraversando una stradina ricavata tra alcune proprietà private. L'aspetto attuale delle strutture visibili è principalmente il frutto di un intenso intervento di restauro terminato alla fine del secolo scorso, che ha permesso la riapertura del sito ai visitatori, la ri-funzionalizzazione ed il riutilizzo del Teatro per lo svolgimento di spettacoli. L'intervento ha interessato, oltre al Teatro, il recupero (e parziale rifacimento) delle strutture che occupano la parte meridionale dell'area, ovvero gli ambienti del complesso dell'Odeon, della *porticus* e del secondo portico ad L sul lato orientale. Il grande edificio ottocentesco che ha inglobato parte delle strutture del Teatro, la cosiddetta "Casa Rossa", domina ancora oggi la parte occidentale di quest'area, nonostante il parziale crollo del costone tufaceo nella sottostante baia e la conseguente perdita di alcuni ambienti. Il crollo ha interessato, inoltre, alcune stanze ad ovest del complesso dell'Odeon, utilizzate in passato come camere di rappresentanza o di servizio. Ad est dell'area sono stati, invece, riportati alla luce i resti della del piano di copertura di un'altra struttura, il cosiddetto "Tempio o Sacrum", da cui probabilmente si accedeva alla piazza, ma che non è oggetto di questo studio. Il lavoro è, invece, concentrato sull'acquisizione e restituzione delle due architetture teatrali e degli ambienti che occupano il fronte meridionale. L'obiettivo è quello di ottenere un prodotto tridimensionale coerente con la finalità di documentazione, analisi e rappresentazione di queste strutture. L'utilizzo e l'integrazione delle due diverse tecniche di rilievo *reality-based* per la generazione di un modello digitale di queste strutture deriva da specifiche considerazioni sull'organizzazione, morfologia, geometria, dimensione e caratteristiche cromatiche di questi organismi architettonici.

#### 9.4.1 Rilievo laser-scanning terrestre: acquisizione e processamento dei dati.

La diversa articolazione spaziale delle strutture che occupano il fronte settentrionale e quello meridionale di quest'estesa area ha richiesto, per la prima campagna di rilevamento, la scelta di una tecnologia in grado di acquisire informazioni su distanze variabili, restituendo una visione d'insieme dell'area, ma anche i singoli manufatti. Le strutture a nord sono dominate dalle gradinate dall'*ima* e della *media cavea* del Teatro. In questo caso, l'assenza di elementi di occlusione e spazi piuttosto ampi non impongono particolari vincoli di acquisizione. Di dimensioni inferiori gli unici resti degli altri ambienti che compongono questo organismo architettonico (Figg. 9.3.5 e 9.3.6): la scala di collegamento con il primo praecinctio (larga circa 1.40 m.) e la piccola stanza con volta a botte ad est

e due stanze absidate che interrompono le pareti dell'emiciclo sui due lati. Sul fronte meridionale, l'articolazione degli ambienti è più complessa (Figg. 9.3.7 a 9.4.1): elementi di collegamento verticale che permettono di raggiungere a diverse quote le gradinate dell'Odeon, corridoi non molto ampi, ambienti di passaggio, saloni di rappresentanza, i resti del colonnato della *porticus* e il sistema di rampe che conduce alla terrazza superiore. La presenza di un numero maggiore di elementi e spazi non molto ampi ha chiaramente richiesto l'utilizzo di una strumentazione in grado di acquisire informazioni tridimensionali anche a distanze inferiori. Sulla base di queste considerazioni, per la prima campagna di acquisizione è stato impiegato un sensore *range-based*, uno scanner laser a modulazione di fase (Par. 5.1.2) Faro Focus 3D Cam2 (Tabella 9.1).

FARO FOCUS 3D S120

Type	Phase Shift
<u>Wavelength</u>	905 nm
Beam divergence	0.16 mrad
Ranging error	± 2 mm @ 10 m and @25 m
Ranging noise	0.6 mm @ 10 m
	0.95 @ 25 m

Tab. 9.1: Faro Focus 3D S120

Per la misurazione di distanza dei punti di una superficie, un laser ad infrarossi, viene emesso e dunque riflesso di ritorno al dispositivo. La distanza, misurata con una precisione millimetrica, viene calcolata analizzando lo sfasamento del segnale modulato tra il raggio di un'onda sinusoidale inviato e quello di ritorno. La differenza tra i due picchi costituisce la "differenza di fase", ovvero lo sfasamento, ottenuto come il prodotto tra  $2\pi$ , il tempo di volo e la frequenza di modulazione. Il sensore ha un campo visivo di  $360^\circ$  sull'asse orizzontale e di  $305^\circ$  su quello verticale (considerando lo spazio di occlusione del cavalletto). Uno specchio dirige il raggio laser in direzione verticale sull'oggetto, codificando contemporaneamente l'angolo e la misurazione della distanza, mentre lo strumento ruota intorno all'asse verticale. La strumentazione acquisisce informazioni di distanza in un *range* che varia dai 0,6 ai 120 metri, oltre che i valori di riflettanza dei punti acquisiti, con un'accuratezza di  $\pm 2$  mm a 25 metri ed una risoluzione angolare di  $0.009^\circ$ . Questa strumentazione ha dimensioni e peso molto contenuti (5 kg e questo agevola e velocizza le operazioni sul campo) ed è in grado di registrare quasi un milione di punti di misurazione al secondo (fino a 976.000 punti/



Fig. 9.3.8 - Uno dei due ambienti di servizio che conducono al pulvinar.



Fig. 9.3.9 - Uno degli ambienti di collegamento tra l'Odeon e la porticus.

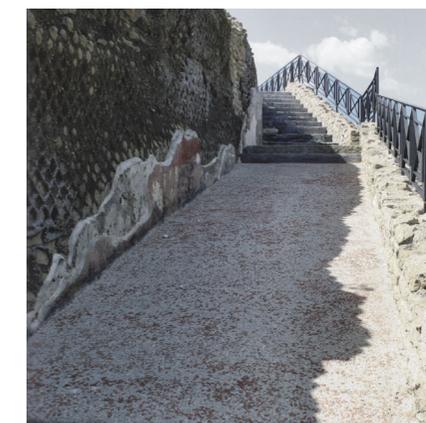


Fig. 9.4.1 - Rampe e scale di collegamento tra l'Odeon e le terrazze panoramiche superiori.

secondo). La distanza, l'angolo verticale e quello orizzontale generano una coordinata polare ( $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ), convertita poi in una coordinata cartesiana ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Il valore di riflettanza varia a seconda della natura del materiale e rappresenta la capacità di un oggetto di riflettere il raggio laser. La riflettanza di una superficie acquisita è espressa da un numero codificato che varia in un determinato *range*. Al valore più basso corrisponde una riflettanza nulla (ovvero il corpo assorbe completamente il raggio senza rifletterlo), mentre a quello più alto è associata la riflettanza massima. La camera digitale integrata, coassiale rispetto al raggio laser, permette inoltre la restituzione dell'informazione radiometrica dei punti grazie alle immagini acquisite. L'intera area dei teatri e le strutture descritte sono state rilevate attraverso l'acquisizione di ventinove scansioni (ad una distanza massima tra le *range maps* acquisite di 20 metri), scegliendo una risoluzione media di 6 mm ad una distanza di 10 metri (Fig. 9.4.2). In modo da semplificare la successiva fase di allineamento tra le singole *range maps*, una serie di targets piani e sferici sono stati posizionati in diversi punti dell'area ed inquadrati durante le riprese. La posizione di questi targets è stata pianificata in modo da garantire la loro visibilità da diverse postazioni ed in punti particolarmente critici per l'allineamento delle scansioni. Le ventinove *range maps*, pianificate per acquisire informazioni tridimensionali sulle strutture del Teatro, dell'Odeon, dei porticati e delle rampe per il terrazzamento superiore, sono state allineate con il software proprietario Faro Scene. Questo software consente il riconoscimento automatico dei targets da allineare, attraverso procedure di *best-fitting* delle primitive geometriche degli elementi considerati (sfere, piani, ...). Una volta riconosciuti almeno tre targets (che devono essere ben distribuiti sulla scena da acquisire, non allineati e non complanari) presenti nell'area di sovrapposizione tra le scansioni, vengono identificati dal software le posizioni tridimensionali degli elementi da allineare, utilizzate per assegnare l'iniziale rotazione e traslazione alle scansioni rispetto al sistema di riferimento scelto. In genere, i targets posti ad una distanza superiore ai 25 metri, vengono esclusi dalla procedura di allineamento, non potendo fornire un'informazione accurata di posizione (ad esempio, il centro della sfera). Questa procedura automatica ha richiesto un'integrazione per la riduzione di evidenti errori di allineamento, attraverso l'individuazione manuale di ulteriori punti omologhi (punti naturali, piani e targets non riconosciuti automaticamente). La nuvola finale, registrata in Faro Scene, è risultata di circa 370 milioni di punti (Fig. 9.4.3).

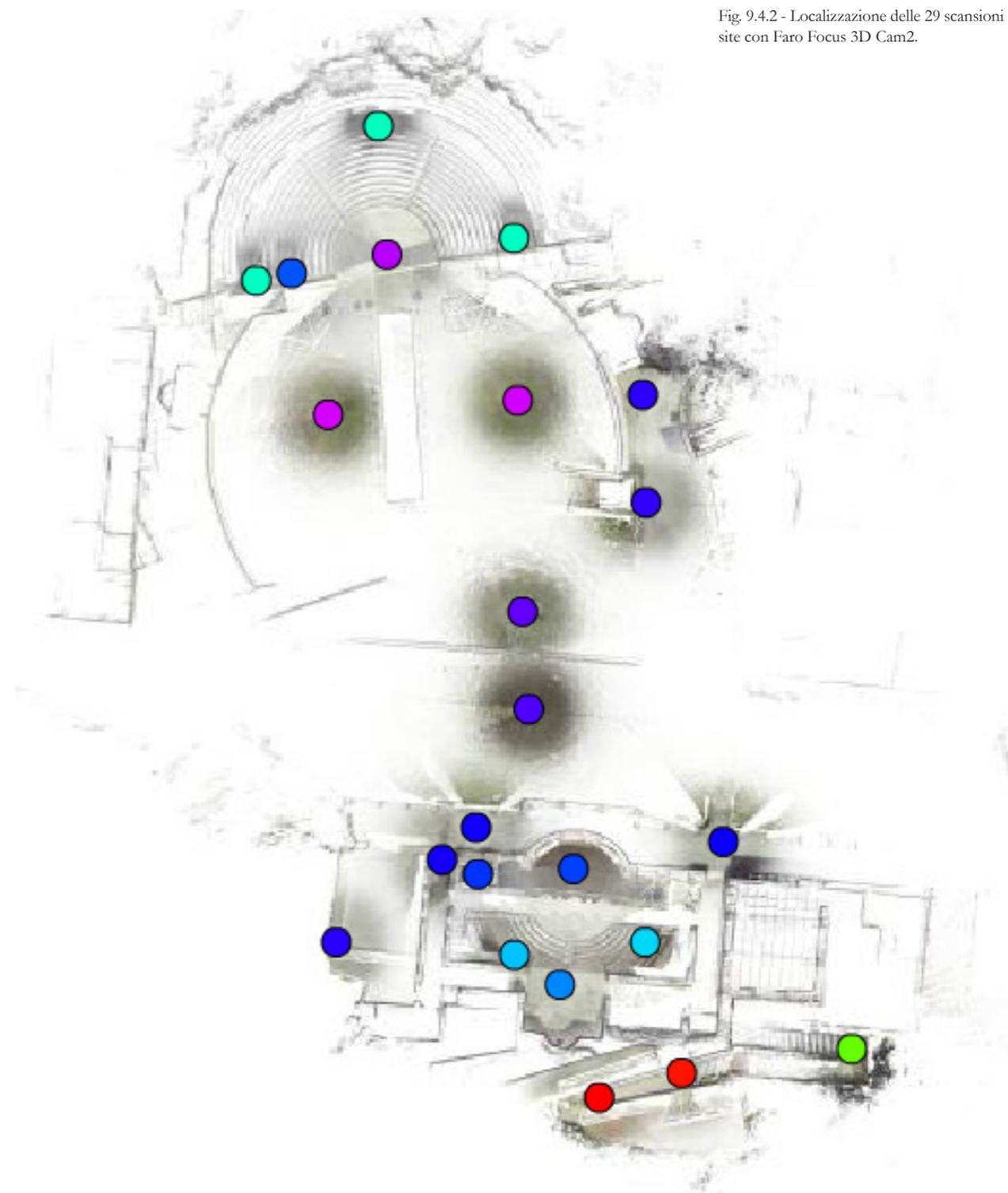


Fig. 9.4.2 - Localizzazione delle 29 scansioni acquisite con Faro Focus 3D Cam2.



Fig. 9.4.3 - Nuvola di punti finale: circa 370 milioni di punti.



Dimensione del sensore (mm)	23.6 x 15.6
Risoluzione del sensore	16.2 Mpixel
Pixel size (µm)	4.78
Obiettivo	Zoom-Nikkor lens 18-55
Focale nominale (mm)	24
GSD (mm)	4
Distanza di presa media (m)	25
Numero di immagini totali	757

Tab. 9.2: Nikon D7000

Dimensione del sensore (mm)	22.3 x 14.9
Risoluzione del sensore	18 Mpixel
Pixel size (µm)	4.3
Obiettivo	Zoom-Nikkor lens 18-35
Focale nominale (mm)	24
GSD (mm)	4
Distanza di presa media - colonnato (m)	2
Numero di immagini totali	303

Tab. 9.3: Canon EOS 1300D

### 9.4.2 Rilievo fotogrammetrico terrestre: acquisizione e processamento dei dati.

L'utilizzo e l'integrazione di due diverse tecniche di rilievo *reality-based* e tipologie di sensori per la generazione di un modello digitale di queste strutture deriva da specifiche considerazioni sull'organizzazione, morfologia, geometria, dimensione e caratteristiche cromatiche di questi organismi architettonici. L'obiettivo è quello di ottenere un prodotto tridimensionale coerente con la finalità di documentazione, analisi, rappresentazione e visualizzazione di queste strutture. Nel settore dei Beni Culturali, l'integrazione tra le tecniche di rilievo *reality-based*<sup>9</sup> è una pratica sempre più diffusa, considerando la necessità di accoppiare all'accuratezza del dato metrico una rappresentazione colorimetrica in grado di esprimere le qualità dell'oggetto. Il dato tridimensionale ottenuto con il sensore *range-based* e che ha restituito una rappresentazione complessiva dell'area dei teatri e delle sue strutture principali, è stato dunque integrato con modelli digitali realizzati con tecniche *image-based* basate su algoritmi fotogrammetrici (Cap.4). I modelli digitali fotogrammetrici hanno così permesso di ottenere un miglioramento delle informazioni colorimetriche per la texturizzazione del modello finale e di integrare dati mancanti nel modello precedente. Scelto un GSD<sup>10</sup> (*Ground Sample Distance*) medio di 4 mm, tre diverse camere digitali (Nikon D7000, Canon EOS 1300D, Nikon D40) settate a 24 mm, sono stati acquisiti quattro datasets per le diverse strutture (Tab. 9.2, 9.3, 9.4):

- 137 immagini per il Teatro e le pareti dell'emiciclo (Nikon D7000);
- 620 per l'Odeon e per l'acquisizione dell'intero fronte meridionale (Nikon D7000);
- 303 per il colonnato della *porticus* e gli ambienti ad ovest dell'Odeon (Canon EOS 1300D);
- 507 per gli ambienti ad est dell'Odeon.

Rispettando una sovrapposizione media tra le immagini acquisite per i diversi *datasets* di circa il 70%, sono state adottate tecniche miste di ripresa (Par. 4.2). Condizioni di illuminazione fortemente variabili durante le acquisizioni, con conseguenti zone d'ombra e aree sovraesposte nelle immagini, hanno richiesto una fase di pre-processamento e di correzione radiometrica. Per la procedura di orientamento, sono state utilizzate le sole immagini con parametri di qualità più elevata, stimati in base alla qualità di messa a fuoco delle immagini. Elementi di vario tipo (ringhiere metalliche, piccoli pali, ...) sono stati esclusi dal processo ricostruttivo attraverso l'applicazione di "maschere" alle immagini. Le immagini

<b>Nikon D40</b>	
Dimensione del sensore (mm)	23.7 x 15.5
Risoluzione del sensore	6.1 Mpixel
Pixel size (µm)	7.9
Obiettivo	Zoom-Nikkor lens 18-35
Focale nominale (mm)	24
GSD (mm)	4
Distanza di presa media (m)	5
Numero di immagini totali	507

Tab. 9.4: Nikon D40

sono state automaticamente orientate utilizzando il *Self-Calibrating Bundle Adjustment* (par. 4.7) dell'applicativo di *Structure from Motion* (Par. 4.7) Agisoft Photoscan. Gli algoritmi di *Structure From Motion* consentono di stimare simultaneamente la struttura tridimensionale della scena (*Structure*) e la posizione della camera (*Motion*), ovvero i parametri di orientamento interno ed esterno della camera (Par. 4.1.2). Nella procedura di auto-calibrazione della camera attraverso un sistema risolvibile ai minimi quadrati, il *Bundle Adjustment*, possono essere inserite delle informazioni aggiuntive (punti di appoggio, distanze note) che permettono di ricostruire in modo ottimale la geometria dell'oggetto. Non avendo, in questo caso, a disposizione punti di coordinate note da inserire come punti di appoggio (*Ground Control Points*), sono state utilizzate misure di distanza acquisite sul campo per il dimensionamento del modello (Fig. 9.4.4). La ricerca di corrispondenze, in questo caso, è basata su un *Feature-Based Method* (Par. 4.6). Una prima lista di coppie viene costruita in base a delle misure di similarità tra le diverse *features* (punti di interesse, spigoli,...) identificate ed associate a dei descrittori. In questa lista sono inizialmente presenti anche gli accoppiamenti errati, per giungere poi alla lista definitiva di coppie che hanno maggiore coerenza con il modello dell'oggetto. Il software utilizzato impiega come descrittore di features un algoritmo simile al SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), che permette di identificare caratteristiche



Fig. 9.4.4 - Dimensionamento del modello, utilizzando misure di distanze acquisite sul campo.

invarianti rispetto a traslazioni, rotazioni, variazioni di scala o cambiamenti radiometrici<sup>11</sup>. Nella soluzione *Bundle-Adjustment* la nuvola “sparsa” può essere filtrata sulla base di diversi criteri. Innanzitutto, possono essere individuati e rimossi i punti con un alto errore di riproiezione (in genere superiore ad 1 pixel), ovvero quell’errore geometrico che corrisponde alla distanza, nel piano immagine, del punto proiettato rispetto a quello misurato. Un valore elevato di questo errore indica un’accuratezza bassa nella riproiezione del punto nella fase di *matching*. Ulteriori filtri permettono di ridurre il rumore (*noise*) della nuvola di punti e di eliminare i punti il cui posizionamento, essendo visibili in un numero limitato di immagini, risulta poco accurato. Il filtraggio della nuvola sparsa e l’eliminazione di questi punti è importante per la stima corretta dei parametri della camera e delle coordinate dei punti dello spazio oggetto nella fase di ottimizzazione dei valori calcolati, minimizzando la somma dell’errore di riproiezione ed altre deformazioni. Una volta completata la procedura di orientamento, gli algoritmi di *Dense Image Matching* consentono di generare la nuvola di punti densa (*Dense Point Cloud*). In base alle posizioni stimate della camera, vengono calcolate le informazioni di profondità per ogni immagine e combinate in una singola nuvola di punti. Le nuvole dense dei quattro *datasets* sono state elaborate utilizzando un parametro di qualità “*High*”, considerando che maggiore è la qualità (ma anche i tempi di processamento), maggiori risulteranno i dettagli e l’accuratezza della geometria.

