



Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

Dipartimento di studi Linguistico-letterari, Storico-filosofici e Giuridici (DISTU)

Corso di Dottorato di Ricerca in

Scienze storiche e dei beni culturali - XXXVI ciclo

“DRES”: UNA PIATTAFORMA GIS 3D INTEGRATA E MULTITASK PER IL RESTAURO VIRTUALE

Settore scientifico-disciplinare

(L-ANT/10)

Tesi di dottorato di:

Dott. Luca Lucchetti

Coordinatore del corso

Prof. Patrizia Mania

Tutore

Prof. Paola Pogliani

Co-tutore

Prof. Stefano De Angeli

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Introduzione.....	1
1. Il Restauro Virtuale: Storia, principi e procedure	4
1.1 Restauro virtuale: definizione e ricognizione degli studi	4
1.2 Restauro virtuale: principi e rapporto con restauro scientifico	10
1.3 Il Rilievo digitale e le procedure di base per il restauro virtuale, <i>workflow</i> piattaforma.....	19
1.3.1 <i>Tecnica Range-based o Laserscanning</i>	20
1.3.2 <i>La tecnica di ricostruzione fotogrammetrica</i>	23
1.3.3 <i>Procedure preliminari per il restauro virtuale</i>	29
1.3.4 <i>Workflow della piattaforma</i>	31
2. I processi del restauro virtuale bidimensionale: pitture, mosaici e documenti librari	32
2.1 L'immagine digitale	32
2.2 La rappresentazione digitale del colore	34
2.3 La rappresentazione delle immagini digitali	41
2.4 Processi preliminari al restauro virtuale	45
2.4.1 <i>Analisi non invasive</i>	53
2.5 I processi del restauro virtuale bidimensionale.....	55
2.6 Il restauro virtuale bidimensionale delle pitture	62
2.7 Il restauro virtuale bidimensionale dei mosaici	66
2.8 Il restauro virtuale bidimensionale dei documenti librari	69
3. I processi del restauro virtuale tridimensionale: architetture, statue e manufatti ...	72

3.1	Tecniche di Modellazione	74
3.2	Stili di visualizzazione.....	83
3.3	Texture mapping.....	85
3.4	Il rendering e le fonti di luce	91
3.5	Il restauro virtuale tridimensionale delle architetture	99
3.5.1	<i>Modelli di corrispondenza del dato</i>	108
3.6	Il restauro virtuale tridimensionale delle sculture.....	113
3.6.1	<i>Tecniche e processi del restauro virtuale per le sculture</i>	115
3.7	Il restauro virtuale tridimensionale dei reperti mobili	119
4.	GIS 3D e Database Relazionali	124
4.1	Tipologie di dati del GIS.....	124
4.1.1	<i>Dati raster e vettoriali</i>	125
4.1.2	<i>Dati tabellari</i>	128
4.2	Sistemi di riferimento, analisi spaziali, formati e WebGIS	128
4.3	GIS 3D.....	131
4.4	Database relazionali	139
4.5	Esempi di applicazioni GIS e GIS 3D per i beni culturali.....	142
5.	La piattaforma e il <i>workflow</i> di lavoro	151
5.1	Il Linguaggio Python e lo sviluppo della piattaforma	151
5.1.1	<i>Il linguaggio di programmazione Python</i>	160
5.1.2	<i>Sviluppo della piattaforma</i>	162
5.2	I processi della piattaforma ed il <i>workflow</i> di lavoro.....	167
5.2.1	<i>Processi e funzioni del plug-in DRes</i>	167
5.2.2	<i>Il workflow e la struttura del database</i>	173

6. I casi di studio.....	186
6.1 Processi di restauro virtuale bidimensionale: La pavimentazione a rombi listellati dell'ambiente A8 della villa dei Quintili.....	186
6.2 Processi di restauro virtuale tridimensionale: Il corredo della Tomba 643 dalla necropoli di Monte Abatone.....	203
6.3 Processi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale: le pitture a grottesche dell'ambiente E del "Bagno del Cardinale" presso la Villa del Colle del Cardinale a Perugia	225
Conclusioni.....	240
Bibliografia:.....	244
Sitografia:	278
Indice delle figure:.....	282

Introduzione

Il presente elaborato è nato dalla volontà di progettare e sviluppare una piattaforma GIS (*Geographic Information System*) 3D in grado di gestire, in un unico ambiente e tramite l'integrazione di diversi software, tutti i processi realizzativi di un restauro virtuale e, parallelamente, che permetta di contenere, visualizzare ed interrogare tutta la documentazione relativa all'intervento stesso con il fine di consentirne una valutazione critica.

Sulla base di tali considerazioni, lo studio si è mosso in primo luogo verso la comprensione del rapporto che intercorre tra i due ambiti dell'informatica e del restauro. Un connubio che, nato agli inizi degli anni '80, mostra a tutt'oggi nuove vie di sperimentazione ed analisi. La denominazione restauro virtuale venne proposta solamente nel 1994 divenendo però, quasi subito, l'elemento centrale di discussione di un dibattito terminologico. Tutto questo interesse in quegli anni dimostrò al contempo una sempre maggior presenza di tali pratiche nelle attività ed ipotesi di intervento. Infatti, di pari passo con l'avanzare della tecnologia, vennero sperimentate differenti soluzioni elaborative che ponevano diversi interrogativi. Questi, principalmente legati con il livello di attendibilità scientifica dei risultati, portarono alla problematizzazione su quali fossero gli obiettivi finali del restauro virtuale e sull'ambito scientifico in cui dovesse ricadere. Tali dilemmi fecero nascere, inoltre, la considerazione di dover definire dei limiti entro cui le pratiche di restauro virtuale dovevano essere fatte rientrare. Queste tematiche verranno maggiormente discusse nella prima parte del primo capitolo, a cui segue la dissertazione di un'altra problematica, legata all'esigenza di dover ricondurre tali attività ad una prassi univoca identificata da precise fasi e momenti elaborativi, sollevata negli stessi anni. Si è, quindi, presa in considerazione la produzione scientifica, associata a pratiche di intervento similari, che potesse definire una standardizzazione dei processi mantenendo al contempo una solida base nella fase di verifica dell'attendibilità dei risultati raggiunti. A seguito di tale ricerca bibliografica si è individuata una tendenza, iniziata a palesarsi dagli anni 2000, di classificare le varie tecniche all'interno di due filoni specifici definiti nelle pratiche del restauro virtuale bidimensionale, per pitture, mosaici e opere librerie, e tridimensionale, per architetture, statue e manufatti. Questa suddivisione, che è associabile più alle tipologie di azioni di intervento messe in atto che alla differenza materica e tipologica delle varie opere, rispecchia una prassi esecutiva che deve partire a monte da un elemento specifico ed univoco, il rilievo digitale dell'opera, un aspetto che verrà presentato e discusso già alla fine del primo capitolo. Questo processo, che vede l'utilizzo di strumenti fotografici e software fotogrammetrici, risulta essenziale per disporre di un modello 3D che possa essere esso stesso alla base delle elaborazioni o che permetta la creazione di un ortomosaico bidimensionale. Solo a questo punto, infatti, ottenendo uno dei risultati sopramenzionati si potranno

effettuare e portare avanti le differenti azioni di elaborazione. A tale proposito, proprio per comprendere a pieno le rispettive prassi di intervento si è sentita l'esigenza di dare maggior risalto, con i rispettivi capitoli due e tre, alle pratiche e processi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale. Come sopra specificato, infatti, in base alla tipologia di opera su cui si andrà ad eseguire l'attività di restauro virtuale verranno impiegate tecniche differenti. Le elaborazioni di restauro virtuale bidimensionale vengono condotte tramite programmi e strumenti di fotoritocco al di sopra di un'immagine o un ortomosaico che riproduce fedelmente l'apparato iconografico dell'opera o la sua decorazione. Ovviamente, prima di poter arrivare ad effettuare l'intervento di restauro virtuale vero e proprio, vi deve essere a monte uno studio delle fonti dirette e indirette coadiuvato dalla produzione di mappe dei degradi e degli interventi che giustificano le successive elaborazioni.

Il restauro virtuale tridimensionale, invece, mostra tutte le potenzialità di queste tecniche andando non solo a manipolare l'immagine bidimensionale, ma anche a modificare la volumetria degli oggetti.

Infatti, alla base di tali pratiche si pone un modello tridimensionale che rispecchia fedelmente le fattezze dell'opera originale, sia essa un'architettura, una statua o un manufatto. Anche in questo caso vi deve essere a monte la produzione di una documentazione scientifica che consideri non solo le fonti dirette ed indirette, ma anche che mostri tutti i processi nelle varie fasi di realizzazione dell'elaborazione. Per giungere a tali risultati si andranno ad utilizzare software di modellazione tridimensionale che permettono non solo l'elaborazione dei volumi e delle forme, ma anche la modifica delle superfici e delle *texture* bidimensionali. Questo aspetto, quindi, mette in evidenza un parallelo tra i processi di restauro virtuale tridimensionale e quelli bidimensionali e mostra come questa suddivisione possa in alcuni casi venire meno. Tale situazione si palesa soprattutto negli interventi di restauro virtuale delle architetture, in cui entrambe le tipologie di elaborazione risultano spesso complementari.

Una volta, quindi, definite quali siano le teorie, le pratiche e i processi associati con le attività di restauro virtuale, il successivo capitolo della tesi, il numero quattro, è stato strutturato per andare a riassumere un'altra tematica essenziale per la realizzazione della piattaforma, definendo cosa siano i GIS 3D e i database relazionali. In questa parte si sono andati a delineare tutti quegli elementi che caratterizzano i *Geographic Information System*, sia bidimensionali che tridimensionali, permettendo di comprenderne funzioni e potenzialità. Tali aspetti possono essere maggiormente integrati tramite il supporto di quegli strumenti che vengono definiti database relazionali, una forma di banca dati che permette la gestione di informazioni complesse tramite la loro scomposizione in raggruppamenti semplificati che sono in relazione tra di loro. Questi elementi sono risultati essenziali nella creazione di uno strumento che non solo permette di integrare i vari software, ma anche di documentare le

azioni di intervento digitale eseguite e di ricollegarle, tramite le relazioni del database, a tutta la mole di informazioni utilizzata per arrivare a produrre quel determinato processo.

Entrambi sono stati, dunque, essenziali per la creazione della piattaforma al pari dello specifico linguaggio di programmazione impiegato. Infatti, mentre il GIS è stato utilizzato come principale ambiente di sviluppo su cui costruire il plug-in, il database relazionale ad esso associato è stato strutturato per poter contenere al suo interno tutti i dati degli interventi. Infine, il linguaggio di programmazione prescelto è risultato imprescindibile per la creazione dell'intera piattaforma nelle sue varie funzioni e per la realizzazione dell'interfaccia grafica. Per cui, il quinto capitolo, quello dedicato al plug-in, è stato strutturato per introdurre primariamente ai concetti di base che definiscono cosa sia e come funzioni un linguaggio di programmazione, per poi concentrarsi principalmente sul linguaggio di programmazione identificato come maggiormente confacente agli obiettivi della ricerca, ossia Python. Solo successivamente si sono introdotti i vari elementi con cui è stato implementato il plug-in a partire dai software integrati, nello specifico: il GIS *open source* QGIS®, il software proprietario di fotogrammetria Agisoft Metashape®, il programma di fotoritocco *open source* GIMP® e quello di modellazione 3D *open source* Blender®. Sono state definite poi le varie funzioni del plug-in che, oltre a facilitare l'apertura diretta di tutti questi software, consentono anche di caricare e generare tutti quegli elementi necessari alla realizzazione dei processi di restauro virtuale. Inoltre, questo strumento permette di poter documentare tutte le fasi dell'intervento e contenere tutta la mole di informazioni prodotta durante ogni singola azione all'interno di un database relazionale. A tal proposito, l'ultimo paragrafo del quinto capitolo è dedicato alla definizione dei due schemi del database relazionale mostrandone le potenzialità sia per la documentazione degli interventi di restauro virtuale bidimensionale che per quelli tridimensionali.

Infine, il sesto e ultimo capitolo evidenzia tutte le funzionalità del plug-in attraverso l'insieme dei processi e dei test effettuati nelle elaborazioni dei tre casi studio scelti. Nello specifico, si è deciso di seguire il *workflow* di restauro virtuale bidimensionale per la pavimentazione in opus sectile dell'ambiente A8 della Villa dei Quintili sulla via Appia, di restauro virtuale tridimensionale per l'intero corredo proveniente dalla tomba 643 di Monte Abatone a Cerveteri e, infine, di entrambi i percorsi di restauro virtuale con le pitture a grottesche collocate nell'abside dell'ambiente E del cosiddetto "Bagno del Cardinale" della villa del Colle del Cardinale a Perugia. Questi tre casi studio, di epoca e contesto molto differente, mostrano le reali potenzialità della piattaforma quale strumento multi-scalare e multi-temporale.

1. Il Restauro Virtuale: Storia, principi e procedure

1.1 Restauro virtuale: definizione e ricognizione degli studi

Il rapporto tra restauro moderno ed informatica è diventato, nel corso del tempo, sempre più stringente e con il duplice fine di strumento informativo e operativo¹. Già Cesare Brandi, nel 1963, in “Teoria del Restauro” oltre a porre le basi per l’applicazione del restauro moderno formulò delle questioni legate alla necessità di conservare e fruire i beni culturali senza contatto fisico con l’opera². Mentre, il primo ambito in cui si applicò il “calcolatore” fu quello archivistico e catalogativo del patrimonio nazionale, dobbiamo aspettare la fine degli anni Settanta per notare una nuova percezione in cui ci si rese conto delle potenzialità dell’informatica applicata alla verifica scientifica degli interventi pittorici di tipo cromatico e materico³.

Infatti, fu nel 1979 che Vito Cappellini, con l’articolo “Il calcolatore e l’arte”, si avvicinò all’analisi di tale argomento riuscendo, per la prima volta, a definire ed ipotizzare una primordiale metodologia di ricostruzione delle opere d’arte tramite tecniche di “restauro elettronico” di tipo bidimensionale⁴.

Tale ideologia iniziò, quindi, ad avere maggior risalto tanto che solo tre anni dopo, nel 1982, furono organizzate le “Giornate di Studio Fiorentine” nell’ambito della mostra *Metodo e scienza: operatività e ricerca nel restauro*, tenutasi a Firenze dal 23 giugno 1982 al 6 gennaio 1983. In queste giornate si evidenziarono attività di restauro con nuove tecniche pratiche di approccio all’informatica, tra le quali le analisi spettrografiche e gammagrafiche delle formelle della Porta del Paradiso di Ghiberti dell’Istituto Guido Donegari di Novara⁵ e lo sviluppo di moduli strutturali e forme geometriche delle architetture del Brunelleschi e delle pitture di Piero della Francesca, individuate attraverso l’uso dell’informatica dagli studi dell’Opificio delle pietre dure di Firenze in collaborazione con l’Istituto di Elettronica dell’Università di Firenze⁶.

Le applicazioni dell’informatica al campo della conservazione e del restauro dei beni culturali continuarono ad essere argomento di studio, tanto è vero che nel 1985, ancora una volta, Vito Cappellini si interessò di queste pratiche con “Elaborazione numerica delle immagini”, ma non fu il solo, anche la Perusini iniziò a scrivere a favore di tali tecniche, infatti in “il restauro dei dipinti e

¹ Bennardi, Furferi 2007, p. 7

² *Ibidem*

³ Casazza 2007, p. 80; Limoncelli 2012, p.22,

⁴ Cappellini 1979, pp. 53-58; Bennardi, Furferi 2007, p. 8

⁵ Aguzzi, Mello, Pianzola 1982, pp. 325-326

⁶ Cappellini *et al.* 1982, pp. 327-332; Bennardi, Furferi 2008, p.8; Biagi Maino, Maino 2017, p. 15

delle sculture lignee” definì con forza l’utilità del computer non solo nell’ambito della catalogazione ma anche in quello della determinazione dello stato di conservazione. Palesò, infine, una ancora primordiale ipotesi di intervento legato alla reintegrazione pittorica «non solo per la catalogazione dei beni culturali ma anche per la determinazione dello stato di conservazione delle opere d’arte e per operazioni ritenute generalmente legate alla sensibilità artistica del restauratore, quali la reintegrazione pittorica»⁷.

Le applicazioni informatiche nel campo del restauro si evolsero, tanto che ormai si sentiva l’esigenza di definire in maniera specifica le modalità di esecuzione di queste tipologie di procedure di intervento. Fu così che si passò dalla definizione di restauro elettronico a quella di restauro virtuale. Tra i primi a palesare tale cambiamento di terminologia e ad utilizzare una metodologia specifica, oltre all’opera della Perusini, risulta Nadia Scardeoni. La restauratrice si attribuisce la creazione di una primordiale metodologia di restauro virtuale applicata all’intervento effettuato nel 1999 sull’“Annunziata” di Antonello da Messina. Tale operazione rivelò alcune incongruità sviluppatesi a seguito dei precedenti restauri prefigurando sull’immagine bidimensionale dell’opera l’intervento di restauro virtuale⁸.

Ma la proposta di accostare questi due termini, restauro e virtuale, come riporta Moschin in “Restauro virtuale, la tecnica per il recupero delle informazioni nascoste” del 2001, venne attribuita a Gianfranco Fiaccadori, professore di Filologia, che la espose nel 1994 cercando di unire le procedure tecniche con la finalità del restauro⁹. Questo concetto venne associato e applicato in principio all’ambito della conservazione e del restauro dei documenti librari antichi, per poi essere esteso a tutti i campi in cui vi era l’esigenza di un intervento di accessibilità di un’opera al fine di restituirla alle sue fattezze originali¹⁰. La prima applicazione pratica di tale processo, come riporta Moschin¹¹, sembra sia stata sviluppata da Daniele Broia in compartecipazione con la società Fotoscientifica di Parma. Essi, utilizzando la fotografia digitale e le riprese multispettrali, riuscirono a migliorare la leggibilità e la comprensione dei documenti antichi¹².

