

AlmaMater Studiorum – Università di Bologna  
Scuola di ingegneria e architettura

---

Corso di Laurea Magistrale in  
INGEGNERIA DEI PROCESSI E DEI SISTEMI EDILIZI

Tesi di laurea in  
Modellazione BIM

**Il Vestibolo di Piazza d'Oro  
Rilievi per la modellazione 3D ed il  
texturing**

*Laureando:*

Simone VIANELLO

*Relatore:*

Prof. Luca CIPRIANI

*Correlatore:*

Prof. Filippo FANTINI

---

Anno Accademico 2015/2016 - I sessione



# Indice

1. Introduzione.....	5
1.1. Obiettivi e finalità .....	6
2. Cenni storici su Villa adriana .....	8
2.1. Villa Adriana.....	8
2.2. Piazza d'Oro.....	16
2.3. Vestibolo ottagonale .....	19
3. Modellazione reality based.....	24
3.1. Modellazione tramite sensori attivi.....	25
3.2. Modellazione tramite sensori passivi.....	28
3.3. Pipeline adottata.....	29
4. Creazione del modello tridimensionale .....	30
4.1. Fase 1: Esportazione point cloud del vestibolo.....	31
4.2. Fase 2: Importazione point cloud in Geomagic Design X.....	35
4.3. Fase 3: Pulizia delle nuvole di punti .....	37
4.4. Fase 4: Generazione mesh .....	38
4.5. Fase 5: Unione e creazione modello high poly (HP) .....	40
4.6. Fase 6: Creazione mesh low poly (LP).....	41
5. Image Based Data Processing (IBDP).....	44
5.1. Normal map .....	46
5.2. UV mapping (parametrizzazione).....	49
5.3. Creazione normal map .....	51
6. Texture del colore diffuso .....	57
6.1. Spazio colore.....	60
6.2. High dynamic range (HDR).....	63

7. Creazione texture del colore diffuso.....	65
7.1. Acquisizione fotografica.....	66
7.2. Condizioni meteorologiche.....	69
7.3. Correzione fotografie (color processing).....	71
7.4. Allineamento fotografie.....	72
7.5. Allineamento al modello da Laser Scan.....	74
7.6. Creazione texture.....	78
7.7. Correzione illuminazione texture.....	79
8. Render e tavole.....	88
9. Conclusioni.....	94
9.1. Il modello 3D.....	94
9.2. Texture del colore diffuso.....	95
9.3. Finalità e sviluppi futuri.....	96
10. Glossario.....	97
11. Bibliografia e sitografia.....	98



# 1. Introduzione

Il caso studio del vestibolo ottagonale di Villa Adriana ha dato la possibilità di applicare ad un edificio di notevole valore storico e artistico tecniche di restituzione digitale e di modellazione tridimensionale basate su applicativi di modellazione geometrica, con lo scopo di generarne il modello 3D digitale fotorealistico e polifunzionale. Nel caso specifico del vestibolo, un modello tridimensionale di questo tipo risulta utile a fini documentativi, a sostegno di ipotesi costruttive e come strumento per la valutazione di interventi di restauro.

Il percorso intrapreso ha permesso di valutare le criticità nelle tecniche di acquisizione, modellazione e foto-modellazione tridimensionale applicate in ambito archeologico, tecniche usate abitualmente anche in settori quali l'architettura, il design industriale ma anche nel cinema (effetti speciali e film d'animazione) e in ambito videoludico, con obiettivi differenti: nel settore del design e della progettazione industriale il Reverse Modeling viene impiegato per eseguire controlli di qualità e rispetto delle tolleranze sul prodotto finale, mentre in ambito cinematografico e videoludico (in combinazione con altri software) permette la creazione di modelli realistici da inserire all'interno di film o videogiochi, (modelli non solo di oggetti ma anche di persone).

La generazione di un modello tridimensionale ottenuto tramite Reverse Modeling è frutto di un processo opposto alla progettazione e può avvenire secondo diverse strategie, ognuna delle quali presenta vantaggi e svantaggi specifici che la rendono più indicata in alcuni casi piuttosto che in altri. In questo studio sono state analizzate acquisizioni tridimensionali effettuate tramite Laser Scan e tramite applicazioni Structure from Motion/Dense Stereo View.

Altro tema affrontato consiste nell'approfondimento delle tecniche di Image Based Data Processing (IBDP), che permettono di ridurre le dimensioni dei modelli tridimensionali (tuttavia mantenendo un elevato livello di dettaglio visivo). I modelli 3D generati attraverso il Reverse Modeling sono caratterizzati da un elevato grado di dettaglio che di contro li rende estremamente pesanti e di difficile gestione se non con computer o workstation professionali. Grazie alle tecniche di IBDP, viene richiesta una minore

capacità computazionale e si estende la fruizione dei modelli ad un più ampio bacino di utenti.

Ulteriore fase consiste nell'attribuire al modello 3D anche il colore proprio tramite applicazione di una texture, fase realizzata con la tecnica dello Structure from Motion. Inoltre, in questo caso studio è stata applicata una tecnica di rimozione delle ombre e correzione dell'illuminazione che ha permesso di migliorare la qualità texture. Infatti, essendo la texture acquisita in ambiente esterno tramite fotocamera digitale, il colore rilevato non corrisponde a quello proprio dell'oggetto, ma è influenzato da ombre, riflessi ed illuminazione indiretta. Simulando l'illuminazione della scena, è stato possibile valutare l'apporto di questi effetti indesiderati sul modello tridimensionale, correggendo la texture ed ottenendo un risultato più neutro e veritiero.

Il risultato finale di questo studio è un modello tridimensionale ad elevato dettaglio ma di dimensioni contenute, comprensivo di texture del colore e visionabile nonché sezionabile da qualsiasi punto di vista e secondo ogni piano a seconda degli scopi specifici dell'utilizzo del modello stesso.

Tuttavia, nel corso dello studio sono stati evidenziati alcuni limiti in diverse fasi del processo di Reverse Modeling applicato in ambito archeologico, la cui analisi critica mira ad ottenere in futuro un'affinazione delle tecniche di RM in questo particolare ambito.

### *1.1. Obiettivi e finalità*

Obiettivo principale dello studio è quello di fornire una documentazione digitale del vestibolo ottagonale completa sia dal punto di vista del supporto tridimensionale che sotto forma di elaborati bidimensionali. Il modello 3D prodotto sarà costituito da mesh poligonali decimate con associate normal maps per il recupero del dettaglio visivo, in modo da ridurre le dimensioni del modello mantenendo un elevato grado di dettaglio. Verranno create anche le texture del colore diffuso del modello allo scopo di conferire realismo alla scena ed eseguire rendering fotorealistici.

Al contempo, sarà analizzato tutto il processo di generazione del modello, valutando criticità del processo, affidabilità del risultato ottenuto e individuando eventuali metodi per incrementare la qualità della restituzione.

A partire dal modello 3D, saranno realizzate tavole bidimensionali contenenti pianta, prospetti e sezioni principali del vestibolo. Tuttavia è comunque possibile ricavare ogni

tipo di sezione nonché viste sia prospettiche che ortogonali da ogni angolazione, a seconda delle necessità. Il modello 3D costituisce quindi il supporto iniziale, dal quale si ottengono le rappresentazioni bidimensionali necessarie a seconda del tipo di finalità.

Tali finalità possono essere:

- Illustrazioni finali, divulgazione
- Interventi di manutenzione o restauro
- Analisi della struttura, chiavi di lettura o ipotesi ricostruttive.

In questo specifico contesto, in sede finale saranno realizzati:

- Rendering fotorealistico simulando le condizioni di luce presenti sulla scena al momento dello scatto;
- Animazione della stessa scena;
- Tavole grafiche contenenti le sezioni del vestibolo secondo i principali piani.

## 2. Cenni storici su Villa adriana

### 2.1. *Villa Adriana*

“Il paesaggio della campagna romana, dall'aspetto dolcemente ondulato, ma con valli intagliate a picco nel tufo, ricco di effetti sorprendenti, e talvolta addirittura drammatico, con gli alti monti Albani e Sabini sullo sfondo, deve aver esercitato sugli antichi lo stesso fascino di oggi. Seduzioni paesaggistiche lo motivano come anche la lussureggiante vegetazione e la ricchezza di acque che, rispetto alla metropoli di Roma, procurano pure un clima più piacevole. Specialmente attorno a Tivoli, ma anche più in là nella zona montuosa, vennero costruite, fin dall'epoca repubblicana, numerose ville, che documentano come questi posti dovessero essere stati molto amati e ricercati quali alternative alle predilette località marine. Essi avevano inoltre il vantaggio di essere al confronto velocemente raggiungibili da Roma. Nel caso di Tivoli fu soprattutto il fiume Aniene, scendente dai monti in mormoranti cascate, ad aver attirato il potenziale proprietario della villa; infatti l'acqua ebbe in tutte le ville un ruolo centrale. Ad attrarre però potevano essere anche panorami piacevoli o freschi boschi; il riferimento alla natura circostante era ad ogni modo di importanza decisiva.”<sup>1</sup>

Villa Adriana si estende su un territorio di circa 120 ettari sui Monti Tiburtini, 28 chilometri a est di Roma. Voluta dall'imperatore Adriano, è stata realizzata in un breve arco di tempo nella prima metà del II secolo d.C., probabilmente tra il 117 e il 138 d.C. La villa è situata in una posizione strategica sotto molti punti di vista, sia per la presenza di risorse e materiali sia per la vicinanza a vie di comunicazione.

“Quasi immediatamente dopo la sua ascesa, Adriano fece un programma per la creazione di una consistente residenza di campagna nelle colline della montagna tiburtina fuori Roma. Il risultato [...] è stato la più grande villa conosciuta nel mondo romano. Un vasto palazzo e sede alternativa del governo, la villa appare quasi come una piccola città, per alcuni forse anche come l'impero in miniatura, audace esperimento nella progettazione e

---

<sup>1</sup> Storia dell'architettura italiana – Architettura romana – I grandi monumenti di Roma, a cura di Henner von Hesberg e Paul Zanker, Capitolo di Adolf Hoffman, Villa Adriana a Tivoli, Electa, 2009, pag 290-300

costruzione tecnica del suo edificio trasformava il sito in un vasto parco giochi architettonico, con qualche struttura che non aveva eguali nel mondo antico.”<sup>2</sup>



*Vista aerea di Villa Adriana (immagine da: Google Earth).*

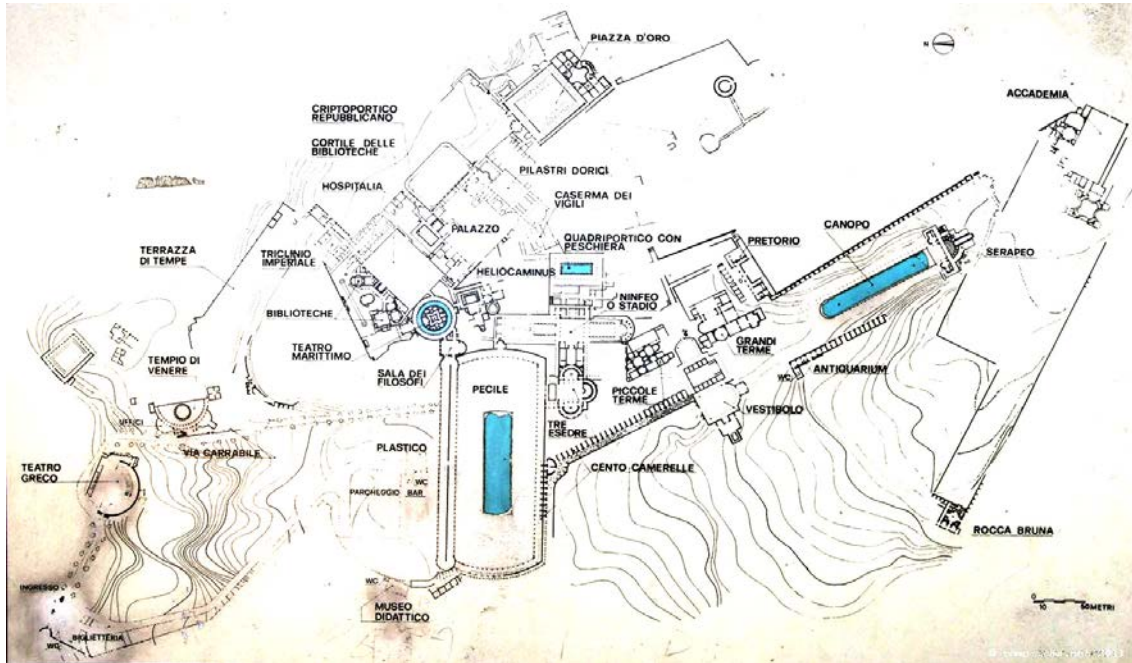
L’ubicazione di villa Adriana risultava ottimale, soprattutto sotto l’aspetto delle vie di comunicazione. La via Tiburtina garantiva un collegamento diretto con Roma e con la vicina città di Tivoli (in latino Tibur). Inoltre costituiva un’importante canale di comunicazione e trasporto anche il fiume Aniene, all’epoca navigabile e che permetteva di far giungere i materiali da costruzione dalle cave circostanti: terra, sabbia, pozzolana, travertino, tufo, calce, erano abbondantemente presenti nei pressi del sito di costruzione. “La villa occupa una posizione che poteva difficilmente essere migliorata. In un combinazione di splendidi paesaggi, topografia dalle grandi risorse ed eccellente rete di infrastrutture. L’area della villa si estende su un lungo terreno costituito da tufo e confinato da piccole valli ad est e ovest nelle quali scorrono due corsi d’acqua che forniscono un ambiente lussureggiante. A nord, essi si uniscono e successivamente confluiscono nel fiume Aniene. Il terreno presenta una leggera pendenza da sud verso nord che assicurava il drenaggio dell’acqua e permetteva la distribuzione dell’acqua tramite la rete idrica. È inoltre ottima l’esposizione alla luce solare e alle correnti d’aria; un santuario non distante forniva acque solfuree per il riscaldamento.”<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Hadrian empire and conflict, Thorsten Opper, The british museum press, 2008, pag 130-165

Villa Adriana è un sito molto vasto, ed il concetto di villa non è da intendersi nel suo senso più stretto, in quanto è più simile ad una città che ad un edificio. Al suo interno sono presenti molti gruppi di edifici con determinate funzioni e spazi distinti tra luoghi pubblici, privati e di servizio. Anche il processo di costruzione è associabile a quello di una piccola città, con un centro di origine più antica e successive espansioni che hanno creato nuovi spazi dalle varie destinazioni d'uso. Il nucleo del sito è infatti una piccola villa già esistente, risalente al II secolo a.C., che poteva offrire alcuni vantaggi: “essa era non lontana dalla via Tiburtina e quindi, per via del traffico, ottimamente collegata; il luogo regalava vedute affascinanti tanto sulle zone vicine quanto in lontananza: quando la visibilità è buona oggi si vede addirittura la cupola di San Pietro a Roma; e non da ultimo Adriano potrebbe aver riconosciuto fin dall'inizio la lunga lingua di terra come un'attraente prospettiva di sviluppo. L'acqua, una delle condizioni fondamentali della vita in villa, era presente sul posto in effetti forse solo in modeste quantità, ma poteva essere facilmente condotta alla villa attraverso un acquedotto e molto probabilmente tale problema venne anche risolto in questo modo.”<sup>1</sup>

“Per capire la villa, è necessario riottenere un'idea di ciò che è stato perduto, per avere una visione globale degli spazi dal punto di vista funzionale. È importante che lo spazio sia visto come aree usate attivamente per scopi specifici. Il termine ‘villa’, come concetto in uso ai Romani associato all'ozio o al lusso è fuorviante. Si pensa spesso che questo fosse il mondo privato di Adriano, dove poteva distaccarsi dalla vita pubblica e allontanarsi dalle relazioni col senato. Ma questo era anche il luogo dove si svolgeva parte della vita politica imperiale, a cui partecipavano in maniera più informale solo i membri dell'élite imperiale.”<sup>2</sup>



*Pianta del sito di Villa Adriana (immagine da: maricarte.blogspot.it).*

“Sarebbe sbagliato considerare la villa come spazio privato completamente estraneo agli affari politici. Al contrario, ci sono chiare prove che Adriano trattava affari di governo quando si trovava nella villa. Nell’agosto o settembre del 125, per esempio, inviò una lettera dalla villa agli ufficiali del santuario di Apollo a Delphi in Grecia.”<sup>1</sup>

“Per la comprensione e una valutazione della villa di Adriano si dimostra un ostacolo il fatto che noi oggi possiamo sì osservare il risultato complessivo di un processo costruttivo a lungo persistente, che richiese almeno tutto il periodo di regno dell'imperatore dal 117 fin verso la sua morte nel 138 d.C., ma che gli inizi di questo processo furono assolutamente modesti e di facile orientamento e i successivi addensamenti e ampliamenti appartengono ai principi fondamentali di questo procedimento. Situazioni architettoniche intermedie devono aver avuto validità per lungo tempo ed essere state utilizzabili. Questi stadi temporanei di una probabilmente incerta progettazione a lungo termine, richiesero, con il desiderio ritenuto sicuro di poter utilizzare la villa in modo permanente, un'efficiente autarchia delle singole parti, o quanto meno di determinati gruppi spaziali e fabbricati.”<sup>1</sup>

Secondo recenti studi sui laterizi sui quali è riportata l’incisione di bolli o date consolari, è stata formulata l’ipotesi che Villa Adriani sia stata edificata attraverso due fasi di costruzione. La prima si fa terminare intorno al 125 d.C. (i bolli più antichi riportano la

data del 117 d.C.), con la quale la maggior parte degli edifici era stata realizzata. La seconda fase, con anno di inizio 126 d.C., consistette tuttavia solo nell'ultimazione di una parte di edifici. "All'inizio - in parte ancora prima dell'ascesa al trono di Adriano - e a completamento dell'esistente antica villa a peristilio, furono piuttosto provvedimenti edilizi di piccolo formato, quelli con i quali l'imperatore pose nuovi accenti: le due cosiddette biblioteche; la villa circolare in miniatura sull'isola, detta teatro Marittimo; un impianto termale più piccolo, il cosiddetto Heliocamino, e, intercalato con un salone (sala dei Filosofi), un lungo e ampio portico molto allungato verso occidente. Soprattutto le biblioteche e il teatro Marittimo sono creazioni architettoniche singolari, che sembrano improntate ad un uso personale dell'imperatore stesso. Con le loro complicate forme e combinazioni spaziali, che a prima vista non ne lasciano assolutamente riconoscere uno specifico utilizzo, ma che di contro rendono possibili insolite esperienze spaziali e visive allineate per lo più in modo strettamente assiale, tali creazioni dimostrano già il carattere individualistico e sperimentale, che può valere quale una delle caratteristiche generali di una gran parte di villa Adriana. Quindi, mentre questi primi edifici erano riservati a quanto pare alla persona dell'imperatore e potrebbero essere stati luoghi di ritiro privato, le successive costruzioni trasformarono la villa a poco a poco in un luogo residenziale, alquanto ufficiale, che doveva soddisfare esigenze di cerimoniale e di palazzo, ma in questo contesto non siamo informati sui particolari."<sup>1</sup>

Nel complesso si contano oggi circa 900 tra stanze e corridoi. Un progetto molto vasto realizzato per parti, che probabilmente non è stato concepito già nella sua forma finale (anche se alcune ricerche sostengono il contrario), ma è stato oggetto di continui ampliamenti fino a raggiungere la sua massima espansione.

"Che il risultato finale fosse già esistito all'inizio dei lavori come una lontana visione dell'imperatore, è piuttosto improbabile. Tutt'al più come work in progress, magari addirittura come architettura sperimentale, si può definire forse il tipo di procedimento costruttivo di questo impianto, che spinge all'estremo il concetto di villa e mette in ombra ogni costruzione paragonabile ad essa."<sup>1</sup>





*Le grandi terme (immagini da: Wikipedia (sinistra), sights.seindal.dk (destra)).*

“Né uno sguardo alla pianta di villa Adriana né una passeggiata tra le sue rovine lasciano riconoscere un concetto generale del progetto o della funzione complessiva dell'impianto. In modo apparentemente arbitrario i singoli complessi architettonici si distribuiscono su tutta l'area e si notano direttamente tra loro; solo in casi eccezionali sono collegati con parti architettoniche che fanno da cerniera. A un'osservazione più attenta però si evidenziano regolarità che aiutano a spiegare sia il processo della progettazione che il concetto di utilizzazione. Abbiamo già citato come fattore essenziale della progettazione il privilegiare gli impianti rivolti verso l'interno; esso consentiva un'utilizzazione indipendente e flessibile di questi singoli complessi. Un secondo elemento di progettazione altrettanto importante, ma completamente contrario, va visto nell'orientamento dell'architettura verso obiettivi e punti panoramici, che utilizza di volta in volta le particolari condizioni del luogo. Quest'aspetto sta talmente in primo piano che da esso sono deducibili in parti essenziali sia la posizione di quasi tutti i complessi architettonici della villa che, di conseguenza, tutta la sua pianta. Ciò era valido già per le prime costruzioni di Adriano, come le citate biblioteche, dava ad esse il loro orientamento alternato spiegabile solo in questo modo, e vale infine forse anche per l'impianto più famoso di villa Adriana, la cosiddetta piazza d'Oro.”<sup>1</sup>

Ma nonostante alcune fonti ritengano improbabile che la Villa sia stata realizzata seguendo un piano generale stabilito a priori, nuovi studi tendono a sostenere il contrario facendo leva su elementi quali i criptoportici, ovvero i corridoi sotterranei di servizio.

“Tuttavia recenti ricerche suggeriscono che il layout generale della villa era basato su un complesso piano maestro stabilito inizialmente. Questo piano prevedeva l’ubicazione degli impianti idrici e di scarico, nonché una rete di passaggi sotterranei di collegamento che pare siano stati costruiti all’inizio della prima fase del progetto. Ancora più



*Il teatro marittimo, una delle prime costruzioni della villa (immagine da: Wikipedia).*

importante, l’assetto naturale del terreno è stato radicalmente modificato, con lo spostamento di colossali volumi di terreno. In totale, furono costruiti cinque grandi terrazzamenti. La precisione del lavoro ingegneristico è dimostrata dalla corrispondenza del livello del terreno riscontrabile in aree a grande distanza l’una dall’altra.”<sup>2</sup>

“La fantasia progettuale e la forza inventiva si concentrarono sulla struttura e sull’allestimento dei vestiboli, dei cortili a giardino, delle stanze di ricevimento e intrattenimento, delle sale da pranzo, delle architetture per godersi il panorama, e infine anche delle costruzioni commemorative. A ciò si aggiungono terme, teatri, alloggi per gli ospiti ed edifici utili come le caserme e i depositi, che a seconda della gerarchia e del valore rappresentativo, erano anch'essi strutturati in modo più o meno dispendioso. Tutti assieme formavano un ensemble architettonico, caratterizzato da una ricchezza di alternanze quasi inesauribile, con un complesso intreccio di rapporti e un concetto di utilizzazione nel quale si poteva tener conto di tutte le esigenze del piacevole intrattenimento in una cerchia piccola o grande, e dell'accoglienza privata o ufficiale degli



*Hospitalia, l'edificio dove soggiornavano i soldati di guardia romani (immagine da: Wikipedia).*

ospiti, a seconda dello status o anche dell'ora del giorno e delle condizioni atmosferiche legate alle diverse stagioni dell'anno. Alla flessibilità e agli effetti sorprendenti veniva così accordata la massima importanza. Un ruolo decisivo ebbe anche l'allestimento, al quale, seppure qui possiamo solo accennare: la decorazione dei pavimenti, le pareti e i soffitti, come anche il ricco ornamento scultoreo, l'utilizzo artistico dell'acqua e la strutturazione degli spazi liberi. Quasi ogni complesso architettonico fino agli impianti delle toilettes aveva giochi d'acqua che variavano in una molteplicità oltremodo grande il tema, analogamente alle pregiate decorazioni spaziali ricche di alternanze sia nei

materiali, sia nelle forme che nei colori, con stimoli ottici e acustici e con gradita frescura.”<sup>1</sup>

“In ambito edilizio la sua attenzione fu rivolta specialmente anche al miglioramento delle infrastrutture regionali. Il valore di simili provvedimenti l'imperatore lo seppe apprezzare anche nella sua propria villa: con una rete molto insolita e molto ramificata di strade di accesso e di approvvigionamento scavate nel tufo quali tunnel destinati forse soprattutto al trasporto di materiali edilizi e in prevalenza addirittura percorribili con mezzi, si riuscì a collegare tra loro, sotto terra, quindi in modo invisibile al visitatore, i singoli complessi architettonici e ad organizzare efficacemente non solo l'attività edilizia, ma soprattutto anche quella di servizio. Solo con queste costruzioni sotterranee molto impegnative fu possibile rendere agibile il complesso architettonico di villa Adriana cresciuto a poco a poco, addensatosi in un conglomerato di non facile orientamento e che infine aveva trascorso tutti i limiti della precedente architettura delle ville.”<sup>1</sup>

## 2.2. *Piazza d'Oro*

Piazza d'Oro è un cortile a giardino ricco di elementi architettonici ed elaborate decorazioni. È un ampio spazio di forma rettangolare, orientato secondo l'asse NO-SE, il cui ingresso è rappresentato dal vestibolo ottagonale oggetto di studio.

“Piazza d'Oro è, fra gli edifici della Villa Adriana, uno dei più straordinari e nel corso dei secoli le sue originali forme architettoniche e la decorazione preziosa hanno affascinato visitatori e studiosi, a partire da Baldassarre Peluzzi e Pirro Ligorio. Posta in uno dei punti più elevati dell'area della villa, oltre il settore noto come Palazzo Imperiale, costituisce un nucleo autonomo rispetto al resto della residenza, realizzato in parte su una terrazza artificiale e dotato di un orientamento diverso da ogni altra costruzione, con un leggero disassamento anche rispetto allo stesso Palazzo Imperiale. Raggiungibile da quest'ultimo edificio tramite un portico aperto a oriente verso la Valle di Tempe, essa presenta a nord un padiglione d'ingresso a pianta ottagonale, coperto da una complessa cupola con oculo centrale, che immette in un quadriportico a doppia navata racchiudente un giardino ornato da una lunga vasca al centro. Il lato meridionale è occupato da una grande sala centrale polilobata, con lati concavi e convessi, decorata di fontane e dotata di latrine, oltre la quale si trova un ninfeo curvilineo che conclude scenograficamente l'asse principale della



costruzione; ai lati sono due gruppi di sale coperte a volta aperte su due cortili con fontane.”<sup>3</sup>

“Questo cortile a giardino, straordinariamente ricco di elementi architettonici, con un raffinato vestibolo sormontato da una cupola sul lato d'accesso, culmina nel lato di fronte in un gruppo di spazi trasversali, nel quale si manifesta in modo esemplare la ricchezza di idee, quasi traboccante, della villa: sull'asse longitudinale del giardino si allaccia, dopo



*Vista aerea di Piazza d'Oro*

un portico a due navate, di nuovo un ambiente centrale sormontato da una cupola, il cui spazioso colonnato, con un ininterrotto andamento concavo e convesso oscilla in fuori e in dentro creando così una struttura spaziale leggera e dinamica che non conosce paralleli nell'antichità e che stimolerà all'imitazione in seguito solo gli architetti del Barocco. Questa spettacolare sala curvilinea è raccolta da un incurvato cortile a ninfeo, che non solo rappresenta il massimo apice artistico nel mutamento delle zone d'ombra e di luce che si alternano, ma che con il movimento dell'acqua dà all'insieme quell'importante dimensione supplementare già citata. Sull'asse trasversale seguono alla sala centrale piccoli peristili con colonnati ugualmente incurvati e altri ambienti, dai quali si poteva godere quell'esperienza spaziale, ulteriormente accresciuta da splendide decorazioni in materiali pregiati, con la sua molteplicità di prospettive e colpi d'occhio dalle posizioni

---

<sup>3</sup> Adriano e la Grecia – Studi e ricerche, Capitolo di Fabrizio Salvazzi, Piazza d'Oro a Villa Adriana: architettura e meraviglia, Electa, 2014, pag 71-80

più diverse. Nonostante il suo carattere riservato e chiuso, la piazza d'Oro sta però direttamente sul margine nordorientale della lingua di terra citata all'inizio; infatti anche questa architettura interna non voleva rinunciare alle possibilità delle vedute panoramiche: sul suo lato a valle si trovano parecchi ambienti, uno dei quali strutturato come un elaborato ninfeo curvo, che lasciano spaziare lo sguardo sulla cosiddetta valle di Tempe confinante a nord-est, con il suo lembo di tufo, e su Tivoli, che si scorge in lontananza.”<sup>1</sup>

Come per altri edifici di Villa Adriana, anche Piazza d'Oro non è definibile nelle sue funzioni sulla base della forma, distaccandosi da uno dei principi della tradizione architettonica romana. È possibile che fosse luogo di diverse funzioni, ma sicuramente era uno spazio frequentato dall'imperatore, visti i numerosi elementi di pregio architettonico e decorativo. “Quasi tutti gli studiosi sono concordi nel considerare il complesso un triclinio di frequentazione imperiale, che peraltro si affiancava agli altri molteplici presenti nella villa. Ma questa poteva non essere l'unica funzione: si sono proposti, oltre a quello simposiaco, usi come sala delle udienze oppure luogo di epifania imperiale. De Franceschini ipotizza che si tratti della biblioteca della villa, sulla base del confronto con il templum Pacis a Roma e con la Biblioteca di Atene, anche se non esclude la possibilità che la sala polilobata potesse essere impiegata per i banchetti. Stierlin vi vede un tempio-ninfeo, con la sala centrale ipetra utilizzabile come triclinio imperiale. Altri aspetti di Piazza d'Oro sono stati indagati, come la struttura e il funzionamento del giardino, oppure elementi e temi della decorazione, mentre una lettura complessiva dell'edificio è stata spesso trascurata o risolta attraverso la ripetizione delle ipotesi prevalenti. Si vuole qui attirare l'attenzione su alcuni temi, che siano di aiuto e di proposta a una interpretazione generale dell'edificio.”<sup>3</sup>

### 2.3. *Vestibolo ottagonale*

Il vestibolo oggetto di studio è un padiglione a pianta ottagonale con cupola, e costituisce l'ingresso di Piazza d'Oro, un'ampia porzione del sito di Villa Adriana datata intorno al 125 d.C. Lo studio di edifici a pianta ottagonale di epoca romana assume notevole importanza dal momento che non solo è esiguo il numero di edifici pervenuti fino ad oggi, ma essi si trovano in stato di progressivo deterioramento, che ne compromette non solo l'aspetto ma anche la struttura.



*Il vestibolo ottagonale costituiva l'accesso settentrionale a Piazza d'Oro (Rilievo digitale in ambito archeologico: frammenti di Piazza d'Oro, Eduardo Baviera Llópez, Milo Montalti, Tesi di Master 2014-2015)*

“Il padiglione d'ingresso è considerato, a ragione, uno degli elementi più originali del complesso. La forma ottagonale della pianta viene dilatata sugli assi principali in quattro nicchie rettangolari traforate – due servono a collocare le porte, le altre due ospitano finestre precedute da due fontane - , sulle diagonali in quattro nicchie semicircolari, forse per accogliere statue. La copertura, con la cupola a ombrello che sembra apparentemente retta dalle colonne, richiama un baldacchino sia in termini di leggerezza sia per l'uso del colore nelle membrature architettoniche e sulle pareti, interamente in lastre di marmo.

Prima di Piazza d'Oro, una simile struttura sarebbe stata utilizzata in un edificio termale e alla conclusione di un percorso. Il suo impiego in un contesto 'privato', come atrio e propileo (dato che si colloca all'esterno della pianta del complesso monumentale), rappresenta una soluzione del tutto nuova, il cui compito sembra quello di rimarcare in maniera chiara l'ingresso in un edificio in qualche modo speciale e di indurre alla meraviglia lo spettatore, anticipando quello che lo attenderà all'interno: il lusso dei materiali, l'originalità e la fantasia delle forme, che raggiungono limiti nuovi per l'epoca sia per la statica sia per la capacità tecnica nella realizzazione e che si fanno ammirare nella loro struttura – il padiglione mostrava all'esterno la sua complessità volumetrica, contro la pratica dell'architettura romana - , rompendo schemi tradizionali di principi costruttivi, soluzioni decorative e di rifinitura, associazione rigida di forma e funzione. Se si pensa a quello che avviene in due edifici spesso citati come termini di confronto per Piazza d'Oro, la Biblioteca di Atene e il Traiano di Italica, le cui strutture d'ingresso sono adeguate alla tradizione, l'eccezionalità e l'originalità della scelta sono evidenti.