### 9.4.3 Procedure per l’integrazione dei dati.

L’integrazione tra le nuvole di punti acquisite con i diversi sensori ottici attivi e passivi, è stata realizzata utilizzando il sistema di riferimento del dato ottenuto da scansione laser e applicando delle roto-trasformazioni spaziali alle nuvole di punti fotogrammetriche. I valori (x,y,z) di posizione di alcuni punti ben riconoscibili e distribuiti nel modello laser-scanner sono stati preliminarmente identificati (Fig. 9.4.5). Una volta ottenute le coordinate cartesiane di questi punti, nei modelli fotogrammetrici sono stati contrassegnati come *markers* i punti corrispondenti, visibili nelle immagini dei diversi *datasets*. Le coordinate del modello laser-scanner sono state dunque assegnate ai *markers*, permettendo la roto-traslazione dei modelli nel nuovo sistema di riferimento. Tutti i modelli tridimensionali, che condividono così lo stesso orientamento spaziale, sono stati poi importati nel software *open-source* CloudCompare<sup>12</sup>. In CloudCompare, utilizzando un algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) è stato possibile migliorare l’allineamento tra i diversi dati, scegliendo come nuvola “*reference*” la nuvola laser-scanner e come nuvole da allineare quelle fotogrammetriche. In questa fase è

importante definire una giusta percentuale di sovrapposizione tra i diversi sistemi di dati, potendo eventualmente rimuovere durante ogni iterazione alcuni punti della nuvola da allineare troppo lontani da quella assunta come riferimento (che molto spesso rappresentano il “rumore” del dato). Per verificare l’accuratezza di questa procedura di integrazione tra differenti modelli tridimensionali, sono state estratte diverse sezioni verticali ed orizzontali dalle nuvole *range-based* e *image-based*, vettorializzate ed analizzate in CAD. La maggiore differenza, in termini di distanza, è nell’ordine dei 2 cm (Fig. 9.4.6). I valori di deviazione standard più elevati si riscontrano approssimandosi ai bordi dei modelli, nelle zone in ombra dovute a condizioni di illuminazione fortemente disomogenee ed in presenza di superfici con *texture* complesse (ad esempio la copertura in legno di un salone di rappresentanza nella parte meridionale dell’area). Questo risultato era, del resto, atteso, considerando i limiti delle tecniche *image-based*<sup>13</sup> e *range-based* connessi a particolari condizioni ambientali e di illuminazione durante l’acquisizione e la presenza di diversi elementi di disturbo (come ad esempio le numerose ringhiere metalliche). Ulteriori dati di riferimento esterni (acquisiti, ad esempio, con rilievo topografico) avrebbero potuto supportare l’intera procedura e consentito ulteriori analisi dei modelli ottenuti, verificando la distribuzione degli errori nei diversi sistemi di dati. La nuvola di punti finale, allineata ed unita, (Figg. 9.4.7 a 9.5.1) presenta un livello di dettaglio coerente con le finalità di rappresentazione in scala 1:50, attraverso procedure di ri-disegno in CAD per l’elaborazione dei tradizionali prodotti di un’indagine di documentazione (Figg. 9.5.2 a 9.5.5).

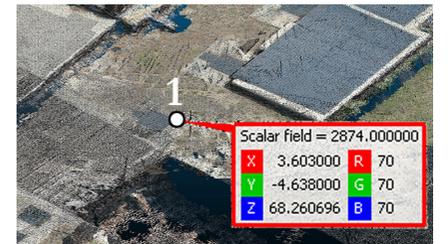
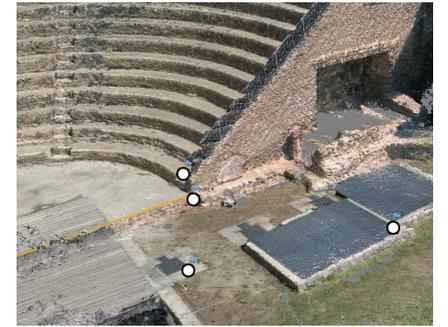


Fig. 9.4.5 - Procedure per l’integrazione dei dati. Identificazione dei valori (x,y,z) di posizione di alcuni punti riconoscibili e distribuiti nel modello laser scanner da assegnare ai punti corrispondenti nei modelli fotogrammetrici.

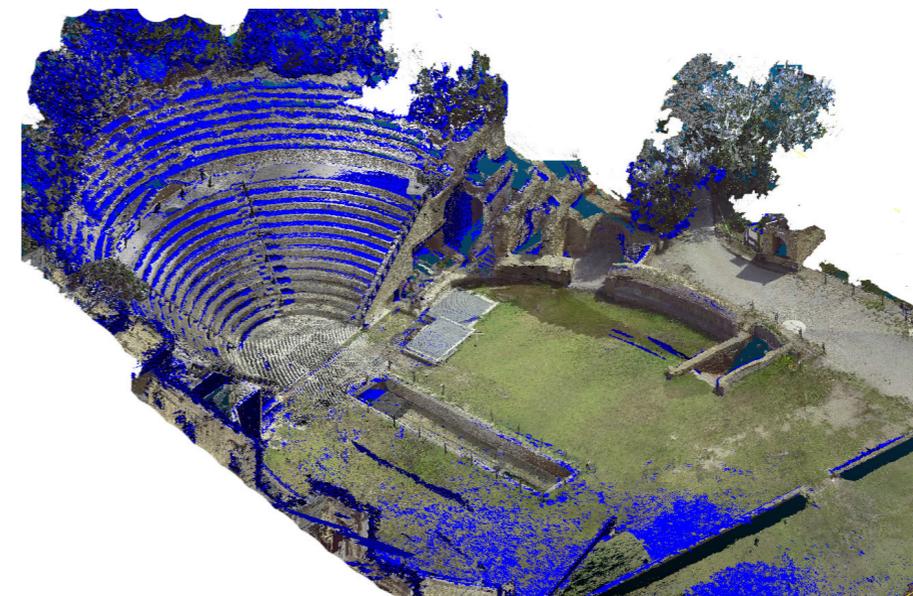


Fig. 9.4.6 - Integrazione del modello laser scanner e dei modelli fotogrammetrici.

Fig. 9.4.7 - Nuvola di punti finale. Teatro.



Fig. 9.4.8 - Nuvola di punti finale. Teatro.



Fig. 9.4.9 - Nuvola di punti finale. Odeon.



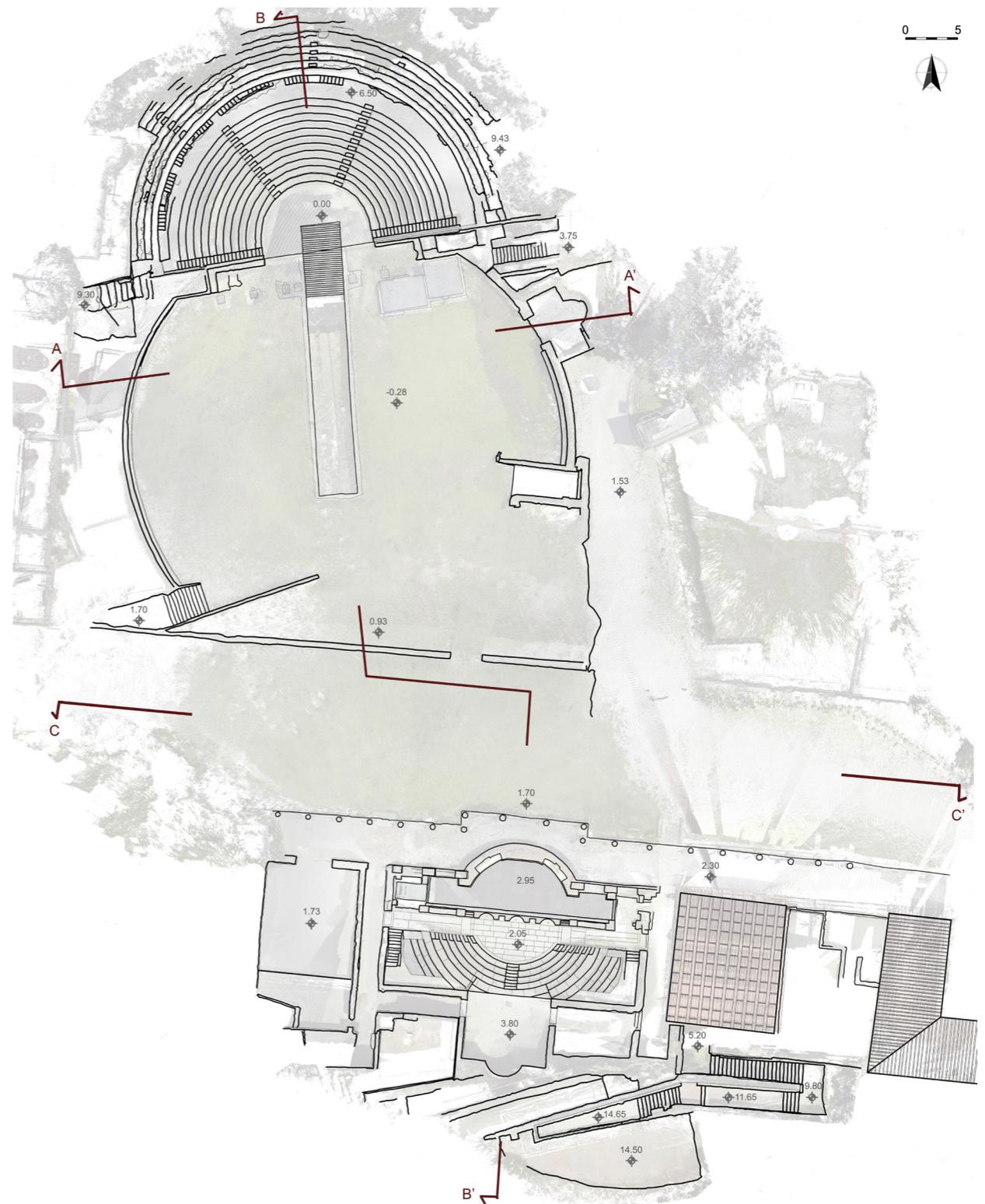
Fig. 9.5.1 - Nuvola di punti finale. Colonnato della *porticus*.



Fig. 9.5.2 - Area dei teatri. Pianta complessiva.



0 5



0 5



Fig. 9.5.31 Sezione A-A'

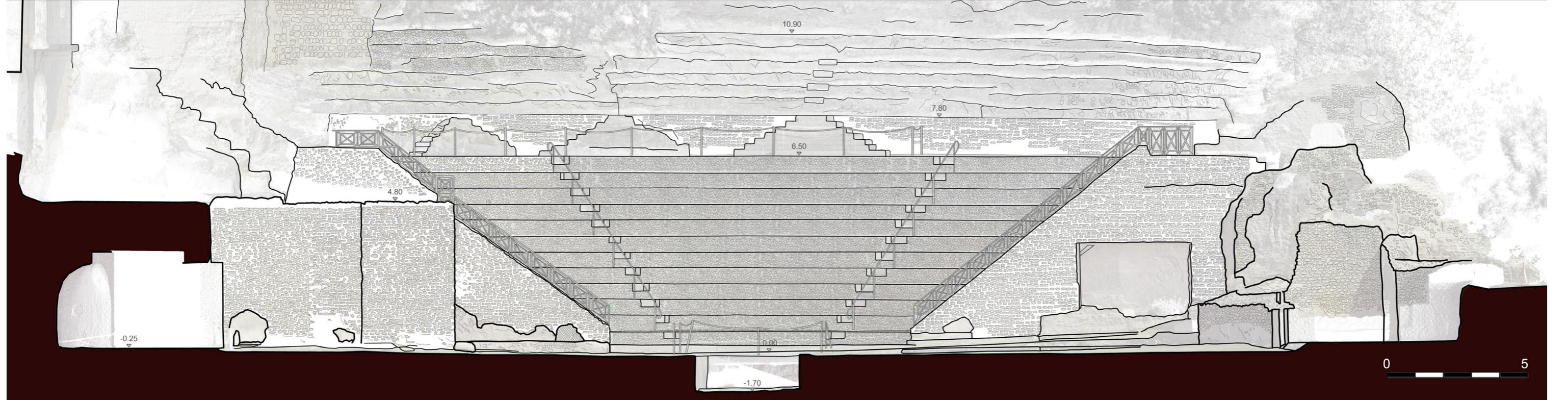


Fig. 9.5.4 - Sezione B-B'

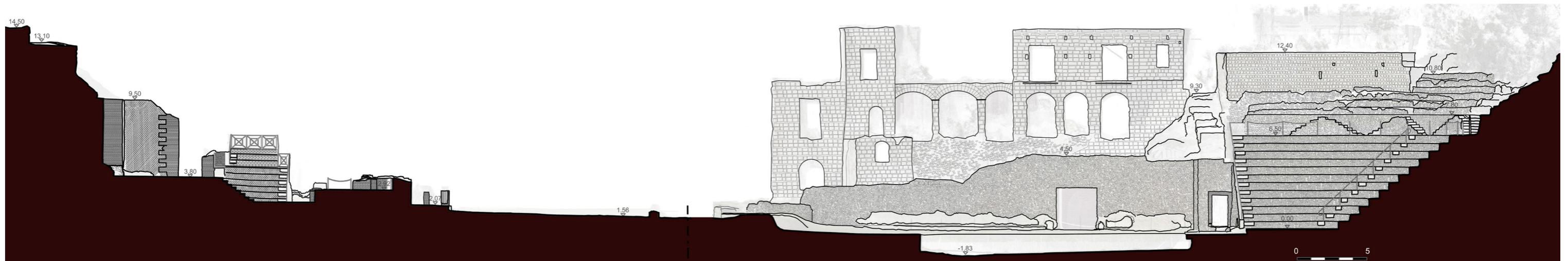
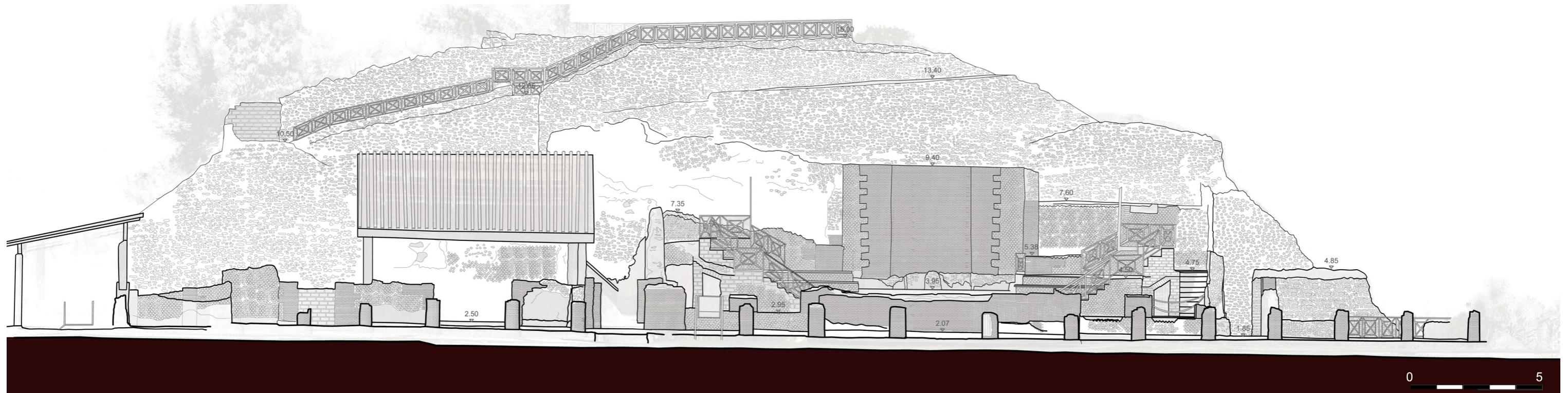


Fig. 9.5.5 - Sezione C-C'



#### 9.4.5 Generazione del modello poligonale e texturizzazione.

Per ottenere un modello digitale tridimensionale da utilizzare nella piattaforma virtuale, due ulteriori fasi del *3D Modeling* sono necessarie: la generazione di un modello poligonale dalla nuvola di punti ed, infine, la sua texturizzazione. Un modello digitale polifunzionale, in grado di rispondere sia ad esigenze di documentazione che di valorizzazione, necessita di un numero piuttosto contenuto di poligoni, in grado di rappresentare adeguatamente la geometria dell'oggetto e, allo stesso tempo, di favorire la fruizione interattiva in applicazioni *real-time*<sup>14</sup>. Modelli densi sono inadatti a questo scopo, considerando il rallentamento della fase di *editing* e le limitazioni nell'importazione di questi modelli nelle scene per la navigazione interattiva. Le procedure, descritte in seguito, sono state applicate in questo lavoro esclusivamente alle strutture dell'area dei teatri, ma sono ugualmente replicabili per la Grotta di Seiano. In seguito alla procedura di integrazione dei dati, vista in precedenza, la nuvola di punti finale, allineata ed unita, conta circa 400 milioni di punti. In modo da ottenere un modello tridimensionale più facilmente gestibile per le fasi successive, considerando l'enorme mole di dati ottenuti, la nuvola di punti finale è stata sotto-campionata a 5 centimetri. Prima di procedere alla generazione del modello poligonale, è stata affrontata una ulteriore fase di pulizia manuale del "rumore" e della vegetazione ancora presente nel dato tridimensionale. Questa procedura ha consentito di ottenere una nuvola di punti di 25 milioni di punti. Dal nuovo dato semplificato è stata infine generata la superficie poligonale, utilizzando il "*Poisson Surface Reconstruction Algorithm*" (Par. 6.6), implementato in CloudCompare. La *mesh* è stata generata scegliendo una risoluzione per il modello poligonale coerente con la risoluzione spaziale scelta di 5 centimetri. Due sono i fondamentali parametri di *input* da scegliere per ottenere il risultato desiderato:

- "*Octree Depth*": questo valore permette di modificare l'altezza massima dell'*octree*. Con valori più alti aumenta la precisione della ricostruzione, oltre ai tempi di elaborazione.
- "*Samples per node*": questo parametro permette di stabilire la quantità di punti contenuti in ogni cubo prima della sua suddivisione. La diminuzione di questo valore comporta una maggiore suddivisione dell'iso-superficie ed un aumento dei tempi di elaborazione. Oltre un certo valore, i vantaggi della suddivisione non sono comunque apprezzabili. L'aumento di questo valore permette, invece, di smussare le curve e di ridurre il "rumore".

Nonostante le procedure di filtraggio applicate alle nuvole di punti

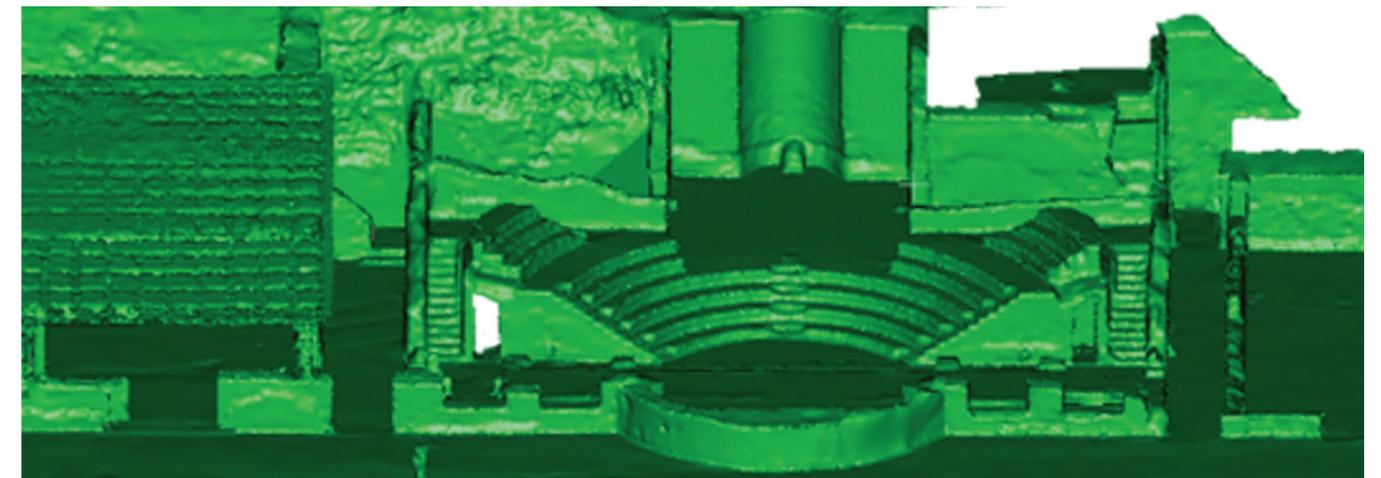
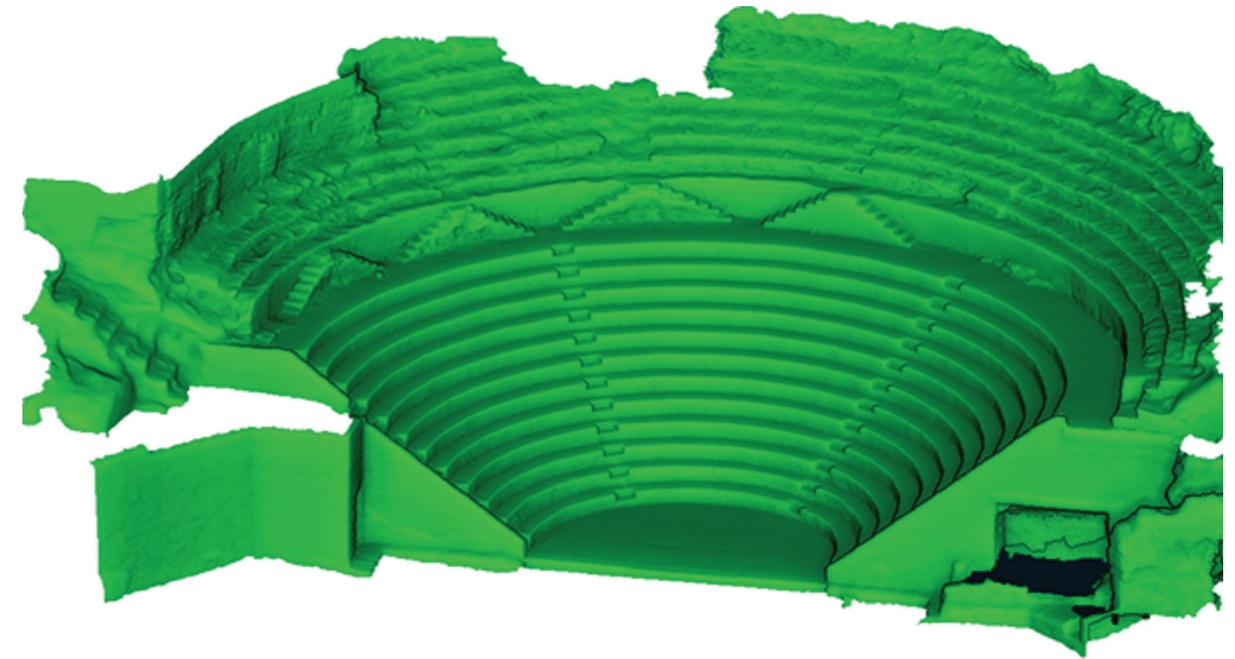