L’associazione terminologica formulata da Fiaccadori, già pochi anni dopo, nel 1997, venne messa in discussione sicché Domenico Bennardi propose un nuovo cambiamento del termine in

⁷ Perusini 1989, p. 151

⁸ Nadia Scardeoni, BTA - Bollettino Telematico dell’Arte, 28 Ottobre 2005, n. 41

<https://www.bta.it/col/a0/01/coll0112.html> ISSN 1127-4883 <http://www.edscuola.com/archivio/interlinea/sondan.html> (Ul. Con. 05-06-22); Biagi Maino, Maino 2017, p. 15

⁹ Moschin 2001, pp. 45-54; Biagi Maino, Maino 2017, p.16; Vico Lopez 2018, p.26

¹⁰ Limoncelli 2012, p. 23

¹¹ Moschin 2013

¹² Biagi Maino, Maino 2017, pp. 16-17

“Restauro Iconologico Digitale”, perché riteneva troppo vago e non specificante il termine restauro virtuale¹³.

Come si intuisce già da queste differenti proposte, il termine restauro virtuale non venne accolto positivamente da tutti, ma, come giustamente accade, aprì un dibattito collegato ai limiti del suo uso, alla sua disciplina di riferimento e ai suoi principi. Infatti, tale discussione, sull'uso o meno di questo termine, trovò terreno fertile nel 1999 al convegno di Roma, *Oltre il visibile: “restauro fisico” per conservare e “restauro virtuale” per valorizzare: una metodologia in evoluzione*. Il dibattito vedeva da una parte l'associazione di questi due termini nata dall'esigenza di coniugare sotto un'unica terminologia la tecnica e la finalità, come abbiamo sopra descritto; mentre dall'altra l'accostamento terminologico risultava discostante talmente tanto che le maggiori critiche, introdotte da Federici nel 1999 in “Restauro tradizionale e restauro virtuale come “divergenze parallele””, ritenevano questo accostamento addirittura ossimorico. La critica nasceva dall'idea che, l'intervento su una copia digitale dell'opera non sembrava compatibile, e quindi, non associabile al concetto di restauro, il quale si presenta come attività di intervento sulla materialità del manufatto con il fine di restituirle le caratteristiche funzionali, estetiche e di trasmissione ai posteri. Si riteneva, inoltre, che un intervento virtuale, anche se non operante sulla matericità dell'opera, poteva modificarne la percezione e comprensione, portando a soluzioni opinabili se non legate a primarie indagini diagnostiche, storiche, artistiche, documentarie e filologiche¹⁴.

Lo stesso Federici però specificò di non porsi contrario all'uso dell'informatica nel campo del restauro, ma che solamente non riteneva corretto l'uso della terminologia restauro virtuale per tali pratiche¹⁵.

Per cercare di comprendere le difficoltà scaturite da questa definizione dobbiamo considerare che “la stessa storia del restauro spiega questa polivalenza di significati: il termine è stato attribuito alla semplice riparazione funzionale dei danni del passato, all'azione di salvaguardia del valore devozionale delle opere di soggetto religioso, o a quella del messaggio artistico e, per ultimo, alla tutela del valore commerciale. Ad ogni tipo di intervento e ad ogni significato hanno corrisposto professionalità diverse e approcci differenziatamente critici, con una babilonia di significati dei termini connessi: conservazione, manutenzione, ripristino, reintegrazione etc”¹⁶.

Lo stesso Federici nel 2001, con l'articolo “Qualche chiosa al restauro cosiddetto “virtuale””, parlando delle possibilità, nel campo della tutela e valorizzazione, di intervento che una copia digitale ci permette di eseguire e che sull'originale sarebbero impossibili, definì il dibattito terminologico non

¹³ Bennardi, Furferi 2007, p. 8; questa definizione però non sostituì la prima e risulta a tutt'oggi meno utilizzata.

¹⁴ Federici 1999, pp. 49-52; Limoncelli, p.23; Biagi Maino, Maino 2017, p. 18

¹⁵ Federici 1999, p. 52

¹⁶ Bova 2002, p.9

più attuale¹⁷. Purtroppo, come specificato nel 2017 da Biagi Maino e Maino, questa discussione, pur iniziata in maniera seria e approfondita, non ha portato a significativi risultati, infatti, successivamente agli interventi di Federici, si riscontra un drastico calo dell'interesse per tale questione a favore di una maggior presenza di pratiche sull'impiego del restauro virtuale¹⁸.

Inoltre, a marcare ancora di più le difficoltà scaturite dall'uso di tale terminologia, nacque, successivamente, un'ulteriore distinzione interna tra i processi di conservazione virtuale e quelli di restauro virtuale.

Per conservazione virtuale viene intesa una simulazione digitale preventiva per prefigurare gli interventi da eseguire nel tempo, ma mantenendo integra la fisicità dell'oggetto e non intervenendo sulla materialità dell'opera stessa. Questa simulazione prevede preliminarmente di effettuare un rilievo digitale al fine di simulare le operazioni su una copia identica per fattezze e dimensioni all'originale, classificando e archiviando i dati che via via nascono dalle azioni svolte¹⁹.

Per restauro virtuale si intende “l'insieme delle metodologie integrate di Computer Graphic, sia bidimensionale che tridimensionale, finalizzate alla restituzione di un bene archeologico, architettonico o artistico nella sua completa o quasi integrità”²⁰.

Il restauro virtuale in tali termini non deve esser inteso solo ed esclusivamente come una ricostruzione ideale di un bene culturale ma alla stregua di una prassi che porti alla verifica e alla sintesi dei dati analitici²¹.

Gli aspetti che vennero dibattuti nel convegno di Roma del 1999 legato al restauro virtuale furono molti e di importanza non secondaria risultò l'individuazione del suo inquadramento scientifico. Ne scaturì che questa materia dovesse rientrare nella Scienza della Conservazione²² che identifica “l'insieme delle misure e degli interventi programmati e mirati a mantenere integra la condizione fisiologica e contestuale dei materiali costituenti il manufatto artistico accettandone il suo naturale declino”²³. Da ciò si convenne che tale metodologia risultava più vicina alle applicazioni di

¹⁷ Federici 2001, pp. 9-10

¹⁸ Biagi Maino, Maino 2017, p.5; sul dibattito vi è un'ottima analisi in: Moschin 2001. Successivamente si riscontrano piccoli riferimenti al dibattito, che però non pongono un apporto concreto al dibattito stesso, in: Ferrarini, Staltari 2002; in Bennardi e Furferi 2007; in Buzzanca 2008, Buzzanca 2009, Buzzanca 2010; in Limoncelli 2011 e Limoncelli 2012 e in Biagi Maino e Maino 2017.

¹⁹ Su tali archivi però entrerebbero in gioco quelle dinamiche che portano al deperimento dell'informazione e alla sua obsolescenza rapida. Per ovviare a queste problematiche nasce l'esigenza del salvataggio continuo su nuovi supporti delle informazioni originarie al fine della trasmissione al futuro. Dietro tali dinamiche si nascondono moltissime casistiche: dall'obsolescenza hardware a quella software, a quella della leggibilità del formato dei file, ecc. Tante dinamiche che devono essere prese in considerazione al fine di conservare e riprodurre le informazioni e renderle disponibili in futuro. Limoncelli 2012, pp. 18-19

²⁰ Limoncelli 2012, p. 20

²¹ *Ibidem*.

²² Come riportano Bennardi Furferi 2007, p. 9; Limoncelli 2012, p. 25 e Biagi Maino e Maino 2017, p. 21

²³ Giannini, Roani 2010, p.159

quelle professionalità che lavorano nell'ambito della diagnostica e della verifica delle ipotesi ricostruttive, piuttosto che a quelle del restauro vero e proprio.

Il restauro virtuale rappresenta, quindi, una metodologia di intervento di restauro prefigurativo e digitale che si ricollega all'area della salvaguardia, in quanto assicura un miglioramento visivo e propone un'ipotetica ricostruzione²⁴, avvicinandosi ai concetti espressi nell'art. 4 della Carta del Restauro 1972²⁵.

Gli studi successivi sul restauro virtuale si sono quasi del tutto concentrati più sull'aspetto tecnico e pratico che non su quello teorico. Questo portò, però, alla problematica che furono associati alla definizione anche degli interventi che con essa non c'entravano nulla²⁶. Per tale motivo si sentì l'esigenza di individuare i limiti della disciplina, come andremmo a vedere tra poco nel prossimo capitolo, prendendone le radici da quei principi che definiscono il restauro reale. Questa situazione nasceva anche dall'errata ideologia che il restauro virtuale potesse essere concorrente al lavoro diretto del restauratore²⁷. Tale finzione però risulta completamente priva di fondamento in quanto, come sopra espresso, il lavoro viene eseguito, proprio perché virtuale, sempre e comunque su una copia digitale dell'opera e mai sull'originale. Proprio per questa base il restauro virtuale dovrebbe essere considerato non sostitutivo ma di supporto e progettazione a qualsiasi attività di restauro scientifico, così già nel 2007 Bennardi e Furferi in "Il Restauro Virtuale: tra ideologia e Metodologia" discorrevano sui limiti e processi di tale disciplina²⁸. Il loro discorso si spostò anche su ulteriori casistiche in cui i processi di restauro virtuale potessero essere indispensabili. Ne scaturì che l'uso di intervenire su di un'opera esclusivamente attraverso questi metodi potesse essere dovuta alla fragilità dell'opera stessa e all'impossibilità o difficoltà di un restauro reale²⁹.

Questa proposta di adeguamento dei processi venne accettata parzialmente da diversi studiosi nei loro interventi, nel tentativo di produrre procedure condivise nell'ambito del restauro virtuale³⁰. Tale tematica sembra permeare l'ideologia anche di altri studiosi tra cui Limoncelli che, successivamente ad un articolo del 2011 in cui inizia a delinearne una prima stesura³¹, pubblica nel 2012 un manuale di restauro virtuale per l'archeologia in cui, oltre ad accogliere alcune proposte teoriche sui limiti e sui processi, già enucleati, come visto, da Bennardi e Furferi, sviluppa una

²⁴ Biagi Maino, Maino 2017, p. 21

²⁵ Art. 4. S'intende per salvaguardia qualsiasi provvedimento conservativo che non implichi l'intervento diretto sull'opera: s'intende per restauro qualsiasi intervento volto a mantenere in efficienza, a facilitare la lettura e a trasmettere integralmente al futuro le opere e gli oggetti definiti agli articoli precedenti. Limoncelli 2012, p. 23

²⁶ Biagi Maino, Maino 2017, p. 5

²⁷ Ferrarini, Staltari 2002, p. 53

²⁸ Bennardi, Furferi 2007, p. 13

²⁹ *Ibidem*

³⁰ Come l'esempio di Monti e Maino del 2011 sul lavoro riguardante i cartoni del mosaico per studio in cui confermano i concetti sopra esposti legati a procedure condivise nell'ambito del restauro virtuale. Monti, Maino 2011.

³¹ Limoncelli 2011, pp. 42-59

metodologia processuale di restauro, sia bidimensionale che tridimensionale, riproducibile e applicabile a tutte le casistiche di intervento: dalle pitture, ai mosaici, ai manoscritti, alle architetture, alle statue e ai manufatti³².

Si riscontra, negli anni seguenti, un susseguirsi di articoli che avvallano questa metodologia o ne propongono una nuova, ma limitata ad un singolo studio o casistica, non producendo, di fatto, nessun avanzamento di proposta teorica o metodologica di rilievo³³.

Tale situazione sembra avere una divergenza nel 2017 con il testo di Biagi Maino e Maino, che tenta di riportare l'attenzione verso i principi che ripercuotono sulla scientificità degli interventi di restauro virtuale basati sulle teorizzazioni già esposte dai precedenti studi sopra citati, proponendo, inoltre, un ulteriore passo tecnico nelle soluzioni di prototipazione e di realtà virtuale³⁴.

Allo stesso tempo vi è, in questo testo da parte degli autori, una presa di coscienza nel denunciare ancora un certo caos nelle tematiche del restauro virtuale a partire dalla definizione terminologica, ma considerando anche il campo di azione e scientifico e le limitazioni per non incorrere nella creazione di falsità puramente estetiche. Tale situazione mostra come ancora non vi era, e per ora sembra non vi sia, un serio e meditato protocollo di azione univoco³⁵.

Successivamente, ancora una volta, gli studi si volgono principalmente verso l'applicazione in singole casistiche portando un apporto minimo alle teorizzazioni già espresse. Ne è un esempio, nel 2018, l'articolo di Vico Lopez che si muove sulle tematiche del restauro virtuale architettonico applicato ai due casi studio della Villa di Livia a Prima Porta e della Casa delle nozze d'argento a Pompei. L'intervento cerca di riportare l'attenzione sulla tematica dei limiti da imporre nella pratica del restauro virtuale partendo dai principi del restauro reale definiti da Cesare Brandi in "Teoria del Restauro", l'intento viene espletato soprattutto alla luce di evitare la creazione di falsi storici³⁶.

Da ultimo, risulta di particolare interesse la pubblicazione dei risultati del progetto di Limoncelli e Potenza per la chiesa di Lama D'antico del 2020.

Gli autori si schierano fermamente verso un approccio al restauro virtuale che da una parte sia limitato dalle regole e dai principi della conservazione e del restauro reale, ma che dall'altra, presentando la libertà di operare, rispetto all'intervento fisico, su una copia digitale dell'opera, dia la possibilità di applicare tutte quelle tecniche informatiche per lo studio, l'analisi, la conoscenza e la

³² Limoncelli 2011, pp. 42-59; Limoncelli 2012, pp. 17-220

³³ Per uno studio più approfondito dei vari approcci susseguirsi nel tempo si vedano: Gabellone *et al.* 2013; Dionisio, Licari 2014; Lanitis *et al.* 2014; Costanzi cobau 2015; Lahiri 2015; Pižurica *et al.* 2019.

³⁴ Biagi Maino, Maino 2017; Il testo di Biagi Maino e Maino del 2017, oltre a presentare una storia degli studi ed alcuni processi più teorici, riporta al suo interno molti casi studio eseguiti dagli studenti e dai laureandi del corso di laurea magistrale in Storia e Conservazione delle Opere d'Arte dell'Università di Bologna. Biagi Maino, Maino 2017, pp. 5-6.

³⁵ Biagi Maino, Maino 2017, p.5

³⁶ Vico Lopez 2018, pp. 25-34

conservazione al fine di fornire un supporto all'intervento fisico vero e proprio e alla conoscenza dell'unità potenziale del bene culturale³⁷.

Negli ultimi anni, infine, si è sviluppato un nuovo ambito di ricerca pionieristico che tenta di legare i processi di restauro virtuale con gli strumenti dell'intelligenza artificiale generativa³⁸. Se da una parte questi studi mostrano una certa potenzialità³⁹, soprattutto nell'ambito della ricostruzione di opere ormai andate perdute e del riassettraggio di manufatti⁴⁰, dall'altro pongono dei dubbi sulla scientificità dei risultati finali e sulle possibilità di controllo dei processi⁴¹.

1.2 Restauro virtuale: principi e rapporto con restauro scientifico

Per comprendere a pieno le dinamiche di parentela che intercorrono tra il restauro virtuale e la prassi del restauro non possiamo prescindere dall'iniziare questa dissertazione se non dai concetti e principi espressi e poi enucleati da Cesare Brandi in "Teoria del Restauro" nel 1963⁴², divenendo poi, con la Carta del restauro del 1972, vere e proprie leggi per la pratica del restauro.

Una delle principali tematiche su cui Brandi basa la sua teorizzazione risulta essere il rapporto e, soprattutto, il legame tra il momento del riconoscimento dell'opera d'arte come tale e il successivo intervento di restauro. Questo binomio si pone a fondamento nel delineare il rapporto tra opera d'arte e restauro in quanto risulta l'opera in sé a definire e condizionare l'intervento di restauro⁴³.

³⁷ Limoncelli, Potenza 2020, p.35

³⁸ Con tale termine si intendono tutti quegli algoritmi o modelli, definiti di *deep learning*, che simulano i processi cognitivi umani e vengono addestrati tramite una grande mole di dati. Questi consentono al calcolatore di creare ed elaborare nuovi contenuti, sia in maniera supervisionata che autonoma. Li 2022, p. 370

³⁹ Molte di queste ricerche, inoltre, si incentrano sugli ambiti della conservazione e della prevenzione a favore del controllo e del monitoraggio. Si guardino a tal proposito: D'orazio *et al.* 2023; Moreno *et al.* 2023; Bordoni *et al.* 2013; Ranaldi, Zanzotto 2021.

⁴⁰ Si guardino a tal proposito: il progetto RePAIR dell'Istituto Italiano di Tecnologia che a partire da algoritmi di intelligenza artificiale e robotica vuole produrre un sistema che ricostruisca tutte quelle opere d'arte, di varia tipologia ed epoca, rinvenute frammentarie, CORDIS, *Reconstructing the Past: Artificial Intelligence and Robotics Meet Cultural Heritage*, <https://cordis.europa.eu/project/id/964854> (Ul. Cons. 20/02/24); Il Progetto di Google Art & Culture dove l'IA è stata utilizzata per ricostruire opere di Klimt andate distrutte durante la Seconda guerra mondiale, RJ Pierce 2021, *Google Just Used Artificial Intelligence To Restore Old Paintings Burned During WW2*, Tech Times, <https://www.techtimes.com/articles/266329/20211007/google-just-used-artificial-intelligence-to-restore-old-paintings-burned-during-ww2.htm> (Ul. Cons. 20/02/24); ancora, il progetto di Li *et al.* 2023, nell'ambito del quale si sono applicati algoritmi di intelligenza artificiale per migliorare la precisione nell'individuazione degli elementi di giunzione per la ricostruzioni 3D di un Guerriero di Terracotta.