L'accesso unico e monumentalizzato, ma anche controllabile in termini di sicurezza e di filtro dei frequentatori, appare simile a quello di altri complessi della villa - in particolare il Teatro Marittimo - nei quali l'atrio sottolinea con la sua monumentalità il ruolo dell'edificio e contemporaneamente ne maschera la funzione con il ricorso a forme insolite o destinate ad altri usi, generando inoltre la veduta interna del l'edificio in tutta la sua lunghezza attraverso un cannocchiale ottico, vero punto di vista focale per lo spettatore fortunato che può godere di una simile visione.”<sup>3</sup>

L'impostazione ottagonale era molto usate nelle cupole romane, addirittura all'interno della stessa Villa Adriana. Nei casi in cui lo stato di conservazione imperfetto impedisca una precisa ipotesi ricostruttiva, è possibile verificare una corrispondenza geometrica in altre cupole della stessa tipologia.

“Sia gli studi di Rakob sia quelli di Hansen rilevavano, seppur da posizioni diametralmente opposte, l'evidente affinità formale presente nelle planimetrie della cosiddetta sala ottagonale delle Piccole Terme e dell'aula ottagonale della Piazza d'Oro, con la differenza sostanziale che la prima presenta significative porzioni della copertura ancora in buone condizioni di conservazione, mentre nella seconda sono completamente assenti i frammenti di una eventuale cupola in concreto. Con l'obiettivo di comprendere la natura morfologica e quindi le ragioni geometriche alla base della singolare copertura



della sala ottagonale delle Piccole Terme, anche al fine di valutarne una possibile relazione con l'originaria copertura del padiglione meridionale di Piazza d'Oro, si è deciso di intraprendere una campagna di rilevamento mediante Laser Scan.

Anche in questo caso, i modelli digitali hanno giocato un ruolo importante per due distinti motivi: da un lato l'occasione di eseguire sezioni puntuali su una superficie voltata e dall'altro la capacità di generare interattivamente proiezioni quotate dell'attuale conformazione della copertura in concreto, per una più approfondita comprensione della sua messa in opera e al tempo stesso per escludere dall'analisi le porzioni restaurate che ne hanno alterato l'originaria forma geometrica.”<sup>4</sup>

Diverse porzioni del vestibolo di Piazza d'Oro sono assenti. Per un edificio di una forma così complessa è difficile avanzare ipotesi ricostruttive soprattutto laddove sono mancati ampie parti così come gran parte della copertura.

“Complessa è l'interpretazione di una possibile copertura della sala ottagonale della Piazza d'Oro. Non solo perché analisi geometriche simili a quelle appena descritte sono fortemente limitate dall'assenza di porzioni anche minime di copertura, ma anche perché l'edificio è ben più grande e complesso; va inoltre sottolineato come le diverse scuole di pensiero abbiano contribuito, nel corso degli anni, a irrigidire e talvolta a estremizzare le posizioni su questa tematica, come ben rilevato da A. Moneti. Al di là delle interessanti, anche se spesso poco attendibili, ipotesi dei Pensionnaires, la maggior parte degli studiosi successivi continua, pur con significative differenze, a prediligere una soluzione coperta. R. Paribeni parla genericamente di una "singolarissima copertura a cupola", mentre H. Kähler prevede una volta a spicchi sopra un tamburo ottagonale. Nel suo modello in scala della Villa, I. Gismondi sembra adottare una bassa copertura lignea, che arriva a includere i quattro atrii diagonali. E. Hansen, infine, il primo a pubblicare un rilievo completo del padiglione meridionale, restituisce una complessa volta in calcestruzzo composta da spicchi alternatamente concavi e convessi.”<sup>4</sup>

Risulta quindi molto utile avere un supporto digitale in casi studio come questo, dove la porzione dell'edificio rimanente è molto ridotta e per trarre delle considerazioni

---

<sup>4</sup> Adriano e la Grecia – Studi e ricerche, Capitolo di Benedetta Adembri, Sergio di Tondo, Filippo Fantini, Fabio Ristori, Nuove prospettive di ricerca su Piazza d'Oro e gli ambienti mistilinei a pianta centrale: confronti tipologici e ipotesi costruttive, Electa, 2014, pag 81-90

architettoniche è fondamentale avvalersi di modelli tridimensionali esplorabili e sezionabili secondo ogni piano. Le cupole ottagonali erano numerose nell'architettura romana, tuttavia ad oggi ne sono pervenute solamente un numero limitato e in condizioni tutt'altro che ottimali. I modelli digitali hanno quindi la doppia funzione di "congelare" lo stato di deterioramento, almeno in ambito digitale, e al contempo fornire uno strumento che possa favorire corrette ipotesi ricostruttive ai fini del restauro.

“Una sala ottagonale della Domus Aurea che è stata costruita intorno al 70 d.C. dà inizio alla serie romana degli edifici ottagonali coperti con cupola sagomata a padiglione. La sala risulta però ancora rinchiusa nella compagine dell'edificio e la cupola, pur mostrando un interessante giuoco costruttivo diretto a neutralizzare le spinte, non si estolle a significare esternamente l'interna struttura. [...] Nella Domus Augustana due sale ottagonali gemelle di epoca domiziana, interessanti anche per la pianta, sono coperte da una cupola a padiglione. Però in questo esempio gli spigoli della cupola perdono, verso la sommità di essa, la loro individualità e l'intradosso, con l'avvicinarsi all'occhio terminale, assume le caratteristiche di una superficie di rotazione. [...] Una piccola sala termale a Villa Adriana, adiacente alla Heliocaminus, è pure ottagonale e coperta con volta a padiglione; ma la sua pianta non è regolare, risultando invece piuttosto di forma allungata per avere due lati paralleli più lunghi dei rimanenti. [...] Anche la sala superstite delle Terme Romane di Pisa è ottagonale e ricoperta da un padiglione a sesto ribassato. Tale aula, ben poco nota, e sulla quale riferisce in questo stesso congresso il Prof. C. Roccatelli, ha una cupola sommamente interessante per le aperture finestrate che si notano in ciascuno spicchio del padiglione e che pertanto richiamano subito alla memoria le simili coperture a volta degli stabilimenti termali mussulmani, i quali, sia nell'organismo architettonico, come nell'essenza stessa delle pratiche balneari, hanno moltissime relazioni con quelli romani. [...] Per non tralasciare gli edifici ottagonali coperti da una cupola di tipo 'ad ombrello', ricordo anche il molto noto padiglione d'ingresso alla Piazza d'oro di Villa Adriana, che costituisce un monumento di notevolissima importanza costruttiva e l'ampia aula, ora adibita a Planetario, delle Terme Diocleziane. Di tutti gli edifici romani sinora citati, esiste anche oggi tutta o gran parte della cupola; pertanto su di essi si possono trarre illusioni e si possono compiere dei paragoni convincenti. Quando poi si rifletta che ben pochi edifici coperti a cupola possono essere sfuggiti ad una sistematica distruzione più che secolare, questi superstiti monumenti dei primi secoli dell'impero assumono

l'importanza come di isolate pietre miliari, dalle quali però possiamo ricostruire tutto il lungo cammino delle realizzazioni architettoniche e delle conquiste costruttive romane.”<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Atti del 1° congresso nazionale di storia dell'architettura, Guglielmo de Angelis d'Ossat, G.C. Sansoni, 1938 Firenze, pag 15-17

### 3. Modellazione reality based

Con modellazione reality based, talvolta definita anche come reverse modeling, si intende quel processo con cui avviene la creazione di un modello digitale tridimensionale a partire dall'oggetto reale. "Il Reverse Modeling (RM) è il processo con il quale è possibile dedurre la rappresentazione della forma dall'acquisizione digitale del modello fisico. Le finalità del processo possono essere diverse, nel design può essere utilizzato sia per le operazioni di restyling che per operazioni più prettamente progettuali. Attualmente le metodologie e le tecniche utilizzate non seguono delle procedure standard, mostrano invece una dicotomia di comportamenti nei confronti del problema, in alcuni casi sono prevalenti le operazioni artigianali, in altri le azioni mirano al massimo rigore per il conseguimento dell'estrema accuratezza nel risultato. Nel processo progettuale dell'oggetto di design, il RM ha un ulteriore compito, risolvere lo scollamento esistente tra il prototipo ed il modello progettato, assumendo un ruolo attivo nel percorso ideativo dell'oggetto.

Solo una ricerca sperimentale di tipo applicativo consente di analizzare i problemi, i metodi e le tecniche di conversione da un modello numerico (nuvola di punti, rilievo) al modello matematico (progetto digitale)."<sup>6</sup> Il Reverse Modeling non trova corrispondenza in un'unica tecnica universalmente applicabile, al contrario sono numerose le metodologie a disposizione, ognuna delle quali si adatta meglio a diverse tipologie di rilievo. Spesso è addirittura difficile sapere a priori quale possa essere la tecnica più indicata al proprio caso studio, ed occorre procedere sperimentalmente valutando di volta in volta il risultato prodotto da ciascun rilievo.

Nel rilievo del vestibolo di Villa Adriana, sono state impiegate due tecniche di rilievo: la prima consiste nel rilievo tridimensionale tramite scansione laser (Laser Scan), la seconda, definita Structure from Motion (SfM), con la quale è avvenuta l'acquisizione del colore proprio del vestibolo ed è stata creata della texture applicabile al modello 3D.

---

<sup>6</sup> Il Reverse Modeling per il progetto di design - Michele Calvano, 2012

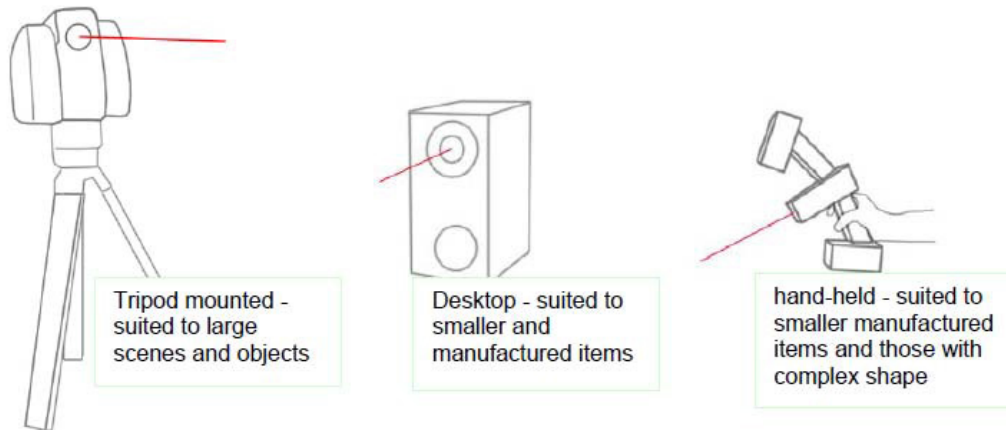
### 3.1. *Modellazione tramite sensori attivi*

Si definiscono tecniche di rilievo tramite sensori attivi quelle in cui è lo strumento stesso che emette il segnale che viene poi rilevato. Appartiene a questa categoria il Laser Scan, uno strumento di acquisizione a sensore attivo che permette di eseguire il rilievo tridimensionale di un oggetto, una scena o un sito, tramite l'emissione di impulsi laser e l'elaborazione del riflesso catturato. "Per dispositivi di acquisizione della forma a sensori 3D attivi si intende quella categoria di strumenti che mediante l'impiego di una sorgente di luce controllata (laser, proiezioni di pattern) consente di acquisire in modo automatico la forma di un oggetto. Appartengono a questa categoria: i sistemi a triangolazione (spot luminoso, piano luminoso singolo, piani luminosi multipli, proiezione di pattern); i sistemi che permettono la misura della distanza (strumenti a tempo di volo pulsato e a modulazione continua, interferometri). Ai sistemi a sensori 3D attivi si contrappongono i sistemi a sensori 3D passivi. Questi ultimi, non necessitano di una ulteriore sorgente luminosa, e si limitano ad osservare la scena convogliandola in un sistema ottico o optoelettronico in grado di estrarre dalla visione informazioni di carattere geometrico. Tra le tecniche passive ricordiamo la topografia, la fotogrammetria."<sup>7</sup>

Esistono diverse configurazioni di Laser Scan, che si differenziano nel tipo di supporto: su treppiede, con base da tavolo (o desktop) oppure impugnabili. I Laser Scan montati su treppiede sono gli apparecchi più pesanti ma che consentono rilievi estremamente più ampi rispetto alle altre configurazioni. Il Laser Scan impiegato per rilievi archeologici è appunto costituito da un treppiede su cui è installata la testa motorizzata su 2 assi di rotazione, all'interno della quale risiedono l'emettitore e il ricevitore degli impulsi laser. Il funzionamento della macchina consiste nell'invio di un raggio laser e nel determinare la distanza del punto rilevato misurando il tempo impiegato dal raggio per tornare alla macchina. Il Laser Scan invia un elevato numero di impulsi laser con diverso orientamento della testa, in modo da ricavare la posizione nello spazio tridimensionale dei punti rilevati. Conoscendo il valore della velocità della luce, circa 299792 km/s (nel vuoto), rilevando il tempo di ritorno dell'impulso laser si ricava la distanza del punto rilevato dal Laser Scan. La velocità di esecuzione del rilievo determina la precisione che è possibile ottenere dalla scansione. La macchina restituisce informazioni digitali

<sup>7</sup> Acquisizione 3D e modellazione poligonale, G. Guidi, M. Russo, J. Beraldin, McGraw-Hill, 2010, Milano

dell'oggetto rilevato sotto forma di un insieme di punti (point cloud - nuvola di punti) distribuiti nello spazio tridimensionale.



*Configurazioni del Laser Scan (da sinistra): installazione su treppiede (adatto a grandi rilievi e oggetti); dispositivo desktop (adatto ad oggetti più piccoli, prodotti industriali); dispositivo impugnabile (per oggetti molto piccoli o articoli con forme complesse) (Didactic material, Terrestrial Laser Scanning\_slides, Gabriele Bitelli)*

Il Laser Scan di tipo T.o.F. (Time of Flight, o a tempo di volo), misura il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso laser e la sua ricezione. Conoscendo la velocità della luce, stabilisce la distanza tra lo strumento e il punto rilevato. Sono quindi necessari timer ad elevatissima precisione per garantire rilievi accurati, infatti la luce percorre circa 30cm in un nanosecondo. Il Laser Scan di tipo a differenza di fase misura la distanza dal punto rilevato in maniera diversa: infatti tale strumento misura la differenza di fase tra l'onda laser emessa e l'onda ricevuta, non necessitando quindi di orologi ad altissima precisione e rendendo la scansione più veloce rispetto al laser a tempo di volo.

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s}$$

$$1) \quad d = \frac{c \cdot t}{2} \quad 2) \quad \varepsilon_d = \frac{c \cdot \varepsilon_t}{2}$$

*Conoscendo il valore della velocità della luce (c), si ricavano:*

*1) Formula per la determinazione della distanza dei punti nel rilievo con Laser Scan a tempo di volo. È presente il 2 a denominatore in quanto il fascio laser percorre la distanza sia in "andata" che in "ritorno".*

*2) Formula che indica l'errore sulla distanza. Tale valore è proporzionale a  $\varepsilon_t$ , ossia la precisione dell'orologio interno dello strumento. Per avere un errore lineare di 1mm, è richiesta all'orologio una precisione inferiore a 6,67 picosecondi ( $6,67 \cdot 10^{-12} s$ )*

L'acquisizione da parte del Laser Scan della posizione dei punti è riferita ad un sistema di coordinate sferiche  $(\rho, \varphi, \theta)$ , in cui  $\rho$  indica la distanza tra il centro del sistema e il punto rilevato,  $\varphi$  l'angolo azimutale (la rotazione compiuta sull'asse verticale dalla testa della macchina rispetto all'asse  $x$  del sistema di riferimento),  $\theta$  l'angolo di inclinazione (compreso tra l'asse  $z$  e la direzione su cui giace il punto, ossia il *tilt* della testa del Laser Scan). Per poter utilizzare le scansioni nel comune sistema di riferimento cartesiano  $(x, y, z)$ , la macchina converte automaticamente la posizione dei punti secondo le equazioni trigonometriche:

$$x = \rho \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi$$

$$y = \rho \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$$

$$z = \rho \cdot \cos\theta$$

Il Laser Scan è in grado di rilevare solamente i punti direttamente visibili, quindi oggetti di forma complessa o in parte coperti da altri elementi non vengono rilevati nella loro interezza. È quindi importante stabilire un corretto posizionamento del Laser Scan ed in alcuni casi effettuare più scansioni da unire per generare un rilievo esaustivo. “Con uno strumento di range sensing attivo come il Laser Scan non tutti i punti significativi di una superficie possono essere acquisiti. Come ormai tutti sanno infatti il Laser Scan misura quello che “vede”. Se si tratta di un sistema a tempo di volo questo significa che soltanto i punti di una superficie che sono intercettabili dalla posizione del sensore sono misurabili. Se il sistema di rilievo impiegato è un sensore a triangolazione, la condizione di “misurabilità” implica l'assenza di occlusioni per due linee di vista: quella dalla sorgente luminosa verso il punto da misurare, e quella dal punto verso la camera. Quindi, se ci sono elementi che occludono in qualche modo la visibilità di una superficie, i punti dell'area occlusa non possono essere acquisiti per via ottica, e, se non possono essere integrati con altri metodi per la loro inaccessibilità, rimarranno un elemento incognito all'interno del modello digitale.”<sup>8</sup>

La corretta gestione della nuvola di punti è cruciale per ottenere il formato di output più adatto allo scopo del rilievo. Il dato grezzo fornito dal Laser Scan è un insieme di punti

---

<sup>8</sup> Il ritorno all'immagine - Nuove procedure image-based per il cultural heritage, Giorgio Verdiani, 2011

posizionati nello spazio tridimensionale che hanno come centro quello dello scanner stesso. Oltre alla posizione, ad ogni punto è fornita la direzione del vettore normale alla superficie in quel punto (tramite 3 componenti  $x,y,z$ ), informazione molto importante per una corretta interpretazione dell'oggetto da parte del software di creazione del modello tridimensionale. L'insieme dei punti è definito point cloud (nuvola di punti) e necessita di una serie di elaborazioni per ottenere il modello tridimensionale finale, dal quale si possono eseguire rendering fotorealistici e sezioni bidimensionali.

### 3.2. *Modellazione tramite sensori passivi*

Per definizione, i sistemi a sensori passivi non necessitano di fonti luminose esterne, ma acquisiscono la luce già presente nella scena. Sono tecniche di rilievo tipiche della topografia e fotogrammetria, ed una di queste è lo Structure from Motion (SfM). Con Structure from Motion è definita una tecnica di generazione 3D tramite acquisizione di immagini 2D. L'input è costituito da un set di fotografie che ritraggono l'oggetto del rilievo da diverse angolazioni; l'output è costituito da una scena contenente il modello 3D dell'oggetto provvisto di texture del colore e la posizione e l'orientamento della camera in corrispondenza di ogni foto.

“Basata su algoritmi di computer vision, la SfM estrae i punti notevoli dalle singole foto, desume i parametri fotografici e incrocia i punti riconoscibili su più foto, trovando le coordinate nello spazio dei punti stessi.”<sup>9</sup> La prima operazione svolta dal software dedicato alla Structure from Motion consiste nell'individuare per ogni foto un insieme di punti notevoli determinando quelli omologhi nelle varie foto. “Alla base della SfM c'è un algoritmo chiamato SIFT, che sta per “Scale-Invariant Feature Transform”. Si tratta di un metodo che estrae i punti notevoli da una immagine, raggruppandoli allo scopo di fornire un “riconoscitore di forme” per la computer vision.”<sup>9</sup> Applicando trasformazioni di rototraslazione alle singole foto, in modo tale da far combaciare i punti omologhi nello spazio tridimensionale, il software è in grado di determinare la posizione e l'orientamento della camera relativamente ad ogni fotogramma nonché la posizione nello spazio dei punti omologhi individuati in precedenza, punti che in realtà fanno parte dell'oggetto rilevato. L'obiettivo di questa fase non è tuttavia la creazione del modello 3D, ma la

---

<sup>9</sup> [exporttocanoma.blogspot.it](http://exporttocanoma.blogspot.it) - SfM - Structure from Motion (prima parte)



determinazione di posizione e orientamento delle camere. L'insieme di punti generato è infatti definito nuvola rada, o sparse cloud, dato che il numero di punti è troppo basso per visualizzare un modello tridimensionale con un dettaglio soddisfacente (i punti sono stati impiegati solamente per determinare l'orientamento delle camere). L'operazione successiva permette la creazione della nuvola densa, o dense cloud, posizionando un elevato numero di punti determinati dalla corrispondenza tra i fotogrammi. In seguito avviene la creazione del modello 3D vero e proprio, tramite la triangolazione della nuvola di punti. Fase finale, consiste nella proiezione dei fotogrammi scattati sul modello 3D per generare la texture del colore.

### 3.3. *Pipeline adottata*

In questo caso studio, sono state impiegate 2 tecniche di reverse modeling che hanno permesso di creare congiuntamente il modello finale del vestibolo. Tramite rilievo con Laser Scan, è stato creato il modello tridimensionale, mentre tramite Structure from Motion è stata applicata la texture al modello.

La *pipeline* sintetica consiste in:

LASER SCAN

- Rilievo
- Modello 3D

STRUCTURE FROM MOTION

- Acquisizione fotografica
- Allineamento foto
- Allineamento al modello 3D
- Generazione texture

La *pipeline* estesa consiste in:

LASER SCAN:

- Acquisizioni Range-Maps
- Allineamento Range-Maps
- Modello HP (modello master)
- Modello LP (modello derivato)
- Baking Normal Map

STRUCTURE FROM MOTION

- Acquisizione fotografica
- Correzione radiometrica foto
- Allineamento foto
- Dense cloud
- Allineamento al modello 3D (scala e verticalizzazione)
- Generazione texture
- Correzione illuminazione texture

## 4. Creazione del modello tridimensionale

Le scansioni tridimensionali fornite dal Laser Scan, nonostante l'elevata precisione dei dati forniti, non sono pronte per l'utilizzo da parte degli utenti finali. Innanzitutto, le scansioni non rappresentano un modello tridimensionale, ma sono un immenso insieme di punti (nuvola di punti) con coordinate spaziali difficilmente interpretabile a livello visivo e che quindi non fornisce un supporto utile agli scopi finali quali la documentazione o lo studio archeologico/architettonico. Inoltre, nel caso di scansioni multiple (spesso necessarie per rilevare un'estesa scena nella sua interezza), le nuvole di punti devono essere unite in modo da generare un unico modello complessivo. Nella stessa fase è necessario rimuovere tutte quelle aree scansionate dallo scanner che tuttavia costituiscono elementi indesiderati o appartenenti all'intorno. Altro ostacolo all'utilizzo finale del modello riguarda la dimensione finale dello stesso e le capacità computazionali che richiede per la visualizzazione tridimensionale. Occorre eseguire un processo di alleggerimento che permetta l'utilizzo e l'esplorazione del modello da parte di utenti tramite tradizionali personal computer.

“Nella modellazione tridimensionale digitale dei beni culturali un tema sicuramente non facile riguarda l'eterna dualità tra la capacità del modello di rappresentare verosimilmente la realtà, e l'impegno computazionale per restituire adeguatamente questa verosimiglianza al soggetto fruitore. [...] Sappiamo bene che quando il modello nasce da un processo di acquisizione la mesh che lo descrive è formata da tante piccole faccette poligonali, i cui vertici sono proprio i dati acquisiti strumentalmente. Se deve essere rappresentata una geometria molto articolata dovrà essere impiegata un'elevata risoluzione. In altri termini il processo di scansione implica un campionamento spaziale con una densità tanto più elevata quanto maggiore è la ricchezza formale dell'oggetto da scansionare.”<sup>8</sup>

Per determinare il campionamento ci si basa sul teorema di Nyquist-Shannon, originariamente formulato nella teoria delle comunicazioni. Il teorema afferma che per ricostruire l'andamento analogico di una funzione sinusoidale, occorre avere un campionamento ogni mezzo periodo  $T$ . Trasportando il teorema in chiave di rilievo, dato

il minimo dettaglio (espresso in mm) che si vuole rilevare (equivalente al periodo T), il campionamento dovrà avere una precisione pari a metà di tale valore.

“Questa stima in nel caso citato<sup>10</sup> fornì un valore minimo del dettaglio pari a mezzo millimetro, e il passo di campionamento fu stabilito in 0.25 mm, il che significa, per una forma più o meno cilindrica alta 180 cm e con una base di mezzo metro, un numero di punti pari a circa 30 milioni. Considerando che ogni punto ha tre coordinate spaziali (x, y, z), e che ogni coordinata è costituita da un numero floating-point (32 bit = 4 byte), possiamo andare avanti nel ragionamento stimando che il file finale possa avere una dimensione approssimativamente pari a 30 x 3 componenti x 4 byte/componente = 360 Mbyte. Visualizzare un modello come questo è tuttora non banalissimo se non si dispone di un’adeguata quantità di memoria, e di un hardware di accelerazione grafica che velocizzi la formazione dei singoli frame di restituzione del modello ombreggiato. All’inizio degli anni 2000 richiedeva addirittura un computer di punta, appositamente configurato allo scopo. Ebbene, se queste sono le dimensioni in gioco (e adesso a oltre dieci anni di distanza si arriva agevolmente a superare questi numeri di un fattore dieci), il fatto che si tenda a render pubblici e fruibili dati e modelli tridimensionali riferiti ai Beni Culturali se da un lato è ricco di implicazioni straordinarie dal punto di vista dell’utente, d’altra parte rende sempre più urgenti gli sforzi nella direzione dello sviluppo di metodologie di visualizzazione del modello digitale che rendano meno oneroso il passaggio dal dato digitale 3D ai rendering bidimensionali che lo rappresentano, tanto più difficoltosi quando tra il modello digitale e la sede dove si forma la sua visualizzazione, ci sia di mezzo una rete di comunicazione.”<sup>9</sup>

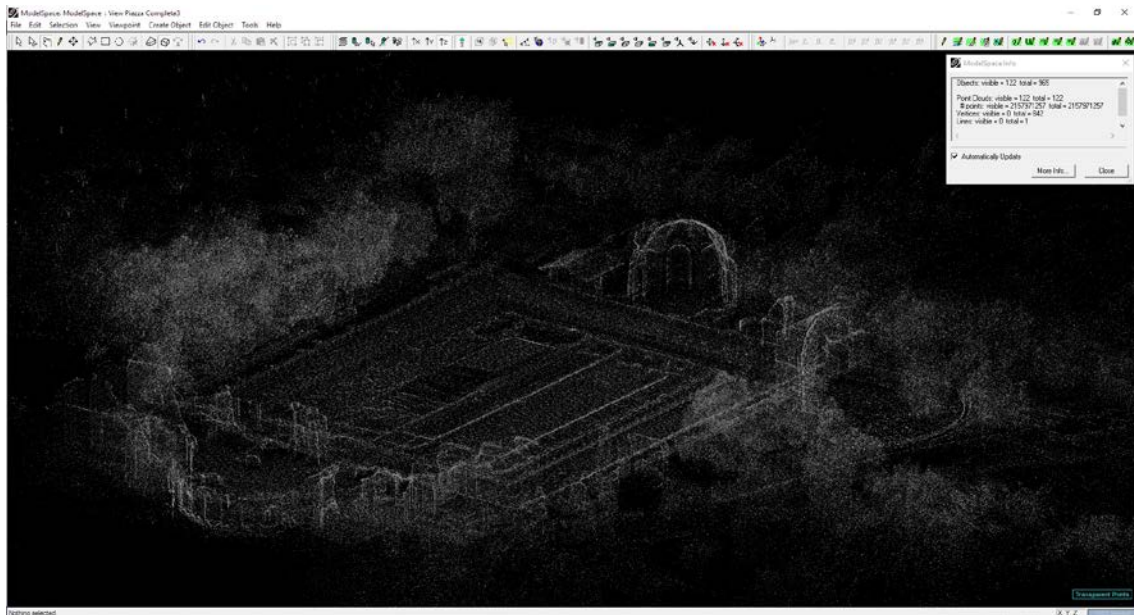
#### *4.1. Fase 1: Esportazione point cloud del vestibolo*

Il dato di partenza per procedere alla creazione del modello tridimensionale è costituito dall’insieme delle nuvole di punti scansionate tramite Laser Scan. È fondamentale allineare tutte le scansioni in un’unica scena in modo che tutte le scansioni siano soggette allo stesso sistema di riferimento. Il software impiegato per la gestione delle nuvole di punti è Cyclone, sviluppato dall’azienda tedesca Leica, produttrice sia di stazioni di Laser Scan che dei relativi software. All’interno del software è stato creato un

---

<sup>10</sup> High accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: the digitizing of Donatello’s “Maddalena”, IEEE Transactions on Image Processing, Guidi G, Beraldin J-A, Atzeni C., 13-3 (2004), pag 370-380.

model space, ossia una scena in cui sono confluite tutte le scansioni di Piazza d’Oro di Villa Adriana che sono poi state allineate.



*Schermata del software Cyclone: visualizzazione ortografica delle nuvola di punti costituenti il rilievo di Piazza d’oro. Questo tipo di visualizzazione non fornisce uno strumento visivo sufficiente per un’interpretazione chiara degli elementi tridimensionali presenti. In alto a destra, il riquadro di informazioni relative al model space.*

<b>Scansioni (Model Space: Piazza d’Oro)</b>	
Scansioni totali Piazza d’Oro	122
Numero di punti totali	2.157.971.257
Dimensione file globale	40,0 GB

Per Piazza d’Oro si contano 122 scansioni, per un totale di oltre 2 miliardi di punti in un file delle dimensioni di 40 GB.

È evidente che per la gestione di una quantità tale di dati sia necessario l’impiego di un computer dalle prestazioni elevatissime. All’interno del CT LAB, è presente una workstation Dell equipaggiata con 2 processori Intel Xeon da 10 core a 2,5 GHz con Hyperthreading, 256 GB di memoria ram, disco SSD su cui sono installati sistema operativo e software, e scheda video Nvidia Quadro. Una configurazione di questo tipo permette di lavorare agevolmente su grandi quantità di dati senza avere carenze prestazionali di alcun tipo. Si è reso però necessario l’utilizzo anche di un computer personale, dal momento che la workstation del laboratorio è condivisa tra i professori e

gli studenti del laboratorio. Il PC utilizzato presenta una configurazione a singolo processore quad core Intel Core i7 3770k a 4,2 GHz con hyperthreading, 16 GB di ram, disco SSD dedicato a sistema operativo e software, impostazione raid 0 per gli hard disk dati, scheda video Nvidia 9800 GT. Nonostante sulla carta il computer personale non sembra possa offrire prestazioni paragonabili alla workstation, ha ben 2 punti a proprio vantaggio: innanzitutto, alcuni dei software utilizzati (quali ad esempio Cyclone e Geomagic Design X) non sono progettati per sfruttare il multithreading. Ciò significa che il software è in grado di utilizzare la potenza di un solo core alla volta, e mentre la workstation offre una velocità di 2,5 GHz, il personal computer arriva a 4,2. Secondo punto riguarda la velocità di lettura dei dati. Il personal computer è provvisto di una configurazione RAID 0, grazie alla quale 2 hard disk vengono interpretati come un'unica unità dal sistema operativo, garantendo però velocità in lettura/scrittura raddoppiata. Tuttavia, la limitata ram a disposizione è un ostacolo maggiore dell'elevata velocità del disco rigido. Infatti, ogni programma trasferisce dall'hard disk alla ram i dati in utilizzo, in quanto la ram è il tipo di memoria con la più alta velocità disponibile. Una volta che la ram è esaurita, i software sono costretti a leggere di continuo i dati dall'hard disk che, anche in modalità RAID 0, sono estremamente più lenti della memoria ram.