Fig. 9.5.6 - Modello poligonale (*Poisson Reconstruction Algorithm*).

e la pulizia manuale effettuata prima della generazione delle *mesh* si è verificata la presenza di consistenti errori topologici, dovuti al “rumore” residuo del dato tridimensionale. La correzione di questi errori, con lunghe procedure manuali di integrazione dei vuoti e dei dati mancanti e di *re-meshing* in alcune aree, è stata necessaria per ottenere un modello completo utile ai fini della visualizzazione del dato. Il modello poligonale finale conta 6584100 facce e 4051808 vertici (Fig. 9.5.6). L'ultima fase del *3D Modeling* applicata al caso dell'area dei teatri riguarda la texturizzazione del modello poligonale ottenuto. L'applicativo di *Structure-from-Motion* Agisoft Photoscan consente di re-importare i modelli, in seguito alla fase di *editing* delle *mesh* per eliminare gli errori topologici, e texturizzare il modello. Le *mesh* corrette ed ottimizzate consentono, infatti, di ottenere mappe UV di migliore qualità. Nella procedura di estrazione delle *texture* e di mappatura di un modello, vengono assegnate le informazioni provenienti dalle immagini 2D alla geometria tridimensionale. Questo è possibile grazie alla coerenza geometrica tra le immagini ed il modello da queste ricostruito. Nell'operazione di estrazione delle *texture*, vengono ricercate ed isolate le parti delle immagini che corrispondono alle geometrie del

modello 3D. Nel *mapping*, i contorni del modello vengono inizialmente proiettati sull'immagine e vengono assegnate le coordinate UV della *texture* alla geometria. La qualità delle *texture* dipende, oltre che dalla qualità delle immagini, dalle tecniche di acquisizione utilizzate. Molti applicativi di *Structure from Motion* basano l'estrazione delle *texture* su procedure automatiche. L'applicazione seleziona, dunque, le foto da cui estrarre le *texture* in base a dei criteri geometrici, basati sull'orientamento delle immagini ed alla dimensione della proiezione dell'oggetto sulla foto. Per il *mapping*, diverse alternative sono presenti nell'applicativo Agisoft Photoscan, dalla parametrizzazione della *texture* (che crea una *texture* uniforme ed utilizzato nel caso studio), al *mapping* attraverso proiezioni ortografiche, sferiche o da singole foto. Nel caso dell'area dei teatri, dopo aver texturizzato il modello, si sono riscontrate alcuni errori ed imperfezioni dovute a lacune od occlusioni. La *texture* è stata quindi esportata e corretta in un software di foto-ritocco per essere, infine, riapplicata al modello da utilizzare sulla piattaforma virtuale (Fig. 9.5.7).



Fig. 9.5.7 - Modello finale texturizzato.



Fig. 9.5.8 - Il Teatro. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1994.



Fig. 9.5.9 - Ambiente rettangolare. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1994.



Fig. 9.6.1 - Odeon. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1994.

## 9.5 La ricostruzione tridimensionale dell'area dei teatri.

L'ultima fase di lavoro sull'area dei teatri, prima dello sviluppo della piattaforma virtuale, riguarda lo sviluppo di un'ipotesi ricostruttiva delle principali strutture che occupano oggi parte dell'antico terrazzamento superiore della Villa. La ricostruzione dell'aspetto originale, dell'articolazione degli ambienti e dell'utilizzo degli spazi di manufatti così antichi e sottoposti a numerosi interventi trasformativi è un'operazione sempre molto complessa. Delle ipotesi riconfigurative possono, tuttavia, essere avanzate sulla base della comprensione delle logiche costruttive, dell'analisi dei materiali, delle analogie storiche e del confronto con le fonti<sup>15</sup>. La produzione dei modelli *reality-based* offre un supporto fondamentale alle analisi metriche, geometriche e colorimetriche dello stato di fatto di queste strutture, da cui è possibile ottenere indicazioni accurate anche da flebili o parziali tracce. Oltre a consentire confronti dimensionali con strutture simili od analizzarne gli schemi proporzionali (soprattutto attraverso la loro digitalizzazione e la produzione di tradizionali rappresentazioni bidimensionali), questi modelli digitali offrono il vantaggio di poter in ogni momento verificare le ipotesi sulla quasi perfetta riproduzione tridimensionale dei manufatti. Tuttavia, tenendo conto delle trasformazioni subite dalle strutture, il confronto non può limitarsi con il loro stato attuale, ma necessariamente richiede l'apporto della documentazione storica disponibile per interpretarne correttamente i resti. L'approccio, di seguito presentato, è stato applicato al caso delle strutture presenti nell'area dei teatri, ma è ugualmente replicabile per gli altri manufatti del Parco Archeologico.

### 9.5.1 La modellazione tridimensionale: riferimenti, dati e processo.

Come già anticipato, l'attuale aspetto delle strutture archeologiche dell'area dei teatri è, per lo più, frutto di un'intensa operazione di restauro e di parziale ricostruzione avvenuta negli anni 2000. Quest'ultimo intervento ha apportato modifiche sostanziali ai manufatti, verificati sulla base del confronto con materiale fotografico d'archivio e rilievi effettuati precedentemente e durante i lavori (Figg. 9.5.8 a 9.6.4). Una prima necessaria verifica di queste trasformazioni, ottenuta comparando i dati digitalizzati dello stato attuale ed i rilievi elaborati durante la fase di scavo e restauro, è mostrata in fig. 9.6.5. Dal confronto emerge principalmente:

- una variazione nel numero delle gradinate dell'*ima cavea*, parzialmente inglobate nelle nuove strutture (13 precedentemente

- ai lavori e 11 allo stato attuale, escludendo la prima precinzione);
- il rifacimento dell'ambiente rettangolare a sinistra dell'orchestra (già trasformato e riadattato ad altri usi nel corso dei secoli);
- una sensibile variazione in larghezza del primo *praecinctio* (da circa 1,20 metri agli attuali 2,20 metri);
- la parziale ricostruzione delle strutture murarie ad emiciclo (ricostruite con un'altezza massima pari a circa 5,30 metri ad est del Teatro e di 1,60 metri per quelle ad ovest);
- la parziale ricostruzione di quasi tutte le strutture dell'Odeon, evidente nell'innalzamento delle pareti del *pulvinar* (fino a circa 5,50 metri) e delle murature circostanti, il rifacimento e la copertura con sedili in legno delle gradinate e gli interventi sulle strutture della scena e sulla muratura in comune con la *porticus*;
- la realizzazione di coperture in legno per l'ambiente di rappresentanza ad est dell'Odeon e per il secondo portico ad L.

Alcuni modelli tridimensionali semplificati sono stati, dunque, realizzati per ricostruire lo stato delle strutture precedente all'intervento di restauro. Sulla base di questo dato metrico, corrispondente ad una fase più antica del manufatto, dei preliminari confronti con le regole vitruviane di costruzione (Par. 10.2), mostrati nelle figure 9.6.6 e 9.6.7, hanno messo in luce la sostanziale irregolarità della struttura del Teatro, considerando come circonferenza di base l'ingombro dell'orchestra, riferite sia allo schema greco che a quello latino. Questa irregolarità, in particolare, si evidenzia nell'organizzazione delle *scalee* che identificano i cunei dell'*ima* e della *media cavea*, che solo in parte rispondono alla direzione indicata dai vertici dei quadrati o dei triangoli equilateri inscritti. Il Teatro si sviluppa su uno schema a 180° (come nel caso latino) che, tuttavia, prosegue oltre il diametro principale dove sono posizionati altri elementi di collegamento verticali. Questo sistema tipico dello schema greco, ad ogni modo, non è nel caso di Pausilypon distribuito su un modello a 210°. L'appartenenza a diversi schemi distribuiti è evidente tra l'*ima* e la *media cavea*. L'*ima cavea*, in particolare, è parzialmente rispondente allo schema latino di distribuzione delle *scalee* ai vertici dei triangoli, sebbene il numero delle stesse gradinate si presenti, in questo caso, dimezzato, con la divisione in soli tre cunei anziché cinque. Le *scalee* sono, inoltre, poste ad intervalli diseguali. Molto più complesso è il caso dello schema distributivo della *media cavea*. L'evidente disarmonia tra questo settore e quello sottostante è di difficile interpretazione geometrica. Pur rispettando, in questo caso, il modello greco che prevedeva la divisione in sette cunei, la distribuzione delle *scalee* e, dunque, la conformazione degli stessi cunei, non rispetta in alcun modo la regola vitruviana. Lo stesso accade se si vuole ipotizzare una rotazione



Fig. 9.6.2 - Primo *praecinctio* e doppie scale. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1988.

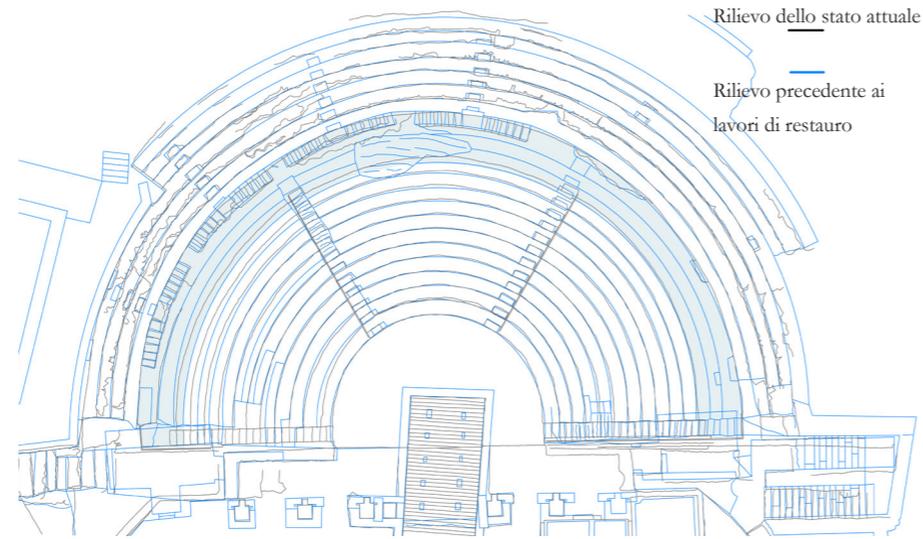


Fig. 9.6.3 - Primo *praecinctio* e doppie scale. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1988.



Fig. 9.6.4 - Muratura e scala ad est del Teatro. Immagine dall'Archivio fotografico della Soprintendenza, 1988.

Fig. 9.6.5 - Confronto tra il rilievo eseguito e la situazione precedente al restauro terminato negli anni 2000. Si evidenzia, in particolare, la riduzione del numero delle gradinate dell'ima cavea e l'allargamento del primo *praecinctio*.



dei quadrati o dei triangoli di base rispetto al diametro principale definito dall'orchestra, in modo che un asse coincida con la quarta *scalea* da sinistra (che sembra allinearsi in qualche misura alla direzione della vasca). Questo è dovuto, ancora una volta, ad intervalli di distanza diseguali tra le scale di collegamento alla *summa cavea*. L'orientamento e la posizione, invece, delle doppie scale sul primo *praecinctio* è perfettamente armonico con lo schema distributivo della *media cavea*. Questo indurrebbe a ritenere che quest'intero settore sia stato realizzato o trasformato in un momento successivo rispetto alla struttura inferiore e che quelli che appaiono oggi come disallineamenti e variazioni siano, in realtà, frutto di espedienti tecnici per armonizzare elementi diversi. Del resto, è noto che la Villa verrà utilizzata anche dai successori di Augusto, almeno fino all'imperatore Adriano, e l'aspetto attuale dei Teatri è di certo frutto di una serie di diversi interventi di cui, però, non esiste documentazione. Per questo motivo, qualsiasi ipotesi sull'aspetto delle strutture precedente agli ultimi interventi di epoca imperiale (di cui permangono tracce archeologiche) risulta ardua. L'unica ipotesi ricostruttiva possibile, pur con tutte le incertezze dettate da tali condizioni, è, dunque, quella riferibile all'ultima fase di utilizzazione delle strutture. Ulteriori anomalie riguardano la geometria delle strutture ad emiciclo che si pongono in continuità con il Teatro. Oltre ai dubbi sulla reale funzione di questo spazio e degli ambienti absidati sui due lati (da molti ritenuta semplicemente una piazza in cui erano presenti elementi di collegamento tra i due teatri), crea perplessità la sua forma interrotta, anche in modo irregolare, dalle scale che sono visibili su entrambi i lati e che potrebbero essere preesistenti alle stesse strutture. La mancanza di ulteriori elementi di confronto e la parzialità degli scavi condotti non consentono

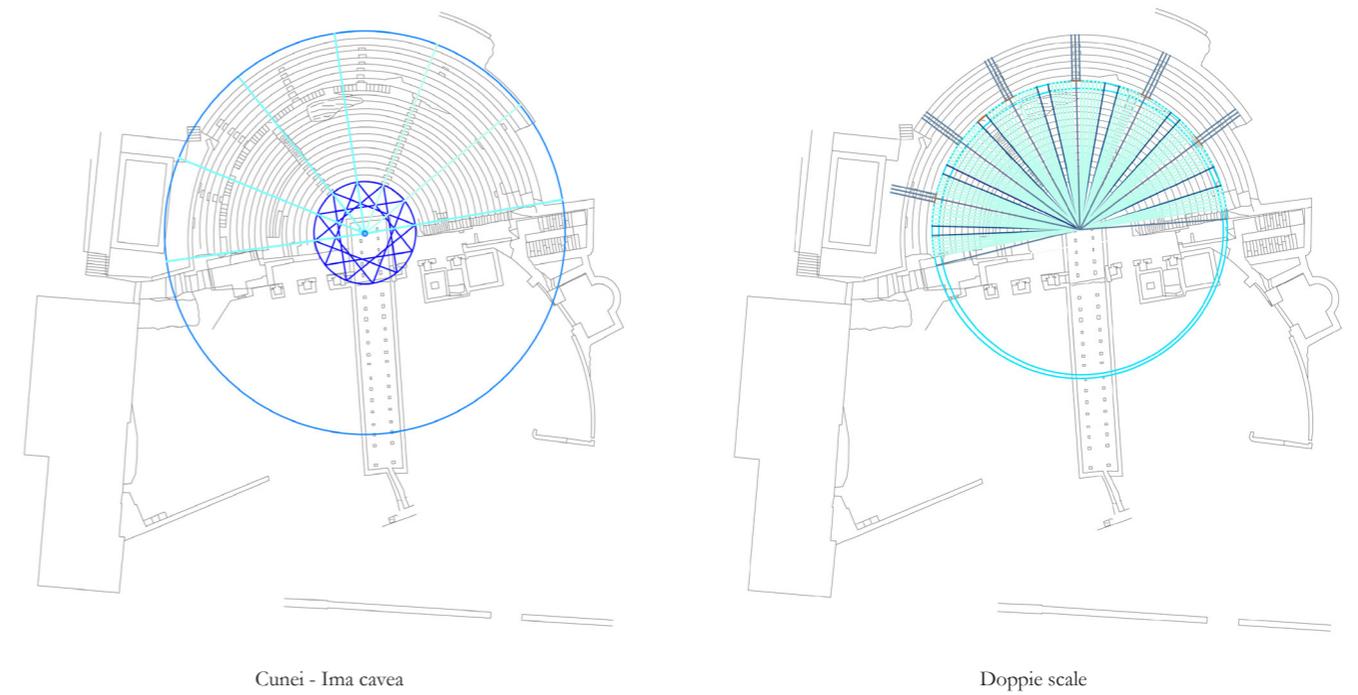
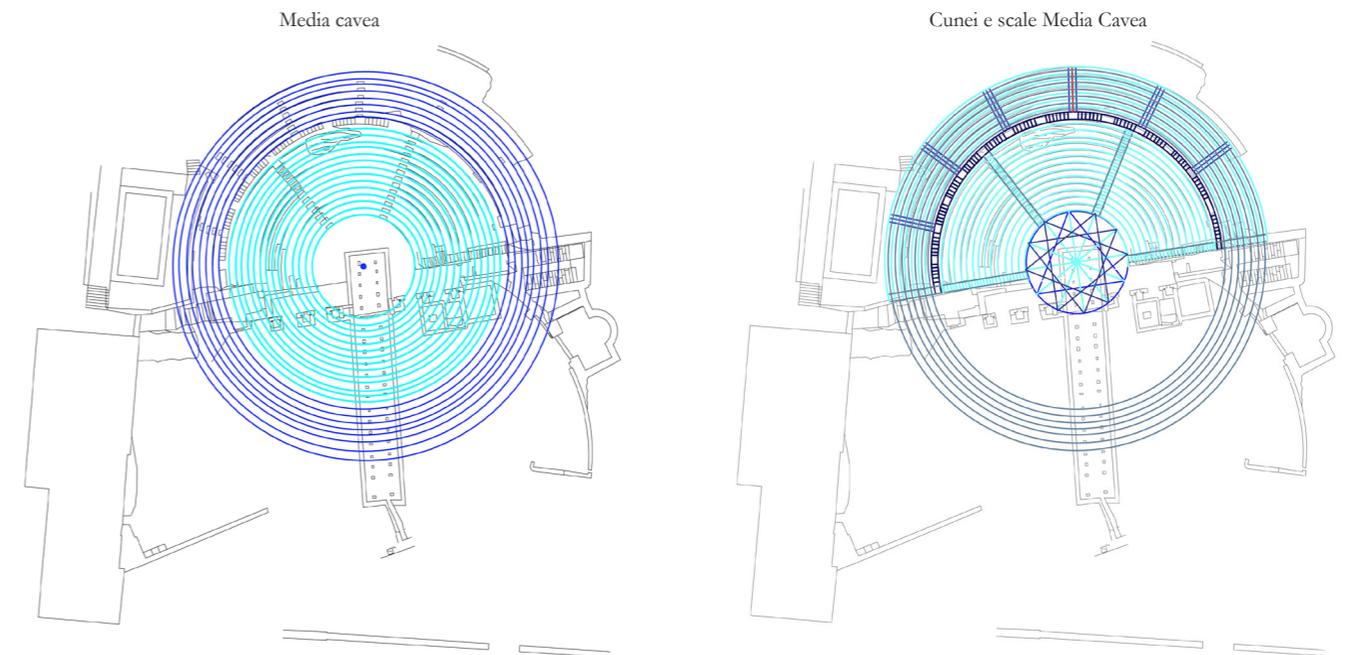