⁴¹ Su tale problematica si veda ad esempio la ricerca di O'Brien *et al.* 2023 che mostra, a partire dal caso studio dell'opera "Achille che trascina il corpo di Ettore oltre le mura di Troia" di Antoine François Callet, le potenzialità ma anche i limiti di tali processi che da una parte favoriscono alcune fasi dell'elaborazione, ma dall'altra producono tal volta dei risultati fantasiosi che modificano completamente il senso del dipinto. Gli stessi autori, infatti, tendono a delineare nelle conclusioni un rapporto di interscambio tra i risultati dell'IA e il processo manuale di controllo e rettifica dei risultati finali. Sulla stessa tematica, ma con processi differenti, si vedano Gaber *et al.* 2023, Sizyakin *et al.* 2022. Mentre per quanto riguarda un'ottima analisi delle nuove ricerche e un confronto sulla tematica del copyright per la creazione di tali elaborazioni tramite l'IA si veda Li 2022.

⁴² Brandi 1977, p. 5

⁴³ *Ibidem*, p. 6

Partendo da questa enunciazione preliminare Brandi viene a definire i concetti di istanza estetica, legata all'artisticità dell'opera d'arte in sé e per la quale l'opera d'arte è tale, e dell'istanza storica collegata al prodotto umano nel momento in cui si viene a creare l'opera, cioè in un determinato tempo e luogo, ma anche al passaggio dei momenti storici che hanno lasciato segni sull'opera stessa per arrivare infine allo stato attuale⁴⁴.

Questi elementi vengono quindi riuniti per rinascere all'interno di una definizione univoca che riesca ad espletare il complesso significato del termine restauro, infatti, Brandi lo identifica come "momento metodologico del riconoscimento dell'opera d'arte, nella sua consistenza fisica e nella sua duplice polarità estetica e storica, in vista della sua trasmissione al futuro"⁴⁵.

È solo a questo punto che Brandi definisce il primo assioma del restauro scientifico: "si restaura solo la materia dell'opera d'arte"⁴⁶. Questo principio va a delineare un concetto fondamentale, l'unica parte legittimata dall'attività di intervento di restauro su di un'opera d'arte è quella fisica e non quella dell'immagine. Vi viene però definita una specifica, una certa parte di questi mezzi fisici faranno da supporto agli altri a cui è affidata la trasmissione dell'immagine così che "Non c'è la materia da una parte e l'immagine dall'altra"⁴⁷. Ma se si esige un sacrificio di una parte della materia di quell'opera primeggerà per importanza l'istanza estetica⁴⁸.

Il secondo principio che viene delineato da Brandi ci dice che: "il restauro deve mirare al ristabilimento della unità potenziale dell'opera d'arte, purché ciò sia possibile senza commettere un falso artistico o un falso storico, e senza cancellare ogni traccia del passaggio dell'opera d'arte nel tempo"⁴⁹. L'autore sente a questo punto l'esigenza di una specifica terminologica sul significato, dato in questo contesto, al termine materia, riferendosi ai supporti fisici che servono alla manifestazione dell'immagine, e al suo rapporto con l'intervento di restauro perché è la materia che riflette il tempo ed il luogo di tale attività⁵⁰.

Questo passaggio ci permette di dare un'identificazione alle due parti principali di un'opera d'arte: la struttura e l'aspetto, e, soprattutto, di come essi si correlino tra di loro, in quanto è l'aspetto ad avere maggior importanza sulla struttura⁵¹.

⁴⁴ Brandi 1977, p.6

⁴⁵ *Ibidem*

⁴⁶ *Ibidem*, p. 7

⁴⁷ *Ibidem*

⁴⁸ *Ibidem*

⁴⁹ *Ibidem*, p. 8

⁵⁰ *Ibidem*, p.9

⁵¹ *Ibidem*, p. 10

Inoltre, un ammonimento ci viene fornito per i rifacimenti, per il qual caso Brandi avverte di mantenere la prudenza perché, anche nel caso in cui il materiale risultasse lo stesso, il lavoro tenderà comunque alla creazione di falsi storici ed estetici⁵².

Ulteriore aspetto di rilevanza capitale per l'opera e per la sua godibilità, secondo la trattazione di Brandi, va dato a quegli elementi che si pongono intermediari tra opera e osservatore, cioè l'atmosfera e la luce. Volendo accentuare il peso di questi concetti, Brandi va a dare maggior importanza al contesto di origine, definendo come unico caso giustamente motivato di rimozione quello relativo alla salvaguardia e conservazione dell'opera stessa⁵³.

A questo punto del discorso, Brandi è pronto per proporre il concetto di unità potenziale dell'opera d'arte che risulta non formata da un totale di parti diverse ma da un elemento evidenziato dalla sua interezza⁵⁴, in cui "l'immagine risulta veramente e solamente quello che appare: perciò una raffigurazione parziale presenta una funzione semantica rispetto al contesto figurativo che l'immagine sviluppa che non può essere equiparata all'unità organico funzionale della realtà esistenziale"⁵⁵.

Tutto questo porta alla definizione di due corollari che negano le possibilità di intervento sulle opere d'arte mutilate o ridotte in frammenti attraverso l'uso dell'analogia. Nascono così alcuni principi: la riconoscibilità dell'integrazione; l'insostituibilità della materia dell'immagine nel momento in cui vi è una collaborazione diretta con la figuratività e, soprattutto, il principio della reversibilità degli interventi di restauro⁵⁶.

A questo punto la trattazione di Brandi si muove su un ulteriore elemento per l'opera d'arte, il tempo, e ne identifica tre momenti: "come durata: nell'estrinsecazione dell'opera d'arte mentre viene formulata dall'artista; in secondo luogo, come intervallo interposto fra la fine del processo creativo e il momento in cui la nostra coscienza attualizza in sé l'opera d'arte; in terzo luogo, come attimo di questa fulgurazione dell'opera d'arte nella coscienza"⁵⁷. Questa definizione temporale ci permette l'individuazione del momento in cui l'intervento di restauro risulti lecito, evitando sempre e comunque l'ingresso nel processo creativo dell'opera con il conseguente rischio di formulare un falso storico. L'azione di restauro, quindi, deve rispettare la complessa storicità dell'opera d'arte, e risulta legittimo solo quello che si attua nel presente senza andare ad intaccare o, peggio, eliminare, questa storicità. A tal proposito, il monito di Brandi è quello che vi deve essere sempre la

⁵² Brandi 1977, p. 11

⁵³ *Ibidem*, p.12

⁵⁴ *Ibidem*, p. 14

⁵⁵ *Ibidem*, pp. 15-16

⁵⁶ *Ibidem*, pp. 17-18

⁵⁷ *Ibidem*, p. 21

conservazione di campioni dello stato precedente al restauro e delle parti non coeve, perché identificano la traslazione dell'oggetto nel tempo⁵⁸.

Il restauro, quindi, deve essere consolidamento e conservazione della materia, dello *status quo*. Il discorso mostra come vi sia poi il bisogno di considerare un ulteriore aspetto, l'intervento diretto presenta sempre un intervento indiretto collegato con lo spazio e l'ambiente che, nel caso di architetture si presenta nella complessità urbanistica, mentre per la scultura e pittura nell'ambiente circostante e nel loro modo di presentazione. L'autore avverte l'esigenza di una specifica riguardante il ripristino, la ricostruzione e la copia che non devono essere neanche contemplate nel restauro, altrimenti si rischierebbe di distruggere l'autenticità cercando di arrivare ad un ripristino eccessivo e forzato dell'unità potenziale⁵⁹. Questo però, d'altro canto, non lascia libertà di azione senza vincoli nel caso delle aggiunte, che vanno mantenute o eliminate in base ad un giudizio di valore legato alla istanza storica o estetica. Se diamo adito all'istanza storica allora dobbiamo mantenerla perché l'aggiunta risulta anch'essa parte del passaggio del tempo sull'opera, mentre se primeggia l'istanza estetica dobbiamo rimuoverla⁶⁰, ma solo nei casi in cui “deturpa, snatura, offusca o sottrae in parte alla vista l'opera”⁶¹. Discorso a parte risulta quello delle patine perché essendo “quella impercettibile sordina posta alla materia, che si vede tenere il suo rango più modesto in seno all'immagine”⁶² si deduce la necessità di mantenerla sia per l'istanza storica che estetica⁶³.

L'ultimo concetto volutamente riportato in questa trattazione, al fine di comprenderne meglio il discorso complessivo, è quello del restauro preventivo il quale, subordinato alle caratteristiche chimico fisiche della materia, riguarda la tutela, la rimozione dei pericoli e l'assicurazione di condizioni favorevoli per l'opera. Quest'ultima presenta una realtà estetica e materiale che può essere deturpata da un imprecisato ed imprecisabile numero di agenti esterni che, potendo essere nocivi all'immagine ed al supporto, sono indicativi del tipo di intervento da eseguire⁶⁴.

Viene così a nascere nell'esposizione brandiana la definizione di restauro come “il momento metodologico del riconoscimento dell'opera d'arte nella sua duplice polarità estetica e storica”⁶⁵.

Per cui, secondo Brandi, lo studio dell'opera d'arte deve partire dall'efficienza dell'immagine per poi interessarsi sullo stato di conservazione della materia, il tutto attuato attraverso una metodologia filologica e scientifica, che ci permetta di comprendere l'autenticità della trasmissione

⁵⁸ Brandi 1977, pp. 26-27

⁵⁹ *Ibidem*, pp. 31-32

⁶⁰ *Ibidem*, pp. 35-37, 43-44

⁶¹ *Ibidem*, p. 44

⁶² *Ibidem*, p. 45

⁶³ *Ibidem*

⁶⁴ *Ibidem*, p. 53

⁶⁵ *Ibidem*, p. 54

dell'immagine fino a noi⁶⁶. Inoltre, solo per l'atto pratico vi è una vera distinzione tra restauro preventivo e restauro effettivo, in cui il primo si presenta come più rilevante del secondo in quanto nel momento in cui si viene a creare l'esigenza di un restauro di urgenza, e quindi effettivo, risulterà maggiormente difficile un salvataggio dell'opera nella sua interezza. Ma la cosa più rilevante è che nonostante tale divisione entrambe sono e rimangono subordinate alle istanze dell'estetica e della storicità⁶⁷.

Dalle esperienze e riflessioni che partirono dal testo di Brandi nacquero tutti quei principi, del restauro scientifico, che portarono nel 1972 alla creazione di una legislazione specifica attraverso la Carta del restauro⁶⁸.

Si tratta di norme tecnico-giuridiche sviluppate al fine di sancire i limiti della salvaguardia, prevenzione e restauro all'interno del concetto di conservazione⁶⁹.

I primi tre articoli identificano quali tipo di opere sono soggette a queste istruzioni. L'Art. 4 differenzia tra la salvaguardia, che riguarda gli interventi conservativi che non implicino un'operazione diretta sull'opera, ed il restauro, qualsiasi intervento volto a mantenere in efficienza, a facilitare la lettura e a trasmettere integralmente al futuro le opere e gli oggetti.

L'Art. 5 specifica che vi deve essere una relazione che giustifichi e illustri gli interventi svolti⁷⁰.

L'Art. 6 propone le pratiche assolutamente proibite: “completamenti in stile o analogici; rimozioni o demolizioni che cancellino il passaggio dell'opera nel tempo, a meno che non si tratti di limitate alterazioni deturpanti o incongrue rispetto ai valori storici dell'opera o completamento in stile falsificanti; Rimozione, ricostruzione o ricollocamento in luoghi diversi dagli originali, a meno di comprovate esigenze di conservazione; alterazione delle condizioni accessorie o ambientali nelle quali è arrivata fino al nostro tempo l'opera; alterazione o rimozioni di patine”⁷¹.

Art. 7 tutto ciò che, invece, è ammissibile: “aggiunte di parti accessorie in funzione statica e reintegrazione di piccole parti storicamente accertate, attuate, secondo i casi, o determinando in modo chiaro la periferia delle integrazioni, oppure adottando materiale differenziato distinguibile ad occhio nudo; puliture che non devono giungere mai allo smalto del colore, rispettando patina ed eventuali vernici antiche, per le altre opere non arrivare alla nuda superficie della materia; anastilosi sicuramente documentate, ricomposizione di opere andate in frantumi, sistemazione di opere

⁶⁶ Brandi 1977, p. 54

⁶⁷ *Ibidem*, p. 56

⁶⁸ Circ. 117 del 1972;

⁶⁹ Brandi 1977, p. 133; Precedenti vi furono nel 1931 con una Carta del restauro e nel 1938 con una commissione ministeriale, incaricata dall'Istituto centrale per il restauro, atta a redigere le norme unificate a partire dall'archeologia fino al restauro, tutte e due non ebbero forza di legge.

⁷⁰ Brandi 1977, pp. 134-137

⁷¹ Art.6, Circ. 117/1972

lacunose, ricostituendo gli interstizi di lieve entità con tecnica differenziabile ad occhio nudo o con zone neutre accordate a livello diverso dalle parti originarie, o lasciando in vista il supporto originario, comunque mai integrando ex novo zone figurate e inserendo elementi determinanti per la figuratività dell'opera; modificazioni e nuove inserzioni a scopo statico e conservativo nella struttura interna o nel sostrato o supporto, purché all'aspetto, non risulti alterazione né cromatica né per la materia in quanto osservabile in superficie; nuovo ambientamento o sistemazione dell'opera, quando non esistano più o siano distrutti l'ambientamento o la sistemazione tradizionale, o quando le condizioni di conservazione esigano la rimozione”⁷².

Infine, in merito alla tematica del restauro virtuale, al fine di comprenderne le possibilità ma anche i limiti, dobbiamo considerare anche l'Art. 8 il quale definisce che “il restauro deve essere reversibile, che deve essere studiato e motivato preventivamente, si dovrà tenere un giornale di intervento, una relazione finale, documentazione fotografica di prima durante e dopo, documentate le ricerche e le analisi effettuate; nel caso delle puliture si dovrà conservare un campione dello stato anteriore all'intervento, mentre le parti rimosse dovranno essere documentate e conservate”⁷³.

La carta del restauro del 1972, revisionata nel 1987, si inserisce, quindi, nel panorama legislativo andando a regolamentare la legittimità dell'azione di restauro che deve risultare riconoscibile, reversibile e non deve deturpare o nascondere in alcun modo l'opera⁷⁴.

Ne risulta che uno dei problemi maggiori del restauro e della conservazione è il connubio tra la salvaguardia dell'opera d'arte, creata attraverso l'uso di materiali deperibili e/o soggetti ad alterazione e degrado, e la fruizione al più vasto pubblico senza contatto diretto⁷⁵.

Quindi, lo scopo del restauro scientifico risulta la rimozione delle cause di degrado, fin dov'è possibile, permettendo, nello stesso momento, un recupero della leggibilità delle fasi della storia dell'opera d'arte. Ne risulta, infine, che il compito del restauro è quello di rallentare i processi di degrado e non di ricostruire il manufatto⁷⁶.

Tutto questo preambolo è funzionale, a questo punto in cui si inizierà ad entrare più all'interno nelle tematiche di studio, a comprendere quanto questo possa e deve condizionare e limitare l'intervento di restauro virtuale.

Per comprendere al meglio queste dinamiche dobbiamo riprendere la definizione stessa di questo termine che, come già anticipato nel capitolo precedente, viene sintetizzata da Limoncelli nel 2012 in *Il Restauro Virtuale in archeologia* come l'“insieme di metodologie integrate di Computer

⁷² Art.7, Circ. 117/1972

⁷³ Art.8, Circ. 117/1972

⁷⁴ Bernnardi, Furferi 2007, p. 7

⁷⁵ *Ibidem*

⁷⁶ Limoncelli 2012, p. 18

Graphic, sia bidimensionali che tridimensionali, finalizzate alla restituzione di un bene archeologico, architettonico o artistico nella sua completa, o quasi, integrità”⁷⁷.

Questa metodologia può, quindi, essere applicata a qualsiasi tipo di opera, ma porrendo sempre l’attenzione verso un approccio multidisciplinare che colleghi le competenze dei settori storico-umanistici e quelle informatico-tecnologiche⁷⁸.

Uno degli aspetti più evidenti del restauro virtuale è la possibilità che ci offre di accrescere la leggibilità dell’opera senza l’esigenza di un contatto diretto con essa, venendosi così ad annullare tutte quelle dinamiche che si ricollegano all’eventualità degli interventi diretti e, quindi, di carattere irreversibile, senza intaccare la materia dell’opera stessa, la tecnica esecutiva, il supporto o lo stato di conservazione⁷⁹.

Permettendo il lavoro su una copia digitale identica all’originale, si esprimono maggiormente le possibilità di implementazione non solo di un’ipotesi di restauro virtuale ma di più soluzioni, che porterebbero ad una pre-visualizzazione dell’intervento finale da eseguire⁸⁰. Rendendo possibile un recupero, basato su ipotesi filologiche, che cerca di avvicinarsi all’originale istanza estetica e testimonianza storica di cui l’opera è portatrice intrinseca⁸¹.

Il restauro virtuale permette l’ipotesi e la visualizzazione digitale di differenti soluzioni per ogni specifico caso, nel tentativo di rispondere, almeno in parte, ai quesiti primari che si pongono di fronte all’intervento di restauro scientifico, come la conservazione o meno delle informazioni depositatesi sull’opera nel corso del tempo, o le tempistiche di azione dell’intervento sull’opera d’arte⁸². Questo dilemma etico che si pone viene perfettamente posto in essere da Basile in “Che cos’è il restauro” del 1989, e di cui si riporta, per maggior comprensione, il seguente estratto: “Il manufatto non risponde più adeguatamente alle funzioni per le quali era stato prodotto, allora è necessario sottoporlo a restauro. [...] Bisogna assicurarne la sopravvivenza in quanto oggetto fisico, intervenendo sui suoi materiali costitutivi. L’estensione di tale intervento varia a seconda delle condizioni in cui si trova il manufatto e in relazione agli scopi che ci si propone. Ci si può limitare, così, al puro e semplice mantenimento dello stato in cui il manufatto ci è pervenuto, perché di più non si può fare. [...] All’estremo opposto si può giungere, sempre che le condizioni del manufatto lo permettano, anche al ripristino della piena funzionalità originaria. [...] Tra uno e l’altro tipo di intervento, o meglio tra l’intervento di conservazione minimo e l’intervento di restauro potenziato,

⁷⁷ Limoncelli 2012, p.20

⁷⁸ *Ibidem*, p. 25

⁷⁹ Limoncelli 2012, p. 19

⁸⁰ Bennardi, Furferi 2007, p. 14

⁸¹ Limoncelli 2012, pp. 19-20

⁸² *Ibidem*, p.24

esiste tutta una gamma di possibilità che fa sì che ogni intervento di conservazione-restauro costituisca un caso a sé, certamente non ripetibile in serie”⁸³.