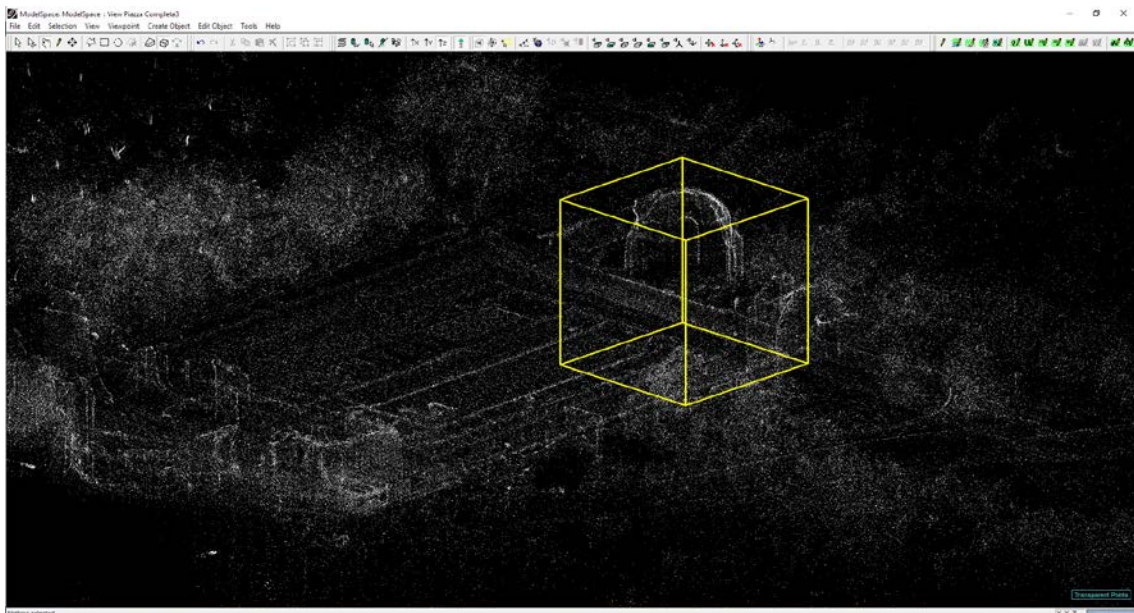
Occorre quindi effettuare un'esportazione delle nuvole di punti limitatamente alla zona di interesse, ovvero il vestibolo ottagonale. La selezione della regione di esportazione è avvenuta con il comando *set limit box by fencing*, che permette di creare un parallelepipedo limite che esclude tutti i punti non interessati (il parallelepipedo è stato creato posizionandosi nella vista dell'alto). Inoltre, l'esportazione è avvenuta sezionando il padiglione in 4 fasce. Per esportare una singola fascia, è sufficiente posizionarsi nella vista laterale, usare il comando *rectangle fence mode* per individuare la fascia da esportare, e il comando *selction->point cloud sub-selection->add inside fence* per applicare la selezione; infine eseguire l'esportazione e ripetere le operazioni tante volte quante sono le suddivisioni che si intende creare.

La suddivisione ha non solo il vantaggio di ridurre le dimensioni di ogni esportazione, ma è consigliata per produrre la generazione di modelli più fedeli. Occorre però che le varie parti contengano delle aree di sovrapposizione che consentano in seguito di creare un modello senza discontinuità. Il formato di esportazione usato è il ptx, che per ogni punto della nuvola fornisce informazioni di posizione e normale. Esportando le 4 fasce

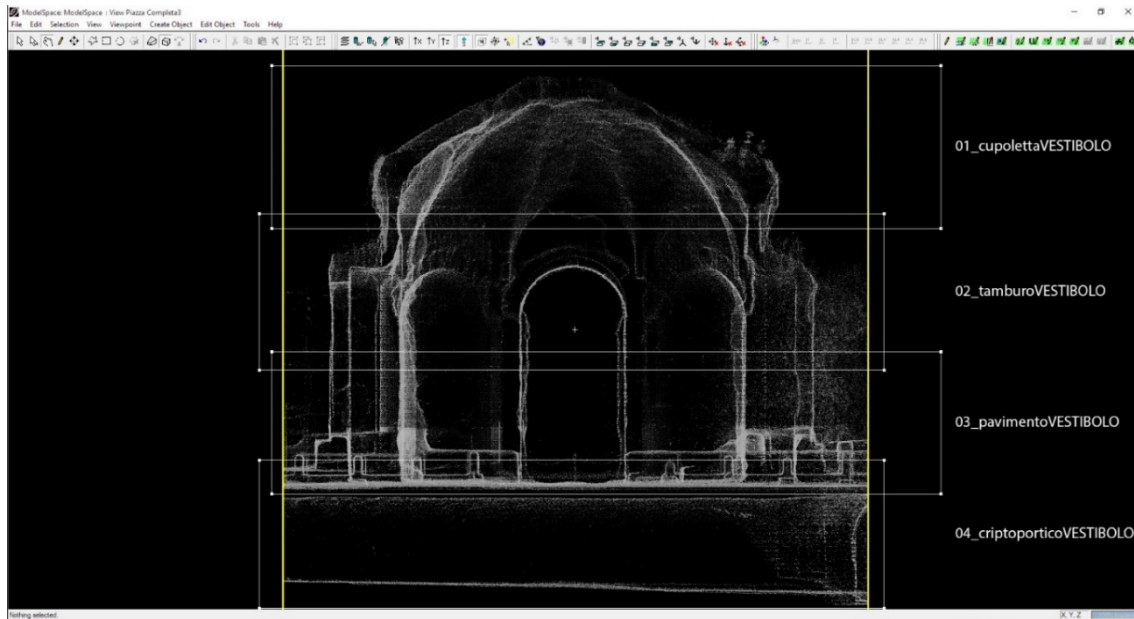
dallo stesso model space, la successiva reimportazione non darà problemi di allineamento, in quanto le parti risulteranno già combacianti. L'esportazione di ogni fascia ha richiesto diversi minuti di tempo, dato che la quantità di dati in fase di elaborazione comporta un elevato dispendio computazionale.



*Schermata del software Cyclone: utilizzo del comando “set limit box by fencing” per delimitare i punti oggetto di esportazione.*







*Schermata del software Cyclone: visualizzazione ortografica laterale del limit box creato per effettuare l'esportazione delle nuvole di punti relative al vestibolo ottagonale. L'esportazione è stata suddivisa in 4 fasce orizzontali nominate come da figura.*

File creati			
Nome	Formato	Dimensione	N° di punti
01_cupolettaVESTIBOLO.ptx	ptx (nuvola di punti)	1.8 GB	21 M
02_tamburoVESTIBOLO.ptx	ptx (nuvola di punti)	2.6 GB	25 M
03_pavimentoVESTIBOLO.ptx	ptx (nuvola di punti)	8.2 GB	120 M
04_criptoporticoVESTIBOLO.ptx	ptx (nuvola di punti)	7.2 GB	106 M

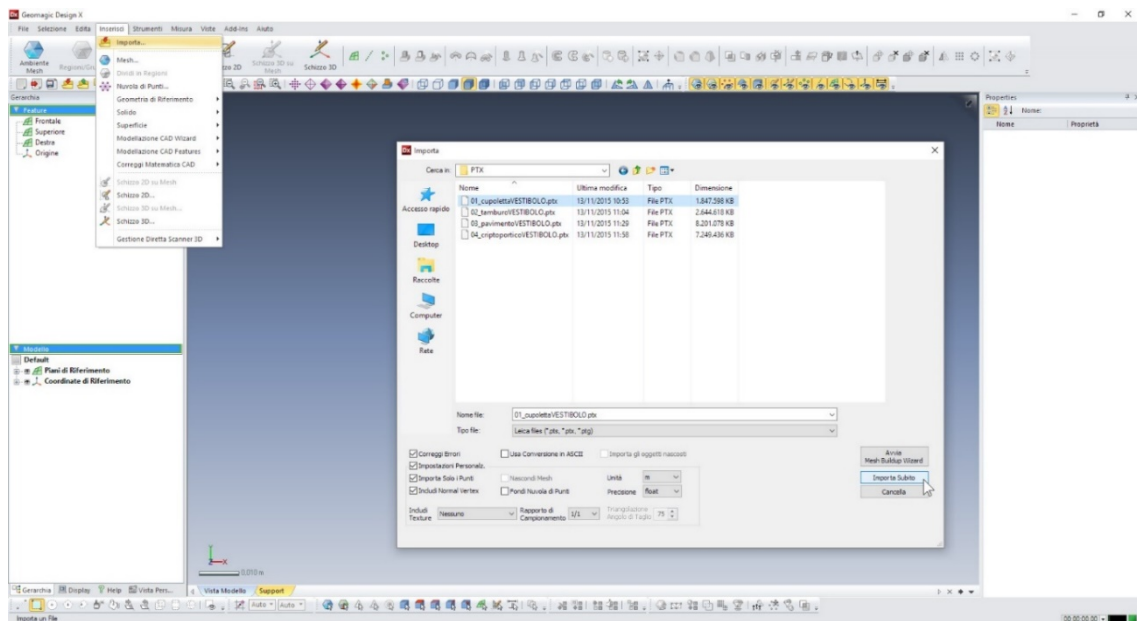
#### 4.2. Fase 2: Importazione point cloud in Geomagic Design

### X

Le nuvole di punti devono essere convertite in modelli tridimensionali poligonali (mesh) per garantire un utilizzo pratico agli utenti finali. Le mesh, essendo costituite da poligoni che ricreano la superficie del rilievo, garantiscono un'elevata comprensibilità del modello, dato che su ogni poligono si ha il calcolo dell'illuminazione in base all'incidenza della luce.

Il passaggio successivo consiste quindi nell'importare le nuvole di punti nel software Geomagic Design X, che permetterà di realizzare le mesh. L'importazione di 4 diverse

fascie ha determinato la necessità di creare 4 diversi file, la cui unione è avvenuta solo successivamente.



Schermata del Geomagic Design X: importazione delle nuvole di punti

Le impostazioni personalizzate di importazione, permettono di effettuare l’importazione solo dei punti e delle normali ad essi associate, escludendo eventuali parti poligonali e texture, in questo caso non presenti. Il rapporto di campionamento consente di importare solo una frazione della nuvola di punti, permettendone una gestione più veloce a scapito del livello di dettaglio.

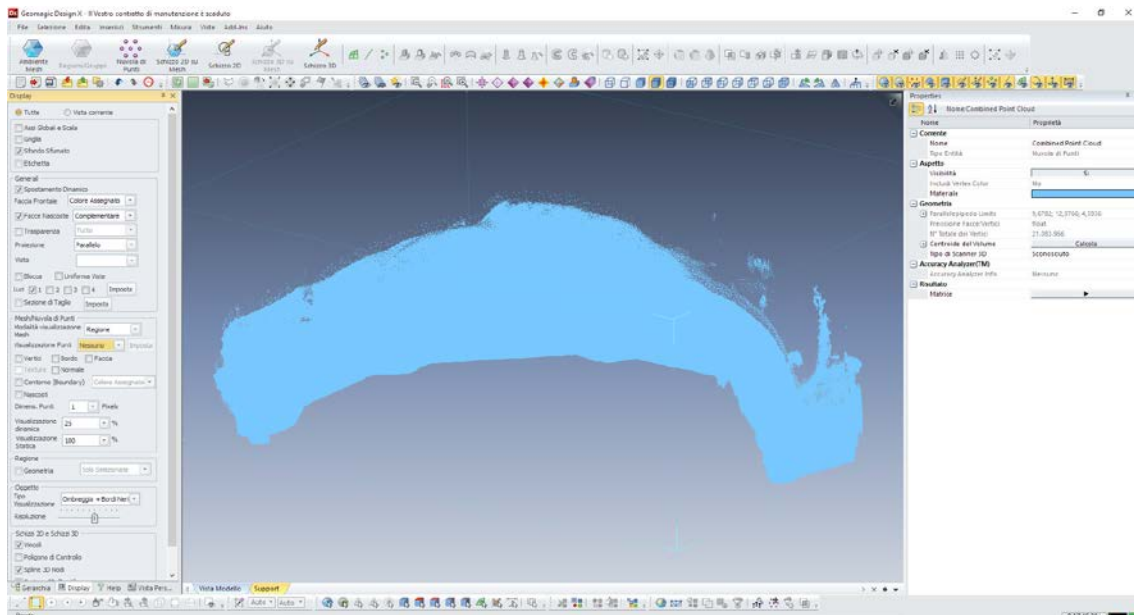
File creati			
Nome	Formato	Dimensione	N° di punti
01_cupolettaVESTIBOL O_PC.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	493 MB	21 M
02_tamburoVESTIBOL O_PC.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	587 MB	25 M
03_pavimentoVESTIBO LO_PC.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	2.9 GB	120 M
04_criptoporticoVESTIB OLO_PC.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	2.6 GB	106 M



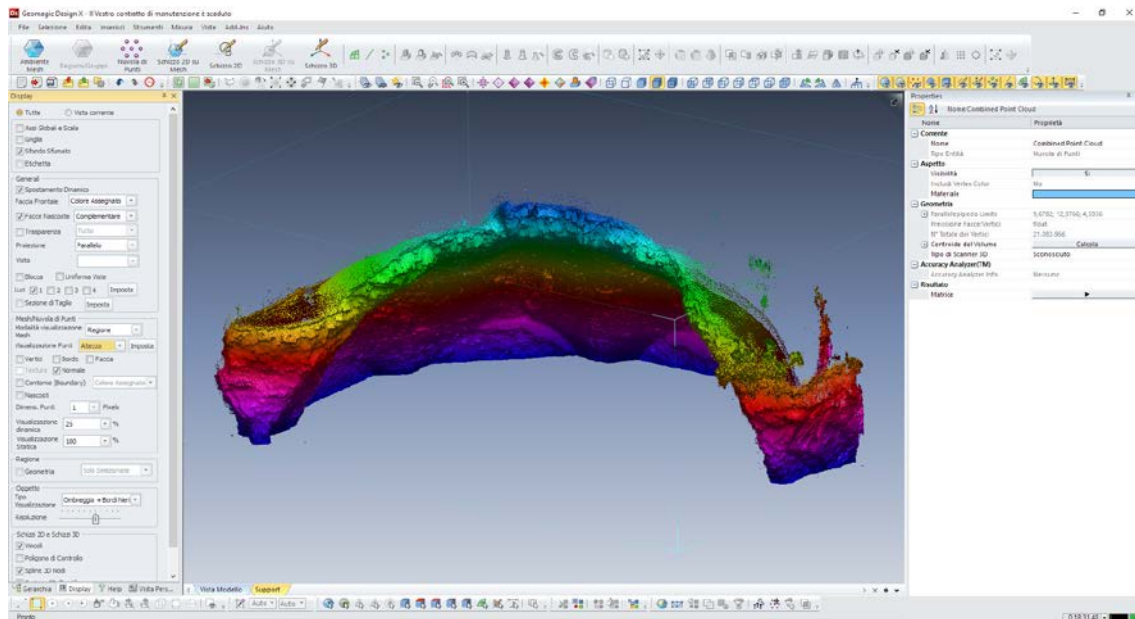
### 4.3. Fase 3: Pulizia delle nuvole di punti

La pulizia delle nuvole di punti è un passaggio fondamentale, in quanto elementi quali alberi, persone, recinzioni, ecc. rappresentano elementi indesiderati che produrrebbero risultati errati in fase di generazione del modello tridimensionali. L'eliminazione dei punti indesiderati dalle nuvole è quindi necessaria per evitare successive interpretazioni sbagliate da parte del motore di generazione mesh.

La criticità di questa fase consiste anche nel fatto che la visualizzazione delle nuvole di punti non è di per sé chiara ed intuitiva. Ogni punto è rappresentato dello stesso colore, e non essendo superfici ma entità di dimensione nulla, anche i punti nascosti sono visualizzati nella schermata. Tuttavia, il software impiega delle modalità di visualizzazione per facilitare l'interpretazione della scena. Ad esempio, nel pannello *display*, in corrispondenza della voce *visualizzazione punti* è possibile impostare *altezza* per applicare un gradiente cromatico basato sulla posizione di ogni punto sull'asse verticale. Inoltre, spuntando la voce *normale* viene variata la luminosità di ogni punto a seconda della direzione del vettore normale, che determina l'incidenza della luce su una superficie.



Schermata del Geomagic Design X: nuvola di punti con visualizzazione piatta.

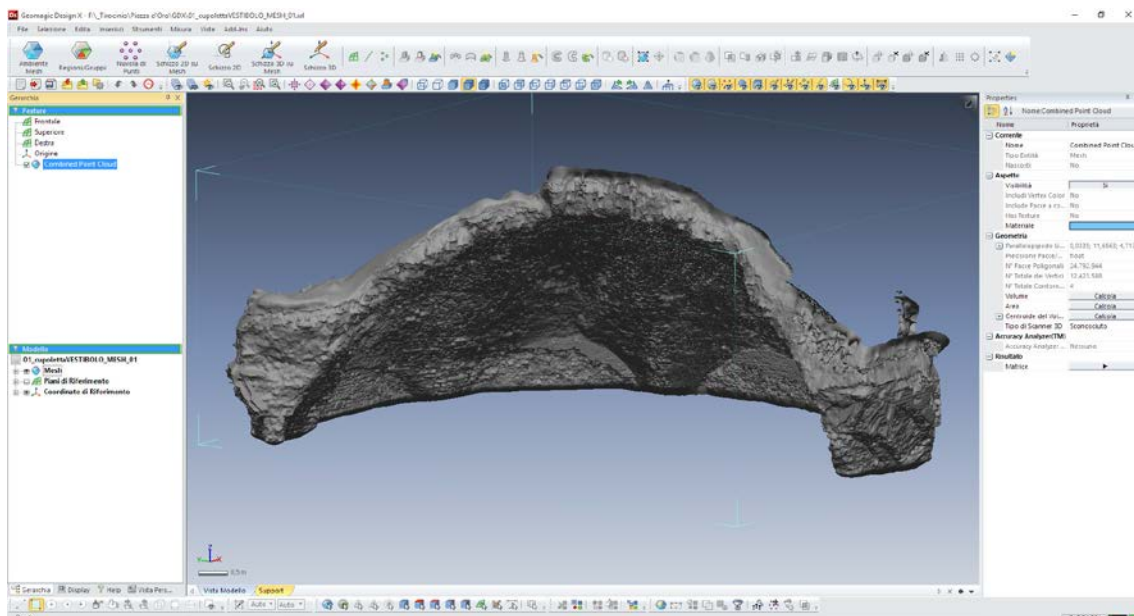
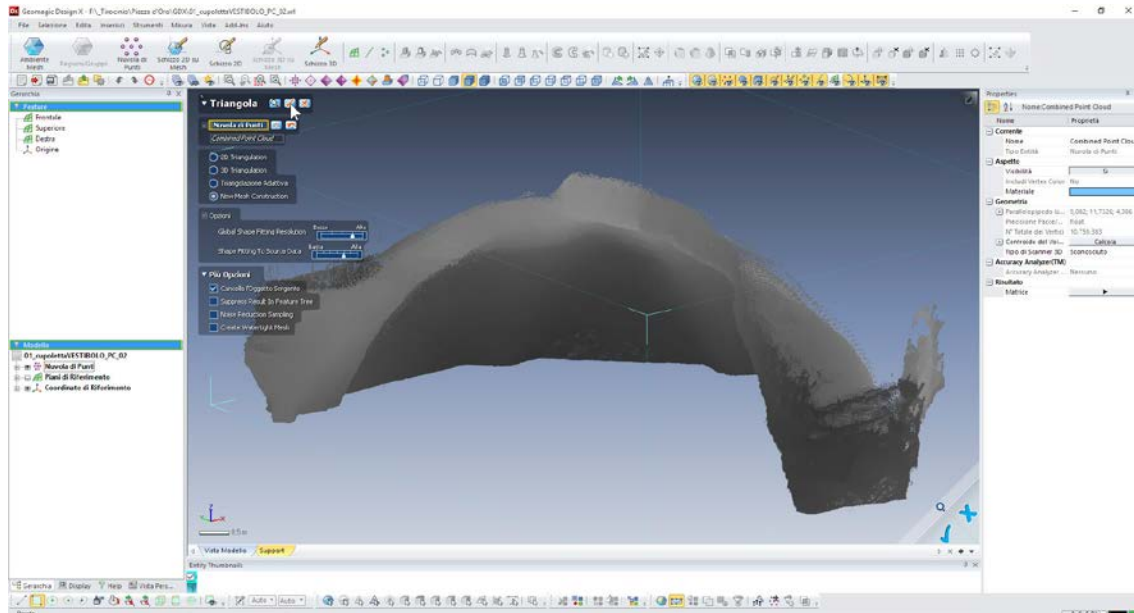


*Schermata del Geomagic Design X: nuvola di punti con gradiente cromatico basato sull'altezza e calcolo della luminosità impiegando le normali.*

#### 4.4. Fase 4: Generazione mesh

La generazione della mesh è la fase più critica del processo, in quanto nel software Geomagic Design X esistono diverse opzioni di generazione, ma seppur la guida fornisca indicazioni sulle specifiche situazioni per cui le funzioni sono progettate, è spesso necessario effettuare più prove con diversi settaggi per valutare il risultato migliore. Inoltre il software fornisce impostazioni riguardo la risoluzione della mesh, che permette di stabilire un elevato livello di dettaglio del modello poligonale, richiedendo tuttavia un notevole arco di tempo per l'elaborazione e anche una notevole quantità di spazio in memoria. È stato quindi scelto un livello di dettaglio inferiore al massimo assegnabile, dal momento che considerando l'errore del Laser Scan un livello di dettaglio troppo elevato della mesh non conferisce in realtà dettaglio visibile. “Sappiamo bene che quando il modello nasce da un processo di acquisizione la mesh che lo descrive è formata da tante piccole faccette poligonali, i cui vertici sono proprio i dati acquisiti strumentalmente. Se deve essere rappresentata una geometria molto articolata dovrà essere impiegata un'elevata risoluzione. In altri termini il processo di scansione implica un campionamento spaziale con una densità tanto più elevata quanto maggiore è la ricchezza formale dell'oggetto da scansione.”<sup>8</sup>

Dal menu *strumenti*->*gestione scansioni* è stata utilizzata la funzione *triangola* per generare la mesh. Il software costruisce la maglia di poligoni sulla base della distanza dei punti e della direzione delle normali. La stessa operazione con le stesse impostazioni va eseguita per le 4 fasce.



Schermata del Geomagic Design X: in alto, impostazioni adottate per la triangolazione. In basso, mesh risultante al termine dell'operazione.

<b>File creati</b>			
<b>Nome</b>	<b>Formato</b>	<b>Dimensione</b>	<b>N° di poligoni</b>
01_cupolettaVESTIBOLO_MESH.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	449 MB	24 M
02_tamburoVESTIBOLO_MESH.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	493 MB	27 M
03_pavimentoVESTIBOLO_MESH.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	663 MB	36 M
04_criptoporticoVESTIBOLO_MESH.xrl	xrl (formato proprietario Geomagic Design X)	598 MB	33 M
Totale		2.2GB	120M

#### 4.5. Fase 5: Unione e creazione modello high poly (HP)

Creare mesh ad elevatissimo dettaglio, a causa della grande quantità di informazioni geometriche, diventa controproducente quando il software e l'hardware a disposizione non sono in grado di gestire agevolmente tale quantità di dati, richiedendo lunghi tempi per l'elaborazione di modelli il cui dettaglio non sarà visibile nemmeno su schermi o stampe ad alta risoluzione. I 4 segmenti del modello contano un totale di circa 120 milioni di poligoni, un numero estremamente elevato per consentirne una pratica gestione anche con una workstation di fascia alta.

Si esegue quindi una fase di riduzione del numero di poligoni del modello, operazione detta decimazione. Sebbene sia presente il comando *decimazione* dal menu *strumenti->scanzioni*, è stato utilizzato il comando *remesh globale* che permette di selezionare più mesh (le 4 fasce in questo caso) e ottenere un'unica mesh di output con il numero di poligoni desiderato. Il modello è stato decimato ad un totale di circa 18,5 milioni di poligoni, e sebbene sia solo un sesto della risoluzione iniziale (120 milioni), la perdita di dettaglio non è percepibile visivamente. Questo modello di riferimento ad alto dettaglio si definisce modello high poly (HP) o modello MASTER.

Il modello così ottenuto è stato suddiviso in 4 parti per facilitarne la gestione e ridurre la dimensione dei singoli file. Non è rilevante in questa fase dove si esegue il taglio tra le

varie fasce, in quanto queste mesh serviranno solo da riferimento per trasferire le informazioni riguardanti il dettaglio ai modelli low poly (LP).

<b>File creati</b>			
<b>Nome</b>	<b>Formato</b>	<b>Dimensione</b>	<b>N° di poligoni</b>
mesh_01_HP_cupola.obj	obj (mesh poligonale)	195 MB	4.8 M
mesh_01_HP_tamb sup.obj	obj (mesh poligonale)	203 MB	5.1 M
mesh_01_HP_tamb inf.obj	obj (mesh poligonale)	154 MB	3.9 M
mesh_01_HP_pav cripto.obj	obj (mesh poligonale)	190 MB	4.7 M
Totale		742 MB	18.5 M

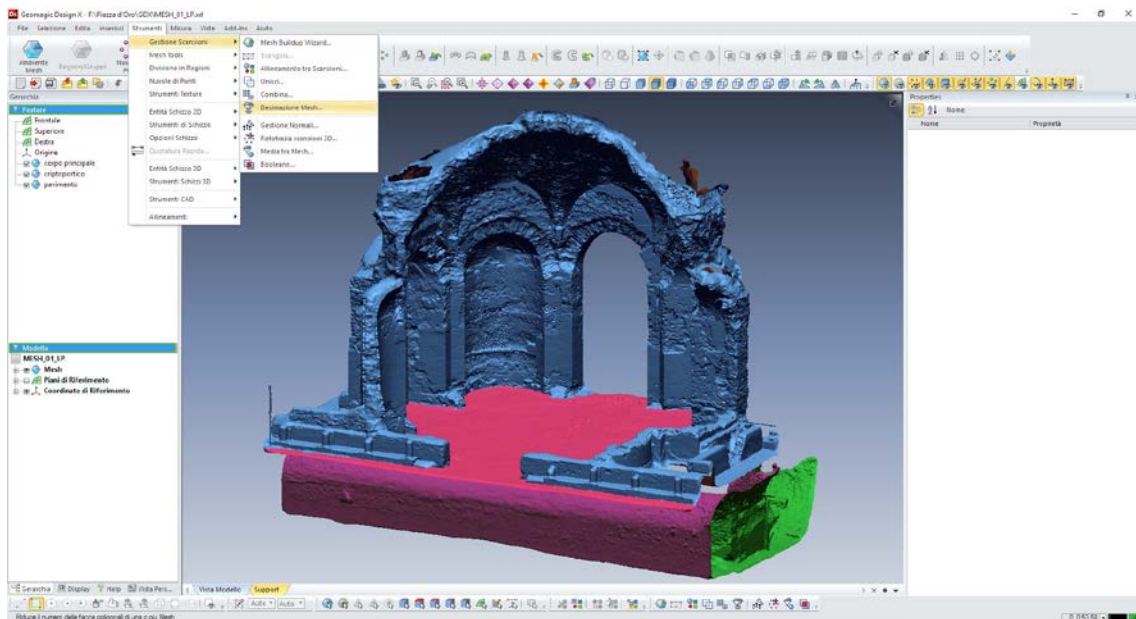
#### 4.6. Fase 6: Creazione mesh low poly (LP)

Il modello HP di riferimento possiede un dettaglio che offre grande realismo visivo e ben si adatta agli scopi tecnici e documentativi per cui il modello potrebbe essere impiegato. Tuttavia, sebbene ora le dimensioni del file e il numero di poligoni permettano la gestione del modello in workstation e pc di fascia alta, non è ancora possibile la fruizione dello stesso da parte di un'utenza con computer di fascia medio-bassa, o l'esplorazione del modello in remoto attraverso un portale web.

È necessario quindi ridurre ulteriormente la quantità di poligoni costituenti il modello HP, ma con tale operazione è inevitabile incorrere nella perdita del dettaglio visivo, che non solo rende meno realistico il modello, ma rende vani tutti gli sforzi e gli accorgimenti finora adottati per garantire la fedeltà, l'accuratezza e la precisione in tutto il flusso di lavoro. La soluzione consiste nel creare delle texture bidimensionali associate al modello tridimensionale che riconferiscono il dettaglio visivo perduto, senza incrementare il numero di poligoni, quindi senza aumentare dimensione e numero di poligoni. Tale processo è definito come Image Based Data Processing, e impiega texture quali le *normal map*, che saranno oggetto dei paragrafi successivi.

All'interno del software Geomagic Design X, si utilizza il comando *decimazione* (dal menu *strumenti->gestione scansioni*) per ridurre il numero di poligoni della mesh master (HP) da 18,5 milioni di poligoni a 2,7 milioni. Al termine della riduzione, il vestibolo è stato suddiviso in 3 parti. Questa suddivisione consentirà nella fase di creazione delle texture di avere non una sola immagine applicata a tutto il vestibolo, ma 3 texture,

permettendo quindi di recuperare maggiori dettagli visivi. In questa fase è molto importante definire una corretta separazione delle mesh low poly, in quanto sebbene siano in ogni perfettamente combacianti, ad ognuna di esse saranno associate delle texture bidimensionali, che nei punti di separazione potrebbero mostrare una discontinuità del modello. Per questo motivo le 3 sezioni create corrispondono al criptoportico (che non ha punti di contatto con il vestibolo), al pavimento (che è costituito da materiale differente dal vestibolo e non necessita di possedere un'accuratezza elevatissima) e al vestibolo vero e proprio (che costituisce l'elemento centrale di pregio del rilievo).



*Schermata del Geomagic Design X: stato del modello prima della fase di decimazione.*

File creati			
Nome	Formato	Dimensione	N° di poligoni
mesh_01_lp_corpo principale.obj	obj (mesh poligonale)	77 MB	2 M
mesh_01_lp_pavimento.obj	obj (mesh poligonale)	9 MB	248 k
mesh_01_lp_criptoportico.obj	obj (mesh poligonale)	18 MB	480 k
Totale		104 MB	2.7 M

A causa della riduzione del numero di poligoni, avviene una riduzione della risoluzione del modello, ovvero la distanza media tra 2 vertici adiacenti della mesh. Attraverso il comando *Global remesh* del software Geomagic Design X è possibile ricavare tale parametro espresso come lunghezza media del bordo (la media viene valutata per tutte le mesh che costituiscono il vestibolo).

<b>Mesh</b>	<b>Dimensione</b>	<b>N° di poligoni</b>	<b>Lunghezza media del bordo</b>
Modello HP	742 MB	18.5 M	9.1 mm
Modello LP	104 MB	2.7 M	22.8 mm

## 5. Image Based Data Processing (IBDP)

L'elevato numero di poligoni che costituiscono un modello tridimensionale, sebbene da un lato permetta di creare una mesh ad elevato dettaglio che approssima fedelmente l'oggetto rilevato, dall'altro rende la mesh "pesante" e difficilmente gestibile, richiedendo elevate capacità computazionali per la modifica e la visualizzazione. Anche se in fase di creazione ci si può avvalere di workstation professionali in grado di elaborare elevate quantità di dati in tempi ridotti, alla fine del processo di creazione del modello è necessario che esso sia visualizzabile in tempo reale anche da un normale computer desktop o laptop. L'esigenza è quindi quella di ridurre il numero di poligoni dei modelli 3D, permettendone la fruizione da parte di utenti in possesso di normali personal computer, ma allo stesso tempo mantenendo un elevato grado di dettaglio visivo.

L'Image Based Data Processing è una tecnica che consiste nel trasferire il dettaglio di un modello tridimensionale ad elevato numero di poligoni (High Poly - HP) a speciali texture bidimensionali, che applicate ad un modello Low Poly (il modello LP è ottenuto riducendo il numero di poligoni del modello originale, fase detta di decimazione) ripristineranno il dettaglio visivo. Questa tecnica permette quindi di avere modelli tridimensionali di dimensioni ridotte, facilmente visualizzabili nella maggioranza dei personal computer, ma con un dettaglio visivo elevato, in quanto fornito dalla texture bidimensionali.

Tali texture sono definite come bump map (mappe di rilievo) e ne esistono diverse tipologie, ognuna delle quali memorizza le informazioni relative al dettaglio in maniera differente (normal map, height map e displacement map).

“Nel campo del *mesh processing*, è prassi utilizzare strumenti di decimazione “intelligente” che attraverso un ricampionamento delle nuvole di punti infittiscono il dettaglio in corrispondenza dei settori del modello dotati di maggior curvatura: se tutto ciò permette di conseguire modelli *mesh* più facilmente gestibili e in seguito convertibili in modelli matematici, dall'altro ci pone di fronte ad un consistente problema metodologico, poiché una parte del dettaglio acquisito viene in ogni caso cancellata. [...] Oggi, il problema dell'attendibilità della restituzione rispetto al modello a nuvola di punti, non riguarda solo gli elaborati disegnativi finalizzati a pratiche manutentive o conservative, ma interessa anche il tema della visualizzazione a fini divulgativi come nel



caso della prospettiva dinamica interattiva. Non a caso nel campo dell'allestimento e più in generale della divulgazione via *web*, è sempre più frequente il ricorso ad applicazioni *real-time* che permettono l'esplorazione interattiva di ambienti od oggetti non fisicamente presenti in una collezione, ma tematicamente affini alla narrazione proposta in sede museologica.”<sup>12</sup> Da un lato, è quindi importante mantenere un elevato grado di dettaglio del modello, grazie anche alla notevole accuratezza fornita dal rilievo tramite Laser Scan. Dall'altro, si riscontra la necessità di garantire una pratica gestione del modello, non solo su workstation ma anche su dispositivi desktop domestici che possono fruire dei modelli tramite piattaforme *web*. È per far fronte a queste necessità di leggerezza e praticità che si utilizzano le *bump map*, ossia texture bidimensionali che raccolgono informazioni relative al dettaglio geometrico di un modello tridimensionale.