Fig. 9.6.6 - Confronto con le prescrizioni vitruviane ed analisi geometriche



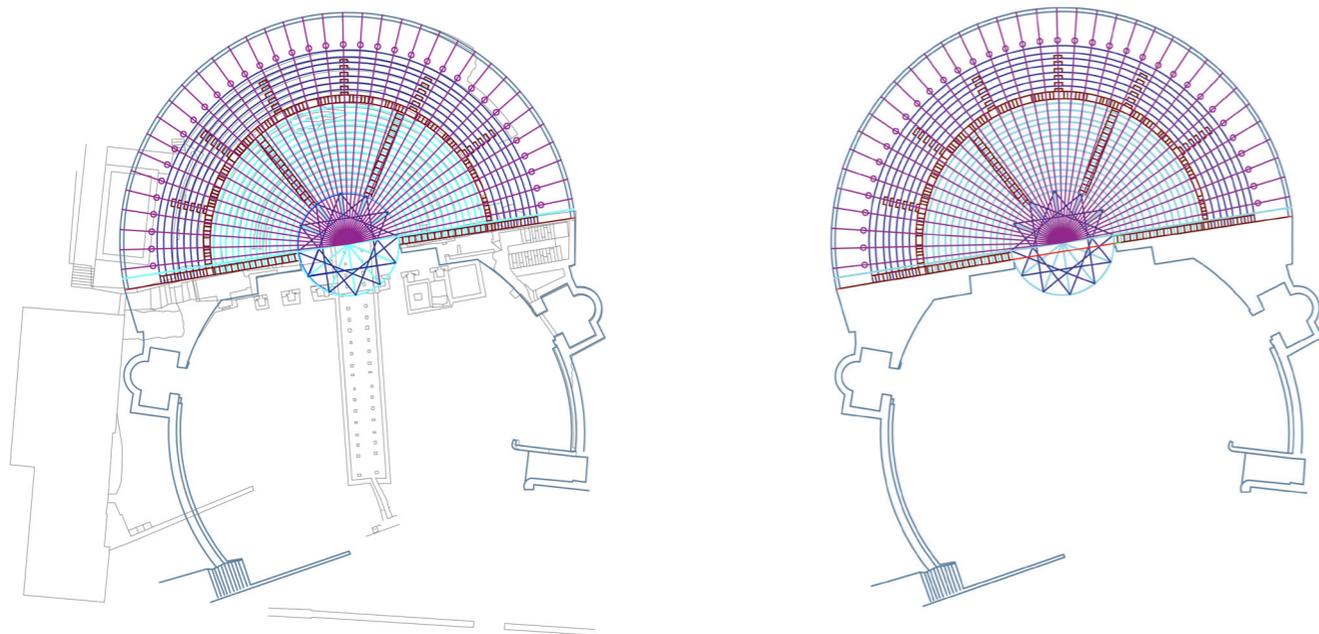


Fig. 9.6.7 - Identificazione delle geometrie principali per la ricostruzione

ulteriori ipotesi ricostruttive per quest'area. Un'altra importante questione riguarda le modalità di accesso ai diversi settori del Teatro. Non essendovi trovate tracce di *vomitoria*, la prima ipotesi è che l'accesso avvenisse direttamente dall'orchestra, per poi raggiungere, attraverso il sistema di scale, i gradini superiori. Un altro sistema di collegamento, che potrebbe corrispondere ad un intervento trasformativo, era fornito da scale laterali al Teatro. Ne sono oggi evidenti le tracce sul lato est, fino quasi al primo *praecinctio*, ma è facile supporre che questo sistema consentisse di raggiungere non solo la prima precinzione ma anche la galleria porticata in sommità. I resti di alcune strutture in corrispondenza della galleria, sono, del resto, testimoniate da diverse fonti. Se questo sistema si ripetesse anche sul lato occidentale è difficile da stabilirsi con certezza, avendo subito così importanti trasformazioni e riusi già con la costruzione della "Casa Rossa". Pur in mancanza di evidenze archeologiche, è supponibile che il sistema, ad ogni modo, fosse replicato anche su questo lato, facendo affidamento soprattutto alla testimonianza di Fusco e Gianpietri nel 1842 (Fig. 9.6.8). Oltre che sulle tracce archeologiche e sulle analisi geometriche, dunque, questo lavoro ricostruttivo si fonda, in modo importante, sul confronto delle fonti bibliografiche ed iconografiche pervenuteci. Le fonti offrono importanti indizi per la comprensione dell'aspetto di queste strutture, se pur riferite ad epoche in cui il degrado e le trasformazioni avevano già in parte compromesso l'immagine originaria dei manufatti. Tra queste, la "Giunta al commento critico archeologico sul frammento inedito di Fabio

Giordano intorno alle grotte del promontorio di Posilipo"<sup>16</sup>, pubblicata sul "Bullettino Archeologico Napoletano" del 1842-1843 offre una descrizione piuttosto ampia dei lavori di scavo condotti a Posillipo nel 1842. La "Giunta", opera di Giuseppe Maria Fusco, Angelo Trojano Gianpietri e Giovan Vincenzo Fusco, è la risposta ad alcune osservazioni mosse agli autori sulla pubblicazione nel 1841 di un manoscritto di Fabio Giordano, vissuto nel XVI secolo, dal titolo "Frammento inedito di uno scrittore napoletano del secolo XVI intorno alle grotte incavate nel Promontorio di Posilipo con un commento critico archeologico". Alcuni estratti sono riportati nell'Appendice A. L'accurata descrizione di queste strutture trova riscontro nel rilievo eseguito dagli stessi autori durante i lavori di scavo del 1842 e precedente alla parziale trasformazione dell'area voluta dal Monsignor De Pietro, con alla costruzione della "Casa Rossa" su parte delle strutture del Teatro. Gli elementi più rilevanti e ripresi al fine dell'ipotesi ricostruttiva, riguarda il numero dei sedili (17 sedili – escludendo i 3 del podio - inframmezzati da due precinzioni poste una dopo l'altra), corrispondente ai dati archeologici verificati prima dell'ultimo intervento di restauro. Le misure delle precinzioni, l'altezza delle murature che le delimitano e le dimensioni del portico superiore sono ugualmente state adottate in seguito ad opportune verifiche dei dati metrici indicati. Non trova riscontro, invece, con i dati archeologici acquisiti, l'ipotesi di scale laterali (come nei citati esempi di Telmisso e Stratonicea) discordante con le strutture antiche che occupano ancora oggi l'area ad ovest del Teatro.

Il 1842 è anche l'anno di pubblicazione di un'altra opera fondamentale, citata anche nel suddetto Bullettino, che è stata per secoli oscurata dal lavoro immediatamente successivo di Francesco Alvino (1845) e, soprattutto, da quella di R.T. Günther ad inizio Novecento. Parliamo della "Promenade a Pausilype et aux fouilles de Coroglio" del Marchese Luigi Lancellotti. L'opera di Lancellotti, tradotta in anni recenti da Marco Iuliano<sup>17</sup>, è di grande valore storico, se si considera la vicinanza dell'autore all'ingegnere Mendia (lo stesso a cui furono affidati i lavori di scavo e restauro della Grotta di Seiano) ed ai fratelli Fusco e Gianpietri. Le numerose illustrazioni e cartografie di cui è corredata, descrivono lo stato dei luoghi, pur non fornendo nuovo materiale grafico sulle strutture teatrali del Pausilypon ma riportando solamente il rilievo dei Fusco e Gianpietri. La descrizione del Lancellotti della struttura del Teatro è sostanzialmente simile a quella su citata, mentre alcuni estratti sull'Odeon e la *porticus*, tradotti da Marco Iuliano sono riportati nell'Appendice B. La descrizione che l'autore fornisce dell'Odeon testimonia le migliori condizioni di questa struttura, sostanzialmente integra, rispetto al Teatro, oltre a fornire alcune informazioni sugli

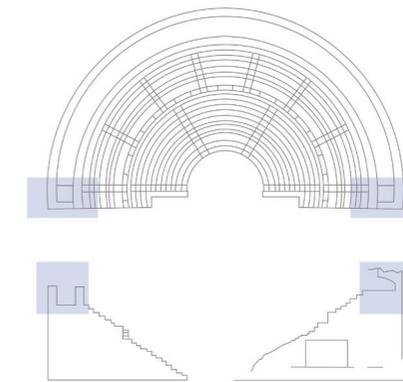


Fig. 9.6.8 - Ri-disegno della pianta dei Fusco e Gianpietri, 1842. Scale alle due estremità del Teatro.

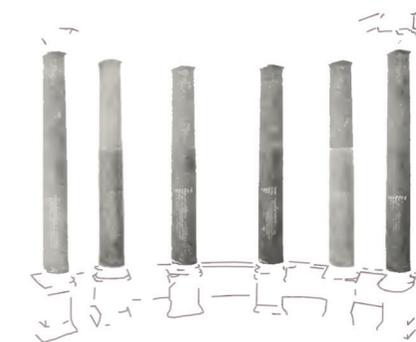


Fig. 9.6.9 - R.T. Günther. Colonnato sulla scena dell'Odeon.

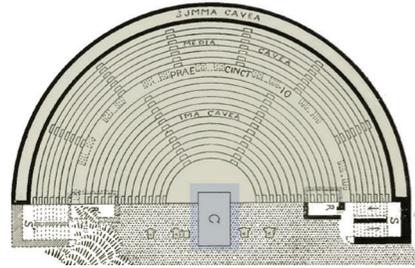


Fig. 9.7.1 - R.T. Günther. Ambiente rettangolare parzialmente scavato.

elementi decorativi e pavimentali degli ambienti interni e della *porticus*.

L'opera di Francesco Alvino del 1845, recentemente ristampata ed arricchita dai disegni di Achille Gigante realizzati in quel periodo, pur non aggiungendo sostanzialmente nulla di nuovo alle descrizioni su riportate, a proposito dell'Odeon fornisce importanti informazioni sui materiali: <<Questo interessante edificio è quasi intero, formato tutto d'opera reticolata solo vedesi rotto e mancante in pochi siti, però oggi è sfornito di tutti i marmi preziosi che l'adornavano. In fatti nel disseppellirsi si rinvenne quasi interamente rivestito da lastre di rosso e giallo antico, marmo pario, paonazzetto e d'altra specie pregiata; tutto di poi fu tolto e solo qualche scheggia ne rimane per testimone dell'antica magnificenza nelle scalee, sul palco imperiale, nell'arena ed altrove.>>

Il lavoro di documentazione dei resti dell'antica Villa di Pausilypon di Robert Theodor Günther, ad inizio Novecento, resta l'opera più completa sul sito, corredata dai rilievi eseguiti su tutte le strutture allora visibili, anche nella parte sommersa per effetto del bradisismo. Alcuni estratti sul Teatro e sull'Odeon sono riportati nell'Appendice C. La descrizione di Günther di queste strutture è molto dettagliata e le indicazioni sono state largamente riprese in questo studio (Figg. 9.6.9 a 9.7.2). Viene riferita, anche in questo caso, l'assenza di strutture fisse della scena, nonostante siano già stati ritrovati gli ambienti ed i pozzetti utili ad azionare le macchine sceniche (della struttura provvisoria in legno) e per sostenere i pennoni del *velarium*. Dal rilievo del Günther è evidente lo scavo parziale della struttura rettangolare che taglia perpendicolarmente l'orchestra. L'autore associa a questa struttura la funzione di piccola cisterna o di una vasca per raccogliere l'acqua proveniente da fontane. Sul numero delle gradinate, ritenendo sottostimata la cifra fornita dai Fusco e Gianpietri, Günther ipotizza la presenza di 18 o 19 ordini di sedili (12 per l'*ima cavea*, 6 o 7 per la *media cavea*) conclusi da una galleria porticata. Lo stesso autore, tuttavia, sottolinea la difficoltà, considerando le condizioni in cui versa il Teatro, di stabilire con precisione questo dato, così come l'impossibilità di produrre un rilievo accurato. Gli ordini superiori erano raggiungibili, secondo Günther, da scale originariamente presenti ai due lati della cavea e visibili oggi solo ad est del Teatro. Quest'ipotesi è stata ripresa anche nella proposta di ricostruzione presente in questo studio. L'autore descrive e rappresenta, inoltre, la decorazione degli ambienti voltati presenti al di sotto dei *tribunalia*. Nella descrizione dell'Odeon, sono particolarmente interessanti le informazioni che riguardano i rivestimenti e la decorazione di quest'ultimo e degli ambienti di collegamento. L'Odeon, in particolare, era

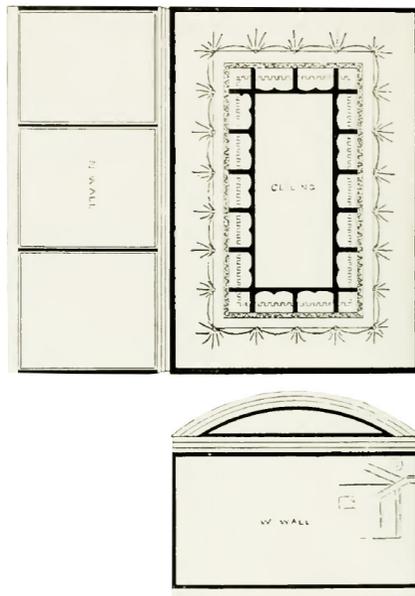


Fig. 9.7.2 - R.T. Günther. Decorazione degli ambienti voltati sotto i tribunalia.

interamente rivestito di marmi di vario genere e colore (l'autore cita rosso antico, giallo antico, Parian e pavonazzetto). Di giallo antico dovevano essere le lastre di rivestimento del *pulvinar*. Sulla scena dovevano trovarsi poi sei colonne corinzie in marmo cipollino, rappresentate dallo stesso autore. Gli ambienti di passaggio sui due lati del *pulvinar* erano, invece intonacati di rosso e giallo, mentre quelli di collegamento con il portico dipinti di rosa. Nella descrizione del portico, anch'esso intonacato, cita la presenza di diciotto resti di colonne in laterizio rivestite di stucco. La pavimentazione di quest'ambiente prevedeva strisce di marmo bianco tra le colonne che separavano una lastroni con schegge di marmo di diversi colori.

Il lungo lavoro di studio e confronto del materiale bibliografico ed iconografico su queste strutture ha consentito, infine, di elaborare un'ipotesi ricostruttiva mostrata nel capitolo successivo. Per la quasi totale assenza di riferimenti nelle fonti e di materiale archeologico non è stata ipotizzata la configurazione dello spazio tra le due principali strutture (che secondo Günther era occupata da un *viridarium* o un giardino). Per quanto concerne la destinazione funzionale dell'ambiente rettangolare che taglia l'orchestra, si ritiene in questo studio maggiormente plausibile l'ipotesi di una cassa di risonanza, che avrebbe potuto migliorare l'acustica del Teatro (considerando l'assenza di una scena fissa per la riflessione dei suoni). La coerenza della ricostruzione, con lo stato di fatto e con le fonti, è verificabile nella piattaforma virtuale attraverso schede interattive e tridimensionali che rimandano ai dati archeologici precedentemente presentati.

## Note

- <sup>1</sup> Pappalardo U., *Teatri greci e romani*, Arsenale Editrice, 2007.
- <sup>2</sup> Ciancio Rossetto P., Pisani Sartorio G., *Teatri antichi greci e romani*. S.P.R., 2006.
- <sup>3</sup> Beare W., *I Romani a teatro*, Editori Laterza, 2010.
- <sup>4</sup> Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.
- <sup>5</sup> Zanelli A., *Trasportabile, Trasformabile. Idee e tecniche che per architetture in movimento*. Maggioli Editore, 2003.
- <sup>6</sup> Salvatore M., “Le geometrie del teatro latino di Vitruvio”, *Dalla didattica alla ricerca*. Alinea Editrice, 2007.
- <sup>7</sup> Maggio F., “Digital Vitruvio ovvero elogio del triangolo equilatero”, *Disegnarecon*, vol. 5 n° 9, 2012.
- <sup>8</sup> Guidi G., Russo M., “The role of digital models in Cultural Heritage preservation”, *IX International Forum Le Vie dei Mercanti*, 2011.
- <sup>9</sup> Bitelli G., Valentina G., Remondino F., Vittuari L., “The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation”, *Proceeding of SPIE – The international Society for Optical Engineering*, 2007.
- <sup>10</sup> GSD (Ground Sample Distance): rappresenta la distanza tra il centro di due pixel consecutivi espresso in unità di misura territoriale. Maggiore è questo valore, minore è la risoluzione spaziale dell’immagine ed i dettagli visibili.
- <sup>11</sup> Remondino F., Fraser C. “Digital camera calibration methods: considerations and comparisons”, *ISPRS Volume XXXVI*, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.
- <sup>12</sup> CloudCompare, 2015. EDF R&D, Telecom ParisTech. <http://www.cloudcompare.org/>
- <sup>13</sup> Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A., Zhang, L., 2008. “Turning images into 3-D models.” *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(4), pp. 55-65.
- <sup>14</sup> Merlo A., Fantini F., Aliperta A., Lavarotti G., Lopez Hernandez J.L.,

Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality-based: la chiesa della Compañía de Jesús. *DISEGNARECON* 12, 2013.

- <sup>15</sup> Vico L., Vassallo V., “Methodologies and techniques for the reconstruction of ancient architectures”. *Proceedings of the 38° Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA2010.
- <sup>16</sup> Fusco M., Trojano Gianpietri A., Fusco G.V., “Giunta al commento critico archeologico sul frammento inedito di Fabio Giordano intorno alle grotte del promontorio di Posilipo”. *Bullettino Archeologico Vesuviano*. Tipografia Tramer, Napoli, 1843, pp. 29, 30, 37.
- <sup>17</sup> Iuliano M., *Promenade a Posillipo*. Edizioni Simone, 2002.
- <sup>18</sup> Alvino F., *La Collina di Posillipo*. Grimaldi & C. Editori, 2001.

CAPITOLO DECIMO  
Il “virtual tour” di Pausilypon

### 10.1 Progettazione del tour virtuale e della “struttura narrativa”

L’ultima parte di questo lavoro, dopo aver introdotto i temi che caratterizzano il dibattito attuale sulle modalità di conduzione di una attività di documentazione in campo archeologico, l’evoluzione dei linguaggi grafici e delle tecniche di acquisizione ed elaborazione con le metodologie del rilievo *reality-based*, riguarda lo sviluppo di un progetto di fruizione virtuale per i prodotti realizzati. L’aspetto più interessante dei prodotti digitali, grazie ai recenti e continui sviluppi delle soluzioni hardware e software nella Computer Grafica, è la possibilità di un loro utilizzo multi-funzionale. Con riferimento ai modelli tridimensionali *reality-based*, abbiamo visto nei capitoli 8 e 9 le enormi potenzialità e le prestazioni di alcuni sensori per la documentazione di strutture archeologiche, in diverse condizioni ambientali. I modelli elaborati sono risultati essenziali per la produzione di grafici accurati con i metodi tradizionali di rappresentazione (piante, prospetti, sezioni,..) e per il confronto dei dati durante la fase di analisi dei resti archeologici. Tuttavia, con la produzione di soli grafici bidimensionali ed interpretati (che rappresentano, quasi sempre, il solo prodotto reso disponibile all’utente), il rischio è quello di limitare gli enormi vantaggi offerti dalla tridimensionalità dello spazio acquisito. Il confronto dei risultati di un lavoro con i dati, i materiali ed i modelli utilizzati nella fase di analisi ed interpretazione è, infatti, indispensabile per la validazione delle ipotesi avanzate, oltre a rappresentare un importante supporto per le indagini future. Allo stesso tempo, pur nel riconoscimento del fondamentale

valore intrinseco dei modelli *reality-based* nel campo della documentazione (rappresentando lo stato delle strutture in un preciso momento storico nelle sue tre dimensioni), non sono stati ancora normalizzati dei sistemi archiviazione digitale aperta e consultabile (Par.2.1). Questo rende la maggior parte dei dati acquisiti e dei modelli realizzati, per lo più, indisponibili per la maggior parte dei potenziali fruitori. Alcune piattaforme o *3D repository* (come Sketchfab<sup>1</sup>, Potree<sup>2</sup>, ...), permettono oggi di visualizzare, interagire e navigare nei modelli che vengono condivisi. Raramente, tuttavia, a questi modelli sono associate informazioni utili a comprendere con quali metodologie, accuratezza e risoluzione questi prodotti sono stati elaborati e quali ulteriori analisi da questi sono state prodotte. Un analogo ragionamento può essere condotto per i modelli tridimensionali ricostruttivi elaborati con metodologie CAD, che ormai da diversi anni vengono prodotti nella ricerca archeologica. I soli prodotti liberamente fruibili si limitano, molto spesso, ad alcuni *render* statici o video che non permettono l'interazione con i modelli e le informazioni aggiuntive in tempo reale. Anche in questo caso, generalmente non è fornita nessun'altra informazione sulle procedure di analisi ed interpretazioni dei resti, sui dati di partenza o sulle fonti storiche consultate. Appare evidente, dunque, che il valore scientifico di questi prodotti è piuttosto debole.

Il progetto di fruizione virtuale, qui presentato, parte proprio da queste considerazioni e dalla consapevolezza della multi-funzionalità potenziale del materiale prodotto. La realizzazione di un tour virtuale con i prodotti della ricerca risponde a due specifiche esigenze: 1) rendere disponibile ed accessibile la maggior parte della documentazione prodotta per future indagini sul sito (nei limiti imposti dalle attuali soluzioni software e hardware disponibili); 2) utilizzare parte dei prodotti per la valorizzazione e la promozione del sito.

Nel rendere chiare le esigenze e gli obiettivi vengono immediatamente identificate delle classi di potenziali fruitori, a cui corrispondono diverse strutture narrative, articolazione dei contenuti e livelli di interazione. In questo lavoro, in particolare, vengono individuate due classi di utenti, a cui corrispondono due diverse tipologie di tour virtuale e piattaforme per la fruizione: 1) un primo tour, progettato per utenti esperti (architetti, archeologici, ingegneri, esperti di geomatica,... che in diverso modo si occupano della tutela, conservazione e valorizzazione del patrimonio), contiene la maggior parte della documentazione prodotta in questo studio. I contenuti sono inseriti in un unico ambiente virtuale interattivo accessibile *online*;

2) un secondo tour, semplificato, per utenti non esperti. In questo caso, considerando come principale obiettivo quello della valorizzazione e promozione del sito, vengono resi fruibili solo alcuni contenuti. La necessità di sviluppare dei prodotti destinati ad un pubblico vasto richiede una soluzione che risulti *low-cost*, di facile utilizzo ed in grado di coinvolgere emotivamente l'utente. Per questi motivi, si è scelto di sviluppare il tour virtuale per una piattaforma semplice, che utilizzi uno *smartphone* di medie prestazioni, anche accoppiato a visori VR (disponibili a costi contenuti).