Proprio per tali quesiti etici e tematiche il restauro virtuale non può esulare dal seguire e far suoi i principi brandiani del restauro scientifico: rispetto dell’istanza storica ed estetica; reversibilità; compatibilità dei materiali; minimo intervento e riconoscibilità. Nel quale un buon restauro è quello che tende a soddisfare il più possibile questi principi, anche nel caso in cui alcuni vadano in contrasto tra di loro. Si mostra, però, avvantaggiato dalla tecnica stessa che porta il principio di reversibilità come intrinseco nella natura stessa del restauro virtuale in quanto l’elaborazione viene effettuata su una copia digitale dell’opera che permette di duplicare, modificare continuamente e ripristinare i passaggi effettuati senza minimamente inficiare sulla materialità dell’opera stessa. Nonché, di poter usufruire del salvataggio su diversi file delle varie fasi di elaborazione, così da poter disporre di *backup* di sicurezza e di ripristino alla situazione precedente. Anche il principio del minimo intervento risulta intrinseco dei processi di restauro virtuale in quanto il non lavorare sull’opera fisica permette di non alterarne la sua materialità e di fornire una maggiore leggibilità, al fine di dare un supporto ai processi di restauro tradizionale, lasciando ad essi maggior libertà di concentrazione verso quei casi in cui sia a rischio la conservazione o la sopravvivenza dell’opera d’arte⁸⁴.

Il restauro virtuale, in parte, potrebbe esulare dal rispettare questi concetti in quanto, come appena scritto: permette l’elaborazione dell’intervento su una copia digitale, non presentando tutte le problematiche legate alla compatibilità fisica e chimica dei materiali; risulta sempre reversibile grazie alle possibilità tecnologiche di recupero e ritorno alle informazioni precedenti; e potrebbe permettere, solo ed esclusivamente in alcuni casi e dopo analisi filologiche accurate dell’opera, ipotesi di restauro in mimetico o competitive rispetto all’originale nel tentativo ipotetico di riportare l’opera all’unità potenziale definita da Brandi stesso⁸⁵. Tale procedimento rispetterebbe anche il principio della riconoscibilità dell’intervento nel momento in cui si sovrapponesse, o affiancherebbe, l’immagine iniziale con quella restaurata, dando così la percezione del lavoro eseguito⁸⁶.

La vera finalità, però, di tale intervento risulta il tentativo di ridare figurativamente, anche solo se in digitale, all’opera la sua unità potenziale come se fosse avvenuto un intervento di restauro fisico⁸⁷.

⁸³ Basile 1989, pp. 85-86

⁸⁴ Monti 2017a, p. 36

⁸⁵ Bennardi e Furferi 2007, pp. 14-15

⁸⁶ Monti 2017a, p. 36

⁸⁷ Limoncelli 2012, p.24

Infatti, mentre il restauro scientifico mira al prolungamento della vita dell'opera, il restauro virtuale si pone come obiettivo quello di rendere maggiormente leggibili le informazioni contenute nel manufatto⁸⁸.

Tali processi, però, devono essere eseguiti secondo il principio del “restauro guidato” fornendo gli elementi conoscitivi indispensabili allo sviluppo e prefigurazione dell'intervento reale. In questa situazione, il restauro virtuale può essere equiparato ad un percorso di “restauro mentale” al fine di restituire l'unità potenziale del manufatto attraverso una metodologia che si avvale di soli strumenti critici e filologici⁸⁹.

Questa attività però risulta complessa e spesso impossibile in quanto l'azione del tempo annulla il ripristino dello stato originale dell'opera. Il passaggio e le azioni del tempo sul manufatto risultano molteplici e complesse e solo una semplificazione permette di riportare l'idea dell'opera allo stato originario. Tale momento risulta anch'esso arbitrario se consideriamo la presenza dell'interazione tra opera e ambiente prima della nascita dell'opera stessa⁹⁰.

L'azione del tempo sull'opera, però, può portare anche alla sua distruzione nel momento in cui si innescano processi e fattori antropici o naturali. Il mantenimento nel tempo della sua esistenza come opera e materialità si avvale degli interventi di manutenzione e conservazione, mentre la sua restituzione può avvenire tramite l'atto del restauro come operazione finale di filologia critica. Da tutto ciò, possiamo evidenziare tre azioni specifiche sull'opera: La prima è legata al momento della sua creazione dalla mano dell'artista; la seconda legata all'azione del tempo e, infine, la terza legata all'azione dell'uomo⁹¹.

Questa situazione deve essere quindi sempre presa in considerazione e studiata attentamente prima di un restauro scientifico, ma anche prima di un restauro virtuale.

Il restauro virtuale si inserisce in quei contesti in cui serve a supporto e alla progettazione di un intervento, il processo include un numero di ipotesi ed interpretazioni che condizionano l'autenticità, correttezza, del risultato. In tali termini i principi della Carta del Restauro devono essere considerati, non per preservare l'opera nella sua materialità, ma per preservarne il significato⁹².

Tali processi risultano, inoltre, ancora più evidenti in quei casi, come restauri tridimensionali di monumenti ed ambienti, restauro di fotografie antiche e restauri impossibili, in cui il restauro virtuale diviene l'unico sistema di intervento, permettendo: di ridare un'unità potenziale all'architettura irrimediabilmente perduta, distrutta o rovinata; di restaurare le fotografie effettuando

⁸⁸ Monti 2017a, p. 36

⁸⁹ Limoncelli 2012, pp. 24-25; Bova 2002, p. 57

⁹⁰ Bova 2002, pp. 48-49

⁹¹ Baldini 1997, p.9

⁹² Vico Lopez 2018, pp. 26-27

un vero e proprio intervento sul film fotografico, partendo dalla copia digitale; e, infine, nei restauri definiti “impossibili” in cui la fragilità dell’opera o l’impossibilità della rimozione di sovrapposizioni non permettono un restauro reale, può consentire, almeno in parte, il miglioramento della leggibilità dell’opera e del suo ripristino ad un’unità potenziale, senza compromettere irrimediabilmente il principio dell’istanza storica dell’opera stessa⁹³.

Infine, nel caso di opere che hanno subito rimaneggiamenti nel tempo legati al cambiare del gusto estetico, il restauro virtuale permette, in alcuni casi e basandosi su dati filologici e sulle tracce ancora visibili sull’opera, di produrre ricostruzioni virtuali delle varie fasi dell’oggetto⁹⁴.

Per comprendere al meglio, però, le potenzialità di queste tecniche dobbiamo considerare un ulteriore aspetto. Il mondo virtuale si presenta come un ambiente materiale assestante che ha la sua consistenza fisica e una sua spazialità misurabile espressa da valori fisici e cromatici. Nel loro universo le copie digitali esistono fisicamente. Tali dati possono ricrearsi nel nostro mondo attraverso tecniche di prototipazione, divenendo così oggetti tangibili⁹⁵.

1.3 Il Rilievo digitale e le procedure di base per il restauro virtuale, *workflow* piattaforma

Il rilievo, diretto o indiretto, risulta di primaria importanza nella fase di progettazione di un intervento di restauro, indifferentemente dalla tipologia di soggetto su cui si eseguirà il lavoro. Un buon rilievo risulta uno strumento importantissimo nei processi di studio e conoscenza del bene culturale, sia nelle fasi preliminari degli interventi sia nel momento della verifica dei risultati raggiunti. Il confronto diretto con l’opera durante la sua campagna di rilevamento e lo studio, successivo, dei segni sulla materia, delineando la loro posizione ed estensione, permette la progettazione degli interventi al fine di limitarli a quelli necessari, evitando così eccessive elaborazioni. Questa serie di operazioni legate al rilievo, diretto o indiretto, evidenziano la presenza di un atteggiamento comune di grande attenzione all’opera⁹⁶.

Il rilievo è direttamente collegato con il momento interpretativo in cui vi è una comprensione critica del soggetto attraverso l’elaborazione grafica dei disegni, spesso ridotti alla scala più idonea. Tale attività risulta di per sé una primaria configurazione dell’attività di restauro da effettuare

⁹³ Bennardi e Furferi 2007, pp. 16-17

⁹⁴ Monti 2017a, p.36

⁹⁵ Gabellone 2010, p. 497

⁹⁶ Esposito 2012, p. 27

attraverso la produzione di elaborati analitici. Una progettualità spesso coadiuvata dai diversi specialisti connessi dalla macroarea della conservazione⁹⁷.

Il restauro virtuale, quindi, prende avvio dalle analisi diagnostiche di superficie e, soprattutto, da un rilievo digitale o da immagini ottenute tramite tale soluzione⁹⁸, al fine di effettuare una preliminare documentazione della situazione odierna dell'opera su cui, successivamente, programmare e testare eventuali soluzioni di restauro⁹⁹.

Il rilievo digitale si avvale delle tecniche di restituzione indiretta, le quali vengono mediate o dall'utilizzo di strumenti ottico-meccanici, come nel caso del *reverse engineering* tramite laser scanner, o informatici, come le *image based technologies* di cui fa parte il rilievo fotogrammetrico¹⁰⁰. Queste metodologie permettono la rappresentazione dell'oggetto attraverso modelli tridimensionali, o superfici bidimensionali, all'interno di uno spazio cartesiano, senza l'ausilio di una rilevazione dell'opera tramite contatto diretto con le superfici¹⁰¹. Queste, inoltre, possono risultare anche complementari tra di loro al punto che possono essere integrate per avere dati maggiormente precisi ed accurati. Le procedure più ampiamente utilizzate sfruttano le acquisizioni metriche tramite l'ausilio del laser scanner, *range-based*, per poi ricollegarle alle informazioni colorimetriche fornite dai dati, di tipo qualitativo e materico, delle superfici sviluppate tramite tecnica fotogrammetrica¹⁰².

Questi strumenti pongono al centro l'immagine quale elemento base di misurazione. Essi mettono in relazione l'immagine con la forma originaria restituendole virtualmente la terza dimensione attraverso una nuvola di punti e una o più superfici *mesh*, le quali possono essere indagate al fine di fornire nuovi dati, tal volta non facilmente individuabili ad occhio nudo¹⁰³.

1.3.1 Tecnica Range-based o Laserscanning

La tecnica *range-based* o *Time of Flight* (ToF, a tempo di volo) dei laser scanner si basa sulla misura della distanza di uno o più punti attraverso un distanziometro laser ad impulsi che misura il tempo di volo di andata e ritorno del raggio luminoso. Nello stesso momento, vengono misurati l'angolo orizzontale e verticale di ogni punto attraverso due goniometri posti all'interno dell'apparecchio¹⁰⁴. La struttura presenta anche una serie di specchi che, attraverso l'impostazione di

⁹⁷ Esposito 2012, p. 28

⁹⁸ Limoncelli, Potenza 2020, p. 36

⁹⁹ Biagi Maino, Maino 2017, p. 22

¹⁰⁰ Remondino, El-hakim 2006; Milella 2007, pp. 99-100; Limoncelli, Potenza 2020, p. 15

¹⁰¹ Bianchini 2008, pp. 147-167

¹⁰² Picchio 2017, p.95

¹⁰³ Mele 2019, p. 22

¹⁰⁴ Bianchini 2008, p. 159

un passo predefinito, curvano il raggio da un allineamento ad un altro, sempre seguendo un andamento verticale¹⁰⁵. Questi strumenti, nel loro insieme, permettono di ricostruire la superficie di un oggetto o più oggetti attraverso la misura di migliaia di punti in pochissimo tempo. Tutto il sistema, però, risulta automatizzato e all'operatore è demandato solo il compito di definire i limiti dell'area da rilevare e il livello di densità dei punti¹⁰⁶.

Un aspetto molto importante di tutto questo processo risulta essere la pianificazione delle scansioni, si parla, infatti, di più scansioni nel momento in cui si stia rilevando una creazione artistica di grandi dimensioni, un'architettura o un'opera a tutto tondo. Questi rilievi devono essere effettuati tenendo conto di un certo margine di sovrapposizione tra una scansione e l'altra al fine di produrre una corretta registrazione o allineamento. Tale processo è legato con i punti di sovrapposizione, detti punti di legame o di corrispondenza, che devono essere almeno tre per ogni scansione. Per semplificare il processo e permettere un corretto allineamento si utilizzano delle mire poste sugli oggetti o nelle loro vicinanze. I laser scanner, inoltre, sono strumenti che acquisiscono i valori di riflettività e colore dei materiali per ogni punto rilevato, permettendo così di distinguerli visivamente ogni elemento nella nuvola finale (Fig. 1)¹⁰⁷.

¹⁰⁵ Baratti 2012, p.14

¹⁰⁶ Bianchini 2008, pp. 159-160

¹⁰⁷ *Ibidem*, pp. 160-163

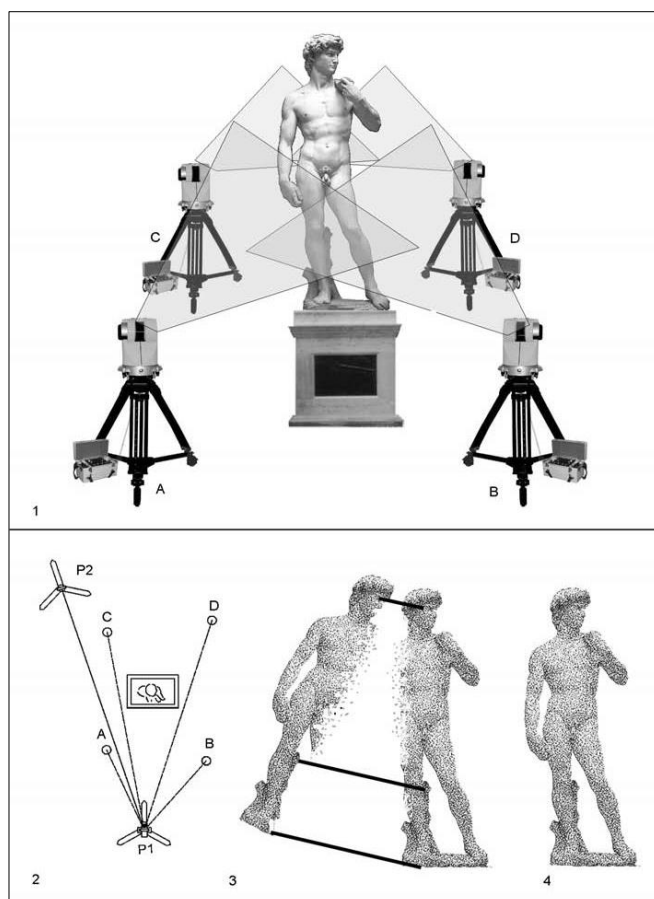


Figura 1 - Esempio di scansione tramite laserscanner e allineamento della nuvola di punti (Da Bianchini 2008).

L'acquisizione di questi dati risulta solo il preliminare processo per arrivare al *reverse modeling* poligonale dell'oggetto. I processi di *postprocessing*, infatti, prevedono, oltre all'allineamento delle nuvole di punti: la pulizia ed eliminazione dei punti in eccesso; la possibilità di creare piante e sezioni; la creazione di *mesh* dalla nuvola attraverso l'interpolazione dei vari punti tramite forme geometriche semplici come i triangoli¹⁰⁸. Altri processi che possono essere eseguiti, in una fase successiva, sono: la lisciatura, o *smoothing*, delle superfici per renderle più morbide; la decimazione della *mesh*, che riduce il numero di forme geometriche presenti rendendo il modello più leggero a discapito dei dettagli; e la chiusura delle lacune¹⁰⁹.

Uno dei limiti di tale tecnica risulta essere l'arrotondamento degli spigoli, un aspetto difficilmente recuperabili dalla nuvola di punti e che, nei casi di forme complesse, potrebbe risultare

¹⁰⁸ Bianchini 2008, p. 164

¹⁰⁹ Baratti 2012, p. 15

in una perdita di dati ed informazioni. In tali situazioni l'utilizzo e l'integrazione con altre tecniche, quali quelle fotogrammetriche, potrebbe risolvere il problema¹¹⁰.

1.3.2 La tecnica di ricostruzione fotogrammetrica

Questa tecnica risulta essere quella che più si avvicina agli scopi finali di questo progetto sia per la qualità dei risultati, sia per la facile integrabilità dei software. Essa si basa sui processi fotogrammetrici, intesi come “disciplina scientifica attraverso cui rilevare le proprietà spaziali e formali di un oggetto da una o più immagini fotografiche”¹¹¹.

Questa tipologia di rilievo vede le sue radici nella tecnica fotogrammetrica aerea, sviluppatasi nell'Ottocento allo scopo di produrre mappe topografiche o rilievi architettonici a partire da un insieme di scatti. La problematica principale risultava essere la rettifica delle distorsioni dovute alla proiezione conico centrale della ripresa fotografica, che produce deformazioni di tipo tangenziale e radiale che si acuiscono verso i limiti del fotogramma¹¹².