“Sono state sviluppate [...] tecniche di restituzione da rilevamento 3D *Laser Scan* improntate all'ottimizzazione dei modelli numerici ad alta densità (modelli *high-poly*, HP). Per indicare tali metodologie è stato creato un acronimo (IBDP) sotto il quale sono raggruppate differenti procedure finalizzate all'ottimizzazione di modelli HP attraverso l'utilizzo di soluzioni informatiche provenienti dal campo delle applicazioni videoludiche. L'aspetto innovativo dell'IBDP risiede nel differente approccio al problema dell'ottimizzazione di modelli numerici: esso non si basa sulla decimazione dei poligoni, bensì sulla conversione del dettaglio geometrico in speciali *bitmap*. Com'è noto, i modelli a nuvola di punti da un lato permettono di documentare morfologie assai complesse con elevata accuratezza, dall'altro si scontrano con l'impossibilità costitutiva di poter impiegare la totalità delle misurazioni effettuate per sviluppare modelli 3D sia di tipo numerico che matematico.”<sup>12</sup> Le *bump map* vengono generate tramite confronto tra due versioni dello stesso modello tridimensionale, uno ad alto ed uno a basso numero di poligoni (processo chiamato *baking*). Grazie a tali texture è possibile restituire al modello a ridotto numero di poligoni il dettaglio visivo fornito dal modello ad alto dettaglio, con un notevole risparmio in termini di numero di poligoni e di conseguenza dimensioni del file del modello e tempo di rendering. “Per effettuare il *baking* è necessario avere a disposizione un modello HP, accompagnato dalla sua versione semplificata costituita da poligoni quadrangolari o triangoli; in entrambi i casi è necessario mappare precedentemente questa versione alleggerita nel sistema di riferimento (u,v).”<sup>11</sup> “Le due tecniche /normal map (NP) e displacement map (DP)/ hanno in comune la caratteristica

di trasferire il dettaglio geometrico fornito da miriadi di poligoni in speciali immagini applicate ad una replica Low-Poly (LP) del modello HP, dotata di parametrizzazione e cioè un sistema di riferimento opportunamente congegnato per l'applicazione di *texture*.”<sup>12</sup>. “Le mappe di scostamento [...] sono ottenute attraverso un calcolo chiamato *baking* (oppure *render to texture*, *bake from object to texture*, etc.): questa caratteristica è di fondamentale importanza perché evita l'empirismo che classicamente caratterizza queste procedure nell'ambito della computer grafica, ma anche perché permette di codificare esattamente, sotto forma di immagine, i valori di scostamento esistenti tra il modello /low-poly (LP) - a basso dettaglio/ e il modello ad alto dettaglio geometrico da *Laser Scan* o *high poly* (HP).”<sup>11</sup>

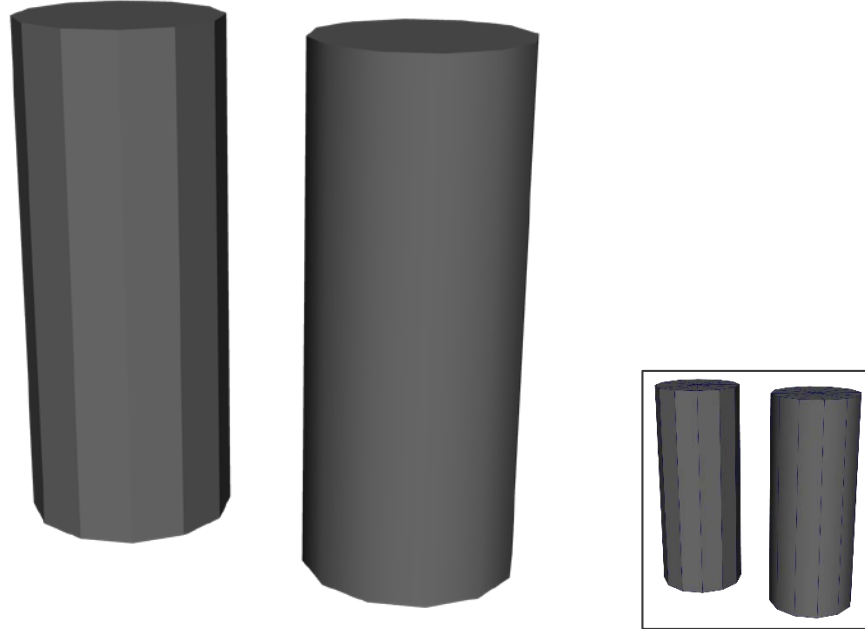
### 5.1. *Normal map*

Con normali (normals) si intendono i vettori normali alla superficie di un modello 3D, e vengono impiegate per calcolare il comportamento della luce che raggiunge la superficie (illuminazione, riflessione, eventualmente rifrazione per materiali trasparenti, ecc...). Per evitare una rappresentazione sfaccettata con spigoli vivi, ai modelli 3D si applica lo smoothed shading, una funzione che fa variare con continuità il valore delle normali tra due poligoni adiacenti. “Le normali in ogni punto in cui la luce viene riflessa variano gradualmente lungo il poligono, così che per ogni dato punto della superficie la luce rimbalza *come se la superficie fosse curva* e non piatta come quella reale del poligono.”<sup>4</sup> Il risultato è che l'aspetto del modello non è più spigoloso, ma smussato. Occorre impostare un valore limite che rappresenta l'angolo formato da 2 poligoni adiacenti. La funzione di smoothed shading viene applicata solo ai poligoni che formano angoli inferiori. Spesso si consiglia di utilizzare un angolo molto elevato, come ad esempio 89°; ciò significa che un cubo, in cui gli angoli tra le facce adiacenti sono di 90°, avrà effettivamente l'aspetto di un cubo, ed ogni faccia avrà la propria normale costante su tutta la superficie. Un prisma retto a base dodecagonale, con angoli di 30° tra le facce laterali adiacenti, verrà invece visualizzato come un cilindro. Occorrerà impostare un

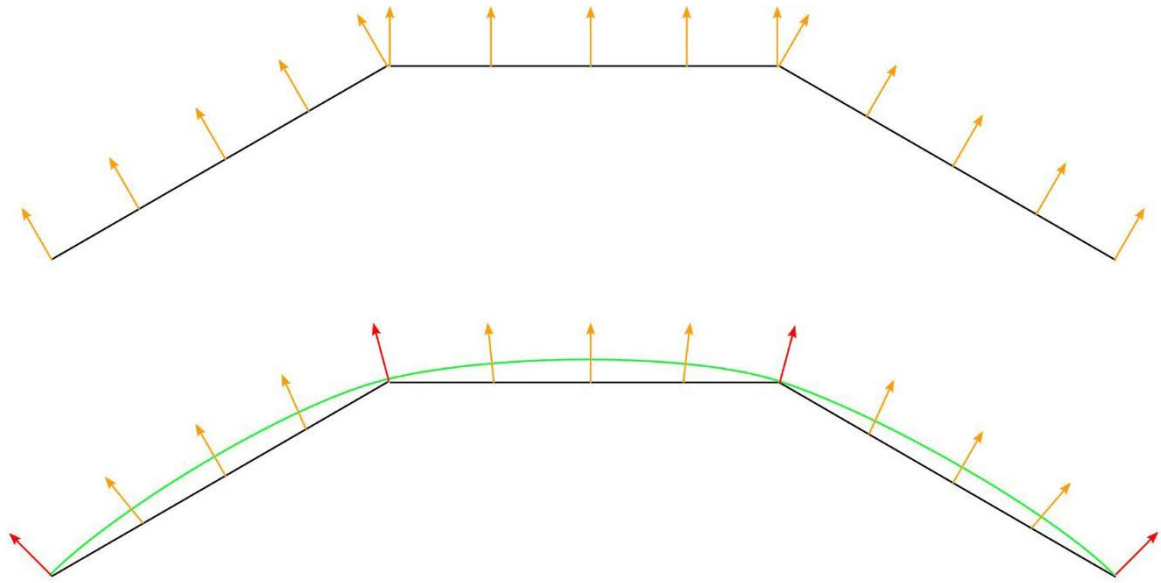
---

<sup>11</sup> Colore e colorimetria – Contributi multidisciplinari, a cura di Maurizio Rossi e Andrea Siniscalco, Capitolo di Filippo Fantini, Pablo Rodriguez-Navarro, Sergio di Tondo, Maggioli Editore, 2012, pag 31-38

angolo limite inferiore a  $30^\circ$  per ottenere la visualizzazione piatta delle facce e spigoli vivi.



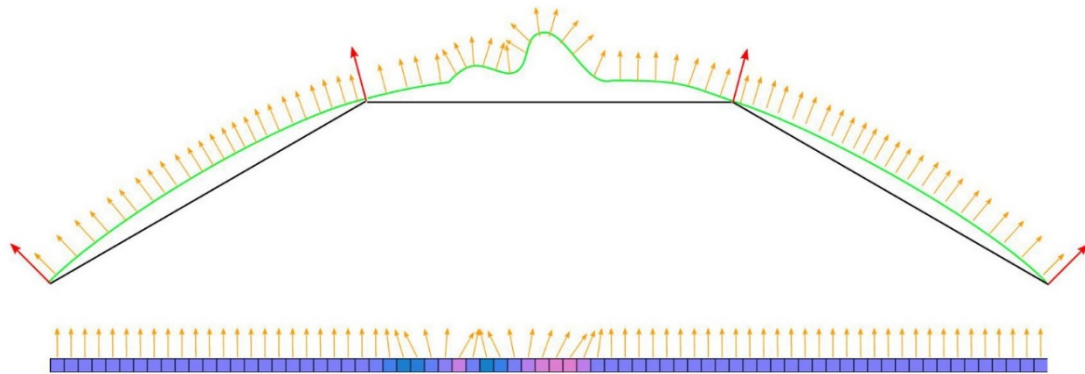
*2 prismi a base dodecagonale, costituiti dallo stesso modello poligonale. A sinistra, normali applicate per poligono; a destra, applicata funzione di smoothed shading con angolo superiore a  $30^\circ$  che restituisce l'aspetto di un cilindro. Si nota che la base non è circolare, ma poligonale. Questo perché le modifiche alle normali non modificano mai la geometria del modello. In piccolo, wireframe che evidenzia gli spigoli della geometria di base.*



*Schematizzazione 2D della funzione di smoothed shading applicata al prisma a base dodecagonale della figura precedente. In alto, normali applicate per poligono; in basso, la funzione di smoothed shading genera una variazione costante delle normali che restituisce un aspetto smussato (cilindrico in questo caso) (immagine da: docs.unity3d.com, Unity - Documentation - Normal map (Bump mapping)).*

Le normal map sono una tipologia di bump map, ossia texture bidimensionali che permettono di incrementare il dettaglio visivo di un modello tridimensionale. Le normal map immagazzinano nei 3 canali RGB di ogni pixel, le 3 componenti xyz che rappresentano la deviazione del vettore normale alla superficie. In questo modo, la normal map permette una diversa illuminazione e riflessione della luce all'interno di una stessa faccia, restituendo visivamente un maggior dettaglio (visivamente, in quanto la mesh è costituita da un numero relativamente basso di poligoni, tuttavia viene visualizzato un maggiore dettaglio grazie alle informazioni fornite dalla normal map).

Come detto, la deviazione del vettore normale alla superficie è rappresentata dai canali RGB di ogni pixel che rappresentano rispettivamente le componenti xyz. Se la normale alla superficie non deve essere deviata, nel pixel viene salvato il dato RGB (0.5,0.5,1). Questo perché ogni dato viene moltiplicato per 2 e in seguito sottratto 1, ed in questo caso il colore (0.5,0.5,1) rappresenta il vettore (0,0,1), ovvero l'asse z, quindi senza deviazione della normale alla superficie.

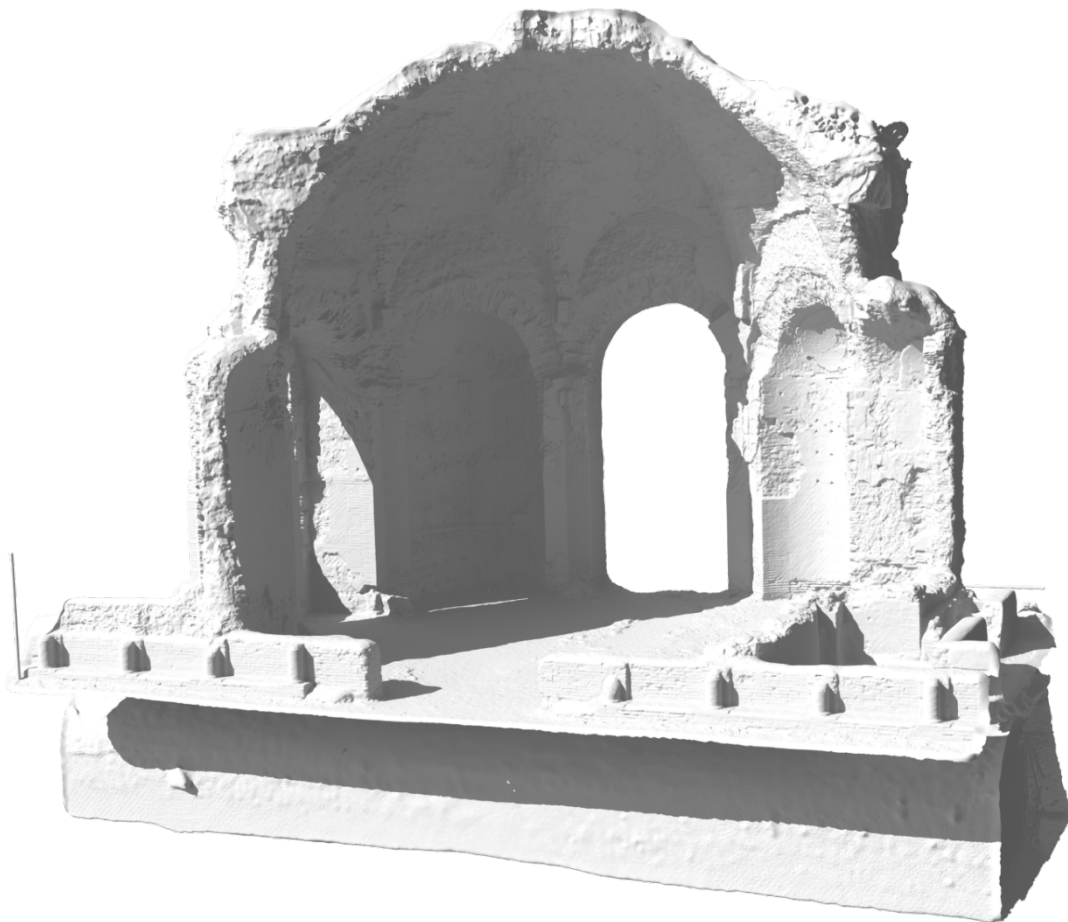


*Schematizzazione 2D dell'applicazione di una texture normal map ad un modello. La curva verde rappresenta il modello iniziale ad alto dettaglio, in nero le linee del modello 3D poligonale. In basso, la normal map che applicata al modello poligonale ne modifica le normali, in modo da rendere visibile il dettaglio iniziale (immagine da: docs.unity3d.com, Unity - Documentation - Normal map (Bump mapping)).*

## 5.2. UV mapping (parametrizzazione)

La mappatura (u,v) consiste nel generare una corrispondenza tra un modello 3D (coordinate x,y,z) e lo spazio 2D della texture (coordinate u,v). Nel processo di creazione delle normal map, la fase di mappatura (u,v) è molto importante, dato che nello spazio 2D (mappato con coordinate u,v e riferito al modello LP) verrà generata la texture tramite la procedura di baking (ogni poligono del modello LP viene quindi associato ad una precisa porzione della texture). Per massimizzare la resa finale delle normal map, è quindi necessario: massimizzare l'area della texture mappata (ossia riducendo al minimo le aree della texture vuote, non associate ad alcun poligono) garantendo che il maggior numero di pixel sia in grado di memorizzare informazioni; ridurre a 0 la sovrapposizione di poligoni (corrispondenza biunivoca), evitando che la stessa porzione di texture sia associata a diversi poligoni, (in tal caso sarebbero fornite informazioni identiche a poligoni differenti). Se la corrispondenza biunivoca è rispettata, il modello si dice parametrizzato. "Parametrizzazione: è l'operazione che permette di associare ad ogni punto di un poliedro in  $\mathbb{R}^3$ , uno ed un solo punto in  $\mathbb{R}^2$  appartenente al medesimo poliedro a seguito di una trasformazione che lo ha convertito in una figura geometrica piana. Un oggetto si dice "parametrizzato", quando si è stabilita una corrispondenza biunivoca fra i *pixel* della *bitmap* ed i *texel* della *mesh*. Comunemente si utilizza il termine (u,v) *mapping* per definire la serie di operazioni che portano alla parametrizzazione dei modelli numerici

che, a differenza dei modelli matematici, non nascono con una parametrizzazione naturale. La “replica” 2D del modello 3D all’interno del sistema di riferimento (u,v) viene indicata con  $\Omega$  e prende il nome di (u,v) *parameter space*.<sup>12</sup>. “È importante notare che le coordinate *uv* sono applicate per facce, non per vertice. Questo significa che un vertice condiviso potrebbe avere differenti coordinate *uv* in ognuno dei triangoli, così triangoli adiacenti possono essere tagliati separatamente e posizionati su differenti aree delle *texture map*.”<sup>13</sup>

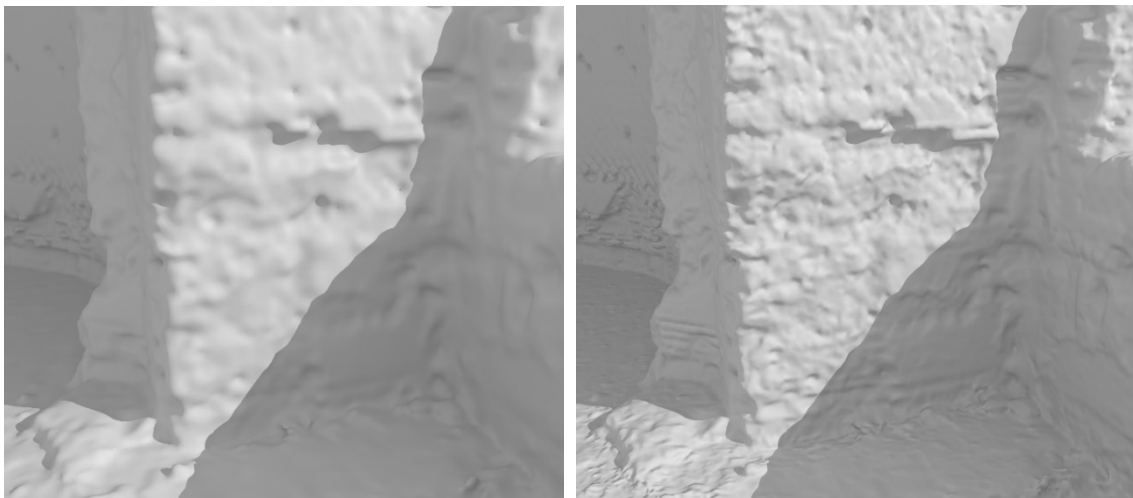
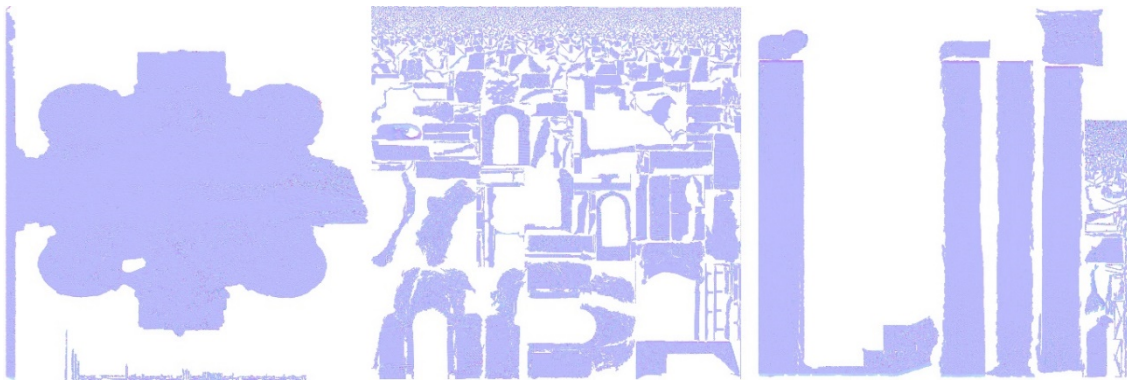


*In modello del vestibolo sito in Piazza d’Oro a Villa Adriana, Tivoli, realizzato tramite rilievi con Laser Scan*

---

<sup>12</sup> Il modello in architettura – Cultura scientifica e rappresentazione, a cura di Emma Mandelli e Uliva Velo, Capitolo di Filippo Fantini, Alinea Editrice, 2010, pag 149-158

<sup>13</sup> Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei, Capitolo di Simone Baldissini, Marco Gaiani, Fabio Remondino, pagg 201-235

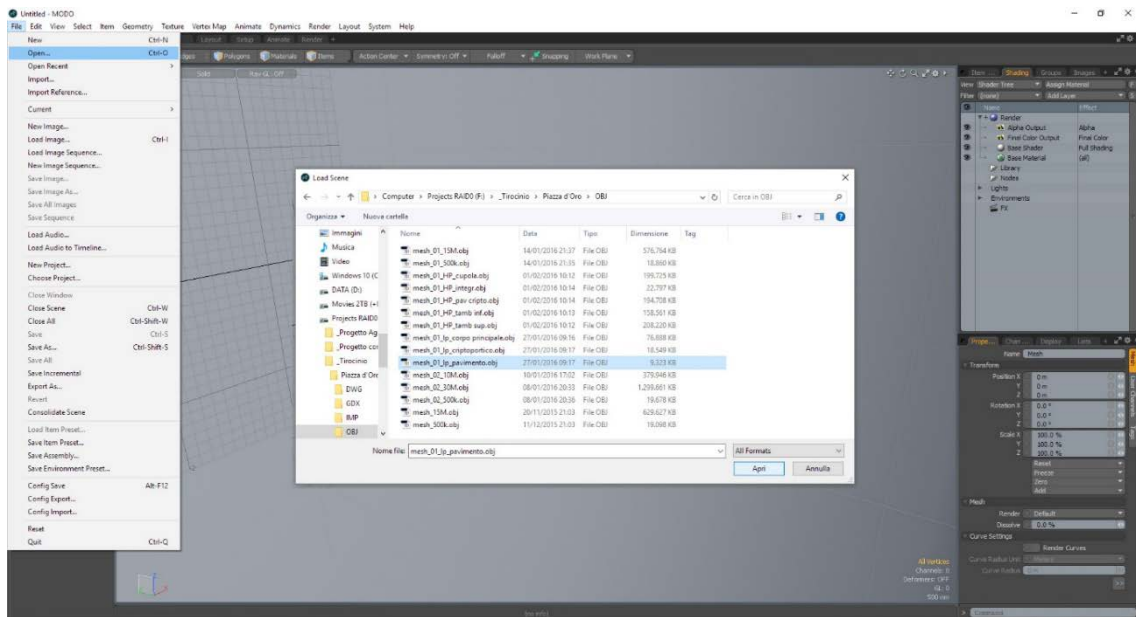


*Il modello conta un totale di 2.689.185, ad esso sono applicate 3 normal map (in alto) aventi risoluzione quadrata rispettivamente di 4096, 8192 e 4096 pixel di lato. In basso, ingrandimento di una porzione del modello senza e con applicazione delle normal map.*

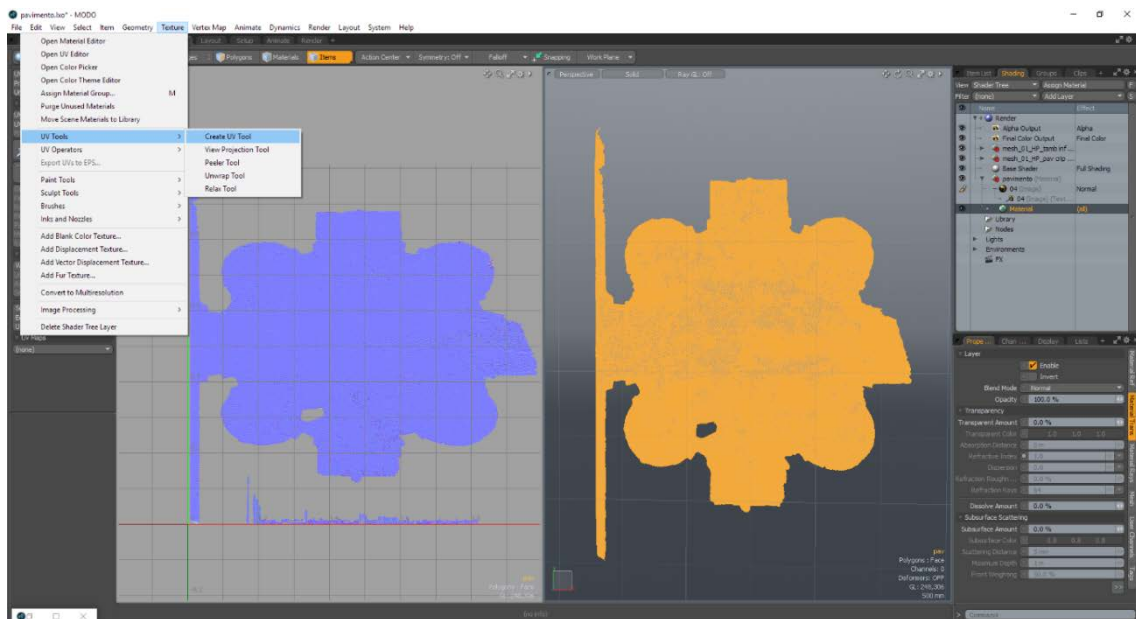
### 5.3. Creazione normal map

Per la creazione delle normal map, è stato utilizzato il software di modellazione tridimensionale Modo. Il software rileva poligono per poligono la differenza della direzione della normale alla superficie tra il modello HP e quello LP e trasferisce queste informazioni su un'immagine bidimensionale, che applicata al modello LP, gli conferirà un dettaglio visivo simile al modello HP. In questa fase del processo, il modello HP è costituito dalle 4 mesh ad alto dettaglio, mentre il modello LP è costituito dalle 3 mesh a basso dettaglio corrispondenti alle 3 porzioni create precedentemente. Per procedere alla creazione delle normal map, è necessario aprire il file obj LP all'interno del programma modo. È necessario eseguire l'UV mapping, ovvero creare una mappa che legherà poligono per poligono il modello mesh a basso dettaglio allo spazio bidimensionale su

cui sarà generata la normal map. L'UV mapping è molto importante perché determina la corrispondenza bi-univoca tra texture 2D e modello 3D, ed una mappa UV corretta permette di massimizzare l'utilizzo dello spazio texture per acquisire la massima quantità di informazioni utili per recuperare il dettaglio visivo. All'interno del software esistono dei comandi che generano la mappa UV in modo automatico, quale il comando *atlas* che



Schermata del software Modo: apertura del file mesh\_01\_lp\_pavimento.obj corrispondente al modello low poly

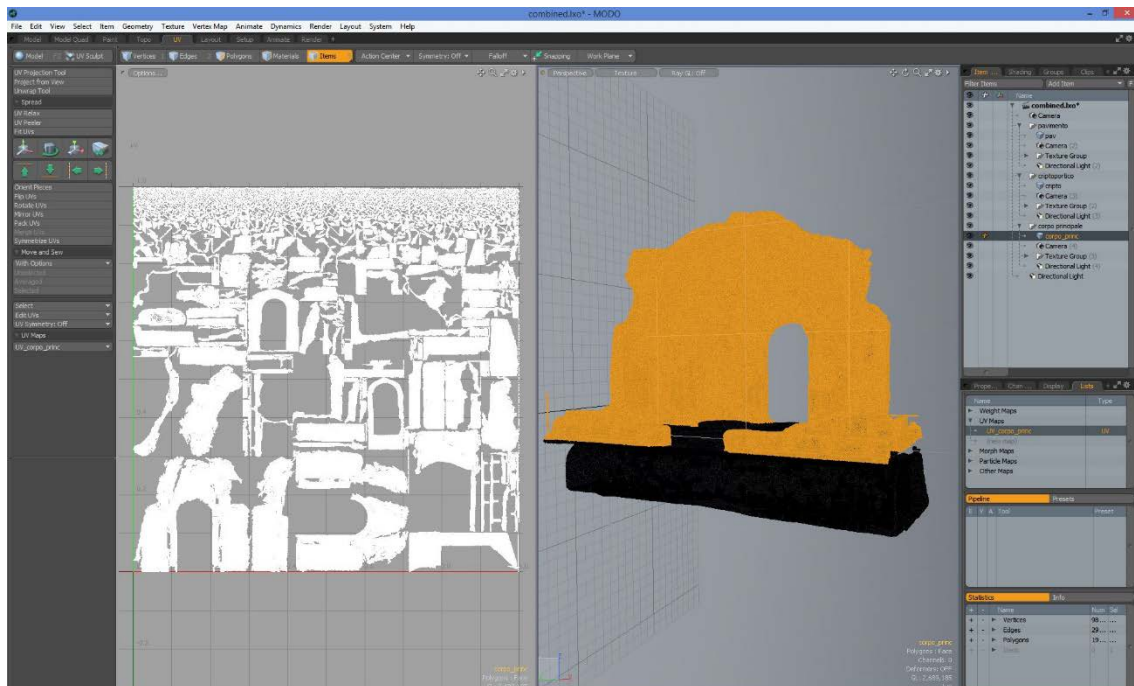


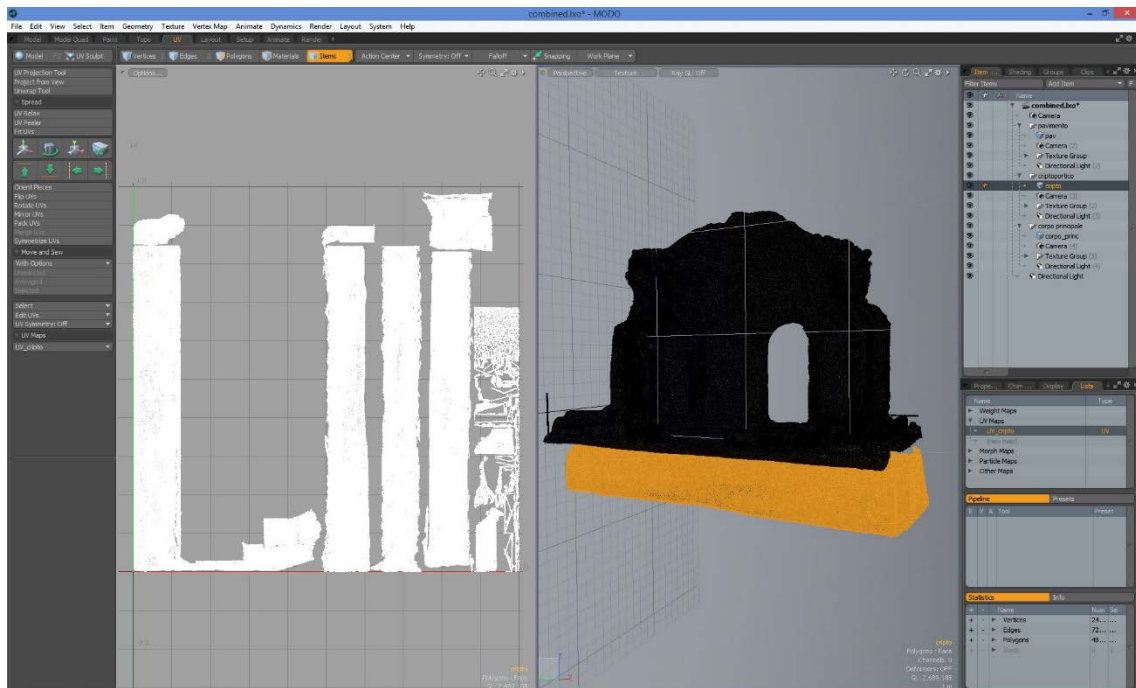
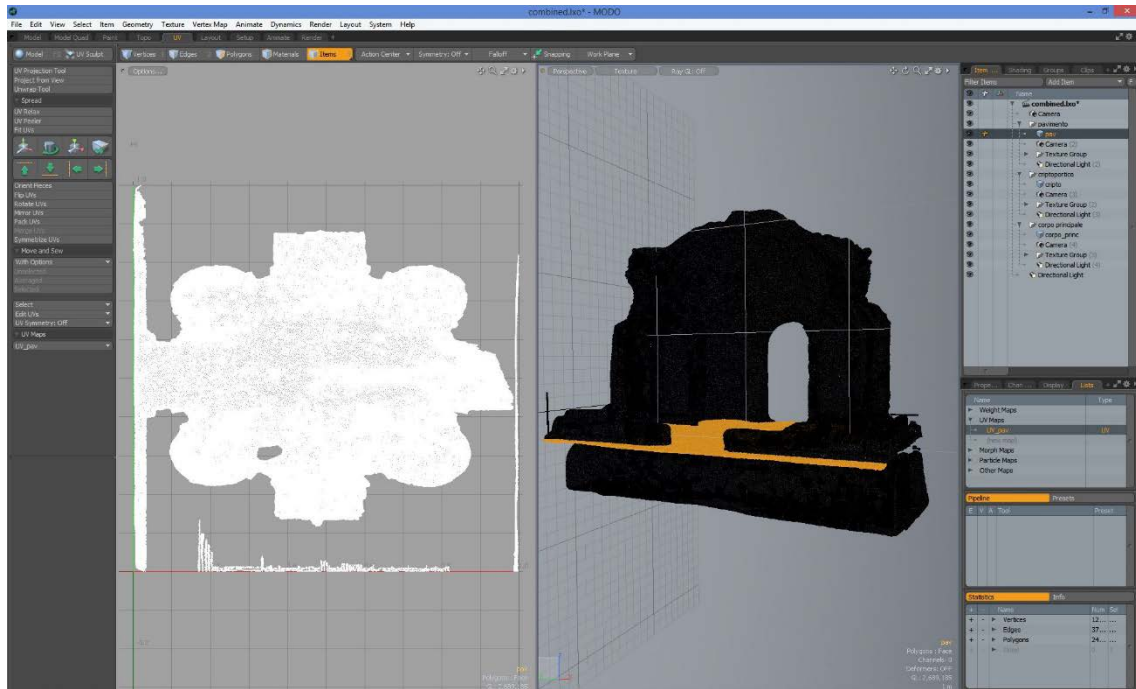
Schermata del software Modo: generazione della mappa uv relativa alla mesh lp del pavimento