Definiti, dunque, gli obiettivi, gli utenti e le piattaforme da utilizzare, la fase più complessa riguarda la progettazione della struttura narrativa (Par. 6.2). Progettare la struttura significa non solo valutare i contenuti da inserire e studiarne l'interconnessione, ma definire la dimensione temporale in cui dovranno svolgersi gli eventi. Se la dimensione spaziale è determinata dagli elementi fisici presenti all'interno delle singole scene, quella temporale è funzione dei percorsi di navigazione, che possono stabilire le modalità ed i tempi di accesso ai diversi contenuti. Vediamo, dunque, in dettaglio la struttura dei due tour:

- il primo tour virtuale, come detto, è quello che contiene maggiori contenuti. Questo implica un livello più avanzato di interattività per poter facilmente visualizzare i diversi elementi e muoversi all'interno delle diverse scene. Considerando il fine principalmente divulgativo, non è richiesto, in questo caso, un livello di immersione elevato, ma solo la possibilità di poter facilmente accedere ai contenuti. Gli elementi di questo tour hanno una organizzazione gerarchica, che deve consentire di:
  - visualizzare le attuali condizioni del sito;
  - visualizzare i modelli 3D *reality-based* e le informazioni relative ai rilievi condotti (paradata) in questo studio;
  - visualizzare altri dati e documenti significativi di tipo testuale o grafico utilizzati nella ricerca (fotografie e rilievi storici, estratti da fonti bibliografiche, schemi elaborati sulla base di confronti,...);
  - visualizzare l'ipotesi di ricostruzione tridimensionale avanzata in questo lavoro (e riguardante la sola area dei teatri).Questi quattro punti corrispondono, nell'ambiente virtuale, ai quattro principali livelli di ogni scena nel caso dell'area dei teatri. Questa struttura è replicabile per la Grotta di Seiano, ma non avendo, al momento, prodotto per questo monumento un'ipotesi ricostruttiva ed un modello poligonale, sono attualmente presenti solo il primo ed il terzo livello per ogni scena.

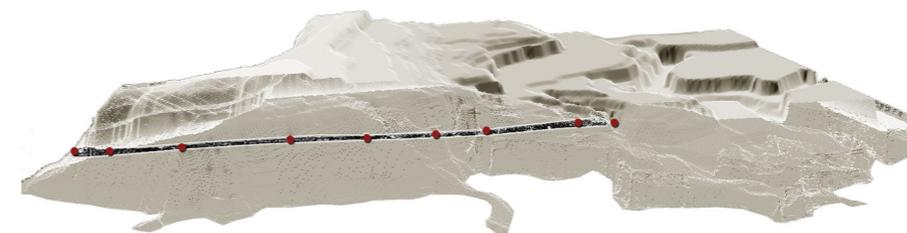
- Il secondo tour virtuale, destinato ad un pubblico non esperto, è stato sviluppato per promuovere la conoscenza del sito. La soluzione proposta in questo caso (*smartphone* e *smartphone* con visori VR) mira ad una diffusione piuttosto ampia, considerando i costi accessibili di questi dispositivi. Un simile sistema potrebbe facilmente essere messo a disposizione degli utenti in musei, info point turistici o sul sito stesso per incentivare la visita alle strutture del Parco. Il coinvolgimento emozionale dell'utente è qui un fattore essenziale. Questo richiede che la visita virtuale risulti un'esperienza percettivamente intensa, con un livello di immersione e di presenza elevata. I contenuti di questo tour virtuale devono permettere la visualizzazione dello stato attuale del sito (il primo livello della gerarchia visto precedentemente) e l'ipotesi ricostruttiva (l'ultimo livello della gerarchia), nel caso in cui sia stata prodotta. La navigazione in queste due dimensioni spaziali e temporali è resa interattiva attraverso diversi cambi di scena. Il passaggio tra diverse dimensioni mira a stimolare l'immaginazione dell'utente ed incentiva una diversa percezione del materiale archeologico.

## 10.2 Lo sviluppo del tour per la fruizione virtuale.

Avendo precedentemente definito la struttura gerarchica tra i contenuti presenti nelle diverse scene, vediamo ora le procedure per lo sviluppo del progetto nel *Game Engine* "Unity 3D", presentato nel capitolo 6.

Dal punto di vista della navigazione, il primo tour virtuale, che risulta più complesso per il numero di interazioni previste ed i contenuti inseriti, presenta un numero di interconnessioni maggiori. La navigazione nei diversi livelli di ogni scena è resa possibile da alcuni "button" cliccabili (a cui sono associati degli *scripts* per il cambio di livello). Il movimento, invece, da una scena all'altra dell'ambiente virtuale (ovvero tra le diverse postazioni da cui sono state acquisite le immagini panoramiche) è facilitato dall'utilizzo di una mappa che presenta degli elementi cliccabili (una per l'area dei teatri ed una per la Grotta di Seiano). A questi elementi sono associati ulteriori *scripts* che permettono di visualizzare le scene dalle postazioni scelte.

Il secondo tour virtuale prevede, invece, un sistema di navigazione semplificato ed un numero di interazioni limitato, come presentato nel paragrafo 10.2.5.



10.1.1 - Mappa delle stazioni di acquisizione di immagini panoramiche equirettangolari per la Grotta di Seiano.

### 10.2.1 La navigazione in foto sferiche equirettangolari.

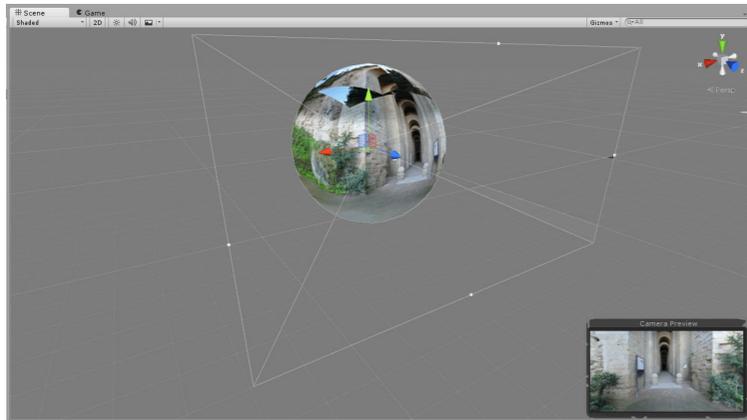
Il primo livello di ogni scena, comune ai due tour virtuali sviluppati, permette la visualizzazione dello stato attuale del sito. Dovendo simulare l'apparenza reale delle strutture archeologiche, sono state acquisite, da diverse posizioni, delle immagini panoramiche equirettangolari. Abbiamo già trattato le procedure di acquisizione di queste immagini e le procedure per il loro utilizzo in "Unity 3D" (trasformandole in "Cubemaps" e quindi in *texture* da applicare ad una sfera) nel paragrafo 6.3.2. Nel caso applicativo esplicitiamo ora le metodologie per l'elaborazione delle immagini equirettangolari attraverso software di *stitching*. Le immagini, per questo primo livello dei virtual tour di Paesilypon, sono state acquisite con una fotocamera montata su una testa sferica ed un treppiedi, da nove stazioni per la Grotta di Seiano e cinque per l'area dei teatri (Figg. 10.1.1 e 10.1.2). Per ogni immagine equirettangolare sono state acquisite 48 immagini, con una fotocamera Nikon D7000 ed un obiettivo (Zoom-Nikkor lens 18-55) con lunghezza focale impostata a 18 mm. La sovrapposizione tra i fotogrammi considerata è di circa il 50% sull'asse orizzontale e del 40% su quello verticale. Il software utilizzato per la creazione delle immagini panoramiche è, in questo caso, "PTGui" (*Graphical User Interface for Panorama Tools*). Il software, consente di creare fotografie panoramiche da *datasets* di immagini con proiezioni latitudine-longitudine, equirettangolari o sferiche. "PTGui" utilizza algoritmi di SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) per individuare i punti corrispondenti tra le immagini, identificare le lunghezze focali utilizzate, correggere le distorsioni ed allineare il panorama. Altri algoritmi di *blending* consentono di correggere le aberrazioni cromatiche ai bordi



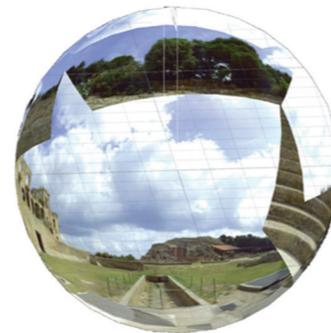
10.1.2 - Mappa delle stazioni di acquisizione di immagini panoramiche equirettangolari per l'area dei teatri.



10.1.3 - Un esempio di immagine panoramica equirettangolare acquisita all'interno della Grotta di Seiano.



10.1.4 - Un esempio di immagine panoramica equirettangolare acquisita nell'area dei teatri.



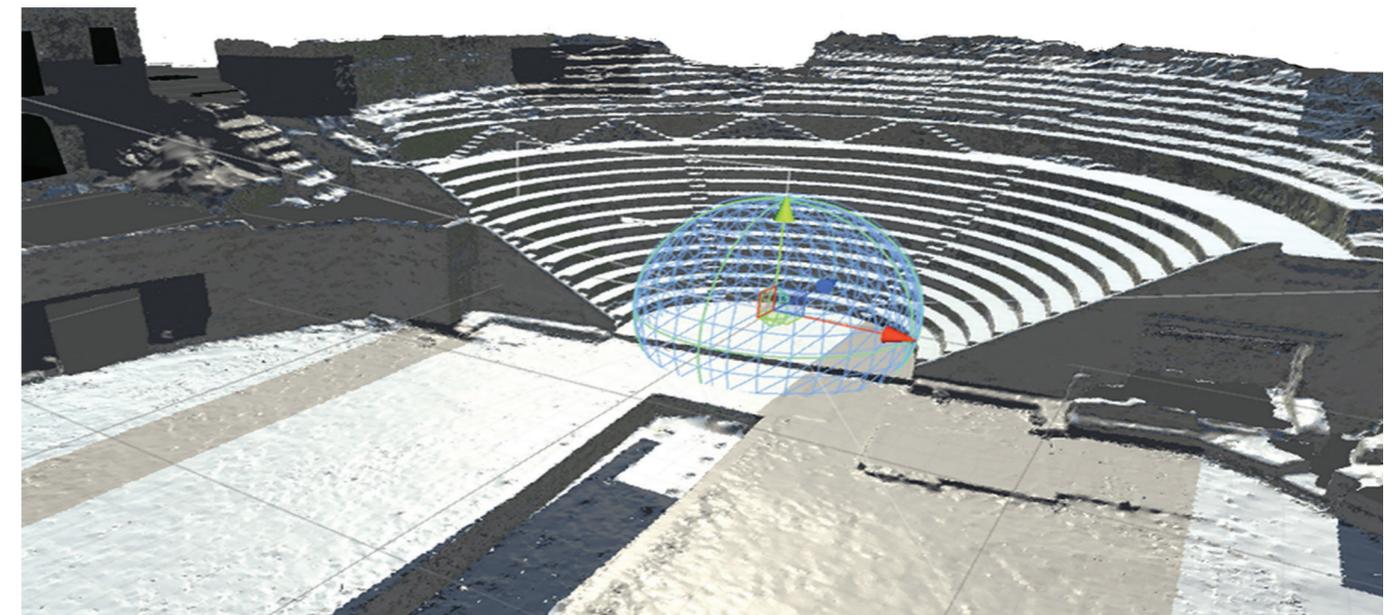
10.1.5 - Primo livello di scena comune ai due tour. Esempio di proiezione dei panorami su superfici sferiche in Unity 3D e posizionamento del *First Personal Controller* al centro della sfera.

delle immagini. Quando la sovrapposizione tra immagini consecutive non è sufficiente o non sono facilmente individuabili in maniera automatica i punti corrispondenti, la procedura di allineamento può non andare a buon fine. In questo caso, è necessario aggiungere manualmente dei punti omologhi tra le immagini e ripetere la procedura di allineamento. Impostata la risoluzione finale dell'immagine panoramica (equirettangolare nel nostro caso) può essere esportata in diversi formati (.jpeg, .tiff, .psd, .psb, .mov). Le immagini panoramiche equirettangolari ottenute (Figg. 10.1.3 e 10.1.4) sono state proiettate su modelli 3D rappresentanti delle sfere (in Unity riconosciuti come "GameObjects" di tipo sferico), come mostrato in fig. 10.1.5. Posizionando il *First Personal Controller* (Par. 6.3.4) e, dunque, la camera, al centro di ogni sfera nelle diverse scene, è possibile visualizzare l'ambiente dal punto esatto in cui è stato acquisito il panorama. Questo consente di esplorare la scena catturata dall'immagine panoramica attraverso movimenti in ogni direzione. Il movimento avviene con *input* da mouse nel caso del primo tour o ruotando la testa nel secondo caso.

### 10.2.2 L'integrazione dei modelli tridimensionali reality-based nel Game Engine.

Il secondo livello di scena del primo tour virtuale consente di visualizzare

10.1.6 - Secondo livello di scena del primo virtual tour. Integrazione del modello del rilievo *reality-based* tridimensionale, sovrapposto al livello di scena precedente.

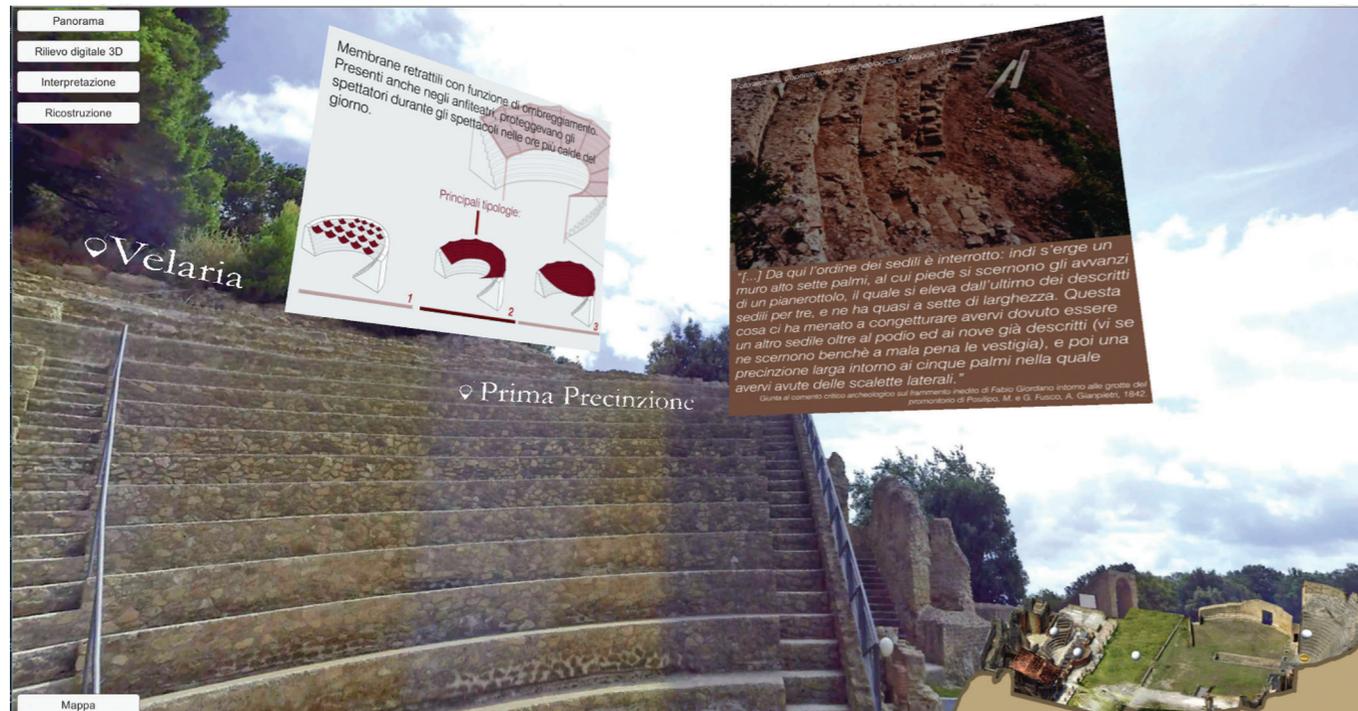


il modello 3D *reality-based* sovrapposto alla scena precedente. Questo consente di verificare la qualità del modello tridimensionale prodotto ed utilizzato per le analisi geometriche. All'interno di questo ambiente virtuale interattivo sono inserite anche alcune schede, contenenti informazioni e dati sui rilievi condotti (metodologie, strumentazioni, risoluzione, ...). La visualizzazione dei contenuti della scena precedente ed il modello tridimensionale nello stesso ambiente è stata ottenuta attraverso il *matching* di alcune coordinate dell'immagine panoramica 2D e quelle dei punti corrispondenti nel modello tridimensionale. Alcuni risultati nella "Scene View" sono mostrati nell'immagine 10.1.6.

### 10.2.3 Il processo interpretativo: l'integrazione di materiale grafico e testuale di riferimento nelle scene.

Il livello di scena maggiormente ricco di contenuto informativo è il terzo (Fig. 10.1.7). Questo livello rappresenta la lettura e l'interpretazione della documentazione consultata e disponibile sul sito archeologico. Per poter visualizzare questo materiale all'interno dell'ambiente virtuale sono state realizzate delle schede tridimensionali, posizionate in diversi punti nelle scene e sovrapposte al primo livello gerarchico (immagini panoramiche). L'accesso a questi dati è interattivo: il fruitore può scegliere cosa visualizzare,

10.1.7 - Terzo livello di scena del primo *virtual tour*. Integrazione di schede tridimensionali con elementi grafici e testuali al primo livello di scena.



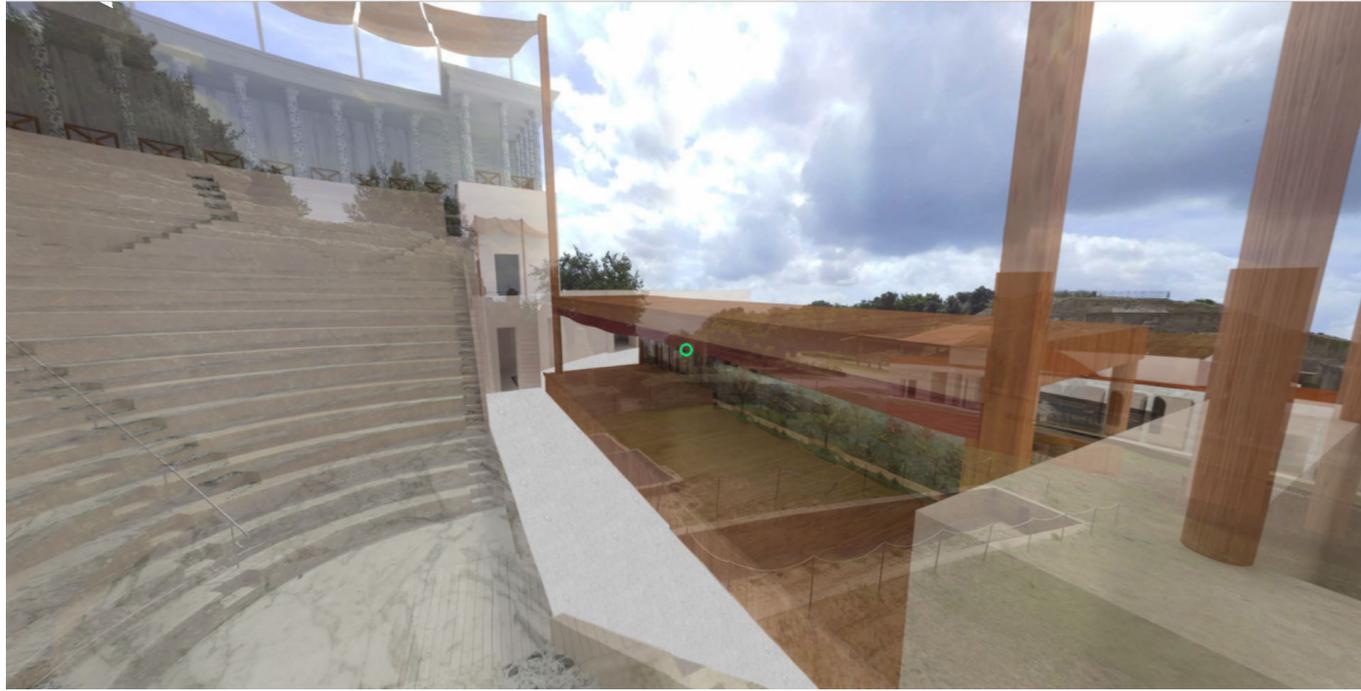
attraverso *input* da mouse su alcuni punti di interesse visibili nella scena. Le schede contengono i maggiori riferimenti testuali e grafici utilizzati in questa ricerca (fotografie storiche, estratti da fonti bibliografiche, schemi geometrici elaborati,...) ed utilizzati nella fase di interpretazione dei resti. Nel caso dell'area dei teatri, gli elementi inseriti permettono di verificare la corrispondenza tra le informazioni offerte dalle fonti e dalla realtà archeologica (in questo caso, precedente all'ultimo restauro) e l'ipotesi ricostruttiva finale presentata nel successivo ed ultimo livello di scena. Questa verifica viene facilitata dalla visualizzazione simultanea, nel terzo livello della scena, dello stato attuale e della ricostruzione tridimensionale, sovrapposte nello stesso ambiente, con diversi livelli di trasparenza delle informazioni (Figg. 10.1.8, 10.1.9 e 10.2.1).