La fotogrammetria presenta, in base ai differenti processi utilizzati al fine di risolvere questa problematica, una macro divisione interna in due categorie: monoscopica, in cui si ricava una proiezione ortogonale bidimensionale dal lavoro su un singolo fotogramma; e stereoscopica, in cui vengono impiegate due o più immagini dello stesso oggetto, che si sovrappongano almeno per il 60 %, al fine di riportare il soggetto fotografato all'interno di coordinate spaziali tridimensionali (x,y,z)¹¹³. Infatti, similmente alla visione umana, la presenza del medesimo soggetto in due immagini, con posizione leggermente divergente ma sovrapponibile, permette di calcolare l'angolo di parallasse che deriva dal punto di presa dei due fotogrammi e dalla posizione del soggetto catturato nelle medesime, e di derivare, così, nell'area di sovrapposizione, i dati spaziali e la tridimensionalità¹¹⁴.

La tecnica fotogrammetrica ha sempre richiesto, dalla sua creazione, una specializzazione tecnica basata su diverse conoscenze. Queste, in un primo momento, furono analitiche, in cui le correzioni venivano apportate manualmente attraverso complessi calcoli matematici, poi analogiche, con soluzioni ottico-meccaniche che riproducevano, in scala, le condizioni di presa come al momento dello scatto¹¹⁵. Successivamente, si passò nuovamente ad una tecnica analitica con l'introduzione del

¹¹⁰ Baratti 2012, p.17

¹¹¹ Paris 2015, pp. 3

¹¹² Ceraudo 1999, p. 60; Bianchini 2008, p.148

¹¹³ Bianchini 2008, pp. 147-148

¹¹⁴ Remondino 2014, p. 66

¹¹⁵ Ceraudo 1999, pp. 60-68

calcolatore elettronico che eseguiva in autonomia i vari calcoli e processi di restituzione tridimensionale¹¹⁶.

Tutte queste tecniche, inoltre, venivano applicate inizialmente solo sulle immagini analogiche che dovevano essere digitalizzate tramite l'impiego di scanner, una fase che, con l'avvento delle immagini digitali, venne meno¹¹⁷. Per di più, fino agli anni '90, i rilievi fotogrammetrici dovevano essere prodotti tramite l'utilizzo esclusivo di macchine fotografiche create specificatamente a tale scopo, successivamente, grazie alla facilità di processamento ed immagazzinamento di informazioni all'interno dei metadati collegati con l'immagine stessa, poterono essere utilizzate anche fotocamere più commerciali¹¹⁸.

Infatti, la semplificazione dei processi di elaborazione fotogrammetrica ha permesso di sviluppare in autonomia algoritmi che gestissero le tre principali fasi di orientamento dei fotogrammi¹¹⁹. Le quali sono suddivisibili in:

- interno: in cui ad essere orientato è il singolo fotogramma;
- relativo: in cui i fotogrammi vengono orientati uno dopo l'altro, con coordinate relative, partendo dal primo fino all'ultimo in ordine di presa.
- assoluto: in cui l'orientamento si lega a coordinate note definite dall'utente o già contenute all'interno dei metadati delle immagini;

L'incontro con la Computer Vision ha cambiato tale sistema permettendo l'automatizzazione di tutti questi processi preliminari¹²⁰.

Per comprendere al meglio, però, le potenzialità di tale sistema si deve considerare che i processi fotogrammetrici si basano sull'uso di due o più immagini, che riprendono un medesimo oggetto, e sul principio di collinearità. Esso permette di stabilire, tramite una linea dritta che li unisce, la relazione che intercorre tra il centro prospettico della strumentazione utilizzata, corrispondente alla lunghezza focale dell'obiettivo, i punti dell'oggetto e i punti corrispondenti sull'immagine (Fig. 2)¹²¹.

¹¹⁶ Ceraudo 1999, pp. 63-69

¹¹⁷ *Ibidem*, pp. 70-71

¹¹⁸ Paris 2015, p. 3

¹¹⁹ D'Apostoli 2012, pp. 137-144

¹²⁰ Remondino 2014, p. 66

¹²¹ *Ibidem*

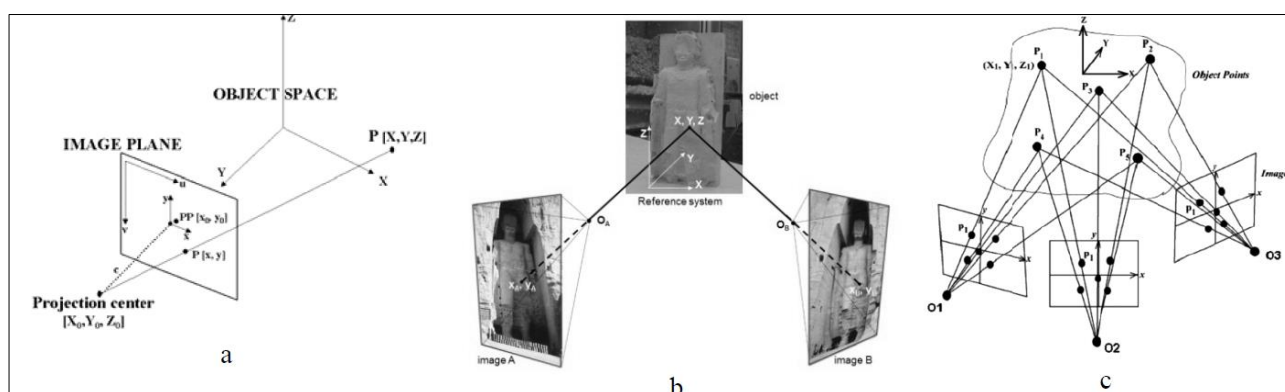


Figura 2 - Il principio di collinearità utilizzato dai processi fotogrammetrici per ricavare i dati spaziali dalle fotografie che inquadrano il medesimo oggetto (da Remondino 2014).

Questo rapporto viene calcolato in più fasi a partire da diverse procedure di allineamento, come la calibrazione della camera e il successivo orientamento delle immagini, che seguono processi diversi ma complementari. Una camera è calibrata nel momento in cui sono noti la lunghezza focale, la compensazione dei punti principali e una serie di parametri aggiuntivi. Questa procedura si basa sul modello di collinearità, associato a due punti che giacciono sulla medesima retta, e a parametri che regolano e riducono gli errori dovuti alla geometria dell'immagine riportata al modello prospettico. Per avere un risultato della migliore qualità è molto importante una buona geometria complessiva e una progettualità delle stazioni di presa¹²².

Ormai i processi di calibrazione vengono svolti in automatico dal software che richiede solamente due o più immagini sovrapponibili, una lunghezza focale costante, le caratteristiche tecniche (dimensione del sensore, dimensione del pixel, qualità massima dell'immagine, ecc.) del sensore della fotocamera e, se possibile, alcune mire¹²³.

La procedura successiva risulta l'orientamento, che riesce a ricavare informazioni sulla tridimensionalità del soggetto attraverso l'identificazione della posizione ed angolo dello scatto e, nuovamente, il principio di collinearità. Tale processo richiede l'identificazione, tra le immagini, di almeno cinque punti vincolanti (definiti *tie points*) distribuiti su tutto il fotogramma, non collineari e non complanari¹²⁴.

¹²² Remondino 2014, p. 68

¹²³ *Ibidem*, p. 70

¹²⁴ *Ibidem*

Questi punti vengono quindi, tramite i vari parametri interni ed esterni ed il principio di collinearità, trasformati in coordinate tridimensionali uniche le quali creano una nuvola di punti rada¹²⁵.

Tutti questi processi sono stati automatizzati grazie all'introduzione nei software degli algoritmi di *Structure From Motion* (SFM) o *Structure And Motion* che permettono di stimare nello stesso momento sia i vari parametri di orientamento sia le coordinate puntuali¹²⁶.

Infatti, questi algoritmi permettono di auto-calibrare la camera attraverso un *bundle adjustment*, una procedura che utilizza il sistema risolvibile ai minimi quadrati. Uno degli algoritmi più utilizzati è quello di *Feature Matching* che permette di mantenere invariati i valori di variazione di scala, angolo di rotazione e distorsione radiometrica delle immagini. A questo punto il processo successivo è la *feature detection* cioè la selezione di entità distinte interne ad ogni singolo fotogramma, per poi creare preliminarmente una lista di corrispondenza basata sulla misura di similarità tra due coppie di punti, che presenta al suo interno una certa percentuale di accoppiamenti errati. Questa lista viene rielaborata sulla base di un modello dell'oggetto, con la rimozione delle coppie non coerenti con esso. Successivamente vi è un affinamento dei punti attraverso gli *interest operators* e gli *edge detector* che controllano le false corrispondenze ed allineamenti. Il processamento passa per l'algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) il quale riesce ad estrarre e descrivere le caratteristiche di punti omologhi sulle immagini¹²⁷. Per i parametri di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi viene impiegato un operatore *greedy*, un algoritmo che ricerca ad ogni tentativo la soluzione più ottimale per giungere a quella che possa essere la migliore dal punto di vista globale¹²⁸, affinato mediante un algoritmo di *bundle adjustment*¹²⁹.

A questo punto attraverso la conoscenza di tutti questi parametri, il principio di collinearità e l'utilizzo di questi algoritmi vengono create coordinate 3D puntuali dalle corrispondenze individuate e presenti sulle immagini 2D, andando a sviluppare nuvole di punti rade o dense (Fig. 3)¹³⁰.

¹²⁵ Remondino 2014, p. 70

¹²⁶ Rizzo 2013, p. 18

¹²⁷ Lingua *et al.* 2008, p. 1339

¹²⁸ Sfacteria 2016, p. 279

¹²⁹ Rizzo 2013, p. 18

¹³⁰ Remondino 2014, p. 70

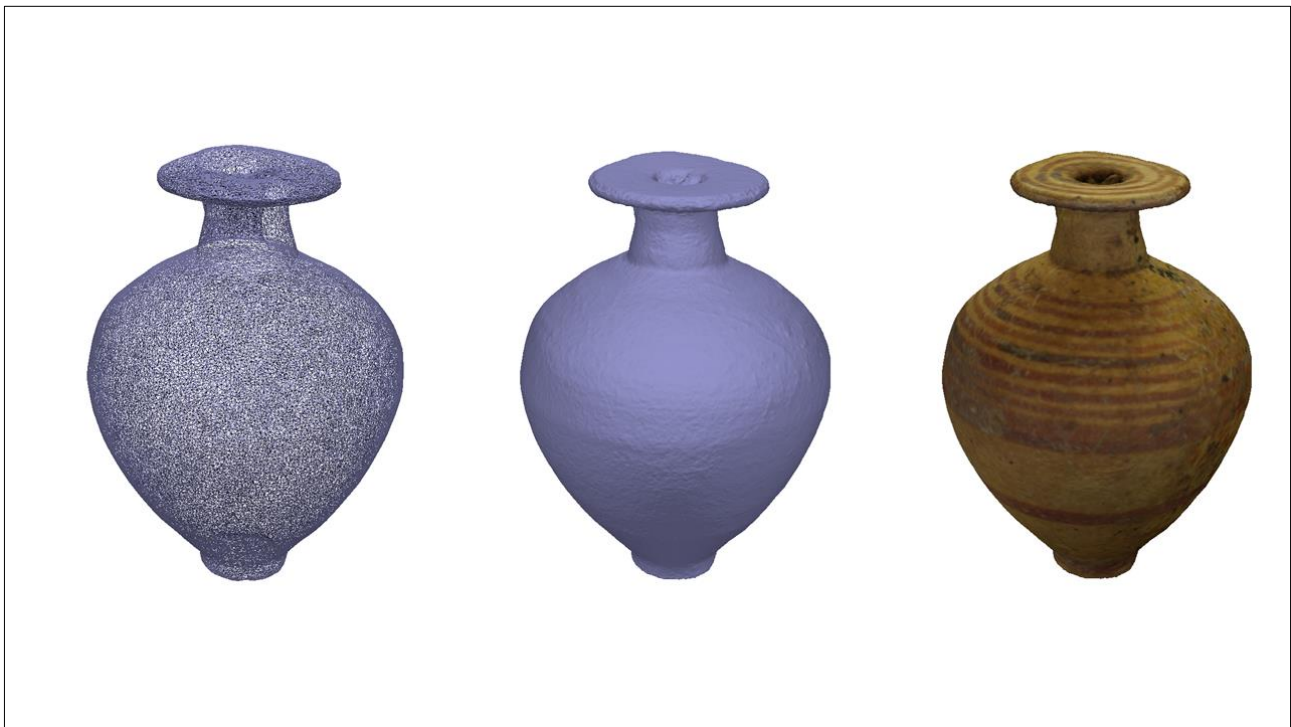


Figura 4 – Mesh, prodotta tramite processi di interpolazione in ambiente Metashape®, nelle differenti modalità di visualizzazione: *Wireframe* (a sinistra), *Solid* (al centro) e *Shaded* (a destra).

Queste tipologie di visualizzazione, ovviamente, non presentano un aspetto fotorealistico, per il quale serve un'ulteriore elaborazione, la texturizzazione (Fig. 5).

Questo risultato può essere ottenuto attraverso la mappatura e l'applicazione delle immagini di partenza sulla *mesh* creata. In questa fase possono verificarsi alcune problematiche associabili con variazioni di luminosità, maggiore specularità di alcune superfici e errate impostazioni cromatiche tra le immagini prodotte. Queste possono essere evitate facendo attenzione a predisporre un'illuminazione adeguata, in fase di ripresa, per ogni scatto, o attraverso l'acquisizione di immagini ad alta dinamica (HDR, *High Dinamic Range*)¹³².

¹³² Remondino 2014, p. 71



Figura 5 - Mesh fotogrammetrica su cui è stata applicata la texture fotorealistica in ambiente Metashape®.

Ultimo step a questo punto è la scalatura del modello attraverso misure prese direttamente sull'oggetto o tramite punti di controllo (GCP, *Ground Control Point*) prodotti con l'impiego di strumenti metrici, quali Stazione Totale o GPS (*Global Positioning System*). Infine, da questi modelli tridimensionali possono essere ricavati, se necessari alle elaborazioni, degli ortomosaici, immagini bidimensionali ortorettificate prodotte tramite la mosaicatura di più fotogrammi che immortalano lo stesso soggetto, metricamente corretti.

1.3.3 Procedure preliminari per il restauro virtuale

L'insieme della documentazione che si ottiene da queste tecniche contribuisce alla realizzazione di rilievi 2D, o ortomosaici digitali, e di modelli 3D. I primi sono finalizzati all'elaborazione di carte tematiche associate con lo stato di conservazione dell'opera, le differenti fasi storiche individuabili o ad altri tipi di argomentazioni "più specifiche e specialistiche legate

all'immagine e alla misura"¹³³. I secondi permettono di descrivere sia l'attuale stato di conservazione, sia l'eventuale correlazione spaziale che intercorre tra tutti gli elementi dell'opera¹³⁴.

Uno degli aspetti più rilevanti di queste tecniche è la possibilità di rapportarsi con l'immagine dell'oggetto catturata nella sua totalità, senza un atto critico interpretativo dovuto alla scelta di cosa rilevare, e di conseguenza cosa non considerare, o di quali misurazioni effettuare in loco. Questa possibilità, però, non elimina l'errore o riduce il livello finale qualitativo, parametri legati alla precisione e caratteristiche degli strumenti utilizzati e dei loro sensori, ma sposta il momento interpretativo di conoscenza ad una seconda fase in cui è lo studioso, in base alle necessità di indagine, a surrogare la realtà sviluppando dei modelli differenti dell'oggetto¹³⁵.

Su questi rilievi si possono eseguire diverse elaborazioni allo scopo di: riconoscere i degradi e i loro meccanismi di creazione; documentare l'attuale stato conservativo o il suo evolversi nel tempo, nel momento in cui si attuino molteplici scansioni; e proporre varie tipologie di intervento al fine di migliorare la leggibilità¹³⁶. Tramite questo materiale si possono effettuare tutte quelle operazioni finalizzate alla conoscenza preliminare quali la mappatura dei degradi, le analisi del colore, le analisi delle lacune e delle integrazioni pittoriche sia di tipo qualitativo che quantitativo¹³⁷.

La raccolta, conservazione ed ordinamento di tutta questa documentazione risulta fondamentale per l'intervento, soprattutto nel momento in cui essa viene integrata all'interno di un database multimediale. Una strutturazione che può essere ampliata tramite l'uso di un sistema GIS (*Geographic Information System*), il quale permette l'associazione tra la documentazione e la superficie dell'opera stessa¹³⁸.

È proprio a questo punto della trattazione, però, che si ritiene utile introdurre un nuovo concetto. Il restauro virtuale, in base alla tipologia di opera su cui si effettua l'elaborazione, presenta al suo interno una distinzione tecnica tra processi elaborativi bidimensionali e tridimensionali. Infatti, se per le pitture, i mosaici e le opere librerie, la principale fonte di lavoro risulta essere l'ortomosaico bidimensionale, per le architetture, le statue e i manufatti, i processi si spostano sull'intero modello tridimensionale¹³⁹. Per quest'ultimo prodotto, tal volta, la grande dimensione dei modelli, sia di peso per la memoria del Computer sia di complessità delle superfici, porta alla scelta della loro semplificazione e ottimizzazione tramite la produzione di diversi livelli di dettaglio (LOD, *Level Of*

¹³³ Mele 2019, p. 22

¹³⁴ Picchio 2017, p. 96

¹³⁵ Paris 2015, pp. 3-4

¹³⁶ Biagi Maino, Maino 2017, p.23

¹³⁷ Limoncelli 2020, p. 36

¹³⁸ Biagi Maino, Maino 2017, p. 21

¹³⁹ Limoncelli 2012, p. 26

Detail), i quali vanno ad alleggerire il modello utilizzato senza però andare ad inficiare sulle informazioni geometriche maggiormente rilevanti¹⁴⁰.