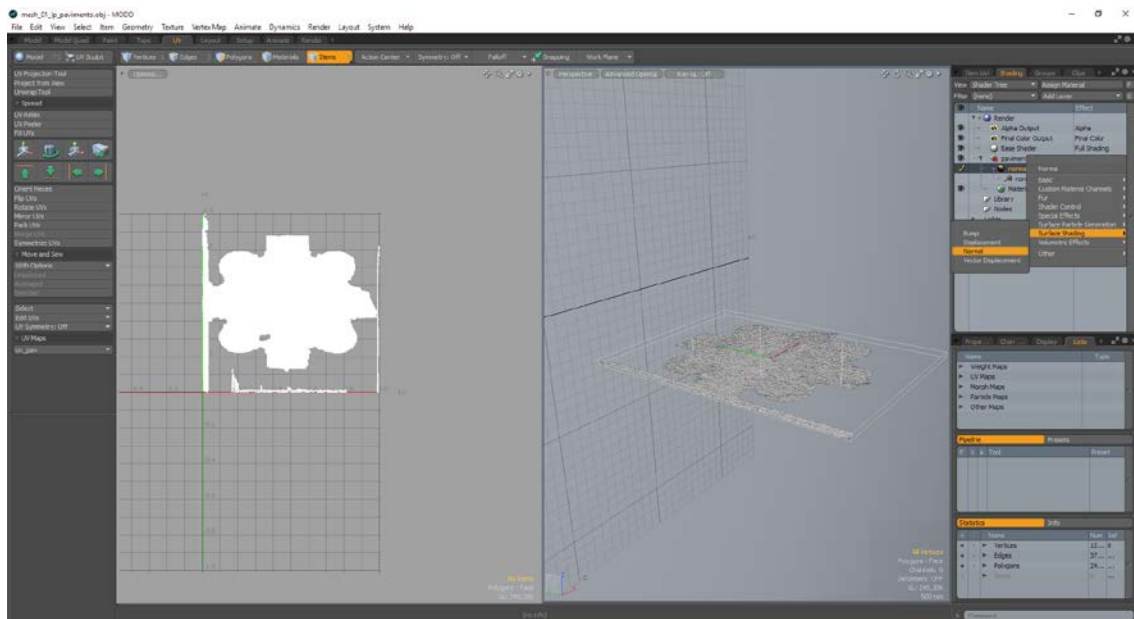
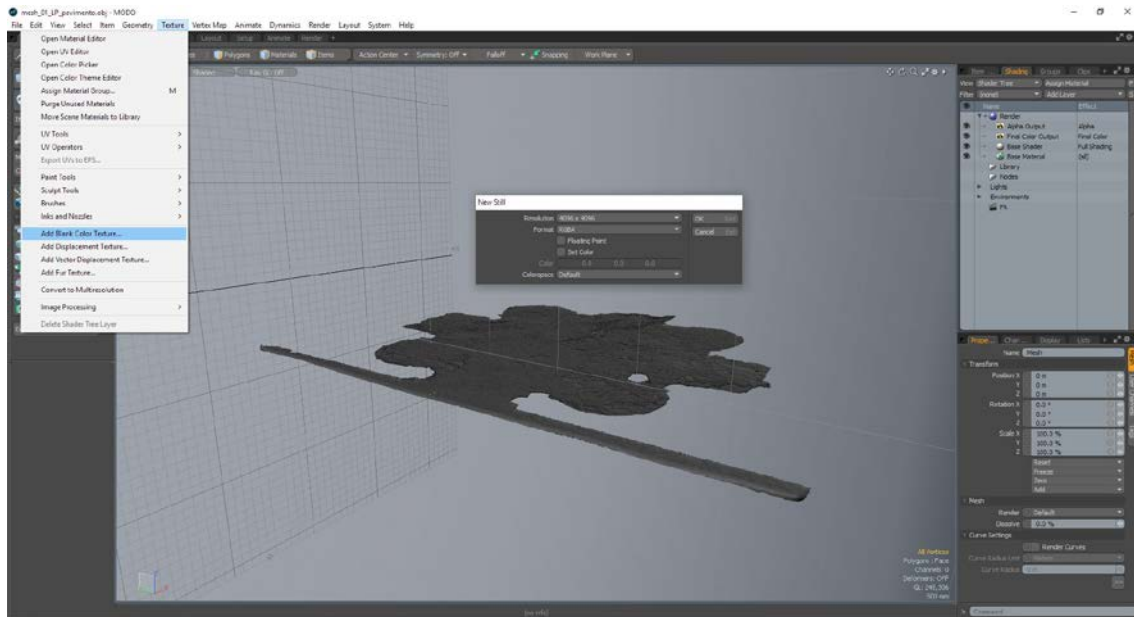
stende i poligoni della mesh sullo spazio bidimensionale. È un comando molto comodo ed efficace, ma è comunque consigliabile correggere manualmente la disposizione dei poligoni in modo da utilizzare la maggiore superficie a disposizione nella texture. Generata la mappa UV, occorre creare la texture vuota associata alla mesh e impostarla come normal map in modo che il software esegua l'operazione corretta. Il formato utilizzato è il targa, un formato immagine non compresso che include anche il canale alpha, ossia il canale della trasparenza. Le porzioni di texture non associate ad alcun poligono resteranno infatti trasparenti. Successivamente si importano i file ad alto dettaglio come riferimento.

Infine si esegue la generazione vera e propria delle normal map, con il comando *bake from object to texture*.

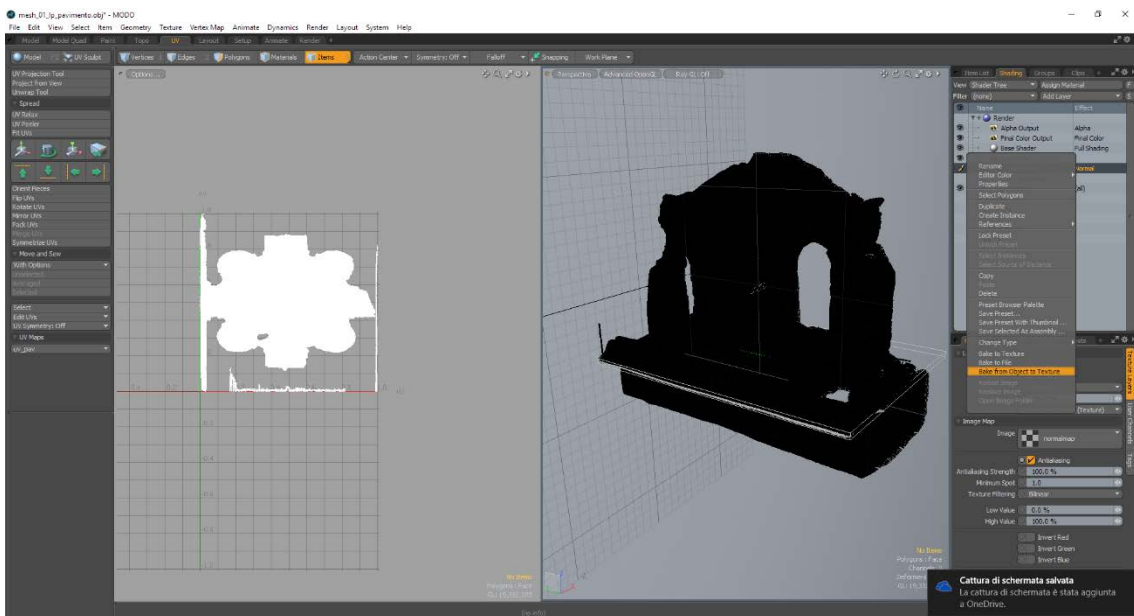
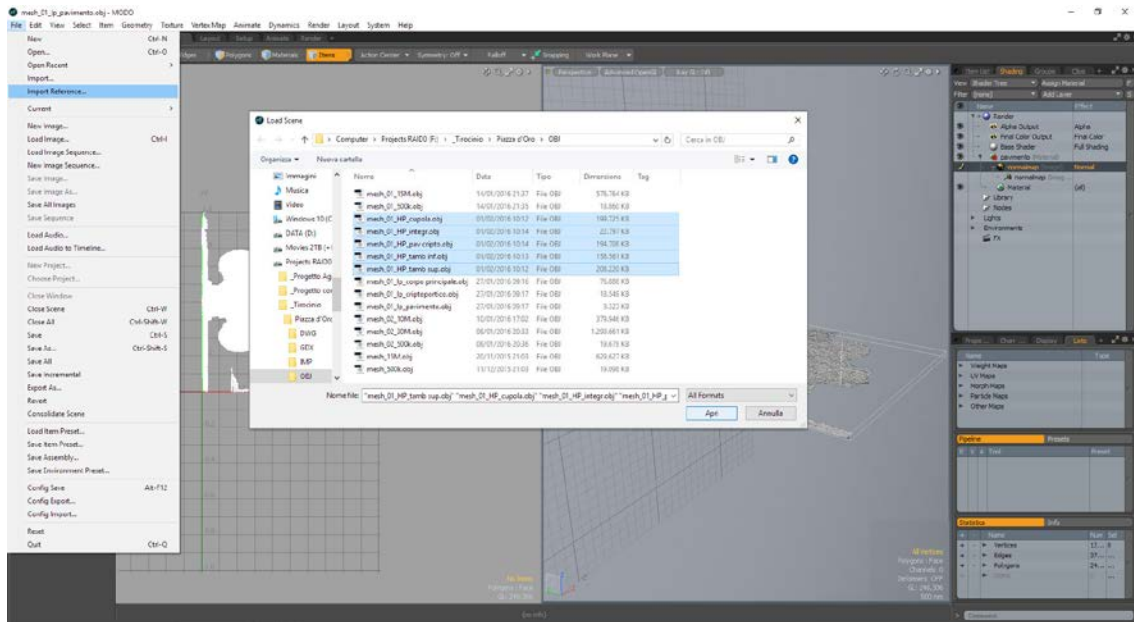




*Schermate del software Modo: unione nello stesso progetto delle 3 mesh low poly. Visualizzazione delle mappe uv relative ad ogni porzione del modello (in questa pagina e nella precedente).*



*Schermate del software Modo: creazione texture vuota (blank texture) applicata alla mesh lp del pavimento (sopra) ed impostata come normal map (sotto).*



Schermata del software Modo: importazione della mesh hp di tutto il vestibolo (sopra), necessarie per eseguire l'operazione di baking che genererà le normal map (sotto).

**File creati**

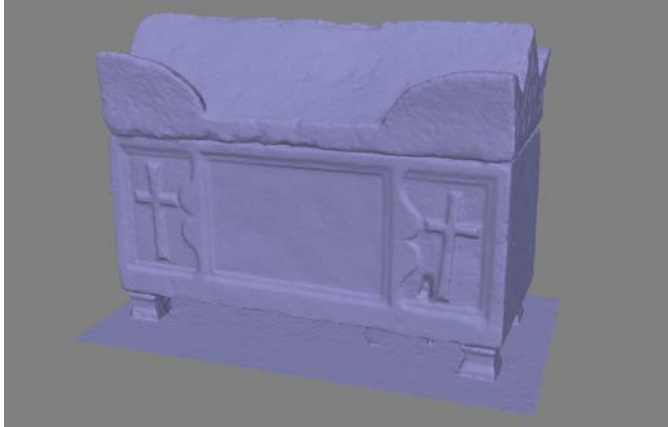
Nome	Formato	Dimensione	Risoluzione
03.tga	tga (immagine con canale alpha)	262 MB	8192x8192
04.tga	tga (immagine con canale alpha)	65 MB	4096x4096
05.tga	tga (immagine con canale alpha)	65 MB	4096x4096

## 6. Texture del colore diffuso

L'applicazione di texture del colore diffuso ai modelli 3D è fondamentale per conferire al modello le proprietà visive che ne incrementano il realismo e permettano una comprensione ancor più immediata della geometria e dei materiali di cui è composto. “Gli scanner 3D attuali sono tutti muniti di una camera digitale, ma generalmente la qualità (sia geometrica che radiometrica) delle immagini è molto bassa. Per questo le informazioni relative alla proprietà di riflettanza sono solitamente acquisite mediante camere fotografiche digitali e riprese separate dalla scansione.”<sup>13</sup> L'obiettivo è quello di generare una texture che rappresenti il colore proprio dell'oggetto, indipendente quindi dall'illuminazione, dalle ombre, dai riflessi e da ogni altro fattore esterno. “L'input è un insieme di immagini a colori, i loro parametri di camera (cioè orientamento e calibrazione) e la geometria 3D della scena. L'output richiesto, generato con la procedura detta di *texture mapping*, è una *texture map* [...] in grado di riprodurre fedelmente le proprietà di riflettanza della superficie reale modellata.”<sup>13</sup> Tuttavia, ottenere l'effettivo colore dell'oggetto è molto difficoltoso in quanto in fase di rilievo l'oggetto è caratterizzato da illuminazione, ombre, riflessi ed altri parametri incontrollabili che influenzano l'acquisizione del colore. “L'obiettivo è quello di evitare la mancanza di coerenza fra le ombre proprie e portate dei frammenti marmorei rispetto alle murature una volta riposizionati in ambiente 3D, così come la presenza di dominanti cromatiche presenti nella scena al momento della campagna fotografica.”<sup>11</sup> “Lo scopo dell'acquisizione è quindi quello di ottenere una descrizione di superficie invariante all'illuminazione - che è ciò che è intrinseco alla superficie e indipendente da specifiche condizioni di illuminamento.”<sup>13</sup> È indispensabile generare texture dell'effettivo colore dell'oggetto, in quanto avverrà digitalmente l'inserimento delle luci nella scena, e in fase di rendering avverrà il calcolo dell'illuminazione diretta, indiretta, delle ombre e dei riflessi. “Al fine di una corretta visualizzazione del modello 3D è necessario identificare nel modo più fedele possibile - quindi almeno percettivamente se non metricamente - colore, tessitura, proprietà di riflettanza delle superfici e visualizzarle altrettanto fedelmente. La fedeltà della riproduzione del colore dipende da una serie di variabili come: il livello di illuminazione al momento dell'acquisizione, le caratteristiche tecniche



del sistema di acquisizione, la rappresentazione matematica dell'informazione sul colore attraverso tutta la catena di digitalizzazione.”<sup>13</sup>



*Modello del sarcofago di Piazza San Francesco, Ravenna. A fianco, modello 3D di 1.000.000 di poligoni; in basso, modello con applicazione della texture del colore diffuso, avente risoluzione di 6000x6000 pixel. Da notare il colore scuro del pavimento al di sotto del sarcofago, dovuto alle ombre non eliminabili per il rilievo in esterno.*



Le texture di colore diffuso presentano quindi notevoli problematiche in fase di acquisizione, che rendono il rilievo del colore difficoltoso ed oneroso in termini di tempo, tecnologia e capacità tecniche degli operatori. “La fase di *texture mapping* è una procedura abbastanza complessa per varie ragioni. La prima è che le immagini sono prese da diversi punti di vista con differenti gradi di scorciamento ed effetti dipendenti dal punto di vista. La seconda è che illuminazione e parametri della camera possono cambiare da uno scatto all'altro, generando immagini con scarti di colore. Infine in ambiente esterno è praticamente impossibile non avere ombre portate. [...] Le camere digitali consentono di identificare colore e riflettanza diffusa estese a tutto il manufatto, generalmente con poche riprese e successiva rielaborazione *software* con controllo della temperatura colore, per ottenere una riproduzione cromatica della zona campione con elevata approssimazione.”<sup>13</sup> È innanzitutto fondamentale regolare il tono delle diverse immagini in modo che tutte riproducano obiettivamente i colori, utilizzando dei target standard. “Al

fine di essere in grado di realizzare misure obiettive di ogni parametro radiometrico in gioco, è necessario utilizzare *target* differenti per diverse forme di immagini. I *target* sono usati, infatti, per verificare riproduzione di tono e colore dei materiali che si stanno rilevando, ma anche per misurare la risoluzione del sistema. Le immagini acquisite devono essere elaborate, così che uno sfondo bianco appaia come tale: questa operazione è chiamata bilanciamento (colore) del bianco. Il bilanciamento del bianco può essere facilmente ottenuto tramite un approccio di tipo ‘fisso’ che si realizza in presenza di un’illuminante noto (nel nostro caso dato dai valori noti delle *patch*).”<sup>13</sup>



*Kodak patches, per la correzione cromatica dei rilievi fotografici (immagine da: motion.kodak.com, KODAK Color Separation Guides and Gray Scales).*

Ulteriore problema riguarda la valutazione della relazione tra luce incidente e luce riflessa. In ogni punto dell’oggetto, il colore rilevato è costituito da una componente del colore proprio e da una componente di riflessione, ed il rapporto tra di esse varia in relazione all’angolo di incidenza. Per determinare l’entità di tali componenti è necessario avere un controllo completo dell’illuminazione della scena, impensabile in un sito esterno. “Normalmente il problema fondamentale nella fase di acquisizione è quello della ricerca delle relazioni tra luce incidente e luce riflessa in un determinato punto della superficie dell’oggetto rilevato. Il problema, nella sua formulazione generale, richiede la

conoscenza e il controllo sulle sorgenti luminose e l'influenza dell'ambiente sulle misurazioni. [...] La quantità fondamentale che codifica le proprietà intrinseche della superficie è la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) che descrive tutte le proprietà intrinseche di riflessione spettrale dell'oggetto. Per restituire accuratamente le qualità superficiali di un oggetto la BRDF deve essere nota in tutti i punti della superficie. [...] Purtroppo in ambiente esterno l'acquisizione della BRDF completa e corretta è praticamente impossibile per la presenza della luce naturale, delle interriflessioni fra gli oggetti, per l'ambia area che ricoprono le superfici che richiederebbero una quantità impensabile di misurazioni e, infine, per la difficoltà tecnica di un'accurata misura della BRDF.”<sup>13</sup>

Come già detto, nel campo del rilievo architettonico è impossibile avere un controllo completo delle luci, inoltre la presenza di diversi materiali e forme rendono praticamente impossibile ricavare una texture colore fedele in ogni punto. “Nel caso pratico dell'architettura e dell'archeologia in ambiente esterno è impossibile ricondursi a condizioni standard ripetibili soprattutto perché è estremamente complesso e dispendioso (in termini di tempo ed attrezzatura) caratterizzare la sorgente di luce naturale che cambia ogni istante. [...] L'oggetto architettonico poi comporta la presenza di elementi appartenenti a piani differenti, superfici curve, materiali differenti che reagiscano alla luce in maniera diversa, superfici molto ampie, specie se considerate alle esigue dimensioni della patch cromatica. [...] Questi aspetti fanno sì che l'applicazione teorica del processo di calibrazione possa dare risultati inattesi.”<sup>13</sup>

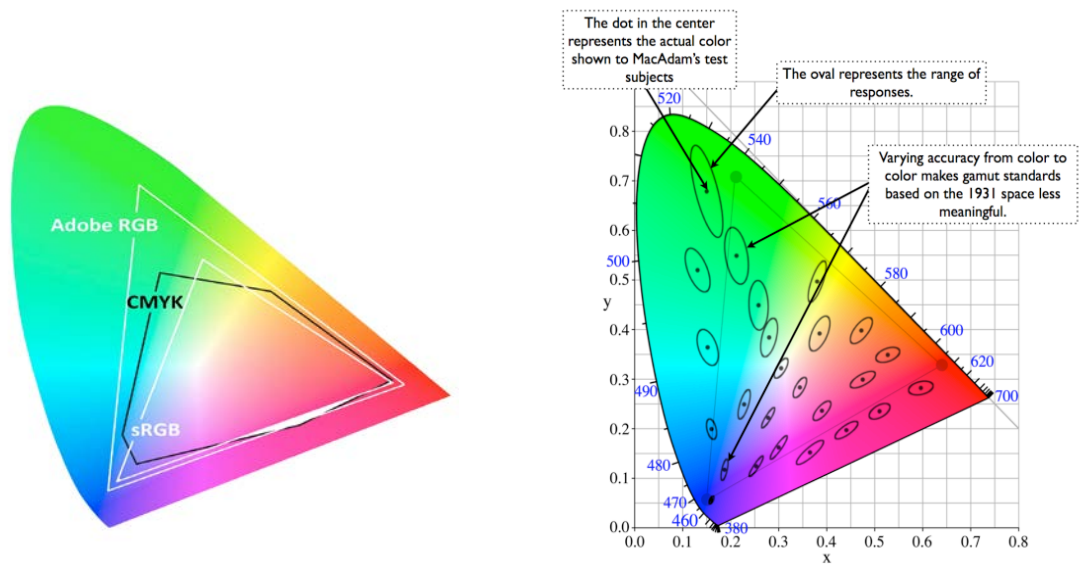
## 6.1. Spazio colore

“Ogni dispositivo atto ad acquisire o mostrare immagini, è caratterizzato da un proprio metodo di rappresentazione interna del colore e dall'insieme di colori (la gamma dei colori [...]) che è in grado di acquisire/visualizzare determinato dalla tecnologia su cui si basa. Questo determina che un dato colore sarà rappresentato su dispositivi diversi in differenti maniere. Questa discrezionalità nell'elaborazione delle informazioni cromatiche ha portato alla necessità di stabilire degli standard per consentire che un certo colore possa essere rappresentato in maniera il più possibile fedele su differenti dispositivi. [...] La CIE /nel 1931/ ha sviluppato un sistema di coordinate artificiali, in cui i valori di tristimolo richiesti per far corrispondere tutti i valori percepiti sono resi positivi

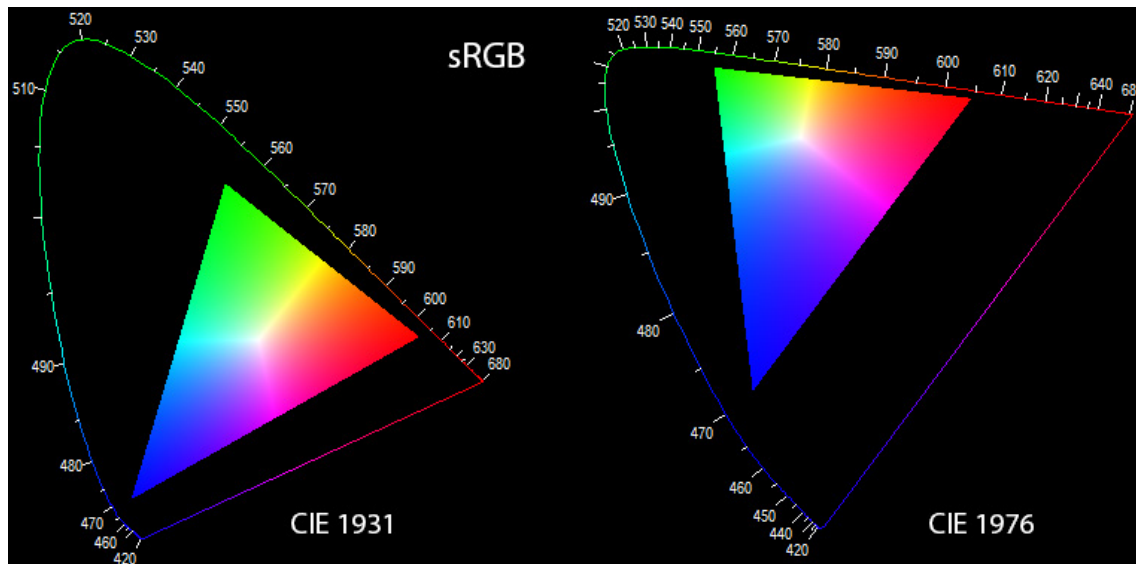


e designati con le coordinate X, Y e Z. [...] I vertici del triangolo rappresentano le coordinate dei colori primari di un dispositivo di addizione del colore, specificatamente i colori dei tre fosfori di un monitor RGB. La regione compresa nel triangolo rappresenta il *gamut* del monitor; molti colori percepibili sono al di fuori del triangolo e non possono essere restituiti con questo dispositivo. L'esagono irregolare rappresenta il *gamut* di dispositivo di sottrazione del colore, specificatamente di una stampante a sublimazione: tutti i colori stampabili da questo dispositivo sono compresi nell'esagono. Di nuovo un'ampia gamma di colori percettibili non può essere rappresentata dal dispositivo.”<sup>13</sup>

Una problematica dello spazio colore sviluppato nel 1931, consiste nell'impossibilità di fornire una tolleranza uniforme in tutto lo spazio colore, in quanto a parità di spostamento, in diverse regioni dello spazio si hanno diverse variazioni cromatiche. “Per tale motivo la CIE ha definito nel 1976 un nuovo spazio colore le cui coordinate, chiamate  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  sono descritte in termini di coordinate CIE XYZ.  $L^*$  è la componente di luminosità,  $a^*$  (dal verde al magenta) e  $b^*$  (dal blu al giallo) sono le componenti cromatiche.  $L^*a^*b^*$  include tutti i colori fisicamente realizzabili ed è vicino ad essere percettualmente uniforme, il che significa che una variazione di colore è approssimativamente della stessa dimensione attraverso lo spazio.”<sup>13</sup>. Per garantire la stessa rappresentazione dei colori su diversi dispositivi di tipo desktop, si fa riferimento alla tecnologia chiamata *device-independent color*. “Essa è il processo col quale le caratteristiche di colore digitale delle periferiche sono misurate in uno spazio colore standardizzato e indipendente, attraverso cui i dati immagine sono trasferiti da un dispositivo ad un altro.”<sup>13</sup>



A sinistra, gli spazi colore Adobe RGB, sRGB e CMYK, rappresentati nel grafico CIE XYZ (1931) (immagine da: [www.dpreview.com](http://www.dpreview.com)). A destra, la dimensione variabile delle ellissi all'interno dello spazio colore CIE XYZ, indica che in punti diversi dello spazio colore, a parità di variazione cromatica, si riscontrano spostamenti differenti sugli assi xyz (le ellissi, che rappresentano la stessa variazione cromatica, hanno dimensioni nettamente differenti a seconda della collocazione nello spazio) (immagine da: [dotcolor.com](http://dotcolor.com), Color space confusion).



Spazio colore sRGB (regione triangolare) collocato nello spazio colore CIE XYZ (1931) e nello spazio colore CIE  $L^*a^*b^*$  (1976) (immagine da: software CIE Chromaticity Diagrams, efg's Computer Lab).

“Gli spazi colore possono essere ottimizzati per la visualizzazione di immagini e modelli 3D a schermo. In questo campo il formato di riferimento è certamente lo sRGB, descritto dalle norme IEC 61966-2-1 della *International Electrotechnical Commission* (IEC) come uno spazio colore di *default* per applicazioni multimediali.

Il formato sRGB è stato sviluppato come uno spazio monitor medio *device-independent* per il Web da Hewlett-Packard e Microsoft, con lo scopo di essere da complemento alle strategie esistenti per la gestione del colore. [...] sRGB è uno spazio colore di utilizzo semplice che può essere impiegato su monitor di caratteristiche sconosciute, senza alcuna trasformazione addizionale. Tuttavia, per trasformare i dati nello spazio sRGB e quindi in dispositivi con differenti intervalli dinamici, gamma e condizioni di osservazione sono richieste conversioni. Lo sRGB, inoltre, è progettato solo per dati a 24 bit, non lascia bit per modificare l'immagine o mapparla in un altro dispositivo di output e vi è una forte mancanza di corrispondenza tra la gamma sRGB e la gamma CMYK necessaria per la stampa. [...] sRGB è definito con gamma 2.2: questo valore è stato scelto anche perché consente gradazioni di grigio scalate in modo lineare (come nella percezione umana). Se ciò funziona bene per i PC, che usano tipicamente monitor con gamma 2.2, il sistema operativo di Apple, che usa come default una gamma di 1.8, tende a rendere le immagini sRGB più scure di come dovrebbero apparire.”<sup>13</sup>

## 6.2. *High dynamic range (HDR)*

Una delle principali differenze tra la vista umana e la fotografia digitale, consiste nell'estensione della gamma dinamica, ovvero il rapporto tra l'intensità luminosa minima corrispondente al bianco (oltre la quale ogni colore è percepito come bianco) e l'intensità massima corrispondente al nero (al di sotto della quale ogni colore è percepito come nero). “L'occhio umano è in grado di percepire almeno quattro ordini di magnitudine di luminanza. [...] La maggior parte delle immagini digitali codifica soltanto una piccola frazione di quello che un osservatore umano è in grado di vedere. [...] Le camere digitali standard infatti possono solo acquisire valori di intensità entro un intervallo limitato.”<sup>13</sup> Dunque, la gamma dinamica degli apparecchi digitali è molto limitata rispetto alla vista umana. “Inoltre l'immagine ottenuta con una fotocamera è normalmente a 24 bit per pixel, corrispondenti ad 8 bit per i tre canali di colore necessari per memorizzare i colori nel sistema RGB.”<sup>13</sup>. Ciò significa che 8 bit permettono di memorizzare solamente 256

sfumature per ogni canale (Red Green Blue). Dati questi limiti ne consegue che “le aree chiare sono generalmente saturate mentre le parti scure contengono un basso segnale di rapporto (S/N) di rumore. [...] Al fine di superare tali problemi [...] si possono generare immagini a High Dynamic Range (HDR) che cercano di restituire l'intero intervallo dinamica di luce presente nel reale e, nel caso della definizione della riflettanza di un oggetto, ad acquisire molti più toni. [...] Le immagini HDR richiedono un maggior numero di bit per colore delle tradizionali immagini. Per rappresentare i pixel HDR sono spesso utilizzati numeri a 16-bit o a 32-bit floating point, le immagini così ottenute offrono una gamma dinamica superiore a quella garantita dai 24 bit complessive delle fotocamere.”<sup>13</sup>. Grazie al numero molto maggiore di bit (16 o 32 rispetto ai soli 8 delle immagini comuni), le immagini HDR offrono un ampio range dinamico e un numero di sfumature elevatissimo. Tuttavia, formato di salvataggio dei file immagine non risolve il problema della limitata gamma dinamica dovuta ai limiti tecnologici dei sensori delle camere digitali. “Il principio dell'*high dynamic range* (HDR) è quello di acquisire più immagini della stessa scena a differenti esposizioni assicurando che almeno un valore digitale significativo sia disponibile per ogni pixel. [...] A partire da questa serie di immagini [...] è generata un'immagine HDR con valori di intensità lineare in *floating point* del pixel. [...] La tecnica dell'HDR offre la possibilità, a partire da tre o più esposizioni dello stesso oggetto, di cui alcune sovresposte, altre sottoesposte, di fondere le informazioni in esse contenute in un'unica fotografia che contiene un buon livello di dettaglio, sia nelle zone più in ombra, sia nelle zone caratterizzate da luci intense.”<sup>13</sup>

## 7. Creazione texture del colore diffuso

Il colore è una delle proprietà fondamentali da applicare al materiale di un modello tridimensionale per conferirgli realismo e permettere una comprensione più efficace dello stesso. Tuttavia, come visto nei paragrafi precedenti, l'acquisizione del colore diffuso di una superficie, ovvero il colore intrinseco del materiale indipendente dall'illuminazione, non è un processo diretto ed immediato, ma richiede una serie di accorgimenti e fasi di elaborazione che consentano di ottenere il risultato più fedele possibile.