### 10.2.4 Reale/virtuale: il modello tridimensionale ricostruttivo dell'area dei teatri.

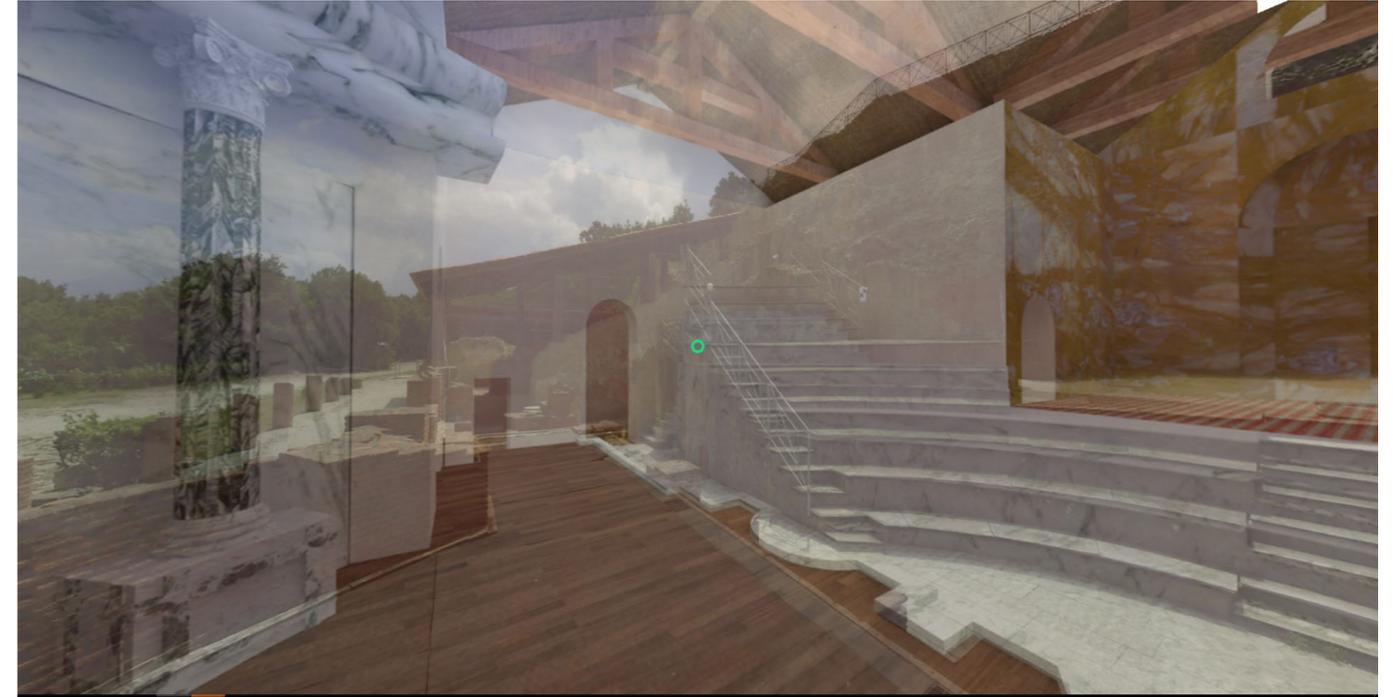
L'ultimo livello di scena, presente in entrambi i tour virtuali, presenta l'ipotesi di ricostruzione tridimensionale dell'area dei teatri (presentata nel paragrafo 9.5). Questo livello simula l'aspetto visivo e la spazialità di queste architetture, attraverso colori e materiali in parte ipotizzati ed in parte descritti dalle fonti (come verificabile nel livello di scena precedente attraverso le schede). La simulazione dell'aspetto di questi ambienti è stata ottenuta realizzando dei render a 360° del modello ricostruttivo elaborato con il software "Rhinoceros". Per ottenere una corrispondenza tra la simulazione dello spazio reale (panorami) e quello antico ipotizzato (modello ricostruttivo) i render sono stati realizzati impostando la camera nello stesso punto di acquisizione dei singoli panorami.

### 10.2.5 Il tour virtuale per la navigazione da smartphone e visori VR.

L'ultima parte di questo progetto di fruizione, considera le esigenze di una tipologia di utenti, non esperti, ed ha il solo scopo di promuovere la conoscenza e valorizzare il sito archeologico. Per consentire un facile accesso ai contenuti multimediali prodotti e la navigazione nelle immagini panoramiche eque rettangolari dello stato attuale (primo livello della gerarchia) e nei *render* sferici ricostruttivi (quarto livello), è stato sviluppato un secondo *Web Virtual Tour*. Negli ultimi anni, lo sviluppo di *smartphone* (con componenti hardware di ultima generazione) e dei visori di Realtà Virtuale) hanno introdotto un profonda innovazione nelle modalità e



10.1.8 - Ipotesi ricostruttiva del Teatro. Visualizzazione nel terzo livello di scena del primo *Virtual Tour* (in alto) e dell'ultimo livello in entrambi i tour (in basso).

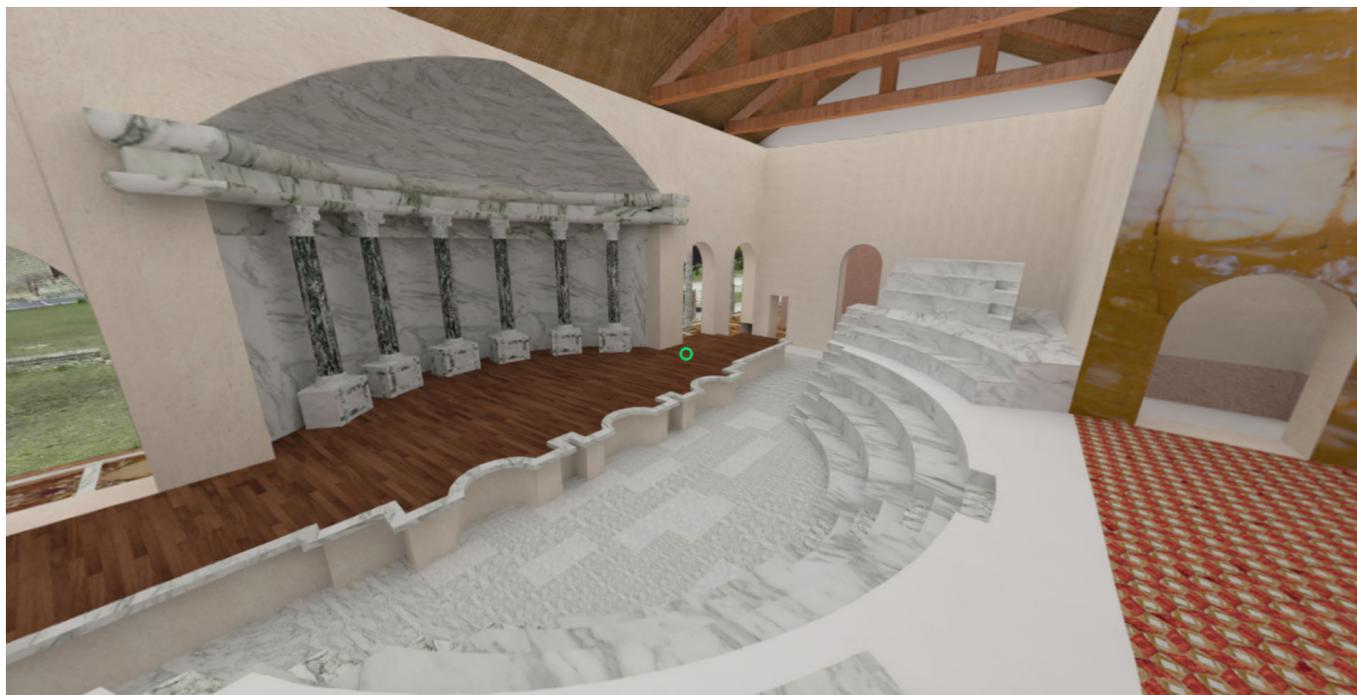


10.1.9 - Ipotesi ricostruttiva dell'Odeon. Visualizzazione nel terzo livello di scena del primo *Virtual Tour* (in alto) e dell'ultimo livello in entrambi i tour (in basso).





10.2.1 - Ipotesi ricostruttiva dell'Odeon. Visualizzazione nel terzo livello di scena del primo *Virtual Tour* (in alto) e dell'ultimo livello in entrambi i tour (in basso).



nelle possibilità di visualizzazione dei contenuti multimediali. In questo caso è stata prodotta una versione semplificata, come più volte accennato in precedenza, con la sola navigazione in foto sferiche e divulgato sotto forma di sito web (*web Virtual Tour*) con la possibilità di fruire su *smartphone* e *smartphone* inseriti in dispositivi VR passivi (Par. 3.3). Per lo sviluppo di questa piattaforma web è stato utilizzato codice HTML ed uno *script* diffuso per lo sviluppo di soluzioni 3D per il web (threejs). Alcuni risultati di questo secondo *Virtual Tour* sono visualizzabili al link:

<http://3dom.fbk.eu/repository/3Dpointclouds/posillipo/main.html>

Nella pagina principale, inquadrando il QRCode con uno *smartphone*, è possibile immediatamente accedere al tour virtuale sul dispositivo *mobile* ed attivare la visualizzazione stereoscopica per i visori VR. Un'altra possibilità è quella di navigare nello stesso tour con modalità desktop da computer. E' possibile navigare nell'ambiente e cambiare scena attraverso schede cliccabili nella soluzione desktop (posizionando il cursore - cerchio - sul pannello che indica la scena) o nella versione *smartphone*/VR osservando per alcuni secondi l'elemento/scheda che si vuole selezionare (Fig 10.2.2).

10.2.2 - Secondo *Virtual Tour* per *smartphone* e visori VR con modalità di visualizzazione stereoscopica.



## Note

<sup>1</sup> <https://sketchfab.com/>

<sup>2</sup> <http://potree.org/>

## Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di ricerca emergono le complessità e le potenzialità delle nuove modalità di conduzione di un'indagine di documentazione e fruizione del patrimonio archeologico. I temi presentati, dagli sviluppi teorici di questa “nuova archeologia”, ai riflessi nella pratica del rilievo, fino alle sperimentazioni di nuovi sistemi di comunicazione e fruizione dei dati digitali poli-funzionali, hanno trovato un'applicazione su alcune strutture del Parco Archeologico di Pausilypon. Se per l'acquisizione digitale dei dati sono stati evidenziati i limiti dei diversi sensori e delle metodologie applicate (con la necessità ancora di una loro integrazione), nella fase di modellazione emerge l'onerosità dell'intero processo.

Il valore intrinseco dei dati digitali tridimensionali prodotti, per la prevenzione, la tutela e la conservazione del patrimonio archeologico, è da tempo riconosciuto. La ricerca mira, tuttavia, alla sperimentazione di sistemi di archiviazione, condivisione ed accesso digitale alle informazioni, quale fondamentale priorità per la produzione di un reale avanzamento nelle modalità di conduzione e divulgazione scientifica di un'attività di documentazione del patrimonio archeologico. La poli-funzionalità dei prodotti digitali consente oggi, grazie agli sviluppi della Computer Grafica, di raggiungere in parte questo obiettivo, ma richiede uno sforzo di approfondimento e di capacità di lavoro multi-disciplinare.

La condivisione dei dati di natura eterogenea in un unico ambiente virtuale, può facilitare la comprensione dei processi di costruzione ed interpretazione delle informazioni archeologiche. Primi sviluppi futuri di questo lavoro potrebbero prevedere lo sviluppo di piattaforme in grado di supportare processi di interazione e *feedback* in tutte le fasi dell'attività di costruzione del dato interpretato con la comunità scientifica. Questo consentirebbe di validare o confutare iterativamente ipotesi e conclusioni prodotte sul materiale archeologico, costruendo un vero processo di collaborazione tra

gruppi di lavoro con uguali finalità di indagine, conoscenza e divulgazione. Ulteriori sviluppi, che riguardano la navigazione immersiva, potrebbero riguardare la sperimentazione di diversi sistemi di interazione con l'ambiente virtuale, per l'accrescimento della sensazione di presenza e di coinvolgimento. L'aspetto emozionale della navigazione va, infatti, valutato con attenzione, considerando la possibilità di influenzare la percezione del passato, comprendere il valore dei resti ed innescare nuovi processi di tutela attiva da parte del fruitore.

## APPENDICE A

“Giunta al commento critico archeologico sul frammento inedito di Fabio Giordano intorno alle grotte del promontorio di Posilipo”.

In: *Bullettino Archeologico Vesuviano*. 1843 pp. 29, 30, 37

Autori: Fusco M., Trojano Gianpietri A., Fusco G.V.

Di seguito vengono riportati alcuni estratti sul teatro, il *velarium* e l'odeon. Sul teatro: <<La cavea del teatro posto a non molto dalla grotta è rilevata nel fianco meridionale della collina sovrastante alla valle della Gajola per trarre profitto di sostruzione naturale, come solevano praticare gli antichi per lo più in sì fatti edifici. Vasto più che ad una villa potesse convenire ha 17 sedili (gradus) intermezzati da due precinzioni poste l'una dopo l'altra come nel teatro di Esculapio in Epidauro. Il podio è intero, e va sovrastato da nove sedili interi parimenti, tranne due rovinati nelle parti che sono a sinistra di chi si fa a mirarli dall'arena, e questi insieme al podio sono intermezzati da quattro scalee (scalaria) pose sconciamente non ad eguale intervallo. Da qui l'ordine dei sedili è interrotto: indi s'erge un muro alto sette palmi, al cui piede si scernono gli avvanzi di un pianerottolo, il quale si eleva dall'ultimo dei descritti sedili per tre, e ne ha quasi a sette di larghezza. Questa cosa ci ha menato a congetturare avervi dovuto essere un'altro sedile oltre al podio ed ai nove già descritti (vi se ne scernono benché a mala pena le vestigia), e poi una precinzione larga intorno ai cinque palmi nella quale avervi avute delle scalette laterali come quelle del teatro di Telmisso e di Stratonicea, non diritte simiglianti a quelle del teatro di Epidauro sopra menzionato, perché mancherebbe la larghezza conveniente a farvene di tali, per ascendere ai sedili posti dopo, del cennato muro di sette palmi; altrimenti egli sarebbe stato impossibile senza di essi il montare a chi era giù ai gradini superiori. Dopo questo si apre una precinzione (sarebbe la seconda), ed indi sei altri sedili intermezzati da otto scalee poste a non eguale intervallo come le prime, tranne l'ultimo che n'è senza, circondato da un muro affatto rovinato nelle parti estreme ed alto cinque palmi dove ha meno patito dall'ingiurie del tempo. Tanto in esso quanto nell'ultimo scalino non v'appajono segni d'esservi vomitori danti a sedili sottoposti, e questa ragione ci ha fatto perservare nella opinione di esservi state delle scalette laterali nella prima precinzione da noi divinata per salire alla seconda; altrimenti nè da su, nè da giù si sarebbe potuto in essa pervenire. Parallelo al muro testè menzionato avvenne un'altro che posto nell'istesso livello ne dista a dieci palmi. Su essi doveva esservi un piano come vediamo praticato nel detto teatro di Stratonicea ed altrove, al quale si ascendeva forse per esterne scalette: se non vogliamo supporre

esservi elevato un portico secondo l'insegnamento Vitruviano; e come a noi in moltissimi teatri antichi è dato vedere. Nell'istessa linea dell'ottavo scalino sono i tribunali, l'un dei quali, cioè quello che sta a destra, è rovinato nella più parte ed ingombro da terriccio, l'altro intero ma però minaccia crollare. Questo ha sotto a sé una stanzetta coperta d'intonaco con avvanzi di dipinture avente in un lato un masso di fabbrica di figura parallelepipedica. Sopra ai tribunali osservansi due vani a livello dei muri testè ricordati coperti da semivolta. Forse su di essi doveva aggirarsi la scalea che conduceva sia nel piano, sia sul portico che era sopra quei due muri accerchianti la cavea. Nell'arena avvi un incavo parallelepipedo il quale cominciando a lieve intervallo dopo del podio si va oltre stendendo, avente ai lati quattro forami due per ciascuno. Scena questo teatro, con esempio nuovo, non ha, e per quanti scavi si fossero praticati nella banda ove avrebbe dovuta essere, non il menomo segno se n'è mostrato. E' sembra che essa fosse stato affatto mutevole, e che questo teatro secondo l'uopo ora a spettacoli scenici, ora ad altri di diversa specie fosse stato ordinato. Tutto il teatro edificato alla maniera romana è di fabbrica reticolata stata rivestita di marmi finissimi di varie spezie (come dai frantumi incastrati in parecchie bande si può raccogliere) tranne le stanze sotto ai tribunali che sono di laterica e di reticolata, ed i vani stanti in sull'arena di reticolata parimenti frammista a pseudo-isodoma>>. Su velarium ed odeon: <<[...] Dopo la descrizione delle fabbriche scavate passano gli aa. a dar l'indicazione degli oggetti che in esse si sono rinvenuti... nel teatro parecchie mensole ove doveano esser site le aste per lo velario [...] Nell'odeo oltre a'tegoloni, di cui si è detto, trovati nel portico, che forse coprivano, si scavarono alcuni leggiadri capitelli corintii di rosso antico, di circa mezzo palmo, sei colonne striate di cipollino con basi e capitelli corintii di pregevole scultura, tre intere alte 11 palmi e mezzo, tre rotte. Le basi aveano un palmo e mezzo di diametro, altrettanto i capitelli, ed un palmo e 5 onces di altezza.>>

## APPENDICE B

“Promenade a Posillipo”. 2002

Traduzione: Marco Iuliano

Testo originario: “Promenade a Pausilype et aux fouilles de Coroglio” 1842.

Autore: Luigi Lancellotti.

A proposito dell'Odeon: <<[...] Di fronte al Teatro si trova l'Odeon. Costruito con molta arte e d'opera reticolare, ha la cavea, come quella del Teatro, appoggiata alla collina. È perfettamente integro eccetto in qualche parte caduta in rovina: i cunei, le 10 gradinate, la sua unica precinzione, infine le 5 scale, oltre le due laterali, sono in perfetto stato. Al centro, al livello del quarto gradino di fronte alla scena, c'è una specie di camera quadrata d'opera reticolare, eccetto in qualche parte isodoma, che presenta al centro un piccolo banco che dovrebbe essere la sedia imperiale (pulvinar) o suggesto. In fondo c'è in una nicchia una base che ci fa supporre aver dovuto sostenere una statua. Vicino alle scale laterali, attraverso le quali si sale alla cinta, ci sono due passaggi di due piccole camere uguali che girano sotto i cunei.[...] La scena, molto rovinata, ha il piano d'ingresso in mattoni e diverse colonne scanalate, alte 11 palmi e un terzo e che erano abbellite da marmi d'ordine corinzio. Dietro la scena c'è il portico. Gli intercolumnni sono intrammezzati da bande di marmo bianco inclinate verso il lato del teatro; e il pavimento del portico è intarsiato con piccoli pezzi di marmo di specie e colori differenti. I muri sono d'opera reticolata coperti di intonaco dipinto; delle colonne piazzate a distanza irregolare non ne resta che una piccola parte dei fusti, senza base, in mattoni rivestiti di intonaco scanalato, e può darsi che fossero di ordine tuscanico. Alla destra di chi guarda la scena, ci sono varie piccole camere (cellae) per la maggior parte di opera reticolare, e in altre parti, isodoma. Alcune hanno il muro in comune con il portico, delle altre si allungano verso la cala di Trentaremi seguendo la stessa linea degli intercolumnni; cosa ci sia dall'altra parte, non è dato sapersi, perché coperto di terra.>>

## APPENDICE C

“Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo, ”. 1913

Autore: Robert Theodore Günther

A proposito del teatro Gunther scrive: <<Among the ruins [...] is the Theatre, now in the grounds, part garden, part vineyard, of a private villa. [...] there is a remarkable absence of any stage building, from which we may infer that it was constructed during a transition period, before the Romans had entirely overcome their early prejudice against stone-built theatres, which they considered a yielding to Greek luxury. It would not be unnatural for the patrons of the stage, even when accustomed to the greater comfort of the stone seats under the awning, velarium, to remain conservative in their views about stage fittings and furniture and to desire to retain the wooden stage; which might, moreover, have advantages in the way of rapid alternation or of easy removal. [...] In the middle of the arena is a shallow rectangular pit [...] measuring 20 feet long by 13 feet wide and sunk out to a depth of 2 feet. [...] might have been a compluvium into which rain-water was conducted; but, as there was no lack of water ‘laid on’ to all the Pausilypon buildings, it is more likely to have been a tank to receive the jets from fountain figures like those of the House of the Vettii in Pompeii. On either side of the tank are two deep holes, the purpose of which seems to have puzzled the original excavators. We believe them to have been part of the contrivances for supporting stage scenery, curtains or awnings, carried on wooden masts or uprights stepped in the holes. The channels down the sides of the holes even suggest the positions of heel-ropes used for raising or lowering the masts. [...] The details of the plan are discernible here and there, yet the thick clothing of weeds, with roots driving the stone-work asunder, no less than the well-intentioned restorations of Pietro, have so obscured the original work, that even the exact number of the rows of seats cannot be countered without much care. Further, owing the entire removal of the marble slabs with which the lower benches at any rate were once covered, it is impossible to make measurements with accuracy, which is the more regrettable as the two sides of the theatre are not exactly alike, and so the commonly accepted symmetrical plan published by Fusco must be regarded as unreliable in details. The auditorium consisted of 18 or 19 rows of seats surrounded by a gallery. [...] 12 rows of seats being below and 6 or 7 above the precinctio. The stairways are all above ground; there are no vomitoria. [...]