1.3.4 Workflow della piattaforma

Tutto questo viene integrato, come si vedrà nei prossimi capitoli, nella piattaforma GIS 3D al fine di contenere tutti i processi tramite un sistema univoco. Il rilievo, infatti, risulta essere il primo dei passaggi da effettuare al fine di possedere dei risultati metricamente accurati dei soggetti da restaurare, non prima di avere effettuato tutte quelle analisi e ricerche propedeutiche alla corretta scientificità degli interventi. I dati prodotti tramite rilievo tridimensionale verranno poi esportati, in formati differenti, in base al tipo di soggetto su cui si dovrà effettuare l'elaborazione. Esso sarà un rilievo bidimensionale ortomosaicato nel caso delle pitture e dei mosaici, il quale sarà modificato e processato tramite software di fotoritocco, mentre sarà un modello tridimensionale per le architetture, le statue e i manufatti, per essere elaborato in un programma di modellazione 3D. Questi elementi, successivamente, verranno importati all'interno della piattaforma GIS al fine di connetterli con il database relazionale associato, il quale conterrà non solo le informazioni inerenti alle fonti utilizzate e analisi effettuate, ma anche tutti i dati relativi ai processi e passaggi che hanno determinato quel risultato. Inoltre, il modello finale presenterà una duplice visualizzazione: la prima, fotogrammetrica, con l'obiettivo di visualizzare l'opera nella sua situazione odierna; e la seconda, con colori monocromatici associati solo agli elementi di intervento virtuale, al fine di identificare visivamente le varie elaborazioni effettuate sul modello e distinguere le parti rilevate digitalmente da quelle integrate, nonché per prefigurare un ipotetico intervento di restauro reale. Infine, all'interno del progetto può essere aggiunta un'ultima tipologia di visualizzazione del modello che mostra una plausibile ricostruzione totale dell'opera¹⁴¹.

¹⁴⁰ Remondino 2014, p.71

¹⁴¹ Questo tipo di approccio è, in parte, ispirata dalla tecnica dell'Extended Matrix, un tipo di modellazione 3D che seguendo i principi del matrix di Harris vuole evidenziare la scientificità della ricostruzione al fine di non incorrere in errori o tecnicismi solamente estetici. Per maggiori informazioni si guardi: Demetrescu 2018.

2. I processi del restauro virtuale bidimensionale: pitture, mosaici e documenti librari

I processi associabili con le attività di restauro virtuale bidimensionale riguardano tutte quelle opere che possono essere riprodotte, nella loro totalità, tramite la creazione di una singola immagine digitale o di un ortomosaico. Con questa metodologia, che risulta invariata nei processi in tutte le casistiche, si possono, quindi, restaurare virtualmente le pitture, i mosaici e le opere librarie, al fine di migliorarne conoscenza e leggibilità¹⁴².

2.1 L'immagine digitale

L'immagine digitale è caratterizzata e prodotta a partire da due elementi base: i *pixel* per le immagini *raster* (o *bitmap*) e i vettori per quelle vettoriali¹⁴³.

Con il termine *pixel*, abbreviazione di *picture element*, si intende l'unità minima che compone un'immagine di tipo *raster*. Un *pixel* è un elemento di forma quadrangolare o rettangolare che dispone di una sua dimensione cartesiana definita dai suoi valori x e y e alcuni parametri cromatici che vanno a definire un colore di tipo omogeneo. Il *pixel* determina la qualità dell'immagine in quanto minore sarà la grandezza del *pixel* e maggiore sarà la definizione e viceversa. Questo rapporto nasce dal fatto che un'immagine *raster* (reticolo o griglia) è composta da una matrice di *pixel*, formata da righe e colonne, che dispongono di una dimensione prestabilita e di un colore¹⁴⁴. L'immagine, quindi, presenta una sua dimensione che viene calcolata in metri o pollici, in base al rapporto tra la sua lunghezza e larghezza per il numero dei *pixel*. Mentre, il parametro della risoluzione, con il quale si intende quanto l'immagine risulta dettagliata, viene espresso moltiplicando il numero di *pixel* al quadrato per l'unità di lunghezza prescelta. Convenzionalmente la risoluzione viene espressa in *pixel* per pollice (ppi *pixel per Inch*, considerando un pollice corrispondente a 2,54 cm). Si viene a creare così un rapporto in cui maggiore è la densità di *pixel* in un pollice, maggiore sarà la risoluzione dell'immagine che, disponendo di più elementi e dettagli, risulterà più nitida¹⁴⁵.

Un'ulteriore problematica legata alle immagini *raster* è data dalla visibilità più o meno accentuata del bordo dei *pixel*, soprattutto nei casi di confini frastagliati. Al fine di ovviare a questo aspetto, sono stati sviluppati degli algoritmi definiti *antialiasing* (anti-scalettatura) che

¹⁴² Limoncelli 2012, p. 51

¹⁴³ Palazzani 2007, pp. 11-16

¹⁴⁴ Limoncelli 2012, p. 39

¹⁴⁵ Bianchini 2008, p. 177

ammorbidiscono questi limiti tramite una suddivisione maggiore dei *pixel* e una media colorimetrica per rendere più omogenea la cromia¹⁴⁶.

Per vettore si intende una primitiva geometrica, cioè un punto, una linea, una curva o un poligono che creano l'immagine e che dispongono di un attributo monocoloro o sfumato. Queste forme vengono intese come primitive perché grazie alla loro unione si possono formare figure più complesse. Tali geometrie possono quindi comporre un'immagine attraverso le caratteristiche geometriche che la costituiscono, e che possono essere descritte matematicamente per forma, contorno e dimensione in uno spazio virtuale, e alle quali può essere associato un colore rappresentato tramite modelli e metodi di colore¹⁴⁷.

Le illustrazioni vettoriali possono essere costruite, tramite dei tracciati, sia da formule matematiche, a cui vengono associate determinate misure, sia direttamente a mano libera. Questi tracciati possono essere aperti, come nel caso di linee o curve, o chiusi, come per i poligoni. Essi vengono definiti tramite punti di ancoraggio, che connettono i vari segmenti e dei quali il primo e l'ultimo permettono di comprendere se si tratti di una forma aperta o chiusa. Infatti, per disporre di una forma geometrica chiusa il primo e l'ultimo vertice dovranno disporre di stesse coordinate e, quindi, sovrapporsi perfettamente. Se i punti di ancoraggio collegano due segmenti curvi, allora si avrà un angolo morbido, altrimenti si avrà un angolo retto. Il profilo del tracciato dispone di diverse caratteristiche: un colore, uno spessore, un *pattern* e, se si tratta di una forma chiusa, un riempimento monocromatico o sfumato. Inoltre, essendo elementi geometrici, essi possono essere modificati, scalati, spostati, traslati, tagliati nello spazio virtuale senza perdita di informazioni. Infatti, a differenza delle immagini *raster*, le illustrazioni vettoriali non presentano il problema della risoluzione perché, essendo prodotte tramite formule matematiche, vengono ricalcolate al cambiare della scala, in quanto risultano svincolate dalla dimensione. Perciò si possono elaborare sia in scala 1:1 sia a dimensioni minori o maggiori e essere riportate successivamente ad una grandezza precisa solo nel momento della stampa. Altra caratteristica di tali elementi è la minor quantità di memoria impiegata legata alle inferiori informazioni richieste per l'immagazzinamento dei dati vettoriali¹⁴⁸.

Nell'ambito del restauro virtuale vi è una netta divisione di utilizzo tra immagini vettoriali e *raster*. Infatti, le prime vengono impiegate, esclusivamente, per le mappature e le analisi quantitative e qualitative. Questo perché possono essere sovrapposte le une alle altre senza nascondere l'immagine sottostante. Invece, i *raster* sono gli elementi principali degli interventi di restauro virtuale in quanto

¹⁴⁶ Limoncelli 2012, p. 40

¹⁴⁷ Palazzani 2007, pp. 16-20

¹⁴⁸ Bianchini 2008, pp. 199-202

permettono di elaborare tutti i processi necessari grazie alla rappresentazione fotorealistica del colore¹⁴⁹.

2.2 La rappresentazione digitale del colore

Le immagini digitali come già detto nascono dalla creazione di una griglia di *pixel* che dispongono di coordinate e di un colore. Questo attributo colorimetrico e la sua corretta rappresentazione derivano dalla risultante di più elaborazioni legate alla comprensione e allo studio di tutti i processi che permettono una visione naturale di un colore.

La rappresentazione di un colore si basa su due parametri principali che sono la determinazione del fascio di luce, creata da una specifica sorgente, e la riflessione selettiva di tale onda, determinata dalle proprietà del materiale. La luce, infatti, si compone di onde elettromagnetiche che hanno una frequenza ed una lunghezza d'onda. Quest'ultima può essere misurata in nanometri (nm), mentre la frequenza è data da quante onde in un secondo passano per un punto determinato, essendo così calcolata in hertz (Hz). Inoltre, ad una maggior lunghezza d'onda corrisponderà una minore frequenza e viceversa, in quanto questi due parametri risultano inversamente proporzionali tra loro¹⁵⁰. Combinando queste due grandezze nei vari abbinamenti, si disporrà alla fine dell'intero Spettro Elettromagnetico (EM)¹⁵¹ che può essere suddiviso tramite sette intervalli o bande: raggi gamma, raggi X, raggi ultravioletti, luce visibile, raggi infrarossi, microonde e onde radio, partendo da una lunghezza d'onda di 0,01 nm o 1 picometro (pm) e da una frequenza di 300 EHz (ExaHertz), per arrivare a 10 km e fino a 300 KHz (KiloHertz)¹⁵².

La percezione umana del colore risulta limitata a quella che viene definita come luce visibile e che corrisponde a tutti i colori compresi nell'intervallo di lunghezza d'onda, tra 380 nm e 780 nm, e frequenza, tra 430 e 750 THz (Fig. 6)¹⁵³. Questi colori possono essere divisi in sette tinte o radiazioni

¹⁴⁹ Limoncelli 2012, pp. 31-32 e 43

¹⁵⁰ *Ibidem*, pp. 32-33

¹⁵¹ Parkin 2018, p. 4

¹⁵² Limoncelli 2012, p. 33

¹⁵³ Parkin 2018, p. 4

monocromatiche che comprendono il rosso, l'arancio, il giallo, il verde, l'azzurro, l'indaco ed il violetto. Il bianco è formato dalla miscela di tutte queste tinte.

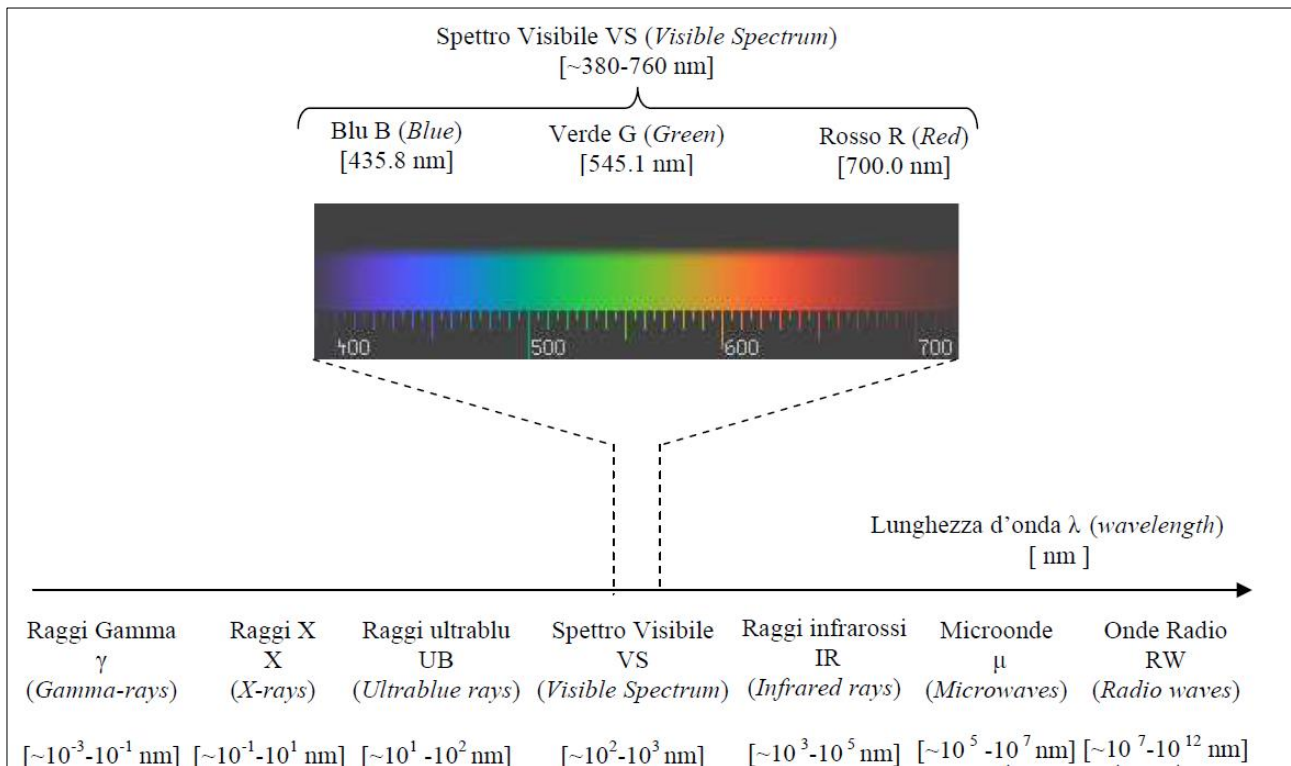


Figura 6 - Spettro elettromagnetico con in evidenza lo spettro visibile (da Bianco 2011).

La percezione di questo spettro non è dovuta alla caratteristica fisica dell'oggetto, ma alla caratteristica psicofisica della percezione soggettiva dell'essere umano. È, infatti, l'occhio che, attraverso i fotorecettori della retina, assorbe le radiazioni elettromagnetiche di varia intensità e lunghezza d'onda, che una volta inviate al cervello vengono trasformate in colore. Questi fotorecettori si dividono in bastoncelli e coni. I primi percepiscono solamente le tonalità di bianco, grigio e nero a bassa intensità di luce, mentre i secondi percepiscono tre differenti lunghezze d'onda, corta, media e lunga, che corrispondono ai colori primari additivi, dividendosi rispettivamente in blu, rosso e verde. La combinazione in egual misura di queste tonalità crea il bianco, mentre la loro mancanza il nero. Gli altri colori, invece, vengono creati dalla mescolanza additiva di due dei tre colori: il rosso e il verde generano il giallo, il verde e il blu il ciano, il blu e il rosso il magenta¹⁵⁴.

La visione umana del colore è una caratteristica psicofisica e quindi non uguale per tutte le persone, tale situazione risulta pertanto non adatta ad una classificazione. Per questa motivazione, nel

¹⁵⁴ Fiorentini 1998, pp. 53-98

corso del tempo è nata la necessità di trovare uno standard alfanumerico univoco in grado di ordinare ed identificare i colori.

Il primissimo a tentare una standardizzazione internazionale nel 1905 fu Albert Henry Munsell che sviluppò tale classificazione a partire proprio dalla percezione colorimetrica umana. Il suo sistema divide il colore in base a tre costanti che l'occhio può percepire: *Hue* (tinta o tonalità), *Saturation* (Saturazione) e *Brightness* (luminosità). Tale sistema si basa sul confronto diretto tra un catalogo di colori con parametri standardizzati e il colore da riconoscere¹⁵⁵.

Graficamente tale sistema viene rappresentato da un asse verticale che identifica la luminosità, composto da undici step che partono dal nero, in basso, per arrivare al bianco, in alto. Perpendicolare ad essa, la tonalità è rappresentata da un anello composto da dieci intervalli suddivisi in cinque colori di base, cioè il rosso, il giallo, il verde, il blue e il porpora. Ogni coppia di colori è inframezzata da una tinta complementare, risultante dalla miscela dei due. Da ultimo, la croma è divisa in quindici step e misura la saturazione del colore dal punto centrale della colonna verso l'esterno, dove si colloca il colore puro (Fig. 7)¹⁵⁶.

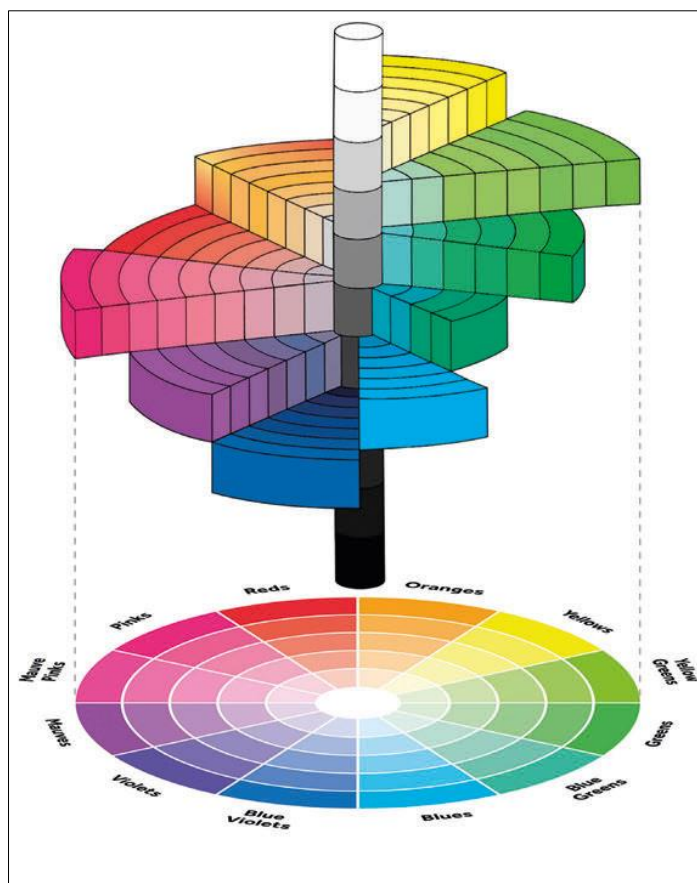


Figura 7 - Rappresentazione tridimensionale e bidimensionale del sistema di classificazione Munsell (da Gabellone 2022).