È importante studiare in anticipo le metodologie alla base del processo, dal momento che in fase di scatto non è possibile avere a priori un feedback sul risultato, ma occorre operare seguendo alcuni importanti principi che assicurino un'ottima resa finale. “L'input è un insieme di immagini a colori, i loro parametri di camera (cioè orientamento e calibrazione) e la geometria 3D della scena. L'output richiesto, generato con la procedura generalmente detta di texture mapping, è una texture map o un insieme di mappe senza soluzione di continuità fra loro o un insieme di colori per-vertex in grado di riprodurre fedelmente le proprietà di riflettanza della superficie reale modellata. Il tutto deve essere accompagnato da una procedura corretta ed affidabile per garantire durante visualizzazione la fedeltà dei colori mappati che non solo devono garantire la qualità percettiva del modello ma anche la definizione quantitativa del colore ai fini di poterla riutilizzare per operazioni di conservazione e restauro.”<sup>14</sup>

La fase di acquisizione delle foto è sicuramente quella più importante e in cui occorre prestare la maggiore attenzione, in quanto le foto costituiscono l'unico input in questo processo e spesso non è possibile ritornare sulla scena per effettuare ulteriori acquisizioni nel caso ci si accorga di errori in una delle fasi successive. Gli scatti devono assicurare la copertura dell'intero elemento oggetto di rilievo e dovranno essere corretti per riprodurre fedelmente il colore. Successivamente le foto saranno allineate, ovvero per ogni foto sarà ricavata la posizione e l'orientamento della camera, tramite il software Agisoft Photoscan Pro. In seguito sarà inserito ed allineato anche il modello tridimensionale creato in

---

<sup>14</sup> I portici di Bologna – Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche, Capitolo di Marco Gaiani, Andrea Ballabeni, Massimo Ballabeni, Zheng Sun, Bononia University Press, pag 74-88

precedenza e su di esso saranno proiettate le foto, che andranno a creare la texture, infine esportata seguendo la mappa UV associata al modello.

### *7.1. Acquisizione fotografica*

Per l'acquisizione del colore si utilizza un apparecchio fotografico quale una macchina fotografica digitale reflex. Il sensore cattura la luce proveniente dalla scena immagazzinando i dati in un'immagine costituita da milioni di pixel, ciascuno dei quali registra il colore nei 3 canali rosso, verde e blu. Nelle immagini tradizionali, per ogni pixel ciascuno dei 3 canali viene memorizzato in 8 bit di dati che permettono di avere 256 ( $2^8$ bit) livelli di intensità per canale ed un totale 16.777.216 ( $256^3$ canali) colori. Sebbene possa sembrare un numero elevato, in realtà ci sono diverse limitazioni: la prima consiste nel fatto che sono disponibili solamente 256 livelli di luminosità che vanno dal bianco al nero, quindi con un range dinamico molto limitato. Ciò significa che le aree troppo chiare (sovraesposte) saranno tutte salvate come bianco, in quanto non sono disponibili valori che rappresentano colori più chiari, mentre le aree troppo scure (sotto esposte) appariranno nere. Per questo motivo nelle scene in esterno dove sono presenti contemporaneamente zone fortemente illuminate e zone molto scure in ombra, molte informazioni possono non essere memorizzate in quanto troppo chiare o troppo scure, e quindi all'esterno del range dinamico. Altra caratteristica negativa delle foto tradizionali consiste nella forte compressione del formato jpeg. A livello teorico, un'immagine di 12 Megapixel a 8 bit per canale non compressa dovrebbe avere una dimensione di 274,66 MB ( $12.000.000 \text{ pixel} * 8 \text{ bit/canale} * 3 \text{ canali RGB}$ ). Tuttavia, la compressione jpeg può ridurre le dimensioni del file fino a pochi MB (a seconda della qualità desiderata) quindi provocando una netta perdita di informazioni.

Per massimizzare la qualità delle foto in fase di acquisizione, è necessario scattare in formato RAW. Questo formato immagazzina tutte le informazioni generate dal sensore della macchina fotografica digitale, senza alcun intervento di riduzione della gamma né di compressione. Visivamente, non si notano differenze tra una fotografia in formato jpeg o la stessa in formato RAW, ma in quest'ultimo formato sono memorizzate informazioni anche nelle aree che appaiono bianche o nere. Il range dinamico è quindi esteso fino ai limiti tecnologici intrinseci del sensore ottico. Altri vantaggi sono la maggiore profondità in bit di ogni canale, di ben 14 bit (dato riferito alla Nikon D300s utilizzata in

questo caso studio) rispetto agli 8 bit del formato jpeg, e la compressione senza perdita di dati offerta dal formato.

Lo scatto RAW si presenta quindi inizialmente identico allo scatto in formato jpeg, ma grazie alla maggiore quantità di informazioni contenute al suo interno (maggiore range dinamico, maggiore profondità in bit, compressione senza perdita di dati) è ideale per



*Reflex digitale Nikon D300s con obiettivo 18-200 VRII: attrezzatura utilizzata per l'acquisizione fotografica (immagine da: [www.nikon.it](http://www.nikon.it))*

tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una fase di post-produzione e modifica dei set fotografici. Oltre allo scatto in formato RAW, è necessario utilizzare la macchina fotografica in modalità manuale in modo da impostare personalmente tutti i parametri di scatto (ISO, tempo di esposizione, apertura del diaframma, bilanciamento del bianco) in modo che non cambino per l'intero set. I parametri ISO, tempo di esposizione e apertura del diaframma sono gli unici parametri che determinano l'esposizione (ossia la luminosità) della foto. Sono valori che non possono essere modificati in fase di post-produzione (a differenza ad esempio del bilanciamento del bianco) ed è quindi importante impostarli correttamente per ottenere scatti correttamente esposti e di elevata qualità. Per settare correttamente questi parametri, occorre capire in che modo agiscono nella fase dello scatto della foto e quali controindicazioni presentano. La sensibilità ISO rappresenta l'amplificazione applicata al segnale rilevato dai fotoricettori del sensore ottico.

Incrementando tale valore si incrementa la luminosità dell'immagine, tuttavia aumenta proporzionalmente anche il rumore che riduce la qualità dell'immagine. Sono quindi consigliati valori molto bassi di sensibilità ISO. Il tempo di esposizione è l'intervallo di tempo durante il quale il sensore è esposto alla luce. Più ampio è tale arco di tempo (espresso generalmente come frazione di un secondo) e maggiore è la luminosità dell'immagine. Tuttavia, scattando a mano libera è consigliabile utilizzare esposizioni molto brevi per evitare l'effetto mosso. Molti obiettivi, tra i quali anche il Nikon 18-200 VR II impiegato nel caso studio, presentano sistemi attivi di riduzione delle vibrazioni che riducono notevolmente questa controindicazione. L'apertura del diaframma è riferita ad un componente meccanico dell'obiettivo, il diaframma appunto, in grado di aprirsi e chiudersi analogamente ad una saracinesca, permettendo di regolare la quantità di luce che colpisce il sensore. Più basso è il valore di questo parametro e maggiore sarà la luce che attraversa l'obiettivo e che viene registrata dal sensore (il valore dell'apertura del diaframma è posto a denominatore). Tuttavia, si consiglia di eseguire scatti con un'apertura del diaframma ridotta, per due motivi: il primo è che un'apertura elevata del diaframma riduce la profondità di campo, ossia riduce la porzione di spazio con una corretta messa a fuoco e incrementa la sfuocatura nelle aree circostanti il soggetto (effetto molto apprezzato nei ritratti, ma assolutamente da evitare nella fotomodellazione); il secondo motivo consiste nel fatto che la parte centrale delle lenti (l'unica zona nella quale chiudendo il diaframma si consente alla luce di passare) garantisce una nitidezza migliore delle foto, soprattutto utilizzando obiettivi economici e non professionali.

È altresì consigliabile mantenere la stessa distanza focale in modo da consentire al software di interpretare correttamente tutti i parametri di orientamento interno della macchina fotografica e le distorsioni introdotte dall'obiettivo.

Per quanto riguarda la posizione da cui eseguire gli scatti, bisogna anticipare brevemente ciò che riguarda la fase di allineamento, dove viene ricavata la posizione e l'orientamento della camera per ogni foto. L'allineamento, eseguito nel software Agisoft Photoscan Pro, impiega le equazioni della fotogrammetria per individuare i punti in comune tra le varie foto, e stabilire sia le coordinate dei punti dell'oggetto, sia posizione e orientamento della camera. Questo comporta alcune considerazioni: innanzitutto, ogni porzione dell'oggetto deve essere catturata da più foto (maggiore è il numero delle foto migliore sarà la restituzione finale a scapito del tempo di elaborazione) e le foto devono essere scattate da



posizione differente con un'inquadratura perpendicolare alla superficie. Il caso ideale è rappresentato dal rilievo di un oggetto sferico, del quale si può eseguire un'acquisizione tramite numerosi scatti normali alla superficie effettuati a brevi intervalli tali da garantire una sovrapposizione tra più fotogrammi. È proprio la differenza di posizione a permettere al software di determinare la posizione nello spazio sia della camera che dell'oggetto. Caso diametralmente opposto è rappresentato dal vestibolo di Villa Adriana oggetto di rilievo, in quanto la superficie interna è approssimabile all'interno di una sfera. Se si eseguisse un set di foto "panoramico" all'interno del vestibolo (ovvero scattando foto a 360° dallo stessa posizione) non sarebbe possibile per il software ricavare informazioni tridimensionali (il principio è equivalente alla vista stereoscopica, infatti è grazie a 2 occhi che ricevono informazioni della stessa scena da posizioni leggermente differenti che il cervello è in grado di determinare la distanza degli oggetti). La soluzione adottata è stata quella di eseguire più set panoramici "eccentrici", ossia anche da punti non corrispondenti al centro geometrico del vestibolo.

Per il rilievo sono stati scattati nell'arco di 3 giorni 7 set fotografici, 5 con una Nikon D300s e obiettivo 18-200mm, 1 con obiettivo fisheye e 1 con asta telescopica 3D Eye. Il set selezionato per la creazione della texture è costituito da 310 foto da 12 Megapixel scattate con obiettivo 18-200mm fissato a 24mm, con impostazioni manuali ISO 250, 1/250s f/8, in formato RAW a 14 bit, per un totale di 4,20 GB.

## 7.2. *Condizioni meteorologiche*

Per catturare il colore proprio di un oggetto, occorrerebbe che tutta la sua superficie fosse illuminata in maniera uniforme, e non fossero presenti alcun tipo di ombre (portate, autoportate) né riflessi. Ciò è possibile solo con un controllo completo dell'illuminazione, realizzabile solo allestendo un set fotografico in ambiente chiuso ed impiegando una diffusa illuminazione artificiale. In un set fotografico esterno, in cui l'unica fonte di illuminazione è la luce solare, i colori rilevati sono inevitabilmente influenzati dall'illuminazione, dalle ombre e dai riflessi. Dal momento che il controllo sulle luci è assolutamente impossibile, è essenziale effettuare il rilievo in un breve periodo in modo da assicurarsi che la luce resti costante durante l'acquisizione dell'intero set fotografico. Tuttavia, è possibile minimizzare l'influenza dell'illuminazione eseguendo il set fotografico in condizioni di cielo completamente coperto. Questa circostanza fornisce

l'illuminazione ideale per un set esterno, dato che scompaiono le ombre nette provocate dall'illuminazione del sole e la scena viene illuminata da una luce omogenea e diffusa proveniente da tutte le direzioni. Ciò non vuol dire che tutta la superficie dell'oggetto sia



*Immagini di due diversi set fotografici del vestibolo: a sinistra, foto acquisite con cielo sereno, il sole proietta ombre nette (set non utilizzato). A destra, foto acquisite da posizione simile, ma all'interno di un set eseguito con cielo completamente coperto. Non sono presenti ombre nette (il set è stato impiegato per la creazione della texture).*

illuminata allo stesso modo, ma solo che la scena è sottoposta ad un'illuminazione uniforme. Sull'oggetto si manifesta una variazione di intensità luminosa non costituita dalle ombre, ma determinata dalla porzione di cielo a cui è esposto (e da cui è illuminato) ogni punto della superficie. Nel caso del vestibolo, la superficie dell'estradosso della cupola viene illuminata in maniera totale dal cielo, mentre l'intradosso, non essendo

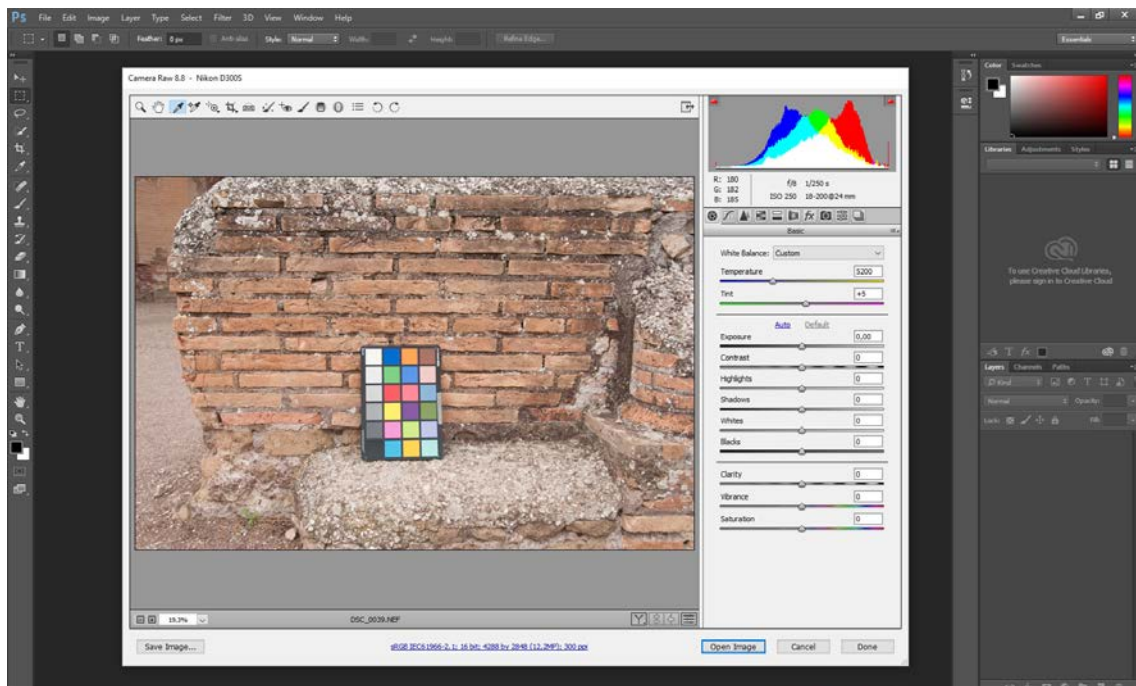
esposto alla volta celeste, risulterà di un'intensità luminosa inferiore. Il set selezionato per la creazione della texture è stato realizzato in condizioni di cielo completamente coperto, e sono state scattate 310 foto dalle ore 14.36 alle ore 14.55 (19 minuti).

### 7.3. *Correzione fotografie (color processing)*

La correzione delle fotografie è una fase che consiste nel bilanciamento del colore di tutte le foto acquisite nel medesimo set. Questa operazione è detta anche bilanciamento del bianco, dato che consiste nel selezionare in una foto campione un elemento corrispondente ad un colore neutro (bianco o grigio) in modo da calibrare tutto il set di foto sulla giusta corrispondenza cromatica.

Per effettuare il bilanciamento, è stato incluso in alcune fotografie il color checker, una tavolozza di colori costituita da 24 tasselli che funge da riferimento per tutto il set fotografico. È sufficiente indicare nella foto campione il tassello corrispondente al grigio per correggere allo stesso modo ogni foto appartenente al set (ogni foto è stata scattata con le stesse identiche impostazioni e illuminazione della scena).

Per questa operazione è stato utilizzato Camera Raw, plug-in del software Adobe Photoshop. Dalla barra degli strumenti è stato utilizzato il comando *White balance tool*, con il quale si è selezionato il tassello "grigio medio" del color checker in modo da



Schermata del plug-in Camera Raw: bilanciamento del bianco tramite color checker.

ottenere il corretto bilanciamento del bianco (*temperature* e *tint* sono i parametri che vengono modificati in seguito all'utilizzo del comando).

#### 7.4. Allineamento fotografie

La fase di allineamento delle foto avviene tramite l'utilizzo del software Agisoft Photoscan Pro. Il programma individua inizialmente i punti omologhi nelle fotografie, poi impiega le equazioni della fotogrammetria per determinare la posizione di tali punti (punti che appartengono alla scena rilevata) e posizione/orientamento della camera in ogni scatto (i dati di input sono costituiti solo dalle coordinate x,y dei punti omologhi individuati dal software sui fotogrammi caricati).

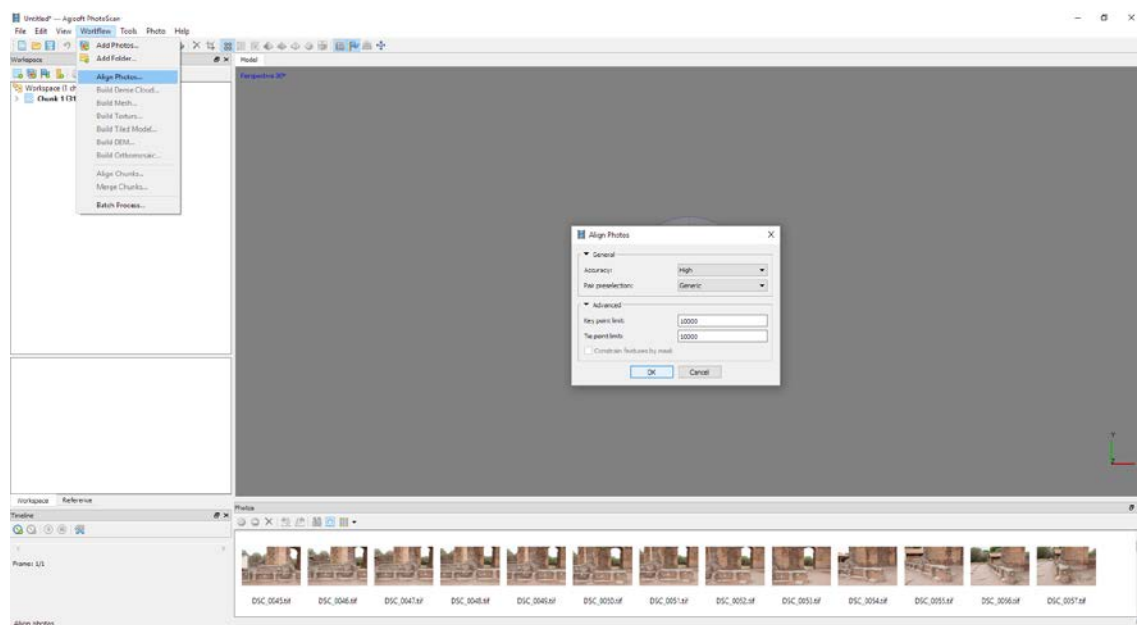
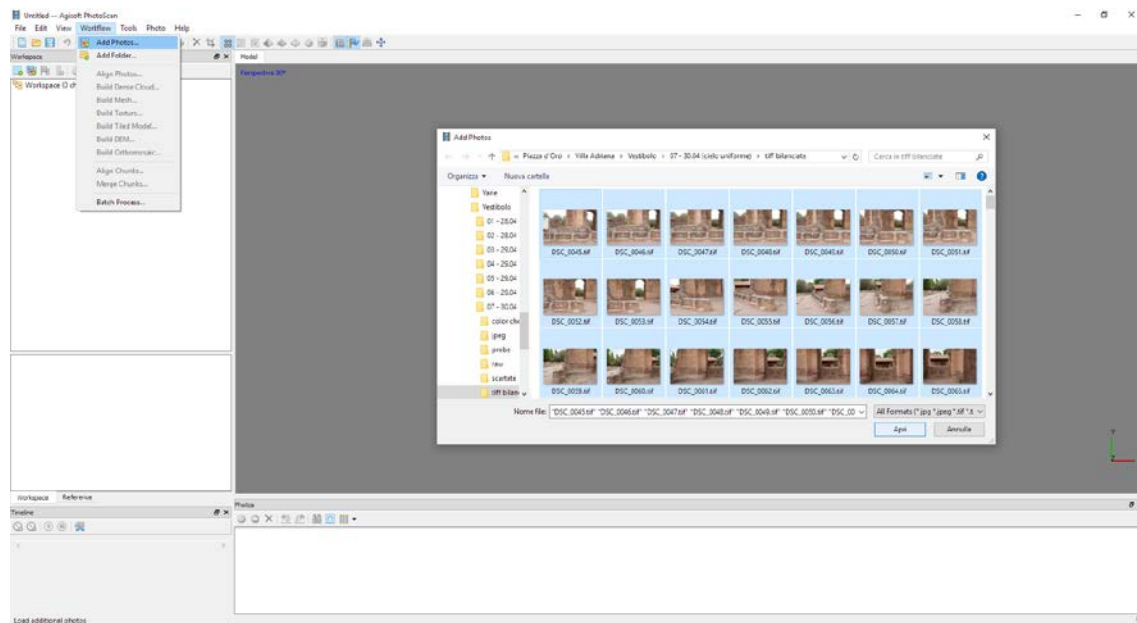
$$x = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

X,Y,Z:	posizione del punto omologo nello spazio
x,y:	posizione del punto omologo sul fotogramma
X <sub>0</sub> ,Y <sub>0</sub> ,Z <sub>0</sub> :	posizione della camera nello spazio
r <sub>ij</sub> :	matrice di rotazione della camera nello spazio
c:	distanza focale della camera

Per aggiungere il set di foto, utilizzare il comando *Add photos* dal menu *Workflow*, in seguito, utilizzare il comando *Align Photos* dallo stesso menu per eseguire l'allineamento. Quest'ultimo comando fornisce poche impostazioni che influiscono sulla precisione dell'allineamento e in maniera proporzionale sul tempo necessario all'elaborazione. Il valore dei *tie points* e dei *key points* esprime il numero massimo di punti per ogni singola immagine che il programma individua e utilizza per stimare la posizione e l'orientamento delle camere. Un numero elevato determina una migliore accuratezza, a scapito della velocità di risoluzione dell'operazione. Tuttavia, un numero eccessivamente elevato può

comportare la scelta da parte del programma di punti poco affidabili, ovvero punti in cui il contrasto è ridotto e vengono associati erroneamente nelle altre foto.

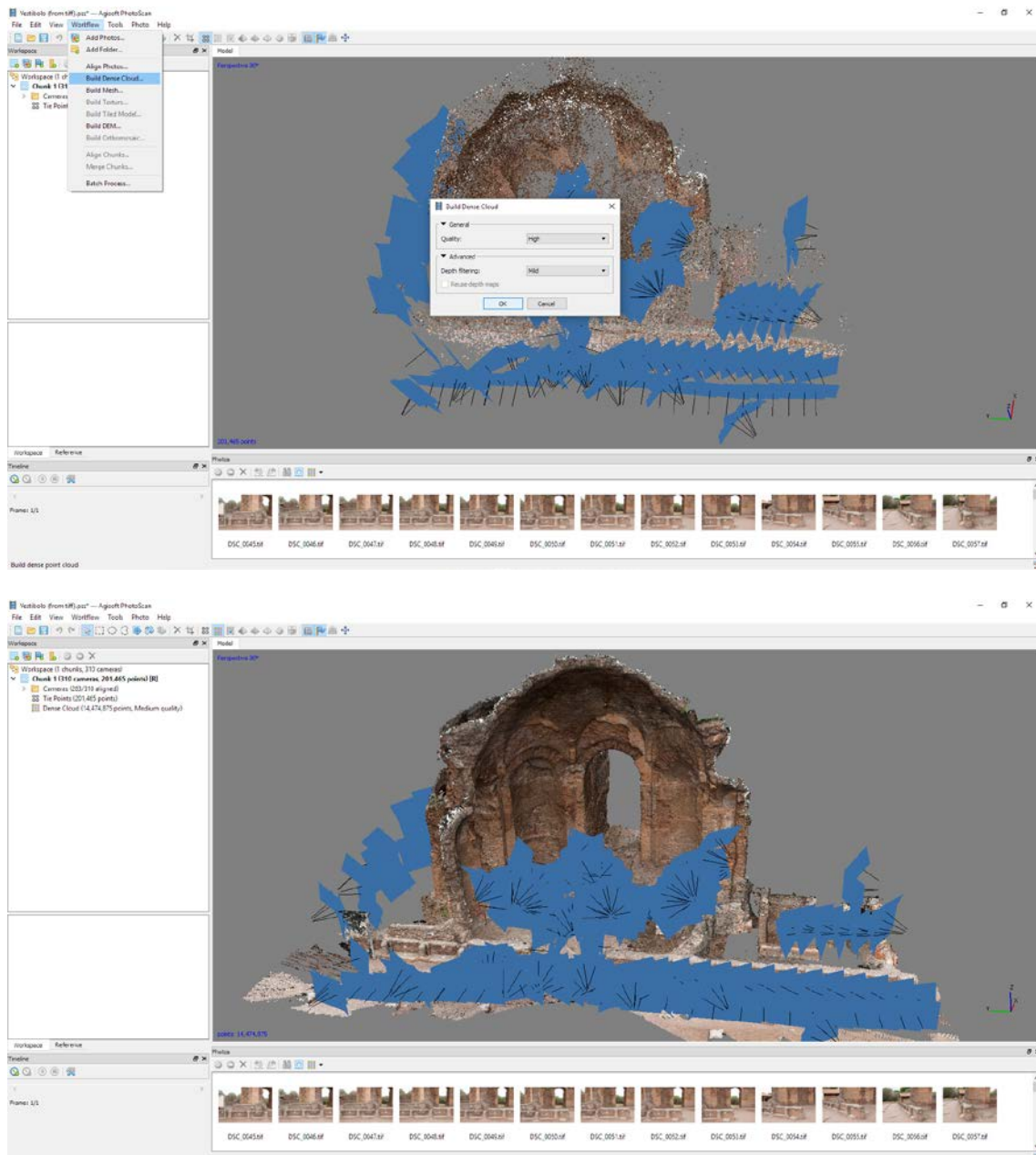


*Schermate del software Agisoft Photoscan Pro. In alto, importazione delle foto. Sotto, finestra di allineamento delle foto.*

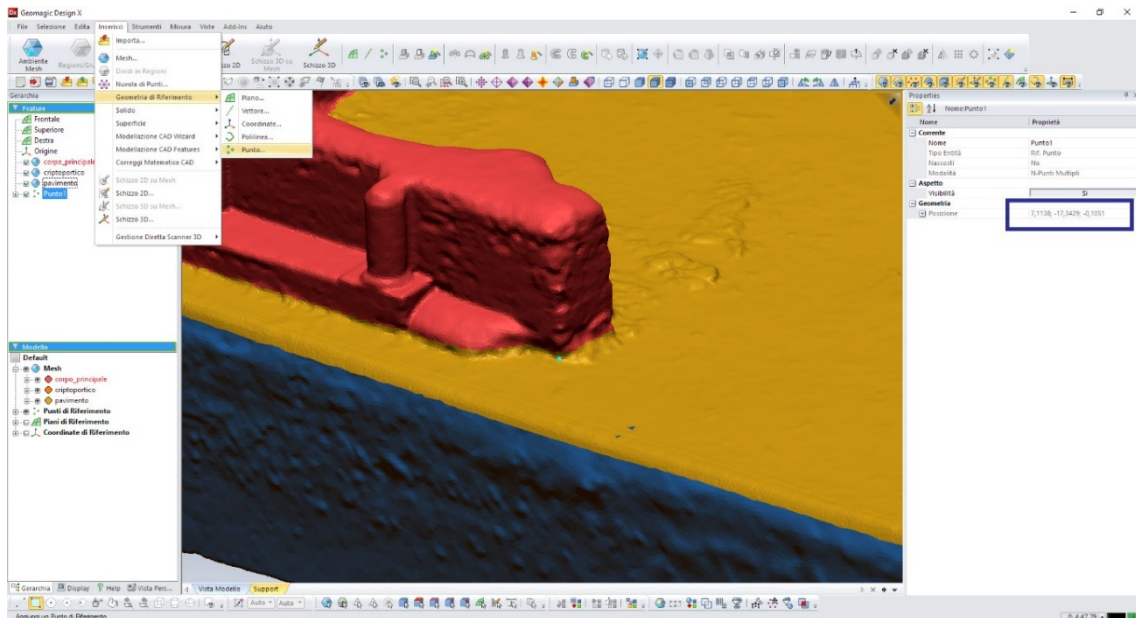
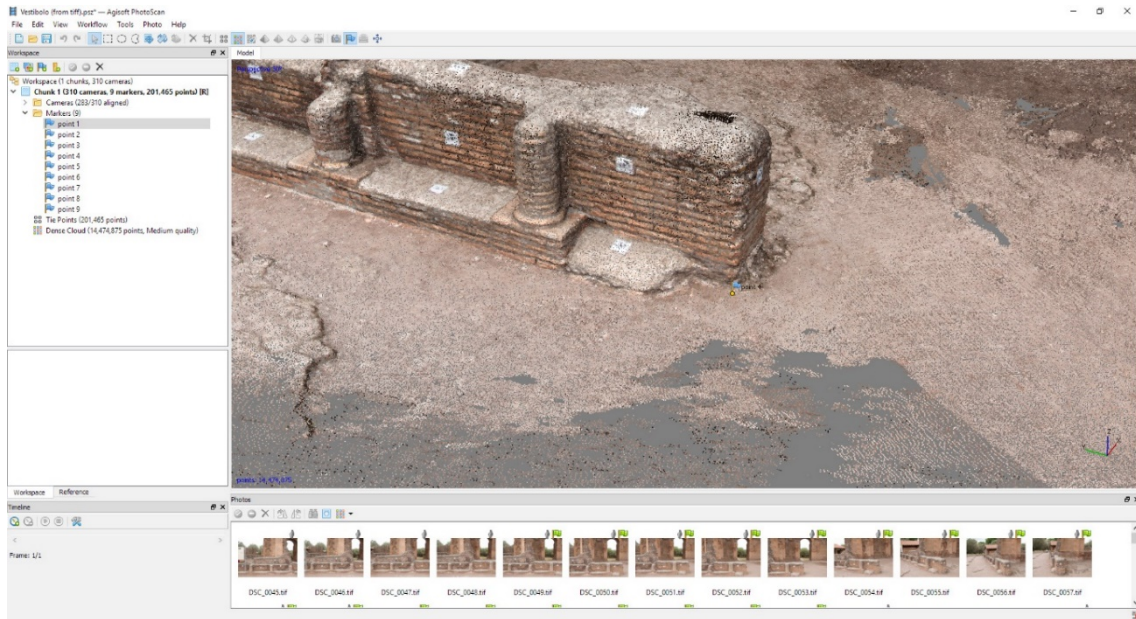


### 7.5. *Allineamento al modello da Laser Scan*

Terminato l'allineamento delle camere, sarà necessario importare all'interno di Agisoft Photoscan Pro il modello tridimensionale creato in precedenza sul quale proiettare la texture. Il modello 3D risulta già correttamente allineato, dal momento che è stato generato da scansioni effettuate tramite Laser Scan correttamente orientate. Per allineare la scena di Photoscan al modello 3D, è necessario individuare in entrambi dei punti in comune, per permettere al software di scalare e ruotare la scena in maniera esatta rispetto al modello 3D. Per garantire precisione e affidabilità nell'allineamento, occorre selezionare punti giacenti su spigoli vivi, facilmente ed accuratamente selezionabili sia nel modello che nella scena. Nella scena di photoscan è tutta via presente solo un limitato numero di punti rappresentanti il modello, ossia solo quei punti impiegati per l'allineamento delle camere. Occorre quindi creare una nuvola di punti densa, o *dense cloud*, sulla quale individuare una serie di punti omologhi con il modello 3D. Dal menu *workflow* si esegue il comando *build dense cloud*, impostando la qualità su *high* e *depth filtering* (un filtro di smussatura che riduce il rumore della nuvola di punti) su *mild*. Si procede quindi ad inserire all'interno della scena dei marker, posizionandoli in corrispondenza di punti facilmente individuabili anche sul modello 3D (preferibilmente su angoli e spigoli vivi). Ad ogni marker vanno assegnate le corrette coordinate x,y,z che permetteranno l'allineamento dell'intera scena. Per individuare le coordinate è sufficiente aprire il modello 3D LP nel software Geomagic Design X e utilizzare la funzione *punto* per inserire un punto in corrispondenza del marker posizionato nella scena di Photoscan. Le coordinate visualizzate all'interno di Geomagic devono essere assegnate al relativo marker.