The summa cavea or gallery 9 feet wide, was separated from the upper row of seats by a wall, which, though ruinous, still rises 4 feet above the last seat. It was almost certainly covered by a portico, but all traces of the columns or of the positions they occupied are lost. The gallery was reached by the two large staircases at the ends of the auditorium, but there may have been other entrances to it from behind. [...] Behind the tribunals and partly under the end-stairways, are two small rooms which [...] had painted decoration on their walls. It is possible that they were dressing-rooms for the actors. [...] On the furniture of the theatre there is not much to relate. The marble seats had all been removed before 1840.>>

A proposito dell’odeon troviamo: <<[...] Odeon and theatre both, were carved out of opposite hill-sides, so that the auditoria face one other; their chords also were parallel, and there is but little doubt that galleries of communications, foundations of which are still partly traceable, connected the ends of a portico which lay behind the stage of the odeon with the wings of the theatre opposite. [...] Thus a quadrangle was enclosed which may have served on occasion for extended spectacular performances viewed from the theatre, or at any rate as a viridarium or garden between the portico of the odeon and the wooden stage building of the theatre. [...] the most important parts were overlaid with ornamental marbles, among which rosso antico, giallo antico, Parian, and pavonazzetto were abundantly used, while the walls of the passages and smaller rooms were coated with plaster and were coloured. [...] The imperial seat or pulvinar is indicated by a small elevation in the middle, and in the apse behind, was a pedestal that would have supported a statue. The walls are still studded with the iron holdfasts which kept the marble overlay in place, and curved pieces of the giallo antico mouldings have been found. The approach to the Imperial box is from behind the lateral cunei on both sides, by two passages [...] the walls of the passages are reticulated, plastered and coloured red and yellow. [...] At the back of the stage is a hemicycle, once ornamented with six fine, fluted Corinthian columns of cipolline marble about 9 ft. 6 in. In height and 14 inches in diameter, the lower 3 feet of the fluting being filled with a bead. Two of these columns were found entire, and a photograph of one of them which has been moved to the house of Signor Acampora, was used for the accompanying sketches as a suggestion of the original appearance of the hemicycle. At the ends of the stage building are two small chambers, about 6 feet square, which may have served as dressing-rooms for the performer [...]. Both parodos and the passage to the Imperial box open out of a passage which led out to the portico at the back of the stage building. The walls of the passage were painted pink. The portico. Upon a pavement raised 1 ft. 3 in. above

the level of the garden, stood eighteen brick-built columns covered with fluted stucco, in the Tuscan style. These columns [...] stood on squared marble bases. [...] The pavement was formed partly of little chips of marble of varied colour, in which African breccia is abundant, and partly of white mosaic, and between the columns were inlaid bands of white marble sloping towards the wall of the odeon.>>

## FONTI DELLE IMMAGINI

### Fonti delle immagini Capitolo Primo

- 1.1.1 Renfrew C., Bahn P., *L'essenziale di archeologia*, Zanichelli, 2009.
- 1.1.2 Hodder J., *The archaeological process*, Oxford, 1999.
- 1.1.3 <http://www.multytheme.com/cultura/multimedia/didattmultitema/scuoladg/storiarte/neoliticovalcamonica.html>
- 1.1.4 [http://tidskriften-arkitektur.blogspot.it/2006\\_11\\_01\\_archive.html](http://tidskriften-arkitektur.blogspot.it/2006_11_01_archive.html)
- 1.1.5 <http://slideplayer.it/slide/608507/>
- 1.1.6 <http://www.the-colosseum.net/ita/history/medium.htm>
- 1.1.7 Moser S., in Hodder I. (edited by), *Archaeological Theory Today*, Polity Press, 2012.
- 1.1.8 [http://www.ercolano.unina.it/ercolano.php?id\\_ist=387&cid\\_namespace=19&padre\\_nodo=10](http://www.ercolano.unina.it/ercolano.php?id_ist=387&cid_namespace=19&padre_nodo=10)
- 1.1.9 [https://www.researchgate.net/figure/228617407\\_fig4\\_Figure-5-3D-modeling-results-of-the-complex-archaeological-site-of-the-forum-in-Pompeii](https://www.researchgate.net/figure/228617407_fig4_Figure-5-3D-modeling-results-of-the-complex-archaeological-site-of-the-forum-in-Pompeii)

### Fonti delle immagini Capitolo Secondo

- 2.1.1 <http://www.thedigsite.co.uk/assets/molasmanual942.pdf>
- 2.1.2 rielaborato da Remondino F., Campana S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

### Fonti delle immagini Capitolo Terzo

- 3.1.3 [www.vrs.org.uk/virtual-realityhistory.html](http://www.vrs.org.uk/virtual-realityhistory.html)
- 3.1.4 [www.vrs.org.uk/virtual-realityhistory.html#4](http://www.vrs.org.uk/virtual-realityhistory.html#4)
- 3.1.5 [http://www.mortonheilig.com/Experience\\_Theater\\_Patent.pdf](http://www.mortonheilig.com/Experience_Theater_Patent.pdf)
- 3.1.6 [www.stampaprint.net/it/blog/altri-mondirealta-virtuale-levoluzione-e-le-tecnologie](http://www.stampaprint.net/it/blog/altri-mondirealta-virtuale-levoluzione-e-le-tecnologie)
- 3.1.7 <http://www.mortonheilig.com/TelesphereMask.pdf>
- 3.1.8 <http://www.gamesnote.it/post.php?id=10212&title=VR-la-Virtual-Reality-nel-corso-della-storia>
- 3.1.9 <http://www.inventinginteractive.com/2010/03/18/aspen-movie-map/>

3.2.1 <http://atomerobitar.se/wp-content/uploads/2016/03/VirtualReality-J.Ericsson.pdf>

3.2.2 <http://www.visbox.com/products/cave>

3.2.3 [http://cyberspaceandtime.com/Data\\_Glove\\_&\\_Insole\\_Sensors/j-UYN4qMsYo.video](http://cyberspaceandtime.com/Data_Glove_&_Insole_Sensors/j-UYN4qMsYo.video)

3.2.4 <http://www.techrds.org/leap-motion-controller/>

3.2.5 <http://atomerobitar.se/wp-content/uploads/2016/03/VirtualReality-J.Ericsson.pdf>

3.2.6 [Universal-Google-Cardboard-VR-BOX-2-Virtual-Reality-3D-Glasses-Game-Movie-3D-Glass-For-iPhone](http://www.universal-google-cardboard.com/vr-box-2-virtual-reality-3d-glasses-game-movie-3d-glass-for-iphone)

3.2.7 [vimeo.com/80151975](https://vimeo.com/80151975)

3.2.8 [www.youtube.com/watch?v=zGdjf9wzHOI](https://www.youtube.com/watch?v=zGdjf9wzHOI)

3.2.9 [giza3d.3ds.com/it-index.html](http://giza3d.3ds.com/it-index.html)

3.3.1 <http://www.mayaarch3d.org/>

3.3.2 <https://3dom.fbk.eu/projects/etruschi-3d>

3.3.3 <http://itlab.ibam.cnr.it/index.php/teatro-di-catania/>

3.3.4 <http://www.coopculture.it/events.cfm?id=268>

### Fonti delle immagini Capitolo Quarto

4.1.1 [http://www.crabnebula.it/rc/camera\\_oscura\\_a\\_foro\\_stenopeico.htm](http://www.crabnebula.it/rc/camera_oscura_a_foro_stenopeico.htm)

4.1.2 <http://www.alamy.com/stock-photo-camera-obscure-from-athanasius-kircher-ars-magna-amsterdam-1671-57309721.html>

4.1.3 <https://chefotografia.wordpress.com/category/alle-origini/>

4.1.4 a 4.2.3 Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing, 2011.

4.2.4 <http://ssghosal.com/resources/tag/aperture-priority/>

4.2.5 [http://www.fotografareindigitale.com/wp-content/uploads/2012/04/Government\\_Center\\_Miami\\_color\\_balance\\_comparison.jpg](http://www.fotografareindigitale.com/wp-content/uploads/2012/04/Government_Center_Miami_color_balance_comparison.jpg)

4.3.1 e 4.3.2 De Luca., *La fotomodellazione architettonica*, Dario Flaccovio Editore, 2011.

4.3.3 <https://www.nikonschool.it/experience/photo-stitching2.php>

4.3.4 a 4.3.6 Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing, 2011.

4.3.7 [www.rhinophoto3d.com](http://www.rhinophoto3d.com)

4.3.8 Moons, T., Vergauwen, M., Van Gool, L., *3D reconstruction from multiple images*, 2008. .

### Fonti delle immagini Capitolo Quinto

5.1.2 e 5.1.3 Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, 2010.

5.1.4 Bawden G., Howle J., Bond S., Shriro M., Buck P., “Three-Dimensional Imaging, Change Detection, and Stability Assessment during the Centerline Trench Levee Seepage Experiment Using Terrestrial Light Detection and Ranging Technology, Twitchell Island, California, 2012”, *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1092*, 28 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141092>.

5.1.5 Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, 2010.

5.1.6 e 5.1.7 – rielaborato da Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, 2010.

5.1.8 <http://www.3deverywhere.com>

5.1.9 <http://informedinfrastructure.com/17364/trimble-introduces-next-generation-indoor-mobile-mapping-system-for-building-interiors-and-underground-structures/>

5.2.1 <http://www.geo-matching.com/products/id4281-ims3d.html>

5.2.2 <http://leica-geosystems.com/en-gb>

5.2.3 [www.geoslam.com](http://www.geoslam.com)

5.2.4 e 5.2.5 Mauri S., “Make your scan. Rilievo 3D di oggetti tramite uno scanner progettato con componenti open source”. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Design, anno accademico 2012/2013.

5.2.6 <http://www.disi.unige.it/person/MagilloP/INTERF06/PROGETTO/voronoi.html>  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma\\_di\\_Voronoi](https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma_di_Voronoi)

5.2.7 <http://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/numeri-della-natura>

5.2.8 <http://liris.cnrs.fr/glavoue/travaux/publi.html>

### Fonti delle immagini Capitolo Sesto

6.1.1 <https://www.youtube.com/watch?v=vBSJfhZTFF0>

6.1.2 <https://www.pcgamesn.com/tags/gaming-pcs>

6.1.3 <http://smartgadgetsnews.com/the-origins-of-virtual-reality/>

6.1.4 [https://www.youtube.com/watch?v=zFq2\\_4CsiB4](https://www.youtube.com/watch?v=zFq2_4CsiB4)

6.1.5 <http://coherent-labs.com/blog/unity-3d-facebook-integration-with-coherent-ui-tutorial/>

6.1.6, 6.1.7. 6.1.8 <https://docs.unity3d.com/Manual/class-Cubemap.html>

6.2.4 <http://www.itechidea.com/tag/unity-3d/>

## Fonti delle immagini Capitolo Settimo

7.1.1, 7.1.2 <http://www.romanoimpero.com/2009/08/architettura-romana.html>

7.1.3 <http://slideplayer.it/slide/567132/>

7.1.4 [http://svoxcalantisindeserto.blogspot.it/2014/06/abitazioni-e-giardini-nellantica-roma\\_24.html](http://svoxcalantisindeserto.blogspot.it/2014/06/abitazioni-e-giardini-nellantica-roma_24.html)

7.1.5 <http://www.romanoimpero.com/2009/08/architettura-romana.html>

7.1.6 <https://www.campaniasuweb.it/cultura/pompei-ed-ercolano-una-mostra-multimediale-racconta-la-vita-allombra-del-vesuvio/>

7.1.7 [http://www.liceobanfi.gov.it/esplora\\_la\\_cavallera/paesaggio\\_nellarte/](http://www.liceobanfi.gov.it/esplora_la_cavallera/paesaggio_nellarte/)

7.1.8 [http://www.archeobologna.beniculturali.it/mostre/RavennAntica/otium\\_ludens\\_09.htm](http://www.archeobologna.beniculturali.it/mostre/RavennAntica/otium_ludens_09.htm)

7.1.9 Bing maps, 05/02/2017

7.2.1 Varriale I., *Posillipo. Storia e Mito*, Valtrend Editore, 2011, pag. 63

7.2.2, 7.2.3, 7.2.4 Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.

7.2.7 Alvino F., *La Collina di Posillipo*. Grimaldi & C. Editori, 2001.

7.3.1, 7.3.5 Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.

7.3.6 Rilievi Barone-Lumaga, 1989-1993.

7.3.7, 7.3.8, 7.3.9 Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.

7.4.1, 7.4.2 *Gaiola: parco archeologico e parco sommerso*, Mondadori Electa, Verona, 2009.

7.4.3 [www.posillipodream.it/luoghi.asp](http://www.posillipodream.it/luoghi.asp)

## Fonti delle immagini Capitolo Ottavo

8.13 Amato, Evangelista, Nicotera, Viggiani, “The Crypta Neapolitana; a Roman Tunnel of the Early Roman Age”, 2000.

8.14 a 8.21 Basso P., *Via per monte excisa: strade in galleria e passaggi sotterranei nell'Italia romana*. L'Erma di Bretschneider, 1997.

8.22 Alvino F., *La collina di Posillipo, con 42 tavole di Achille Gigante*, Grimaldi & C. Editori, Napoli, 2001.

8.24, 8.29, 8.31 Immagini dall'Archivio Fotografico della Soprintendenza per i Beni Archeologici di Napoli, 1987.

8.32 a 8.35 Mattes J., “Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century.”, *International Journal of Speleology*, Vol.44

8.36

a) [www.faro.com/it-it/prodotti/rilievo-3d/laser-scanner-cam2-focus-3D/panoramica](http://www.faro.com/it-it/prodotti/rilievo-3d/laser-scanner-cam2-focus-3D/panoramica)  
[www.leica-geosystems.it/.../hds/hds/.../Leica%20HDS6200%20BRO%20782714\\_it.pdf](http://www.leica-geosystems.it/.../hds/hds/.../Leica%20HDS6200%20BRO%20782714_it.pdf)

b) [www.ecoteksrl.com/georadar.html](http://www.ecoteksrl.com/georadar.html)

c) <http://tilt-drone.myshopify.com/collections/industrial>

d) Hahnel et all., “A system for volumetric robotic mapping of underground mines”

<http://www.trimble-italia.com/infrastrutture>

8.3.7 [www.geoslam.com](http://www.geoslam.com)

## Fonti delle immagini Capitolo Nono

9.1.1 e 9.1.2 [omero.humnet.unipi.it/matdid/180/theatron.ppt](http://omero.humnet.unipi.it/matdid/180/theatron.ppt)

9.1.4 a 9.2.1 Pappalardo U., *Teatri greci e romani*, Arsenale Editrice, 2007.

9.2.2 Rielaborazioni da Salvatore M., “Le geometrie del teatro latino di Vitruvio”, *Dalla didattica alla ricerca*. Alinea Editrice, 2007.

9.2.3 <http://vwhl.soic.indiana.edu/villa/index.php>

9.2.4 <http://www.villaadriana.beniculturali.it/index.php?it/140/teatro-greco>

9.6.8 Ridisegno da Iuliano M., *Promenade a Posillipo*. Edizioni Simone, 2002.ò\_.

9.6.9 a 9.7.2 Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.

## BIBLIOGRAFIA

### RICERCA E DOCUMENTAZIONE IN AMBITO ARCHEOLOGICO

#### Manuali

- Bianchini M., *Manuale di rilievo e documentazione digitale in archeologia*, Aracne Editore, 2008.
- Docci M., Maestri D., *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Laterza, 2009.
- Medri M., *Manuale di rilievo archeologico*, Laterza, 2006.
- Museum of London, Archeology Service, *Archaeological Site Manual*, Third Edition, London, 1994.

### Evoluzione del linguaggio grafico

#### Testi

- de Rubertis R., *Il disegno dell'architettura*, Carocci Editore, 2002.
- Manacorda D., *Il sito Archeologico tra ricerca e valorizzazione*, Carocci Editore, 2014.
- Quici F., *Il disegno cifrato. Ermenensi storica del disegno di architettura*, Officina Edizioni, 1996.

#### Articoli ed estratti

- Demonet, C., “Rilievo architettonico e archeologia, <<Architetti antiquari>> a Roma nel Quattrocento”, *Giornata di studi - Grand Tour del Terzo Millennio*, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, 2011.
- De Rubertis R., “Il rilevamento di Piazza Augusto a Roma”, *La conoscenza dell'architettura: il rilievo e le nuove tecnologie informatiche*, Bollettino della Biblioteca della Facoltà di Architettura dell'Università degli studi di Roma - “La Sapienza”, Gangemi Editore, 1999, pp. 25-32.
- Portoghesi P., in Di Grazia V. (a cura di), *Rilievo e disegno nell'archeologia e nell'architettura, Tecniche, Opinioni e Teorie*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.
- Viollet-Le-Duc E., “Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle”, Edition Bance, 1854-1868, pp.560-561, in Di Grazia V., *Rilievo e disegno nell'archeologia e nell'architettura, Tecniche, Opinioni e Teorie*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.

## La ricerca in ambito archeologico

### Testi

- Boni G., “Il metodo negli scavi archeologici”, *Nuova Antologia*, Serie IV, Vol. XCIV, Roma 1901, pp. 312-322.
- D’Andrea A., *Documentazione archeologica, standard e trattamento informatico*, Archaeolingua, 2006.
- Di Grazia V., *Rilievo e disegno nell’archeologia e nell’architettura, Tecniche, Opinioni e Teorie*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.
- Harris E.C., *Principles of Archaeological Stratigraphy*, Academic Press, London, 1979.
- Hodder I., *Archaeological theory today*, Second Edition, Polity Press, 2012.
- Hodder I., *The archaeological process*, Oxford, 1999.
- Hodder I., *Towards reflexive method in archaeology: the example at Catalboyuk*, McDonald Institute for Archaeological Research, University of Cambridge, 2000.
- Manacorda D., *Prima lezione di archeologia*, Editori Laterza, 2012.
- Piggot S., *Antiquity Depicted: Aspects of Archaeological Illustration*, London, Thames and Hudson, 1978.
- Moser S., in Hodder I. (edited by), *Archaeological Theory Today*, Polity Press, 2012.

## RILIEVO REALITY-BASED

### Testi

- Bollettino della Biblioteca della Facoltà di Architettura dell’Università degli studi di Roma “La Sapienza”, *La conoscenza dell’architettura: il rilievo e le nuove tecnologie informatiche*, Gangemi Editore, 1999.
- Bryan P., Blake B., Bedford J., *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, English Heritage, 2009.
- De Luca L., *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*. Dario Flaccovio Editore, 2011.
- Guidi G., Russo M. e Beraldin J., *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill Education, 2010.
- JCGM, *International vocabulary of metrology – Basic and general concept and associated terms (VIM)*. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), France, 2008.
- Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing, 2011.

- Remondino F., Campana S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*. BAR International Series 2598, 2014.

### Articoli

- Amenta N., Bern M., “Surface reconstruction by Voronoi filtering”. *Discrete and Computational Geometry*. Vol. 22 (4), 1999, pp. 481-504.
- Angelini A., Gabrielli R., “Laser scanning e photo-scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici ed archeologici”. *Archeologia e Calcolatori* 24, pp.379-394, 2013.
- Arrighetti A., Cavalieri M., “Il rilievo fotogrammetrico per le nuvole di punti RGB della Sala Triabsidata di Aiano-Torraccia di Chiusi” in *Archeologia e Calcolatori*, n.23, 2012, pp.121-133.
- Bartoli M., “Metodologie e strumenti di studio digitali per l’archeologia. Nuovi strumenti per la documentazione archeologica”, *Digitalia*, Vol.1, 2014.
- Bawden G., Howle J., Bond S., Shriro M, Buck P., “ Three-Dimensional Imaging, Change Detection, and Stability Assessment during the Centerline Trench Levee Seepage Experiment Using Terrestrial Light Detection and Ranging Technology, Twitchell Island, California, 2012”, *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1092*, 28 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141092>.
- Beraldin, J.-A., Picard, M., Bandiera, A., Valzano, V., Negro, N., “ Best Practices for the 3D Documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy”. *Proc. SPIE*, Vol. 7864, pp. 78640J-78640J-15, 2011.
- Bernardini F., Rushmeier H. “The 3D Model Acquisition Pipeline”, *Computer Graphics Forum*, NCC Blackwell, Vol. 21(2), pp.149-172, 2002.
- Biason A., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F, Lingua A., Rinaudo F., “Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio”, *Relazione finale del programma Interr, III A-ALCOTRA Prog. n.179 Riskydrogeo*, 2006.
- Bitelli G., “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali”, *Atti 6a Conferenza Nazionale ASITA*, IX-XXIV, Perugia, 2002.
- Bitelli G., Valentina G., Remondino F., Vittuari L., “The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation”, *Proceeding of SPIE – The international Society for Optical Engineering*, 2007.
- Bosse M., Zlot R., Flick P., “Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3D Range Sensor with Application to Mobile Mapping”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 28, n° 5, 2012.
- Bosse M., Zlot R., Flick P., “Continuous 3D Scan-Matching with a Spinning 2D Laser”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- Bosse M., Zlot R., “ Three-dimensional mobile mapping of caves”. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 76, no. 3, p. 191–206.