¹⁵⁵ Oulton 2013, p. 1-3; Parkin 2018, p. 5

¹⁵⁶ Limoncelli 2012, p. 35

Negli anni Trenta fu sviluppata la disciplina della colorimetria che si occupava di standardizzare la misura del colore attraverso lo studio dei modelli di colore.

Nel 1931 la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*, Commissione internazionale per l'illuminazione) codificò lo spazio colore CIE xyz, che includeva tutte le tinte percepibili naturalmente dall'uomo. La teoria di base era legata al tristimolo di Hermann von Helmholtz, in cui la mescolanza additiva dei tre colori primari “additivi”, rosso, verde e blu, formava un colore. Associando ad essi una terna di numeri, poteva avvenire l'identificazione di quella determinata cromia. Questo spazio colore può essere rappresentato graficamente come una vela, in cui xyz indicano le coordinate di cromaticità. Al centro vi è il bianco ideale, indicato con una lettera E, mentre i numeri lungo il bordo della vela rappresentano le lunghezze d'onda della luce in nanometri. Infine, nella metà del grafico vi è una curva che identifica, alle temperature assolute in kelvin, il colore di un corpo nero (Fig. 8)¹⁵⁷.

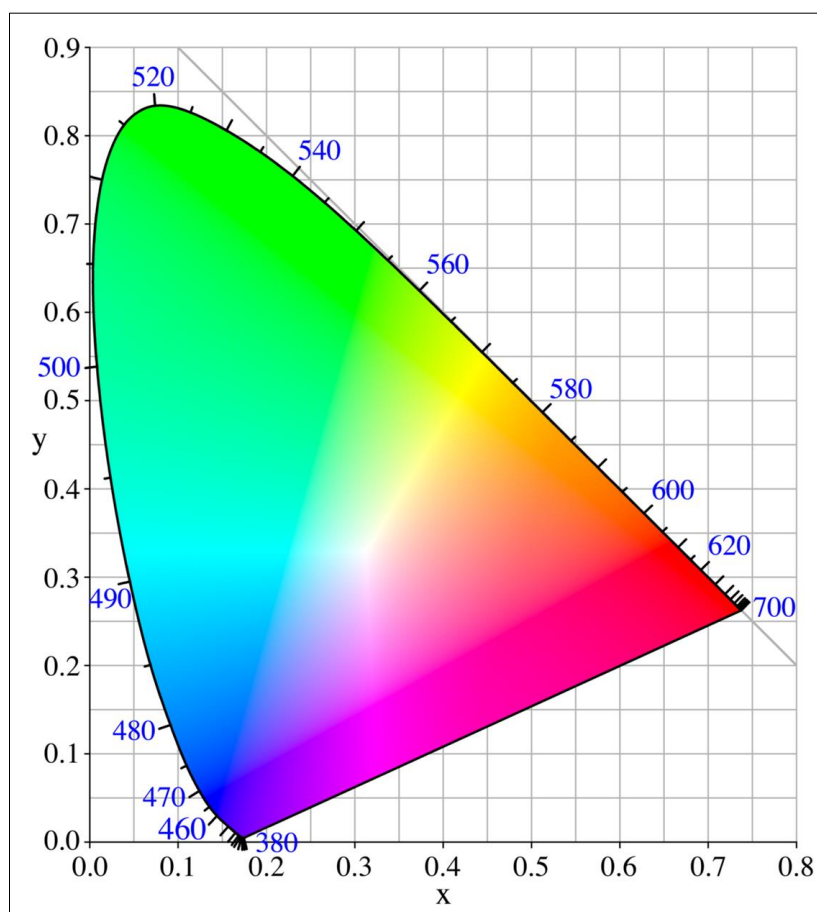


Figura 8 - Rappresentazione del sistema CIE xyz (da Gabellone 2022).

¹⁵⁷ Parkin 2018, pp. 4-5; Gabellone 2022, p. 52

Creare dei sistemi di standardizzazione il passo successivo risultava essere quello di tramutarli in modelli matematici in grado di rappresentarli all'interno di un sistema informatico. Proprio per questo furono creati dei modelli di colore che identificavano, attraverso un codice univoco, ogni singolo colore. Tra i più conosciuti e utilizzati troviamo il Modello CIELAB, o $L^*A^*B^*$ CIE che aggiorna il modello CIE 1931. Esso, sviluppato nel 1976, fornisce una descrizione di tutti i colori presenti nello spettro visibile da un essere umano medio, rendendo, di fatto, indipendente il modello colore dalla periferica di utilizzo. Ciò è dovuto al fatto che si descrive l'aspetto del colore e non la quantità additiva o sottrattiva di esso, necessaria per la sua riproduzione sulla periferica impiegata.

Per comprendere al meglio tale modello, dobbiamo scioglierne l'acronimo definendo: L^* come Brillantezza o Luminosità, in riferimento ai colori puri in una scala di valori da 0 a 100. In forma grafica viene convenzionalmente indicata dalla coordinata Y, che si pone in perpendicolare in riferimento al piano orizzontale del diagramma di cromaticità, che corrisponde allo spazio colori CIE. Compresa in questa area, sono presenti tutte le possibili miscele di colore; A^* , invece, corrisponde al valore compreso tra rosso e verde; mentre B^* tra giallo e blu. Essi sono descritti da valori compresi tra +120 e -120, dove le varie distanze tra colori sono equivalenti alle differenze nei colori percepiti. La luminosità, infine, varia verticalmente, partendo dal presupposto che tutti i colori aventi stesso valore di luminosità giacciono sullo stesso piano (Fig. 9)¹⁵⁸.

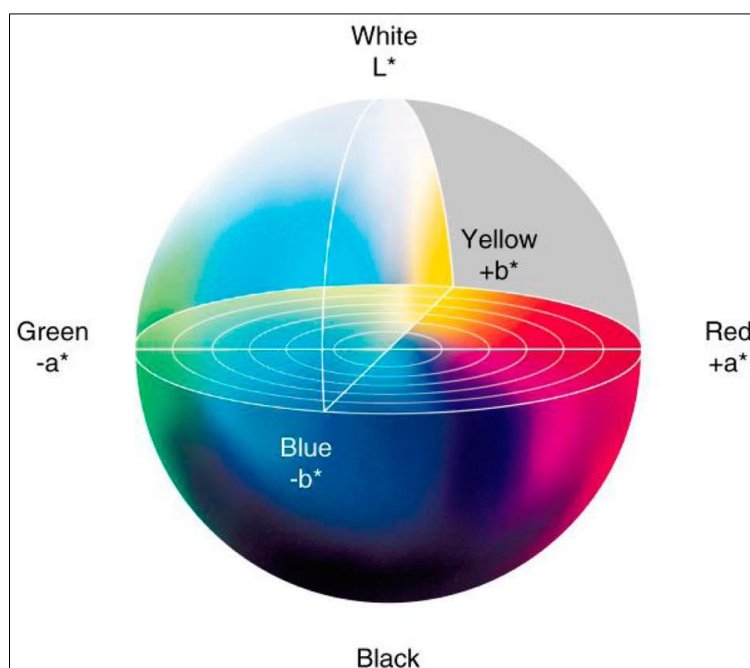


Figura 9 – Rappresentazione del modello di colore CIELAB (da Gabellone 2022).

¹⁵⁸ Limoncelli 2012, p. 36; Gabellone 2022, pp. 52-53

Un altro modello di colore è il HSB che si basa sui parametri della *Hue*, *Saturation* e *Brightness* (Tonalità, Saturazione e Luminosità). Vi sono anche altre due varianti che si distinguono in base all'ultimo parametro considerato. Questo, infatti, può corrispondere al valore della luminosità, divenendo il HSV (*Hue*, *Saturation*, *Value*) o all'intensità con HSI (*Hue*, *Saturation*, *Intensity*). A prescindere però da queste differenze, questo modello si basa sulla percezione della tinta, sfumatura e tono di un colore in maniera additiva. Graficamente si ha un sistema cilindrico di coordinate con la tonalità (H), misurata in gradi, che corrisponde ad un angolo posto attorno all'asse verticale del cilindro e che è coincidente con i tre colori primari: rosso 0°, verde 120° e blu 240°. La luminosità, identificata con la lettera B, viene rappresentata, invece, dall'altezza del cilindro che va da 0 a 100. Infine, il raggio del solido equivale all'intensità e purezza del colore, cioè la saturazione, che si identifica con la lettera S e che in corrispondenza dell'asse è pari a 0, mentre al limite della circonferenza è equivalente a 100 (Fig. 10)¹⁵⁹.

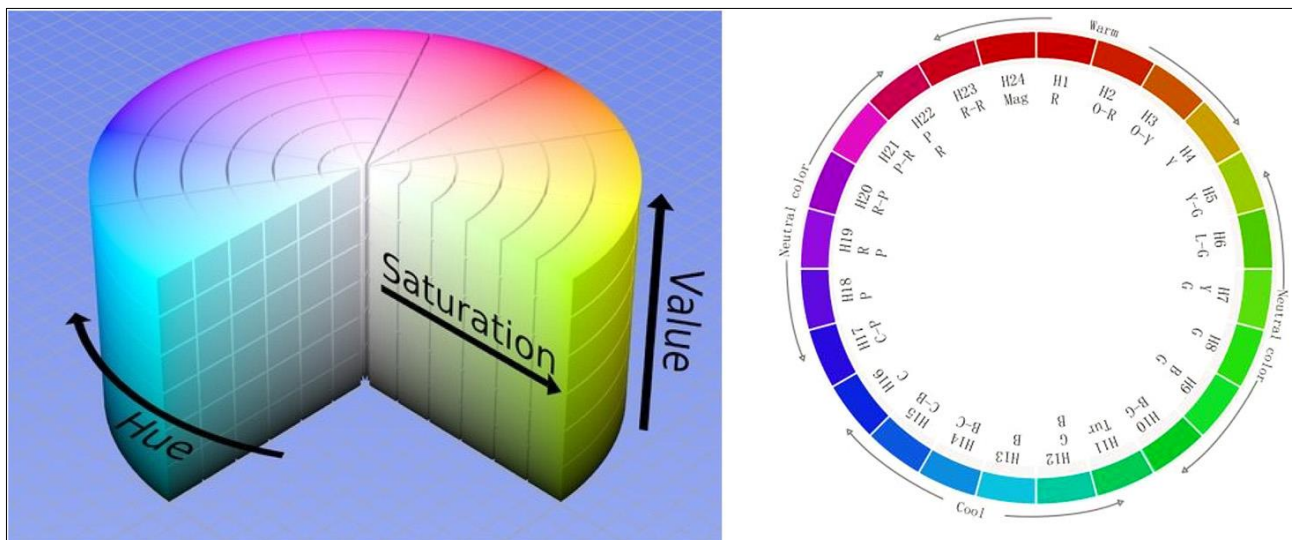


Figura 10 - Rappresentazione del modello di colore HSB (da Yang *et al.* 2022).

Uno dei modelli più utilizzati è quello che si fonda sulla tricromia, cioè sulla sintesi o mescolanza additiva dei tre colori primari rosso (*Red*), verde (*Green*) e blu (*Blue*), denominato anche RGB. Ognuno di questi elementi di base è espresso da un valore numerico compreso tra 0 e 255¹⁶⁰, questo perché ogni colore dispone di un intero Byte per essere memorizzato. Un Byte, che corrisponde all'unità di misura di base in campo informatico, è equivalente a 8 bit¹⁶¹ (*binary digit*) ed esprime una

¹⁵⁹ Limoncelli 2012, p. 36

¹⁶⁰ Bianco 2011, pp. 24-25

¹⁶¹ Il bit è l'unità minima di misura in campo informatico che può avere un unico valore binario convenzionalmente definito con uno 0 o un 1. Treccani enciclopedia online, *Bit*, <https://www.treccani.it/enciclopedia/bit/> (Ul. Cons. 27-02-24)

potenza di 2^8 combinazioni e, quindi, 256 intensità di colore possibili¹⁶². Per produrre i colori secondari si possono combinare quelli primari, così da ottenere il ciano attraverso la somma di verde e blu, il magenta con rosso e blu e il giallo con rosso e verde. Il bianco si ottiene dall'unione dei tre colori alla loro intensità massima, corrispondendo alla massima luce riflessa¹⁶³.

Graficamente questo modello corrisponde ad un cubo con coordinate positive all'interno di un piano cartesiano. L'origine corrisponde al nero con coordinate (0,0,0), gli altri vertici corrispondono alle intensità massime di ogni colore, quindi rosso (255,0,0), verde (0,255,0), blu (0,0,255); mentre gli altri vertici, che corrispondono quindi alle addizioni tra i colori primari, sono: giallo (255,255,0), bianco (255,255,255), ciano (0,255,255) e magenta (255,0,255). Le diagonali del cubo che si incontrano al centro formano il grigio medio (127,127,127).

Il sistema RGB, disponendo di tre assi principali da 256 possibili intensità di colore, permette di ricreare 16,7 milioni di colori (Fig. 11)¹⁶⁴.

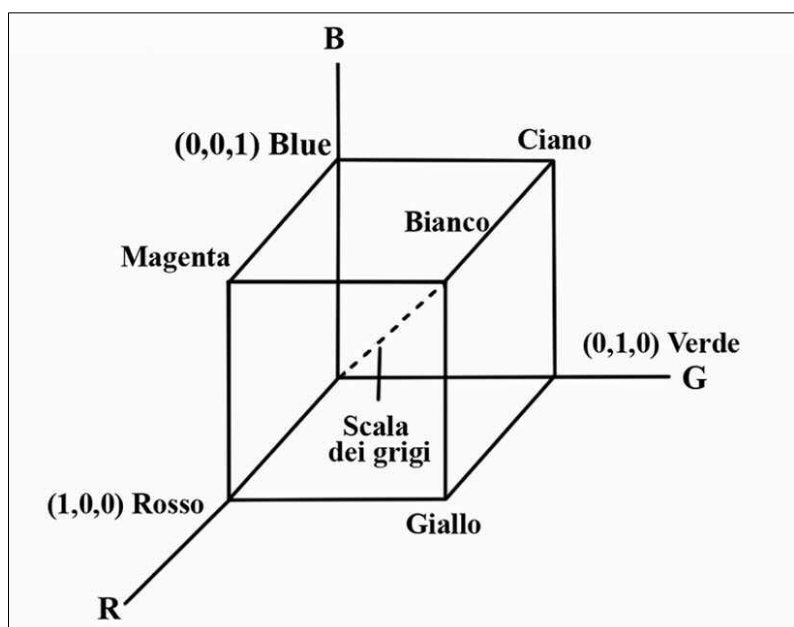


Figura 11 - Rappresentazione del Modello di colore RGB (da Limoncelli 2012).

Ulteriore modello di colore utilizzato, soprattutto per i processi di stampa, è il CMYK che combina attraverso una sintesi o mescolanza sottrattiva i colori C (ciano), M (Magenta), Y (giallo). I valori in questo caso vengono espressi attraverso percentuali da 0 a 100% per ogni colore primario. I colori secondari vengono prodotti attraverso la sottrazione delle singole coppie: il blu dalla sottrazione del ciano con il magenta, il rosso dal magenta meno il giallo e il verde dal giallo meno il ciano. Infine, dalla presenza al 100% di tutte le tonalità non si ottiene il nero assoluto ma un marrone

¹⁶² Bianchini 2008, p. 179

¹⁶³ Bianco 2011, pp. 14-15

¹⁶⁴ Parkins 2018, pp. 16-17

scuri, detto bistro. Questa problematica ha richiesto l'aggiunta di un ulteriore colore, il nero che viene indentificato con la K¹⁶⁵. Inoltre, mentre il sistema RGB è legato agli schermi, quello CMYK, invece, è relazionato alla caratteristica di assorbimento della luce dell'inchiostro traslucido depositato sulla carta in fase di stampa¹⁶⁶.

Ulteriore elemento importante da considerare nella riproduzione del colore è il *gamut* (gamma, spazio cromatico o spazio colore). Esso è una variante dei modelli di colore e dispone di una gamma personale, definita intervallo. Il *gamut* è un elemento molto importante per tutte le periferiche di visualizzazione, cattura e stampa, perché fa sì che alcuni colori siano disponibili solo su di una specifica tipologia di monitor o siano differenti da quelli di una determinata stampante o scanner. Questo parametro nasce dal fatto che ogni periferica riesce ad interpretare i valori RGB o CMYK sulla base del proprio spazio colorimetrico, quindi all'interno del proprio intervallo, e non in termini assoluti. Perciò, si usa il termine fuori gamma, in inglese *out of gamut*, quando un determinato colore non può essere descritto da un certo modello di colore¹⁶⁷.

2.3 La rappresentazione delle immagini digitali

Ai fini di comprendere al meglio i processi atti alla rappresentazione delle immagini digitali, dobbiamo introdurre per prima cosa il concetto di metodo di colore il quale, a sua volta, è strettamente collegato con i modelli di colore e alla *color depth*, conosciuta anche come profondità di colore o risoluzione cromatica. La profondità di colore identifica numericamente quanti colori sono stati impiegati per rappresentare l'immagine, venendo espressa tramite il quantitativo di *bit* per raffigurare il valore cromatico di un *pixel*, che viene calcolato in *bit per pixel* (BPP). Alla base della profondità di colore c'è la codifica dell'immagine tramite codice binario composto da *bit*, i quali possono avere per convenzione valore positivo "0" o negativo "1". In informatica, come già anticipato nel precedente paragrafo, l'unità base di misurazione maggiormente impiegata non è il singolo *bit*, ma il *Byte* che, corrispondendo a 8 *bit*, permette una potenza binaria di 2⁸ combinazioni di stringhe. Quindi, la profondità di colore, o livelli di grigio, se l'elaborazione avviene su immagini in bianco e nero, è strettamente collegata al numero di combinazioni massime permesse dalla quantità di *bit* disponibili. Ovviamente, la profondità di colore, essendo legata alla quantità di *bit* o *byte*, incide notevolmente sul peso in termini di memoria dell'immagine sul dispositivo di archiviazione. Questo condiziona la

¹⁶⁵ La scelta di questa lettera è ricollegata con il termine *Key plate* (lastra chiave) che viene utilizzata nei sistemi di stampa CTP (*computer to plate*) nella fase di allineamento dei tre colori di base. Limoncelli 2012, p. 38

¹⁶⁶ Bianco 2011, pp. 16-20; Limoncelli 2012, p. 38

¹⁶⁷ Limoncelli 2012, p. 39; Gabellone 2022, p. 51

scelta del tipo di metodo di colore che si vuole impiegare. Infatti, i metodi di colore si dividono in base al numero di *bit* utilizzati.