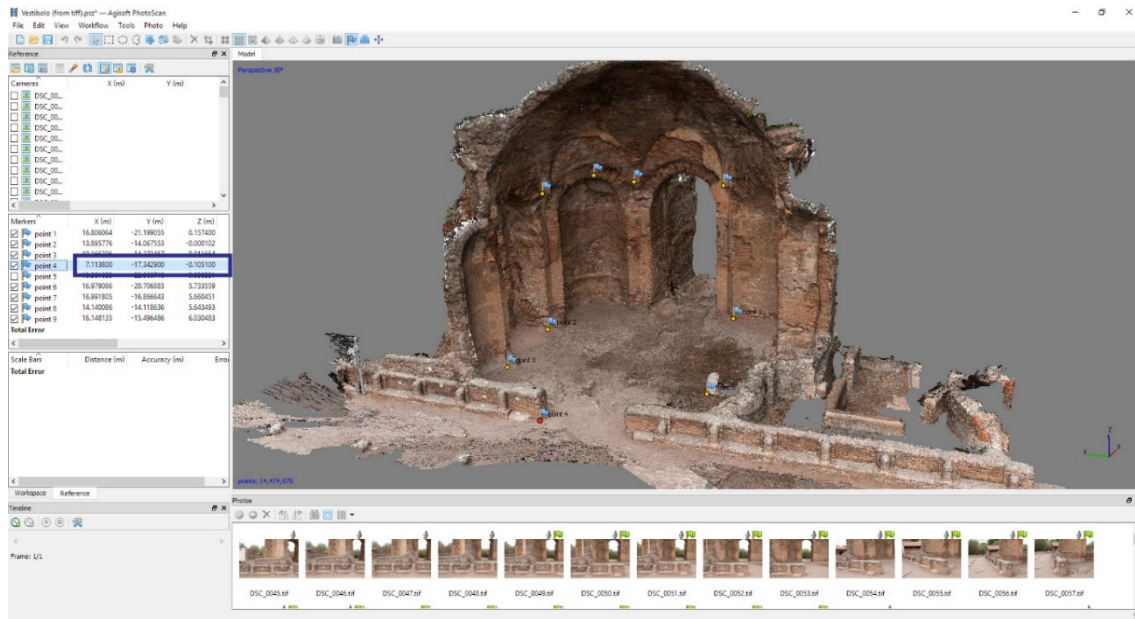


*Schermate del software Agisoft Photoscan Pro. In alto, finestra per la creazione della nuvola densa. Sotto, nuvola di punti al termine dell'operazione.*



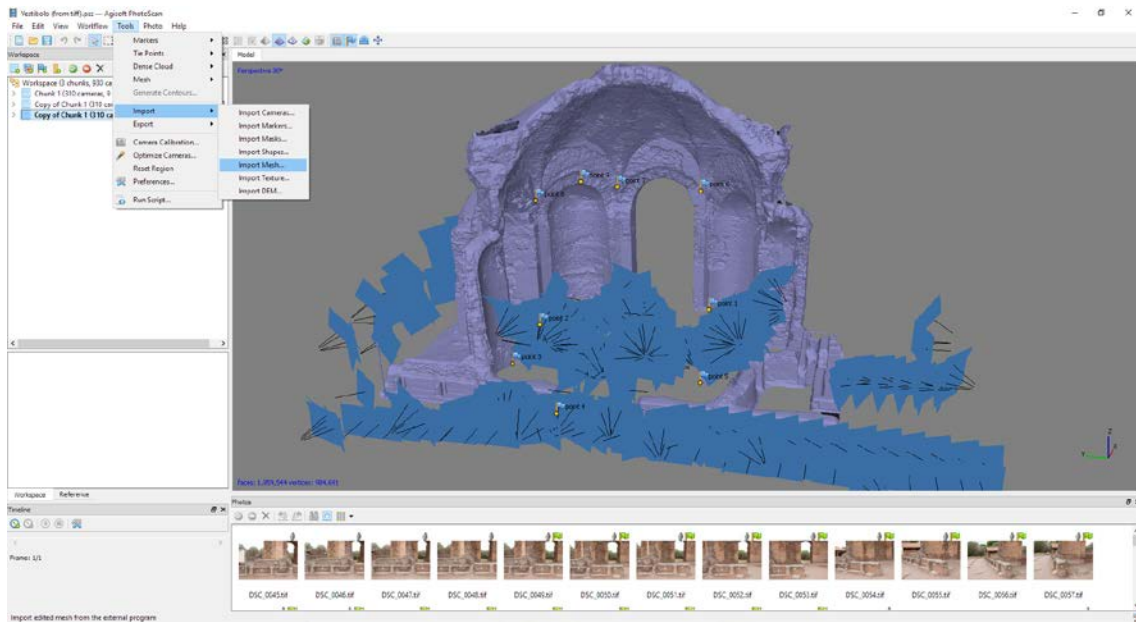
*In alto, schermata del software Agisoft Photoscan Pro: inserimento di un marker nel vertice di un muretto. Sotto, schermata del software Geomagic Design X: inserimento del punto in posizione analoga nel modello 3D con visualizzazione delle coordinate.*





*Schermata del software Agisoft Photoscan Pro: inserimento delle coordinate relative al marker 4, ottenute dal software Geomagic Design X. L'operazione è stata ripetuta per un*

Al termine della creazione di nove di marker, cliccando sul pulsante *aggiorna* Photoscan è in grado di orientare correttamente la scena. Teoricamente sono sufficienti 3 punti per allineare la scena, ma utilizzandone un numero superiore si è in grado di ridurre l'errore globale. A questo punto, importando il modello 3D nella scena, sarà visualizzato con il corretto orientamento. Il modello importato all'interno di Photoscan deve essere comprensivo di mappa UV, quindi non sarebbe corretto importare il file *mesh\_01\_lp\_corpo principale.obj* (esportato dal software Geomagic Design X dopo la decimazione), ma occorre esportare tale modello dal software Modo, in cui sono state realizzate le mappe UV. Siccome non è stato effettuato il rilievo fotografico sotterraneo del criptoportico, saranno create le texture solo per le mesh relative al corpo principale ed al pavimento.

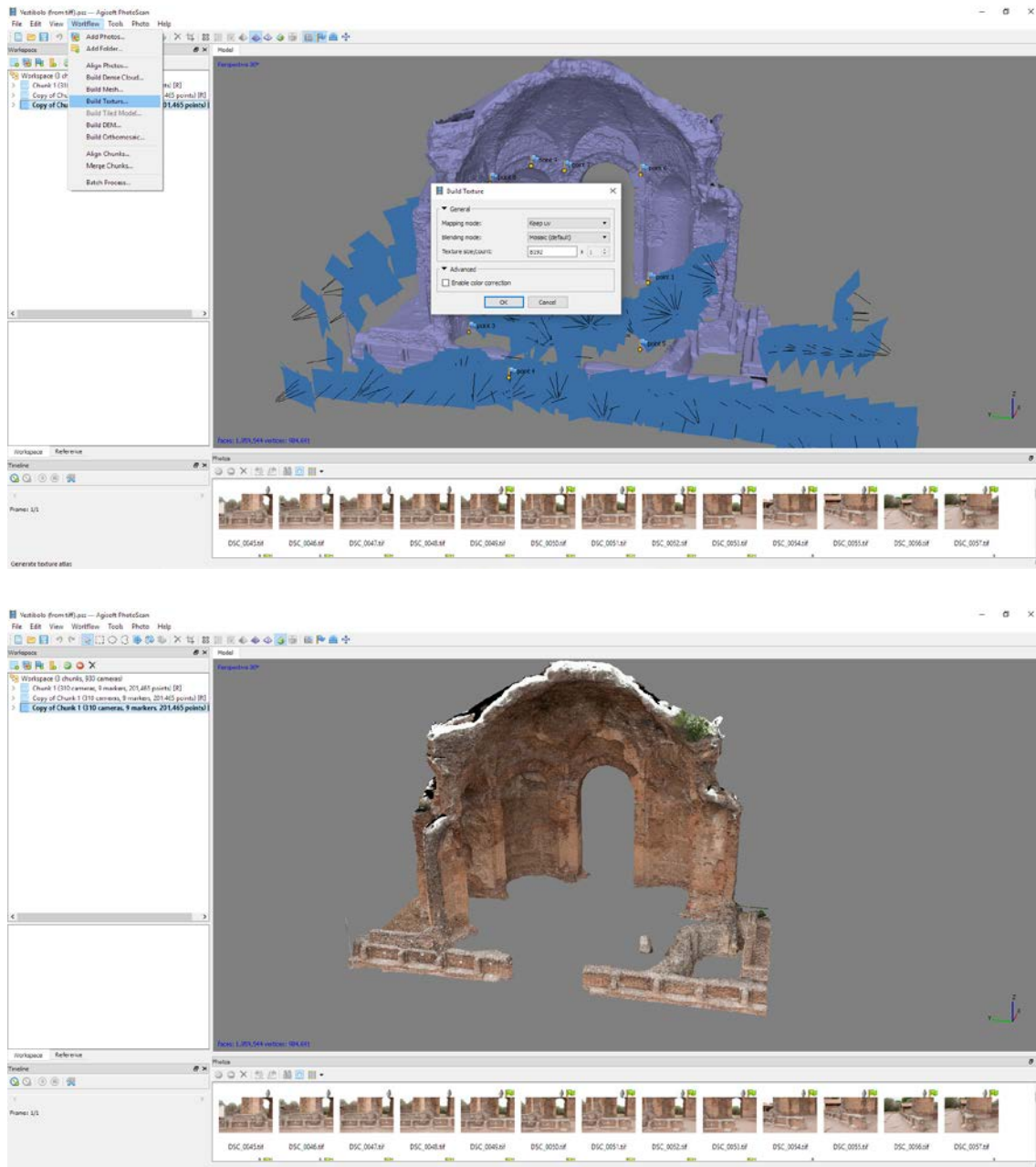


Schermata del software Agisoft Photoscan Pro: importazione della mesh creata tramite Laser Scan (file: mesh\_01\_lp\_corpo principale.obj).

## 7.6. Creazione texture

La creazione della texture è una fase molto rapida e completamente automatizzata, eseguibile tramite il comando *crea texture*. È fondamentale selezionare l'impostazione *keep UV* nella finestra di creazione della texture per poter applicare la texture sul modello compreso già di mappa UV. Si è deciso di impostare la medesima risoluzione applicata anche alle normal map, ovvero 8192x8192 per quanto riguarda il corpo principale e 4096x4096 per il pavimento.

File creati			
Nome	Formato	Dimensione	Risoluzione
03.tif	tif (immagine con canale alpha)	546 MB	8192x8192
04.tif	tif (immagine con canale alpha)	133 MB	4096x4096



*Schermate del software Agisoft Photoscan Pro: in alto, fase di creazione della texture. Sotto, texture applicata al modello 3D.*

### 7.7. *Correzione illuminazione texture*

“Quando l’illuminazione è nota con certezza, i parametri di riflettanza della superficie possono essere stimati servendosi dei valori dell’immagine. Viceversa questa stima è assai complessa per il caso [...] in ambiente esterno in cui le caratteristiche della luce naturale sono difficilmente individuabili essendo estremamente complesse e mutevoli. [...] Queste

difficoltà aumentano quando il problema della definizione e della riproduzione cromatica e tonale è affrontata nel contesto della costruzione e visualizzazione di modelli 3D reality-based. Infatti, ben oltre la semplice definizione e riproduzione statica di un colore su uno schermo, la generazione di una visualizzazione fotorealistica di un modello 3D richiede che non vi sia alcuna differenza tra una vista renderizzata e una fotografia scattata dallo stesso punto di vista: il problema di definizione cromatica e tonale diventa quello della completa definizione delle proprietà dei materiali. Il problema è particolarmente rilevante nel caso delle tecniche SFM, che integrano acquisizione di forma e colore in una soluzione unica.

Per ovviare a questi problemi è stato sviluppato un workflow completo per l'acquisizione, gestione, rendering, visualizzazione e controllo di fedeltà del colore dei modelli 3D [...]. Questo tipo di creazione di immagini di sintesi è chiamato oggi 'Predictive Rendering', ed è considerato un'estensione della fotografia. Esso consiste nella generazione di immagini di sintesi digitali corrette sia percettivamente sia fisicamente. In sostanza consiste in una trasposizione fedele tramite un processo che copre tre aree principali:

- goniometrica (validazione delle proprietà della superficie);
- radiometrica (accurata simulazione del trasporto della luce);
- percettiva (immagine finale corretta per l'occhio umano).

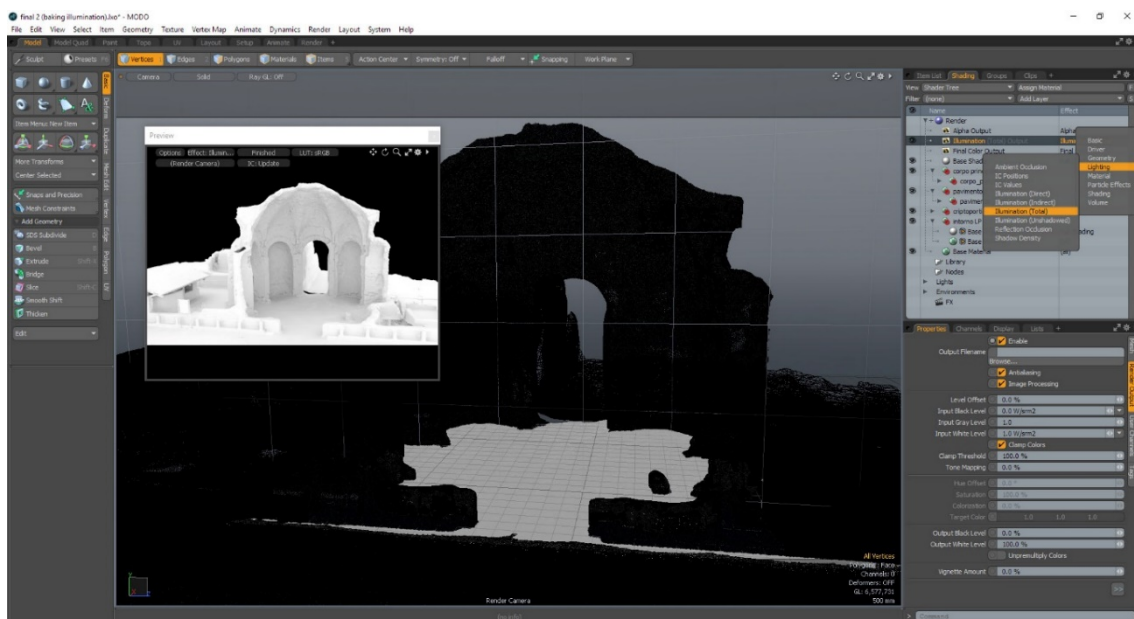
Per la documentazione dell'architettura storica questo framework fornisce una soluzione soddisfacente capace di generare ottimi risultati, permettendo di trasportarli in forma digitale, in quanto copia dotata di tutti gli attributi intrinseci anziché semplice interpretazione o simbolizzazione dell'oggetto rappresentato.”<sup>14</sup>

Proiettando queste considerazioni sul caso studio del vestibolo, risulta evidente come la texture generata non rappresenti fedelmente il colore proprio di tutta la superficie. L'illuminazione presente al momento degli scatti (cielo completamente coperto) non garantisce per un oggetto di forma complessa un'illuminazione uniforme; infatti, sulla texture appena creata, la parte interna del vestibolo presenta un colore più scuro della superficie dell'estradosso, non perché il colore sia effettivamente più scuro, ma perché risultava meno illuminata quando sono state scattate le fotografie (si sottolinea che non è da escludere che nell'intradosso il colore possa essere realmente più scuro dell'estradosso, ma non è possibile valutarlo con un'illuminazione disomogenea). Eseguendo un rendering con questa texture, simulando le condizioni di luce al momento

dello scatto (illuminazione uniforme e diffusa), risulta che la superficie esterna è correttamente esposta, mentre l'intradosso è notevolmente più scuro. Ciò accade perché il motore di rendering simula la fisica della luce e rivela che all'interno del vestibolo la superficie riceve un'illuminazione inferiore; tuttavia in quella zona la texture applicata è già più scura (derivante dall'illuminazione reale), quindi la luminosità finale è erroneamente troppo bassa.

La tecnica impiegata nel caso studio del vestibolo ottagonale di Villa Adriana per la correzione della texture consiste nel simulare l'illuminazione nella scena al momento dello scatto e valutare l'irraggiamento ricevuto da ogni poligono della mesh. In tal modo è possibile compensare la luminosità della texture (incrementandone la luminosità nelle zone meno esposte) in modo da risalire al corretto colore in ogni punto della superficie. Questo processo prevede l'utilizzo del software Modo e in seguito del programma Adobe Photoshop per l'esportazione della texture finale.

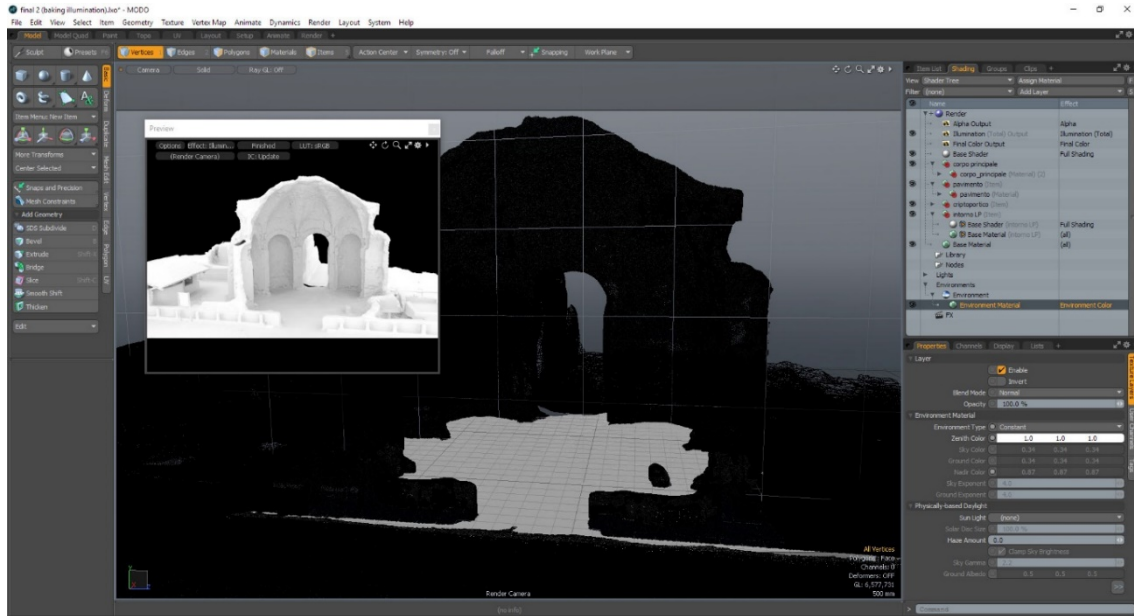
Oltre alle mesh low poly corrispondenti al vestibolo, è stata inserita anche un'ulteriore mesh corrispondente all'area circostante, per consentire di calcolare in maniera più accurata l'illuminazione tenendo conto delle riflessioni esterne. Per ottenere come output un fotogramma rappresentante in scala di grigi l'illuminazione ricevuta dalla superficie del vestibolo, è stato creato un nuovo layer di *render output*, impostato su *lighting->Illumination (Total)*.



Schermata del software Modo: creazione del layer di render output *Illumination (Total)*.



In questo modo non sarà eseguito un rendering fotorealistico, ma verrà generata una mappa di illuminazione secondo la mappa uv della mesh selezionata. Per ricreare il cielo completamente coperto, è sufficiente disattivare le eventuali luci presenti nella scena e impostare l'*environment* su *constant* assegnando il colore bianco.

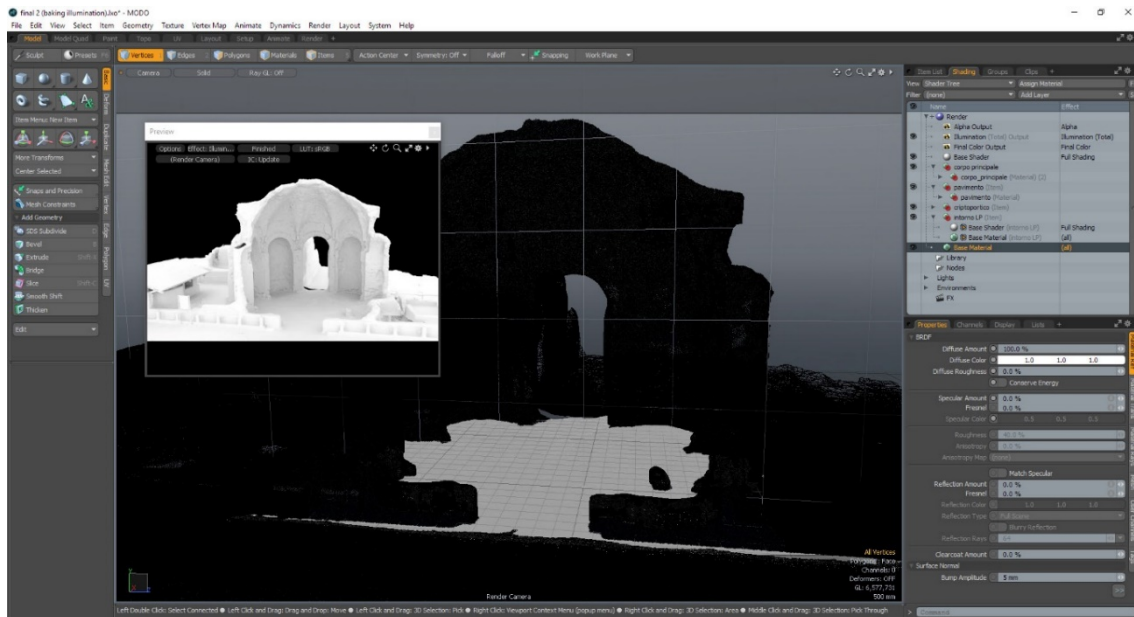


Schermata del software Modo: impostazione dell'*environment*.

Così facendo, le porzioni del vestibolo completamente illuminate appariranno bianche (e saranno zone in cui la texture non necessita di correzioni) mentre le zone in cui l'illuminazione finale è inferiore risulteranno più scure secondo una scala di grigi.

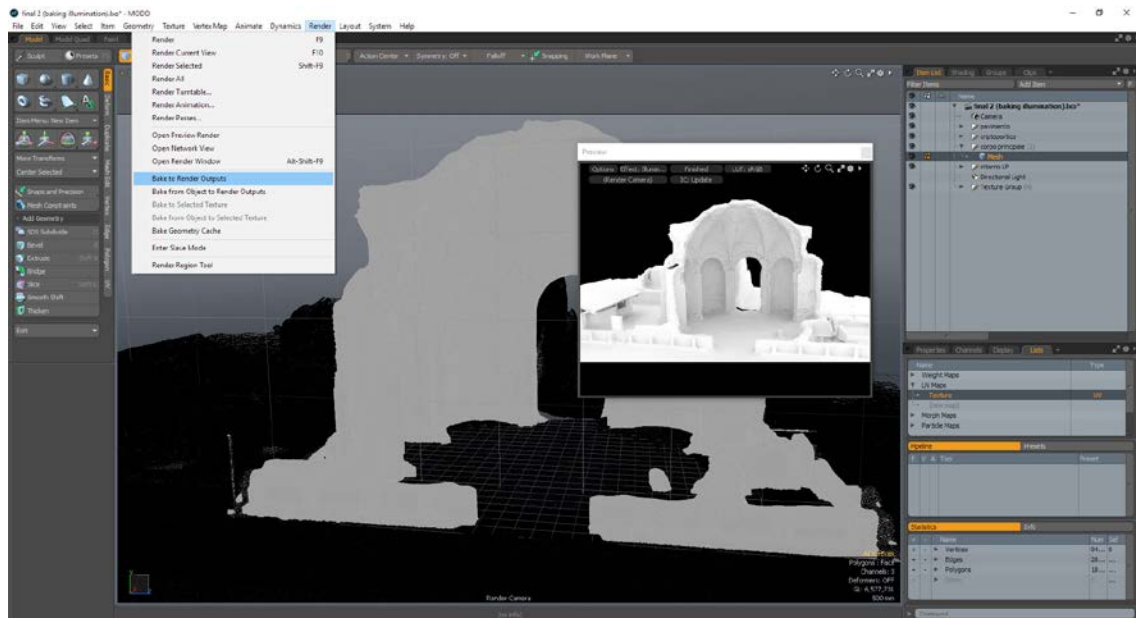
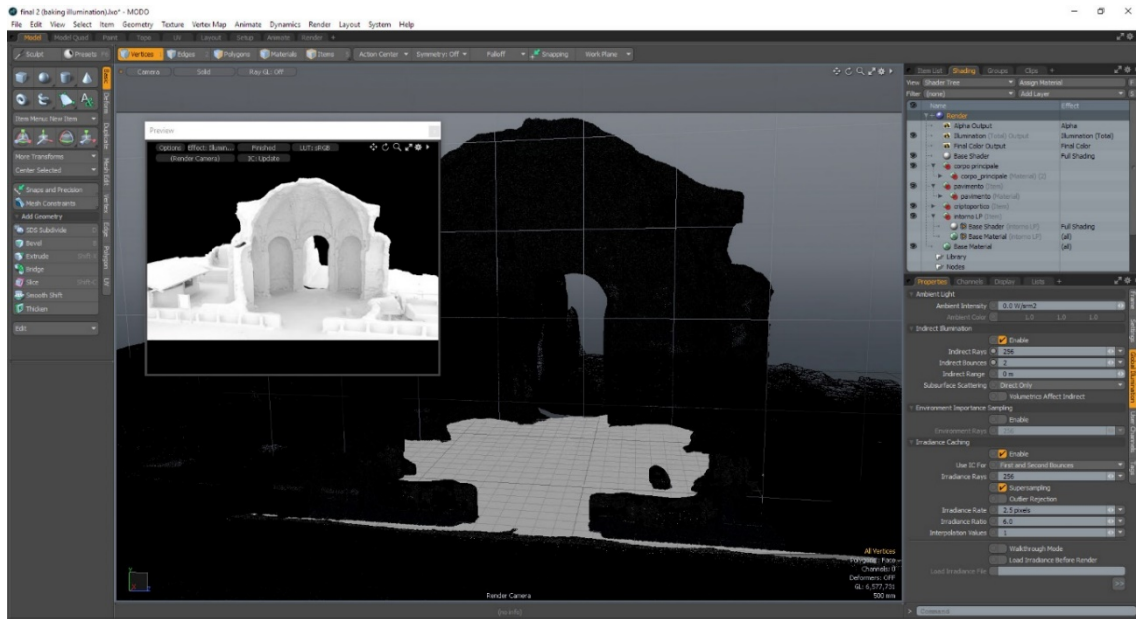
Tutte le texture devono essere disattivate, così come i materiali assegnati ad ogni singola mesh, in modo da assegnare a tutti i modelli il materiale di default, a cui viene assegnato il colore bianco senza alcun tipo di riflessione speculare o altri comportamenti avanzati. Queste impostazioni del materiale non modificano l'effetto dell'illuminazione diretta, ma influenzano l'illuminazione indiretta, dovuta ai rimbalzi della luce sulle superfici, impostazione presente selezionando la voce *render*, nel pannello *global illumination* > *properties*, come *indirect bounces*, impostato su 2. È un'impostazione fondamentale in questo specifico caso, perché la superficie interna del vestibolo è debolmente illuminata in maniera diretta, dato che solo una piccola porzione del cielo non ha ostacoli ed è in grado di illuminarla (ed è anche possibile che ci siano zone particolarmente nascoste che non ricevono alcun contributo di illuminazione diretta). Conta invece in maniera

superiore l'illuminazione indiretta, dovuta al riflesso della luce sul pavimento, sulle superfici laterali, sull'ambiente circostante.



Schermata del software Modo: impostazione del materiale.

Al contrario, se si pensa alla superficie esterna, essa è completamente rivolta al cielo, ricevendo la totalità di illuminazione diretta, mentre non è influenzata dall'illuminazione indiretta in quanto non ci sono superfici in grado di far rimbalzare la luce sull'estradosso. È evidente che l'assegnazione del colore bianco al materiale di default non è rispondente alla realtà, ma dal momento che non è possibile applicare a tutta la scena il materiale corretto e soprattutto sono stati impostati solo 2 *indirect bounces* (per ridurre il tempo di creazione della mappa di illuminazione), utilizzando il colore bianco è la scelta che permette di avvicinarsi il più possibile ad una simulazione reale della luce minimizzando il dispendio di tempo e risorse per l'acquisizione del colore di tutto l'ambiente e la simulazione di un elevato numero di indirect bounces. Per generare la mappa di illuminazione, è sufficiente selezionare la mesh desiderata, la relativa mappa uv ed eseguire il comando *render->bake to render output*.



Schermate del software Modo: in alto, impostazioni di rendering. In basso, avvio del processo di baking.