- Bosse M., Zlot R., “Efficient Large-Scale Three-dimensionale Mobile Mapping for Underground Mines”, *Journal of Field Robotics*, Vol.31 n°5, 2014.
- Bosse M., Greenop K., Jarzab Z., Juckes E., Roberts J., Zlot R., “Efficiently Capturing Large, Complex Cultural Heritage Sites with Handheld Mobile 3D Laser Mapping System”, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 15 n°6, 2014.
- Brown D.C., 1971, “Close-range camera calibration”. *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866.
- Cazals F., Giesen J., “Delaunay triangulation based surface reconstruction”. *Effective Computational Geometry for Curves and Surfaces*, J.-D- Boissonnat and M. Teillaud (Eds), Springer-Verlag, Mathematics and Visualization, 2006, pp. 231- 276
- Čeppek, A., 2002. “The GNU Gama project-adjustment of geodetic networks”. *Acta Polytechnica*, Vol. 42(3).
- Chiabrando F., Costamagna E., Spanò A., “Passive optical sensors and related image matching methods for 3D modeling”, *Territorio Italia*, n.1, 2013.
- Chiabrando F., Lingua A., Maschio P., Rinaudo F., Spanò A., “Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico”, *Atti del Convegno-Una giornata informale per i 70 anni del prof. Carlo Monti*, Politecnico di Torino, 2012.
- Curci A., Fiorini A., “Il rilievo delle superfici tramite fotogrammetria 3D: dal microscavo dei complessi tombali agli scavi in open area”, *Archeologia e calcolatori*, n.24, 2013, pp. 355-370.
- De Felice G., Sibilano M.G., Volpe G., “Ripensare la documentazione archeologica: nuovi percorsi per la ricerca e la comunicazione”, *Archeologia e calcolatori*, n.19, 2008, pp.271-291.
- Durrant-Whyte H., Bailey T., “Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006.
- Fiorillo F., Remondino F., Barba S., Santoriello A., De Vita C., Casellato A., “3D digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013
- Gallay M., Kaňuk J., Hofierka J., Hochmuth Z. & Meneely J., “Mapping and geomorphometric analysis of 3-D cave surfaces: a case study of the Dómica Cave, Slovakia”. *Geomorphometry 2105*, Zwoliński Z., Jasiewicz J., Mitasova H. & Hengl T. (Eds.), pp. 69-73 (available at: <http://geomorphometry.org/2015>)
- Gandolfi S., Forlani G., “Catasto stradale, mobile mapping e navigazione geodetica nelle reti di stazioni permanenti”, *PRIN 2004: I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government*, Cap. 6.
- Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini D., “Photogrammetry and Laser Scanning for Archeological Site 3D Modeling- Some Critical Issues”, *Proc. 24th Intern.CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2-6 Sept. 2013.
- Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini D., “3D survey and modeling of archaeological sites – some critical issues”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013
- Guidi G., Russo M., “The role of digital models in Cultural Heritage preservation”, *IX International Forum Le Vie dei Mercanti*, 2011.
- Guidi G., “Metrological characterization of 3D imaging devices”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical*

- Engineering*. 2013. DOI: 10.1117/12.2021037
- Gruen A., Remondino F., Zhang L., “The Bamiyan Valley. Landscape Modeling for Cultural Heritage. Visualization and Documentation.” *Institute for Geodesy and Photogrammetry ETH*, Zurich.
- Guidi G., Remondino F., Russo M., Menna F., Rizzi A., Ercoli S., “A Multi-Resolution Methodology for the 3D Modeling of Large and Complex Archeological Areas”, *International Journal of Architectural Computing*, issue 01, volume 07, pp.39-55, 2009.
- Guidi G., Remondino F., Russo M., Menna F., Rizzi A., “3D Modeling of Large and Complex Site Using Multi-sensor Integration and Multi-resolution Data”, *The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, M. Ashley, S. Hermon, A. Proenca, and K. Rodriguez- Echavarria (eds), 2008.
- Guidi G., Russo M., Anghelldu D., “3D Survey and virtual reconstruction of archaeological sites”, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2014.
- Lambers K., Remondino F., “Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications”. *Proc. Of 35th CAA (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology)*, Conference Berlin, April 2–6 , 2007.
- Laurent J., 2014. “Use of 3D scanning technology for automated inspection of tunnels”. *Proc. World 309 Tunnel Congress 2014*.
- Mattes J., “Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century.”, *International Journal of Speleology*, Vol.44, pp. 251-266.
- McFarlane D.A., Roberts W., Buchroithner M., Van Rentergem G., Lundberg J. & Hautz S., 2015. “Terrestrial LiDAR-based automated counting of swiftlet nests in the caves of Gomantong, Sabah, Borneo”. In: *International Journal of Speleology*, Vol. 44(2), pp. 191-195.
- Merlo A., Fantini F., Aliperta A., Lavarotti G., Lopez Hernandez J.L., “Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality-based: la chiesa della Compañía de Jesús”. *DISEGNARECON* 12, 2013.
- Ministero per i beni e le attività culturali, Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione, Soprintendenza Archeologica di Roma, *Norme per la redazione della scheda del saggio stratigrafico*, Roma, 1984.
- Moons T., Van Gool L., Vergauwen M., “3D Reconstruction from Multiple Images, Part 1: Principles”. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 4(4):287-404, 2008. DOI: 10.1561/0600000007.
- Nocerino E., Fiorillo F., Minto S., Menna F., Remondino F., 2014. “A non-conventional procedure for the 3D modeling of WWI forts”. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* , Vol. XL-5, pp. 457-464.
- Remondino F., “Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse”, *DISEGNARECON*, Vol.4 n°8. 2011, pp.90-98. ISSN 1828-5961
- Remondino F., El-Hakim S., “Image-based Modelling: a Review”. *The photogrammetric record*. 21: 269-291. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x
- Remondino F., El-Hakim, S., Gruen, A., Zhang, L., “Turning images into 3-D models”. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(4), 2008, pp. 55-65.
- Remondino F., Fraser C., “Digital camera calibration methods. Considerations and comparison”. *ISPRS Volume XXXVI*,

- Rodríguez-González, P., Nocerino, E., Menna, F., Minto, S., Remondino, F., 2015. “3D surveying & modeling of underground passages in WWI fortifications”. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40(5), pp. 17-24
- Roncat A., Dublyansky Y., Spotl, C., Dorninger P., “ Full-3D surveying of caves: A case study of Marchenhohle (Austria)”. *Proc. LAMG2011 Conference*, pp. 1393-1403, 2011.
- Russo M., Guidi G., Remondino F., “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico”, *Archeologia e calcolatori*, n.22, 2011, pp. 169-196.
- Sarazzi D., Mancon L., Julitta F., Quartieri A., “Piattaforma UAV per l’acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche”, *Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno, 15-18 novembre, 2011.
- Vico L., Vassallo V., “Methodologies and techniques for the reconstruction of ancient architectures”. *Proceedings of the 38° Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA2010.
- Voltini F., Remondino F., Pontin M., Girardi S., Rizzi A., Gonzo L., “Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di beni culturali”, *Proc. of X ASITA Conference*, Bozen, 2006.
- Vosselman G., “Design of an indoor mapping system using three 2D laser scanners and 6 DOF SLAM”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. II-3, 2014.
- Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckes, E., Robert, J., 2013. “Efficiently capturing of large, complex Cultural Heritage sites with a handheld 3D mobile laser mapping system”. In: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 15(6), pp. 670-678.
- Zlot, R., Bosse, M., 2014. “Three-dimensional mobile mapping of caves”. In: *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 76(3), pp. 191–206.
- Wang W., Weisen Z., Huang L., Vimarlund V., Wang Z., “Applications of terrestrial laser scanning for 281 tunnels: A review”. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering* Vol. 1, pp. 325-337. 2014.

## VIRTUAL ARCHAEOLOGY

### Testi ed articoli

- Agugiaro G. , Remondino F., Girardi G., von Schwerin J., Richards-Risetto H., De Amicis R., “A web-based interactive tool for multi-resolution 3D models of a Maya archaeological site”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W16, 2011.
- Baldassari G. L., Demetrescu E., Pescarin S., Eriksson J., Graf H., “Behind Livia’s Villa: A case study for devolution of Large Scale Interactive ‘in-site’ to ‘on-line’Application”. *Design, User Experience and Usability*. Second International Conference, DUXU 2013, Part IV, pp. 238-247.
- Barcelò J., Forte M., Sanders D., “The diversity of archaeological virtual worlds”, *Virtual Reality in Archaeology*, Archeopress Oxford, 2000.

- Beacham R., Denard H., Niccolucci F., “An Introduction to the London Charter”, *The e-revolution of Information Communication Technology in Cultural Heritage: where hi-tech touches the past: risks and challenges for the 21st century*, in Ioannides M. et al. (eds), Short papers from the joint event CIPA/VAST/EG/EuroMed, Budapest: Archaeolingua, 2006.

- Ben Kacyra O., “CyArk 500. 3D Documentation of 500 Important Cultural Heritage Sites”, in *Photogrammetric Week '09*, Dieter Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 2009.

- Borghini S., Carlanì R., “La restituzione virtuale dell’architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti”, *DISEGNARECON*, 2011.

- Brusaporci S., Trizio I., “La Carta di Londra e il Patrimonio Architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione”, *SCIRES-IT, SCientific REsearch and Information Technology*, Vol 3, Issue 2, pp.55-68, 2013. e-ISSN 2239-4303, DOI 10.24423/i22394303v3n2p55.

- Ch’ng E., Gaffney V., *Visual Heritage in the Digital Era*, Henry (Eds), 2013.

- Der Manuelian P. “Giza 3D: Digital Archaeology and Scholarly Access to the Giza Pyramids: The Giza Project at Harvard University.” *Proceedings of DigitalHeritage*, France, October 28 - November 1, 2013, vol. 2: 727-734.

- Forte M., “Introduction to Cyber-Archaeology”, *Cyber-Archaeology*, Maurizio Forte (Eds), BAR International Series 2177, 2010.

- Forte, M., “Cyber archaeology: A post-virtual perspective”. *Between humanities and the digital*. Svensson & Goldberg (Eds).Cambridge, MA: MIT Press. 2015.

- Gianolio S., *Archeologia Virtuale: la metodologia prima del software*, Espera, 2012.

- Gonizzi Barsanti S., Caruso G., Micoli L., Covarrubias Rodriguez M., Guidi G., “3D visualization of Cultural Heritage artefacts with Virtual Reality devices”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W7, 2015.

- Guidi G., Russo M., Anghelèddu D., “3D survey and virtual reconstruction of archaeological sites”, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2014.

- Guidi G., Russo M., “The role of digital models in Cultural Heritage preservation”, *IX International Forum Le Vie dei Mercanti*, 2011.

- Laboratorio de Arqueologia, Patrimonio y Tecnologías Emergentes (LAPTE), *Virtual Archaeology Review*, Vol.1, 2010.

- Limoncelli M., “Applicazioni Digitali per l’Archeologia: il Restauro Virtuale”, *Digitalia*, n.1, 2011.

- Jimenez Fernández-Palacios, B., Morabito, D., Remondino, F., “Access to complex reality-based 3d models using virtual reality solutions”. *Journal of Cultural Heritage*, in press, 2016.

- Malfitana D., Gabellone F., Leucci G., Cacciaguerra G., Ferrari I., Giuri F., De Giorgi L., Pantellaro C., “Integrated methodologies for a new reconstructive proposal of the Amphitheatre of Catania”, *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation ‘ARQUEOLÓGICA 2.0’*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016.

- Melchora J., Martínez J., Bonafe C., Cabrera A., “La virtualizaciòn en el Museo Arqueologico de Burriana (Castellòn – Espana)”. *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation ‘ARQUEOLÓG-ICA 2.0’*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016.
- Pescarin S., Fanini B., Ferdani D., Lucci Baldassari G., Calori L., “Archeologia virtuale, realismo, interattività e performan- ce: dalla ricostruzione alla fruizione on line”, *DISEGNARECON*, 2011.
- Phillips N., *Development of an interactive virtual tour for Holmesglen Information Commons*, Available at: <http://nicolephillips.net/pdfs/virtual.PDF>
- Ripanti, Distefano, “Ricostruzioni, 3D e narrativa: strategie diversificate per la comunicazione dell’archeologia”, *Archeologia e Calcolatori*, n.4, 2013, pp. 174-180.
- Sanchez M., “Propuesta de reubicaciòn mediante reconstrucciòn virtual. Caso de estudio:Retablo Mayor de San Francisco de San Esteban de Gormaz (Soria)”, *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation ‘ARQUEOLÓGICA 2.0’*, Valencia (Spain), Sept. 5 – 7, 2016
- Sutherland I., “The Ultimate Display”, *Proceedings of IFIP Congress*, 1965. pp. 506-508.
- Takase, Yano, Nakaya, Isoda, Kawasumi, Matsuoka, Seto, Kawahara, Tsukamoto, Inoue, Kirimura, “Virtual Kyoto: visuali- zation of historical city with 4D GIS, virtual reality and web technologies”, *ISPRS*, 2008.

## POSILLIPO ED I CAMPI FLEGREI

- Alvino F., *La collina di Posillipo, con 42 tavole di Achille Gigante*, Grimaldi & C. Editori, Napoli, 2001.
- Basso, “Via per monte excisa: strade in galleria e passaggi sotterranei nell’Italia romana”. *L’Erma di Bretschneider*, 1997.
- Caputo P., “Viabilità e insediamenti nell’Italia antica”, *Atlante tematico di Topografia antica Atta 13*, L’Erma di Bretschneider, 2004.
- Caputo P., Regis C., “L’Anfiteatro cumano e le cavità artificiali di Cuma”, Cuma, *ACISiMGr XLV/III*, 2008.
- Caputo P., Farella E.M., Mauriello F., 2011. “La Crypta Romana di Cuma. Spazi e Culture del Mediterraneo”. *PRIN 2009-2011*. La scuola di Pitagora editrice.
- Castronuovo S., *Posillipo imperiale*, Altra Stampa Edizioni, 2000.
- Ciardiello R., *La villa romana*, L’Orientale Editrice, 2007, pp.147-162.
- De Fusco R., *Posillipo*, Electa Napoli, 2000.
- De Jorio A., *Guida di Pozzuoli e dintorni col suo atlante*. Napoli dalla Stamperia Francese, 1830.
- Diana A., *Posillipo e dintorni*, Luciano Editore, 2006.

- Fusco M., Trojano Gianpietri A., Fusco G.V., “Giunta al commento critico archeologico sul frammento inedito di Fabio Giordano intorno alle grotte del promontorio di Posilipo”. *Bullettino Archeologico Vesuviano*. Tipografia Trameter, Napoli, 1843, pp. 29, 30, 37.
- *Gaiola: parco archeologico e parco sommerso*, Mondadori Electa, Verona, 2009.
- Günther R.T., *Pausilypon : the imperial villa near Naples with a description of the submerged foreshore and with observations on the tomb of Virgil and on other Roman antiquities on Posilipo*, Oxford, 1913.
- Iuliano M., *Promenade a Posillipo*. Edizioni Simone, 2002.
- Lancelloti L. e Tommaselli A. (traduzione), *Passeggiata da Mergellina a Posillipo ed agli scavi di Coroglio*, Grimaldi & C., 2008.
- Lancellotti L., *Sullo scavo della Grotta di Sejano e sulla nuova strada di Coroglio*, Tipografia del Vesuvio, Napoli, 1840.
- Pappalardo U., *Il golfo di Napoli. Archeologia e storia di una terra antica*, Arsenale, 2006.
- Simeone M., Russo G.F., *Il Parco Sommerso di Gaiola*. Electa Napoli, 2005.
- Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta, *La grotta di Seiano e il Parco Archeologico del Pausilypon*, Electa Napoli, 1999.
- Soprintendenza Archeologica per le Province di Napoli e Caserta, *Napoli Antica*, Macchiaroli Editore, 1985.
- Varriale I., *Posillipo, storia e mito*, Valtrend Editore, 2011.
- Viggiani D., *I tempi di Posillipo. Dalle ville romane ai casini di delizia*, Electa, 1989.
- Viggiani D., *Posillipo Romana*, Robert Gunther, Electa Napoli, 1993.

## VILLE ROMANE MARITTIME

- Esposito A. e Lucignano A., “Ninfei marittimi imperiali nel Golfo di Napoli”, Bollettino di Archeologia on-line, *International Congress of Classical Archaeology*, Roma, 2008.
- Johannowsky W., Laforgia E., Romito M., Sampaolo V., *Le ville romane di età imperiale*, Società Editrice Napoletana, 1986.
- Marzano A., *Le ville marittime dell’Italia romana tra amoenitas e fructus*, Roma: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 2010.
- Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta, *Le ville romane nel golfo di Napoli*, Electa Napoli, 2000.

## TEATRI GRECI E ROMANI

- Beare W., *I Romani a teatro*, Editori Laterza, 2010.

- Ciancio Rossetto P, Pisani Sartorio G., *Teatri antichi greci e romani*. S.P.R., 2006.
- Maggio F, “Digital Vitruvio ovvero elogio del triangolo equilatero”, *DISEGNARECON*, vol. 5 n° 9, 2012.
- Pappalardo U., *Teatri greci e romani*, Arsenale Editrice, 2007.
- Salvatore M., “Le geometrie del teatro latino di Vitruvio”, *Dalla didattica alla ricerca*. Alinea Editrice, 2007.
- Zanelli A., *Trasportabile, Trasformabile. Idee e tecniche che per architetture in movimento*. Maggioli Editore, 2003.

## SITOGRAFIA E CONTENUTI ONLINE

<http://www.naimark.net/writing/aspen.html>

<http://vwhl.soic.indiana.edu/villa/mission.php>

<http://giza3d.3ds.com/#discover>

<http://mayaarch3d.org/>

<https://3dom.fbk.eu/projects/etruschi-3d>

<http://geoslam.com/>

CloudCompare, 2015. EDF R&D, Telecom ParisTech. <http://www.cloudcompare.org/>

<http://www.iccd.beniculturali.it/>

<http://mappaproject.arch.unipi.it/mod/Index.php>

[www.iso.org](http://www.iso.org)

[http://www.applanix.com/pdf/TIMMS\\_2\\_spec\\_sheet.pdf](http://www.applanix.com/pdf/TIMMS_2_spec_sheet.pdf)

<http://www.arqueologiavirtual.com/carta/>

<http://www.londoncharter.org/introduction.html>

[http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL\\_ID=17721&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL_ID=17721&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)

<http://itlab.ibam.cnr.it/index.php/teatro-di-catania/>

<http://www.itlab.ibam.cnr.it/vranficatania/vrtour.html?xml=tour.xml>

<https://sketchfab.com>

<http://potree.org/>

<http://3dom.fbk.eu/repository/3Dpointclouds/posillipo/main.html>

## TESI DI DOTTORATO

- D’Annibale E., “Fotogrammetria Close-Range e Visual Design per i Beni Culturali”, Tesi di dottorato in Scienze dell’Ingegneria, Curriculum Analisi e Progetto dell’Architettura e del Territorio Settore Disciplinare ICAR 06.

- Di Martino A.R., “Applicazioni di Interfacce Aptiche e Realtà Aumentata in ambiti di manutenzione industriale, formazione, medicina e beni culturali (IX ciclo)”, Università degli Studi di Salerno. Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali.

- Girelli V. A., “Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei Beni Culturali”, Tesi di dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche. Ciclo XIX.

- Lercari N., “Il linguaggio degli ambienti virtuali culturali: comunicare la storia di Bologna attraverso il progetto Nu.M.E.” Tesi di dottorato in Storia ed informatica, XXIII ciclo.

- Menna F., “Metodologie e tecniche per la modellazione tridimensionale inversa”, Tesi di dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, XXI ciclo.

- Toschi I., “ Validation tests and best practices supporting automated procedures in image-based 3D Modelling”, Tesi di dottorato in High Mechanics and Automotive Design & Technology, XXVI ciclo.



**Elisa Mariarosaria Farella** si laurea nel 2013 con lode in Architettura presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, con una tesi in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura dal titolo "La Crypta Romana di Cuma". Dal 2014 è cultrice della materia nel settore delle discipline della Rappresentazione del Dipartimento di Architettura di Napoli.