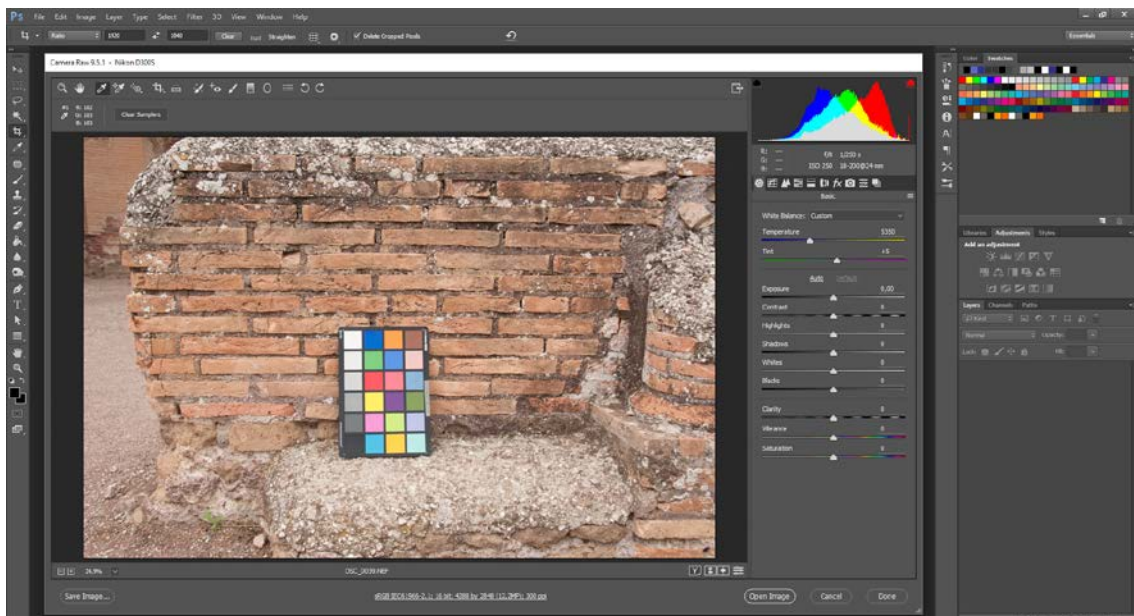
Al termine dell'operazione di baking dell'illuminazione, si è in possesso della relativa mappa in scala di grigi nonché della texture a colori. L'obiettivo della fase seguente è quello di correggere la luminosità della texture sulla base delle informazioni della mappa di illuminazione: più è scura la mappa di illuminazione e più dovrà essere schiarita la texture. Per ricavare l'incremento di esposizione, è stato utilizzato il color checker, posizionandolo inizialmente davanti al vestibolo, posizione in cui l'illuminazione diretta è massima, e successivamente all'interno, in modo da ricevere la minima quantità di



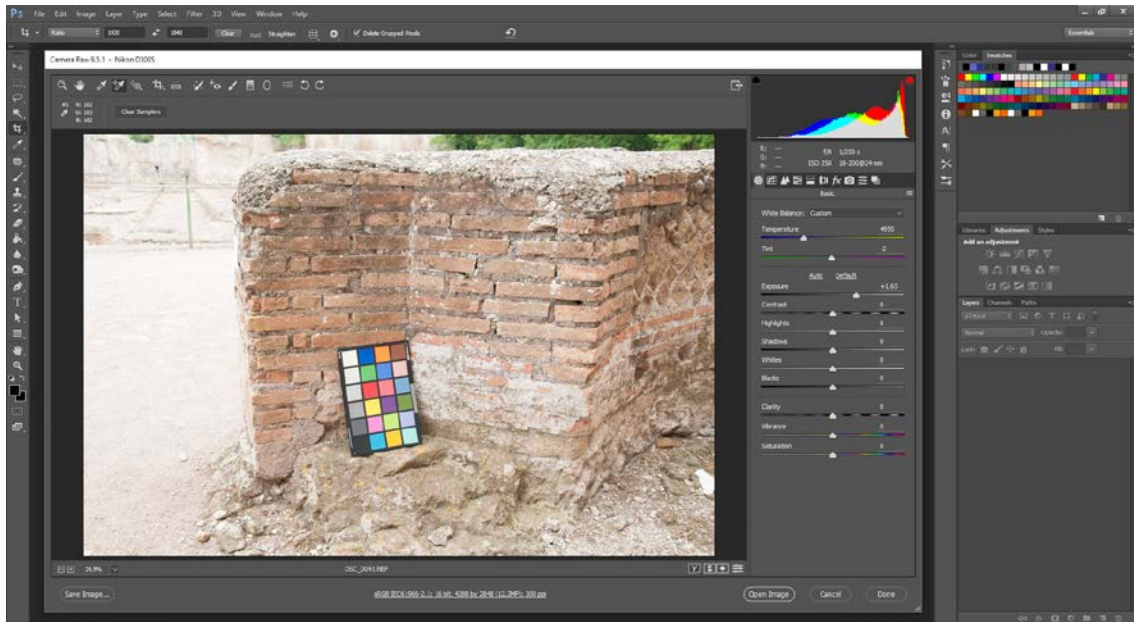


*Output della mappa di illuminazione (a sinistra), che permetterà di correggere la luminosità della texture (destra).*

illuminazione dal cielo. All'interno del plug-in Camera Raw di Photoshop, è stato valutato l'incremento di esposizione da assegnare all'immagine in modo da ottenere la stessa luminosità (verificata nel 4° tassello grigio del color checker). Si sottolinea che questa fase è indipendente dal bilanciamento del bianco, differente nelle due foto, che ha il solo scopo di uniformare il tono del grigio. È stato valutato un incremento di +1,65 EV.

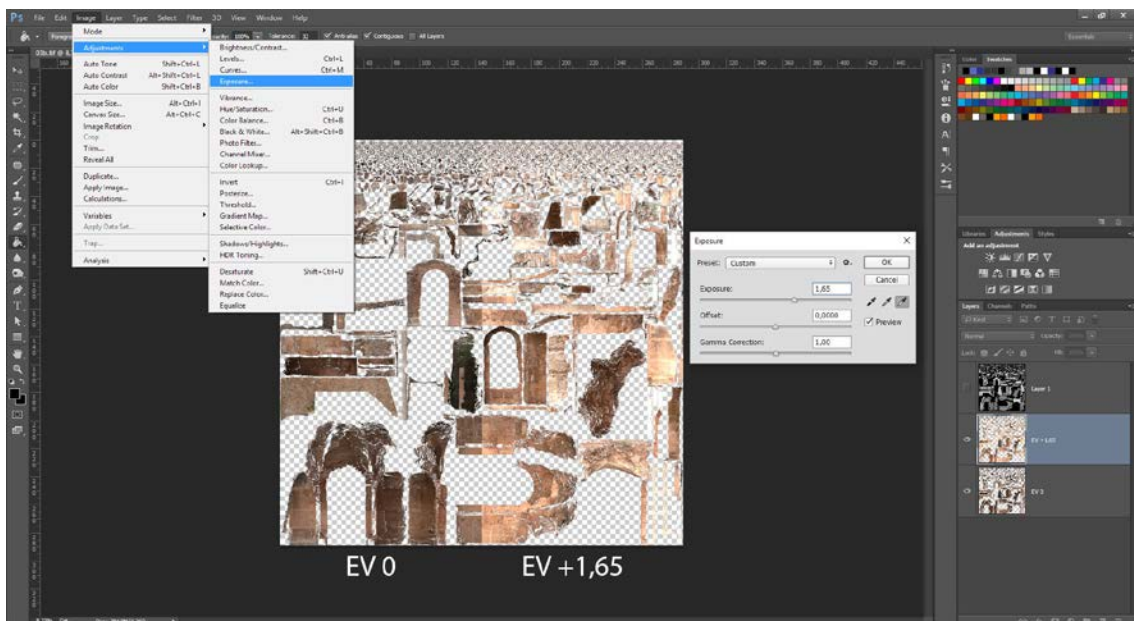


*Schermata del plug-in Camera Raw: in questa foto il color checker è posizionato frontalmente e riceve l'illuminazione massima. Questa foto esprime l'esposizione corretta e viene valutato il valore corrispondente al grigio medio.*



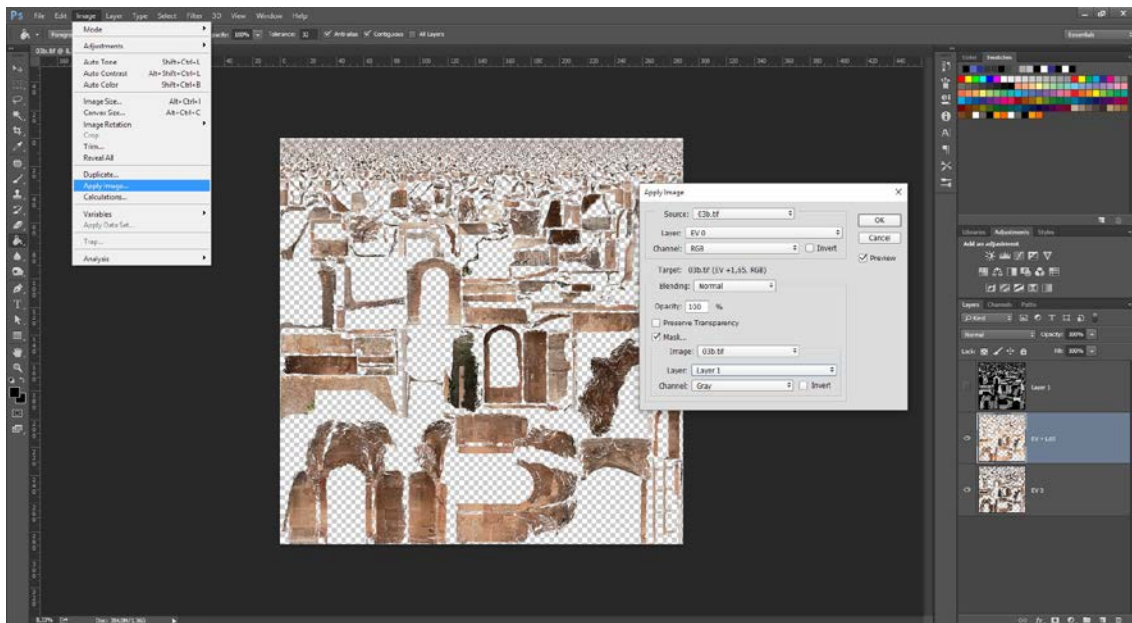
*Schermata del plug-in Camera Raw: in questa seconda foto il color checker è posizionato all'interno del vestibolo e riceve un'illuminazione inferiore (la minima rilevabile). Si opera una correzione dell'esposizione per raggiungere lo stesso valore del grigio medio della prima foto.*

All'interno di Photoshop sono stati importati i file relativi alla mappa di illuminazione e alla texture. Quest'ultima è stata duplicata ed è stata corretta con un'esposizione di +1,65.



*Schermata del software Adobe Photoshop: duplicazione e correzione dell'esposizione della texture secondo quanto riscontrato in precedenza (+1,65).*

A questo punto sono presenti le 2 texture ad esposizioni differenti: ogni pixel della texture finale avrà una luminosità intermedia compresa tra di esse. È compito della mappa di illuminazione stabilire se ogni pixel sarà più vicino alla texture EV 0 o a quella EV +1,65: dove la mappa è bianca saranno mantenuti valori prossimi alla texture EV 0, mentre dove la mappa è scura i valori si avvicineranno alla texture EV +1,65. Per ottenere questo risultato si utilizza il comando *apply image* mentre è selezionato il layer EV +1,65: ad esso viene sovrapposto il layer EV 0, secondo la maschera della mappa di luminosità.



*Schermata del software Adobe Photoshop: processo di generazione della texture finale.*



## 8. Render e tavole

Al termine della creazione della mesh e della texture, è stata eseguita una serie di render per rappresentare con un'elevata qualità il modello del vestibolo ottagonale, effettuando anche delle comparazioni per valutare l'efficacia delle tecniche di modellazione impiegate.

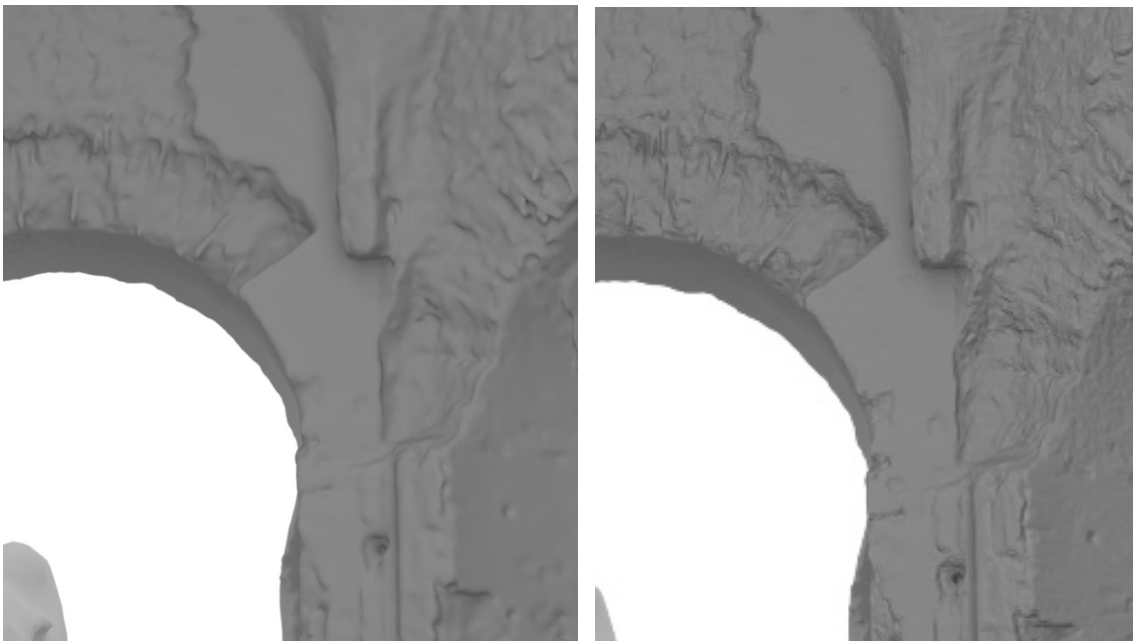
Per il primo confronto, è stato effettuato il rendering del solo modello LP, ad una risoluzione di 5760x3240 pixel, prima senza l'applicazione delle normal map e successivamente attivandole. Si ricorda che le normal map sono speciali texture che incrementano il dettaglio visivo di una superficie. Sono state ottenute tramite l'operazione di baking tra il modello LP (2,7 milioni di poligoni) ed il modello HP (18,5 milioni di poligoni) in modo da permettere un livello di dettaglio prossimo alla mesh HP, utilizzando però la mesh LP, quindi riducendo dimensioni dei file e tempi di rendering. In totale sono state create 3 normal map, per il corpo principale (8192x8192), per il pavimento (4096x4096) e per il criptoportico (4096x4096).



*Render del modello LP (2,7 milioni di poligoni) con normal map disattivate.*



*Render del modello LP con normal map attive (corpo principale 8192x8192; pavimento 4096x4096; criptoportico 4096x4096).*



*Ingrandimento dei render sopra proposti. A sinistra, modello LP senza NM. A destra, modello LP con NM.*

Sul modello LP con normal map è stata applicata la texture del colore, sia prima che dopo la correzione della luminosità. Sono stati quindi eseguiti 2 render per verificare il miglioramento ottenuto in seguito alla tecnica di correzione applicata. Entrambi i render sono stati eseguiti con le stesse impostazioni, ossia con un'illuminazione diffusa che simula il cielo completamente coperto, e impostazione dell'illuminazione indiretta su 2 *bounces*.



*In alto, render del modello LP+NM con texture non corretta. In basso, render dello stesso modello con applicazione della texture finale con luminosità corretta.*

Dove è stata applicata la texture corretta, il modello risulta globalmente più chiaro. Tuttavia, lo scopo della tecnica impiegata consisteva nel compensare la luminosità della texture dove, nella scena reale, l'illuminazione risultasse non uniforme. Ciò significa che la texture ha subito il maggior incremento di luminosità nelle zone più scure. È possibile confermare visivamente quanto detto nelle aree dell'immagine in cui il contrasto risulta più elevato, come ad esempio nello stacco tra il muretto in basso sulla sinistra e l'interno del vestibolo. Si può notare nell'ingrandimento sottostante che mentre il muretto, essendo esposto frontalmente e quindi essendo ben illuminato, non subisce un particolare incremento di luminosità, l'interno del vestibolo, meno illuminato nella scena reale, subisce una correzione maggiore.



*Ingrandimento dei render proposti nella pagina precedente. Sopra, modello con texture non corretta. Sotto, modello con texture corretta.*

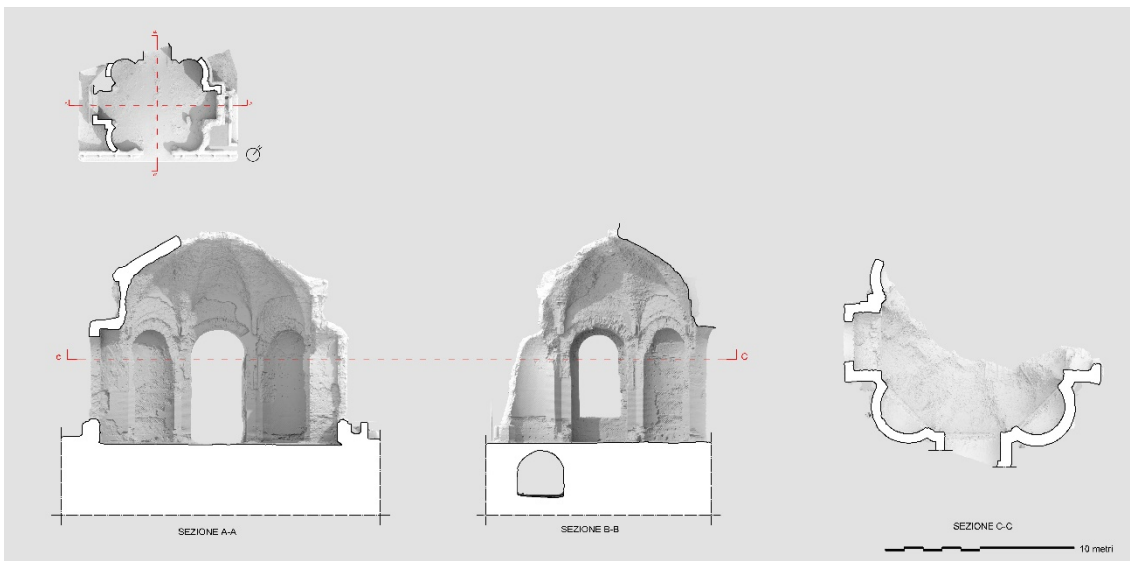


Oltre ai render è stata realizzata un'animazione di 10 secondi, costituita da 24 fotogrammi al secondo, che offre una visione dinamica della scena e la transizione dal modello senza applicazione della texture al modello con texture del colore diffuso finale.



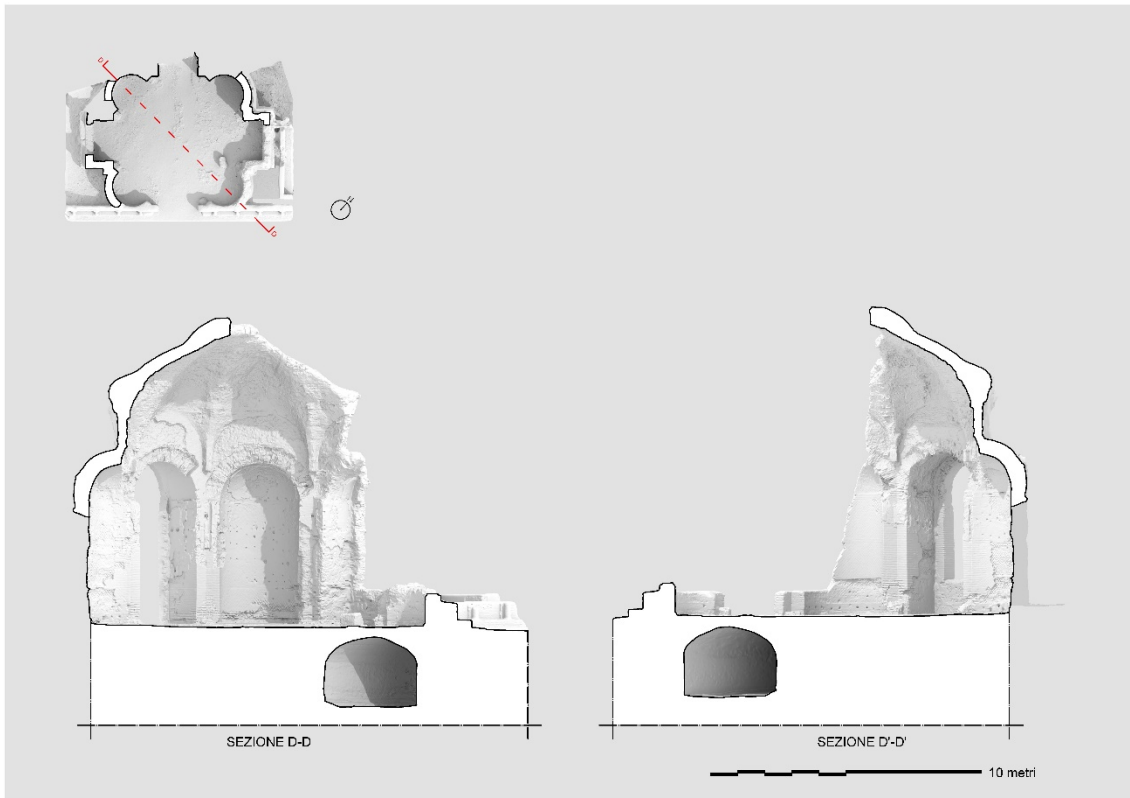
*Un fotogramma dell'animazione finale del vestibolo.*

Infine, sono state realizzate 3 tavole contenenti le principali sezioni del vestibolo, che costituiscono il supporto per un'analisi tecnica dell'edificio nonché per la formulazione di ipotesi ricostruttive, e vanno ad associarsi alle finalità rappresentative e divulgative espresse dai render.

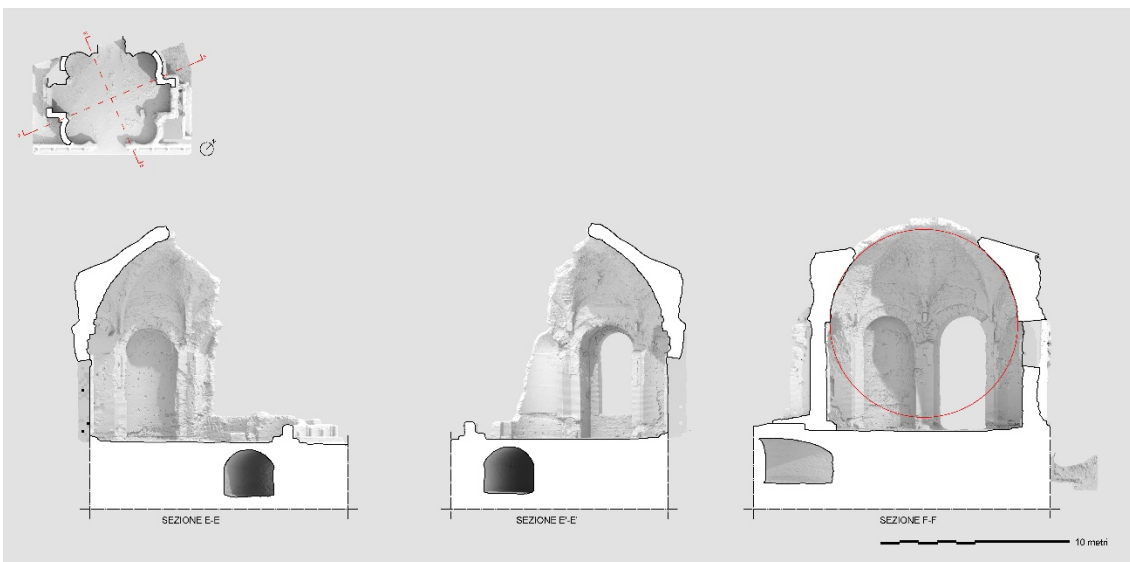


*Tavola 1: sezioni verticali secondo i piani ortogonali principali; sezione ipografica.*





*Tavola 2: sezioni verticali secondo un piano orientato a 45°.*



*Tavola 3: sezioni verticali con piani passanti per gli appoggi della cupola.*

## 9. Conclusioni

Il lavoro svolto sul vestibolo di Villa Adriana ha sicuramente portato alla realizzazione di un buon modello texturizzato, visivamente molto dettagliato, sia per quanto riguarda il rendering finale che per l'animazione digitale proposta. Tuttavia, è utile in questo spazio conclusivo soffermarsi sui limiti e gli ostacoli incontrati nel corso del caso studio effettuando una valutazione critica del risultando conseguito ed eventualmente trarre vantaggio da questa esperienza per assicurare una qualità maggiore nei rilievi futuri in ambito archeologico.

### 9.1. *Il modello 3D*

Il modello tridimensionale è stato generato unicamente tramite scansioni laser. A causa della forma complessa del vestibolo (nonché dell'altezza complessiva), del terreno non uniforme e della presenza di vegetazione, le scansioni non hanno permesso di garantire una copertura completa del padiglione. Il modello 3D risulta quindi incompleto, dato che la parte superiore della cupola è per la maggior parte mancante mentre il lato destro è stato rimosso manualmente in quanto coperto da vegetazione.

Per quanto riguarda le dimensioni del modello, esso è stato ridotto dagli iniziali 18.5 milioni di poligoni (742 MB) alla versione LP finale composta da 3 mesh per un totale di 2.7 milioni di poligoni e 104 MB di dimensione, grazie all'impiego delle normal map per il recupero del dettaglio visivo.

<b>Mesh</b>	<b>Dimensione</b>	<b>N° di poligoni</b>	<b>Lunghezza media del bordo</b>
Modello HP	742 MB	18.5 M	9.1 mm
Modello LP	104 MB	2.7 M	22.8 mm

La decimazione ha prodotto un modello più leggero facilmente gestibile e quindi adatto per realizzare rendering o sezioni 2D in programmi CAD. Tuttavia, il modello risulta ancora troppo “pesante” per poter essere sfruttato in applicazioni real-time o web-based. Basti pensare che nell'ambito dei videogiochi le mesh contano poligoni nell'ordine delle migliaia e non dei milioni. Questo perché per garantire fluidità nel gioco occorre

renderizzare decine di fotogrammi al secondo (almeno 25-30 fps per evitare una percezione “a scatti”). Nel campo dell’archeologia è difficile pensare di ricostruire un oggetto grande, dalla forma complessa e con numerosi dettagli con un numero così ridotto di poligoni, nonostante l’impiego di tecniche di Image Based Data Processing per il recupero del dettaglio su texture bidimensionali. Tali texture infatti recuperano il dettaglio solo visivamente e sono maggiormente efficaci per i poligoni visti perpendicolarmente. Nelle zone corrispondenti ai bordi della mesh e per poligoni rispetto ai quali si ha una visione pressoché tangenziale, l’impiego di mappe normali non è sufficiente a ripristinare un livello di dettaglio soddisfacente. Nello specifico caso studio, sono state create 3 normal map, una per ogni mesh del modello LP, per un totale di 392 MB.

<b>File creati</b>			
<b>Nome</b>	<b>Formato</b>	<b>Dimensione</b>	<b>Risoluzione</b>
03.tga	tga (immagine con canale alpha)	262 MB	8192x8192
04.tga	tga (immagine con canale alpha)	65 MB	4096x4096
05.tga	tga (immagine con canale alpha)	65 MB	4096x4096

Sommando le dimensioni di mesh e normal map, si ottiene un totale di 492 MB (escluse le texture del colore), un valore troppo elevato per poter sviluppare un metodo di visione remoto basato su piattaforma web. Occorre però sottolineare che il formato tga non esegue una compressione delle immagini, a differenza ad esempio del formato jpeg, più indicato per scopi dove la velocità di trasmissione delle immagini è prioritaria rispetto al mantenimento della fedeltà assoluta dei dati.

In seguito a queste considerazioni, per quanto riguarda l’ambito archeologico è evidente che se lo scopo di utilizzo del modello è un’applicazione *real time* o *web based* è necessario raggiungere un compromesso tra qualità/dettaglio e velocità/fluidità.

## 9.2. *Texture del colore diffuso*

In questo studio è stato affrontato un processo di acquisizione del colore e correzione della texture finalizzato ad ottenere un risultato finale più coerente col colore proprio del vestibolo. Il rendering finale offre un risultato “visivamente” più realistico, soprattutto se messo a confronto con il rendering ottenuto applicando la texture senza correzione della

luminosità. Tuttavia, sebbene il procedimento sia basato su fenomeni fisici di diffusione della luce, è difficile quantificare il miglioramento ottenuto nella correzione della texture, dato che questo procedimento si può definire “inverso”, dal momento che mira ad ottenere il colore proprio di un oggetto sebbene le acquisizioni siano “contaminate” da ombre, riflessi ed illuminazione indiretta. Per replicare un modello perfetto della scena reale all'interno del software di elaborazione digitale, occorrerebbero tutti i dati relativi all'illuminazione della scena nonché forma, posizione, colore e proprietà ottiche superficiali di tutti gli oggetti presenti che possano contribuire alla proiezione di ombre o a rimbalzi ottici.

### 9.3. *Finalità e sviluppi futuri*

Oltre agli obiettivi di carattere tecnico inerenti il processo di creazione del modello, è necessario anche valutare se il materiale prodotto è adatto alle finalità stabilite inizialmente o se è consigliabile modificare il flusso di lavoro per ottenere modelli 3D e/o elaborati 2D più efficaci.

Data l'alta risoluzione del modello e delle texture finali, i render e l'animazione hanno prodotto ottimi risultati dal punto di vista visivo, che ben soddisfano le finalità divulgative e rappresentative di carattere puramente estetico. D'altra parte, come già detto, la risoluzione è ancora troppo elevata per garantire una visualizzazione *real-time* tramite web browser. La creazione di un sito internet potrebbe essere uno sviluppo molto interessante, soprattutto tenendo conto del patrimonio culturale offerto da tutto il sito di Villa Adriana, ma per questo scopo i modelli dovrebbero subire ulteriori interventi di riduzione per permettere il caricamento e la visione sul web.

Per quanto riguarda gli elaborati grafici finali (tavole, sezioni), essi costituiscono il supporto principale per la formulazione di ipotesi ricostruttive. La grafica utilizza nelle tavole è rispecchia quella impiegata in elaborati relativi ad altri edifici di Villa Adriana, allo scopo di mantenere uniformità nello stile degli elaborati ed agevolare la comprensione delle rappresentazioni. Inoltre, in questo studio sono state realizzate solo alcune sezioni principali, ma avendo a disposizione il modello 3D è possibile ricavare sezioni secondo ogni piano a seconda delle proprie finalità e risalire alla geometria di base attraverso il *best fitting*, avendo a disposizione anche solamente sezioni incomplete.

## 10. Glossario

*Reverse Modeling*: processo di creazione di un modello digitale attraverso la scansione di un oggetto reale.

*Structure from Motion*: tecnica di rilievo con la quale si determina la posizione di punti nello spazio tramite l'acquisizione di set di fotografie scattate da angolazioni differenti.

*Laser Scan*: strumento che misurando il tempo di ritorno di un elevato numero di impulsi laser, calcola la posizione nello spazio dell'insieme dei punti colpiti.

*Render*: immagine finale ad alta qualità di un modello digitale ottenuta dalla simulazione del comportamento fisico della luce sulle superfici presenti nella scena.

*Point cloud*: nuvola di punti; insieme di punti di cui è definita la posizione nello spazio tridimensionale ed eventuali informazioni secondarie (es. la direzione normale alla superficie).

*Mesh*: modello tridimensionale poligonale costituito da vertici (vertices), spigoli (edges) e facce (polygons).

*Normal map*: texture che simula la complessità della superficie su cui è applicata allo scopo di aumentare il livello di dettaglio visivo di un modello.

## 11. Bibliografia e sitografia

<sup>1</sup> Storia dell'architettura italiana – Architettura romana – I grandi monumenti di Roma, a cura di Henner von Hesberg e Paul Zanker, Capitolo di Adolf Hoffman, Villa Adriana a Tivoli, Electa, 2009, pag 290-300

<sup>2</sup> Hadrian empire and conflict, Thorsten Opper, The british museum press, 2008, pag 130-165

<sup>3</sup> Adriano e la Grecia – Studi e ricerche, Capitolo di Fabrizio Salvazzi, Piazza d'Oro a Villa Adriana: architettura e meraviglia, Electa, 2014, pag 71-80

<sup>4</sup> Adriano e la Grecia – Studi e ricerche, Capitolo di Benedetta Adembri, Sergio di Tondo, Filippo Fantini, Fabio Ristori, Nuove prospettive di ricerca su Piazza d'Oro e gli ambienti mistilinei a pianta centrale: confronti tipologici e ipotesi costruttive, Electa, 2014, pag 81-90

<sup>5</sup> Atti del 1° congresso nazionale di storia dell'architettura, Guglielmo de Angelis d'Ossat, G.C. Sansoni, 1938 Firenze, pag 15-17

<sup>6</sup> Il Reverse Modeling per il progetto di design - Michele Calvano, 2012

<sup>7</sup> Acquisizione 3D e modellazione poligonale, G. Guidi, M. Russo, J. Beraldin, McGraw-Hill, 2010, Milano

<sup>8</sup> Il ritorno all'immagine - Nuove procedure image-based per il cultural heritage, Giorgio Verdiani, 2011

<sup>9</sup> [exporttocanoma.blogspot.it](http://exporttocanoma.blogspot.it) - SfM - Structure from Motion (prima parte)

<sup>10</sup> High accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena", IEEE Transactions on Image Processing, Guidi G, Beraldin J-A, Atzeni C., 13-3 (2004), pag 370-380.

<sup>11</sup> Colore e colorimetria – Contributi multidisciplinari, a cura di Maurizio Rossi e Andrea Siniscalco, Capitolo di Filippo Fantini, Pablo Rodriguez-Navarro, Sergio di Tondo, Maggioli Editore, 2012, pag 31-38

<sup>12</sup> Il modello in architettura – Cultura scientifica e rappresentazione, a cura di Emma Mandelli e Uliva Velo, Capitolo di Filippo Fantini, Alinea Editrice, 2010, pag 149-158

<sup>13</sup> Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei, Capitolo di Simone Baldissini, Marco Gaiani, Fabio Remondino, pagg 201-235

<sup>14</sup> I portici di Bologna – Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche, Capitolo di Marco Gaiani, Andrea Ballabeni, Massimo Ballabeni, Zheng Sun, Bononia University Press, pag 74-88