Il primo metodo, che è anche il più semplice, è quello *bitmap* che dispone di 1 *bit* per *pixel* come profondità di colore. Si avranno così solamente due combinazioni che possono rappresentare esclusivamente i colori bianco e nero (2^1).

Il secondo metodo è quello definito in scala dei grigi, venendo utilizzato solamente nelle rappresentazioni in scala di grigi monocromatiche. Questo metodo dispone di diversi tipi di profondità che vanno da un minimo di 2 *bit* a *pixel* con, quindi, 4 colori (2^2), fino a 16 o 32 *bit* per *pixel* con valori di sfumature molto ampi, che variano dal nero, corrispondente al valore 0, al bianco, che è legato al valore massimo. La profondità più utilizzata è però quella ad 8 *bit*, equivalente a 256 colori (2^8) o 256 sfumature di grigio. Inoltre, ognuno dei *pixel* viene descritto anche dal suo grado di luminosità, che può avere valori che vanno, in questo specifico caso, da 0 equivalente al nero, fino al bianco, che coincide con il numero 255.

Il terzo metodo è la scala di colore che lavora su immagini a 8 *bit*. Essa viene impiegata in situazioni in cui le dimensioni delle immagini sono più importanti della gamma cromatica e si vogliono limitare le modifiche che si possono apportare su di esse, ad esempio nel caso delle immagini web.

Il quarto metodo è quello RGB che può disporre di profondità di colore molto ampie rispetto a quelle precedenti, come quella a 16 *bit*, cioè 65.536 colori (2^{16}). Questa profondità, definita *Highcolor*, viene suddivisa in 5 *bit* per il rosso, 5 *bit* per il blu e 6 *bit* per il verde, in quanto questo colore risulta più percepibile dall'uomo. Questo metodo RGB può avere profondità di colore anche a 24 *bit*, in cui ad ogni canale di colore corrispondono 8 *bit*, arrivando a disporre di 16.777.216 colori (2^{24}). Questa profondità di colore viene anche definita *Truecolor* e permette, nel momento in cui i valori dei tre canali si eguagliano, di disporre di un grigio neutro, mentre si avrà il bianco se tutti e tre corrispondono al valore massimo, ovvero 255, e il nero se tutti avranno valore minimo, cioè 0. Tale metodo di colore, non trova nei 24 *bit* il suo limite, ma può arrivare anche a: 32 *bit*, con 8 *bit* che descrivono i valori di opacità per ogni *pixel* (si dispone così di più di 4 miliardi di colori); 48 *bit*, che si suddivide con 16 *bit* per canale; e a 96 *bit*, con 32 *bit* per ogni canale.

Un ulteriore metodo è quello CMYK, in cui viene assegnato un valore percentuale ad ogni *pixel* per ognuno dei quattro colori. Tale metodo associa percentuali d'impiego di inchiostro più basse per i colori chiari e più alte per i colori scuri. Seguendo tale logica, il bianco viene prodotto impostando lo 0% a tutti e quattro i colori. La profondità di colore, invece, è di massimo 16 *bit*¹⁶⁸.

¹⁶⁸ Limoncelli 2012, pp. 40 – 42; Fodde 2013, pp. 53-65

Oltre a questi tipi di dati cromatici, le immagini digitali dispongono di un ulteriore insieme di dati, chiamato metadato. In questo contenitore vengono inserite tutte le informazioni legate al formato dell'immagine, alla sua risoluzione verticale e orizzontale, data di creazione e dell'ultima modifica effettuata, parametri di compressione, profondità di colore, ecc. Ad esse vengono aggiunte tutte le informazioni legate alla fotocamera che ha prodotto tali immagini, nel caso in cui se ne sia impiegata una. Tutto ciò è contenuto all'interno del codice dell'immagine o viene prodotto in un file esterno (file collaterale) in formato standard XMP (*Extensible Metadata Platform*), sviluppato a partire dal formato XML (*Extensible Markup Language*), o metalinguaggio di marcatura (*markup*), un tipo di linguaggio che utilizza un gruppo di convenzioni impiegate per la descrizione della riproduzione di un testo¹⁶⁹.

Infine, ultimo elemento da tenere in conto è il tipo di compressione e relativo formato dell'immagine.

La compressione è una tecnica che riduce le dimensioni dei file in termini di memorizzazione, ma a svantaggio della qualità e, quindi, dei dettagli dell'immagine. Questo processo utilizza algoritmi di compressione in fase di scrittura e di decompressione in fase di lettura dei dati. Vi sono due tipi principali di compressione, quella con perdita dei dati, definita *lossy*, e quella senza perdita dei dati, detta *lossless*. Ma esistono anche formati che, non utilizzando tali algoritmi, mantengono tutti i dati originali a discapito, però, dello spazio di archiviazione che è più voluminoso.

La compressione e, quindi, i formati più utilizzati nel campo del restauro virtuale sono quelli *lossless*, in quanto mantengono tutte le informazioni. Le tecniche di compressione più comuni *lossless* sono la RLE (*Run Length Encoding*), LZW (*Lemple-Zif-Welch*) e zip, mentre un tipico algoritmo di compressione *lossy* è il JPEG¹⁷⁰.

I formati maggiormente utilizzati per le immagini digitali sono:

- Il JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), che, pur essendo un *lossy*, come detto, è la tipologia di formato più impiegata in tutti i software e negli strumenti fotografici. Il JPEG supporta i metodi di colore più comuni, ma non i canali alfa (si tratta di canali specifici che identificano la trasparenza o meno di un elemento). Spesso, si parla di JPEG anche quando ci si vuole riferire a un altro tipo di formato, il JFIF (*JPEG File Interchange Format*). La caratteristica principale del JPEG è la possibilità di settare il livello di compressione aumentando o diminuendo la perdita dei dati su 12 livelli. Con il livello 12 si ha una qualità pari all'originale, mentre abbassando il livello si verificano sempre maggiori perdite di dati tramite effetti di *Blur* (sfocatura) e *blocking* (quadrettatura). Sempre dello stesso tipo è il JPEG 2000 che, a differenza del precedente, supporta la compressione senza

¹⁶⁹ Limoncelli 2012, p. 42

¹⁷⁰ Murray, vanRyper 1996, pp. 153-218

perdita di dati, ha un rapporto di compressione migliore, permette di supportare tutti i metodi di colore e mantenere canali alfa e tinte piatte¹⁷¹;

- BMP (*BitMap*), formato standard dei sistemi operativi Windows di tipo *lossless*, da non confondere con l'omonimo spazio colore, supporta la maggior parte dei metodi colore tranne CMYK e può arrivare ad una profondità di colore di 32 *bit*¹⁷²;

- TIFF (*Tagged-Image File Format*) è un formato *bitmap lossless*. Permette la rappresentazione di diversi spazi colore: *bitmap*, scala di grigio e colore, CIELAB, RGB e CMYK, ma senza canali alfa. Può avere una profondità di colore a 8, 16 o 32 *bit*¹⁷³;

- GIF (*Graphic Interchange Format*), uno dei formati più diffusi per il web, è compresso con tecnica LZW, quindi *lossless*, ma dispone di profondità di colore massimo di 8 *bit* in scala di grigio o scala di colore¹⁷⁴;

- PNG (*Portable Network Graphics*), alternativa open source al GIF sempre per il web, è compresso senza perdita di dati, ma permette di arrivare ad una profondità di colore di 24 *bit*, supportando anche il metodo colore RGB¹⁷⁵;

- PDF (*Portable Document Format*) è basato sull'*imaging PostScript*, un linguaggio, sviluppato da Adobe System, di descrizione della pagina indipendente dal sistema impiegato. Questo formato si avvale dei sistemi di compressione JPEG e ZIP, riuscendo a disporre di tutti i metodi colore fino ad un massimo di 16 *bit*¹⁷⁶;

- PSD (*Photoshop*) è il formato di Adobe Photoshop®, che supporta qualsiasi metodo di colore e consente il salvataggio di immagini fino a 32 *bit* per canale con gamma dinamica elevata. Le opzioni di salvataggio permettono di conservare tutti i livelli e le informazioni a discapito di molta memoria¹⁷⁷;

- RAW, legata alle immagini prodotte attraverso uno strumento fotografico, contiene tutte le informazioni di acquisizione dell'immagine senza bisogno di compressione, per questo viene anche detto negativo digitale. Proprio tale caratteristica di nessuna perdita di dati permette di elaborare le immagini dai dati grezzi, *raw* appunto. Infatti, quando viene modificata, l'originale rimane invariata e le modifiche vengono allocate in un altro file o all'interno del file stesso. Questo formato permette di rappresentare diversi spazi colore, ma senza canali alfa¹⁷⁸;

¹⁷¹ Murray, vanRyper 1996, pp. 510-515; Limoncelli 2012, pp. 44-45

¹⁷² Murray, vanRyper 1996, pp. 572-591

¹⁷³ *Ibidem*, pp. 880-908

¹⁷⁴ *Ibidem*, pp. 429-450

¹⁷⁵ *Ibidem*, pp. 700-719

¹⁷⁶ Limoncelli 2012, p. 46

¹⁷⁷ Murray, vanRyper 1996, pp. 250-260

¹⁷⁸ Limoncelli 2012, pp. 46-47; Fodde 2013, p. 106

- SVG (*Scalable Vector Graphics*) è un tipo di formato vettoriale che utilizza le forme geometriche, i tracciati testo e i filtri con i loro effetti per riprodurre le immagini, ma riesce a gestire anche le immagini *raster*¹⁷⁹.

2.4 Processi preliminari al restauro virtuale

Le attività di restauro virtuale richiedono preliminarmente di calibrare la gamma cromatica del monitor. Per comprendere al meglio tale passaggio, si devono analizzare quali sono gli elementi principali di uno schermo e come esso produce le immagini.

Il display è lo strumento che traduce input di segnali elettrici o elettromagnetici in output visivi, quali testi o immagini. La tipologia maggiormente impiegata è quella LCD (*Liquid Cristal Display*), seguita dalla tecnologia OLED (*Organic Light-Emitting Diodes*). Questi tipi si differenziano in particolare per il modo in cui vengono riprodotte le immagini. Gli schermi LCD presentano sempre una retroilluminazione, legata ad una luce di tipo fluorescente, che viene limitata selettivamente dai cristalli liquidi per riprodurre le immagini. Gli OLED producono, similmente ai LED (*Light Emitting Diod*), luce propria senza bisogno di una retroilluminazione. Questi, quindi, presentano colori maggiormente definiti e più brillanti, ma hanno una durata minore degli schermi LCD e maggior costo di produzione¹⁸⁰.

A parte le differenze di tecnologia, i monitor presentano delle caratteristiche in comune che sono la dimensione fisica dello schermo, che si calcola sulla diagonale misurata in pollici, la risoluzione, cioè il numero massimo di *pixel* riprodotti nello stesso momento e il *Dot Pitch*, che fornisce il livello di dettaglio dell'immagine, a parità di superficie, attraverso la concentrazione di *pixel*.

Ulteriori aspetti da considerare sono l'angolo di visualizzazione, cioè l'angolo limite che permette una corretta visualizzazione delle immagini; la luminosità, che indica la quantità di diffusione di luce bianca del monitor; e il contrasto che permette di avere una visuale migliore dei dettagli scuri perché legato alla capacità del monitor di produrre una scala di grigi che ha agli estremi opposti i colori puri di bianco e di nero.

Questi elementi sono, quindi, quelli che permettono ad un monitor di produrre un'immagine, ma sono anche quelli che producono differenze tra display diversi, in base alle componenti scelte dal produttore. Questa risulta una grossa problematica ai fini dei risultati del restauro virtuale, in cui si cerca di produrre un'elaborazione più vicina possibile alla realtà. Perciò, prima di tutto, si deve

¹⁷⁹ Limoncelli 2012, p. 47

¹⁸⁰ Calliada *et al.* 2010, pp. 52-53

eseguire una taratura dello schermo rapportandola ai colori di stampa, al fine di avere una corretta rappresentazione cromatica che sia sempre coerente¹⁸¹.

La taratura di uno schermo si divide in due fasi, delle quali la prima è definita calibrazione e permette la regolazione di luminosità, contrasto e bilanciamento cromatico; mentre la seconda è il *profiling*, cioè la fase in cui viene immagazzinato, all'interno della memoria della scheda video, il profilo colore del monitor calibrato tramite i valori numerici della tabella LUT (*Look Up Table*).

Per effettuare la calibrazione si possono impiegare due tecniche principali: l'uso di un colorimetro elettronico, detto *spider* che, se applicato sullo schermo, corregge in automatico i parametri, permettendo solo delle modifiche manuali limitate (Fig. 12); o l'azione manuale, attraverso software specifici che, ovviamente, risulta essere meno accurata.

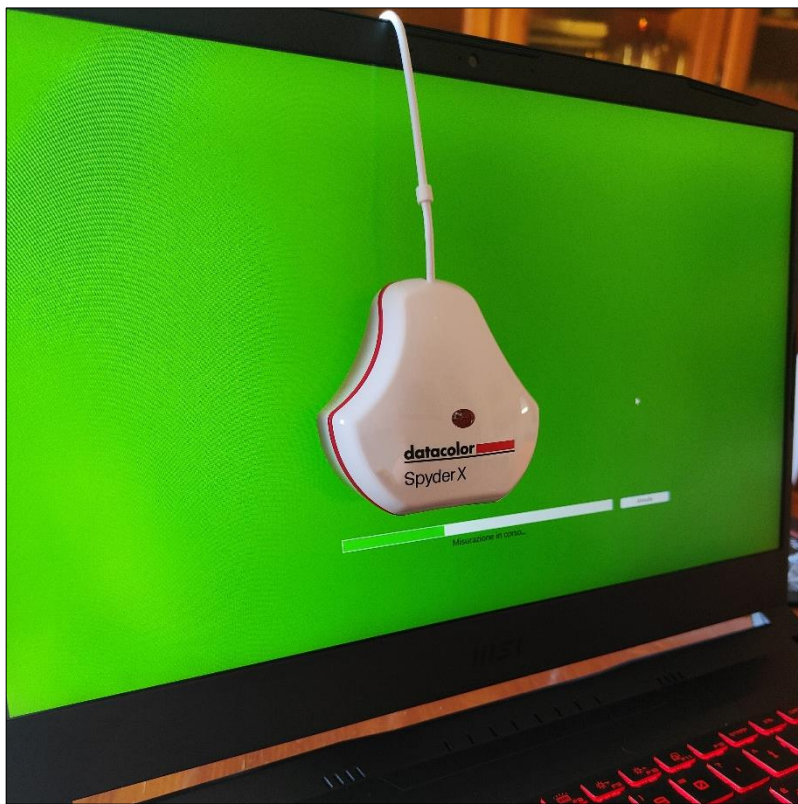


Figura 12 - Calibrazione della gamma cromatica del monitor tramite l'uso del colorimetro elettronico Spyder X della datacolor®.

La taratura si basa sui parametri dell'impostazione dei colori di base che permette la determinazione della temperatura di colore e il punto di bianco. La temperatura di colore determina il tono e si misura in gradi Kelvin. Più la temperatura risulta bassa più i colori saranno caldi (3000/3500 K) e, viceversa, più tenderà all'alto più i colori saranno freddi (9000/9500 K). La

¹⁸¹ Limoncelli 2012, p. 55

temperatura di colore definisce anche il punto di bianco, che corrisponde ai 6000/6500 K, e delinea il bianco neutro del monitor (Fig. 13).

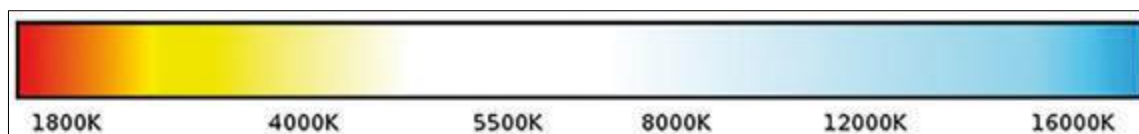


Figura 13 - La temperatura di colore misurata in gradi Kelvin (da Gabellone 2022).

Altri elementi che interessano la calibrazione sono legati: alla corretta impostazione della luminosità nei mezzi toni, cioè la gamma; alla luminosità del monitor che regola quantitativamente l'emissione della luce e la sua intensità in base ai colori e alle ombreggiature visualizzate; al contrasto che, regolando la luminosità delle varie parti dello schermo, determina la modalità di rappresentazione del bianco e dei colori chiari; infine, al bilanciamento del colore, che lavora equilibrando le dominanti di colore¹⁸².

Completata la fase di taratura cromatica dello schermo, si potrà procedere al successivo passaggio di lavoro sulle immagini che, come precedentemente illustrato, vengono prodotte tramite ortomosaico in scala 1:1.

I primi processi, realizzati tramite software di fotoritocco, sono legati all'ottimizzazione dell'immagine attraverso tutti quei parametri che ci permettono di modificarne tono, esposizione, contrasto, colore e gamma e che sono riuniti nelle impostazioni dei livelli di regolazione.

Inoltre, trattando delle tecniche associate all'ottimizzazione dell'immagine, si deve considerare che, tal volta, non è necessario modificare i parametri di tutta l'immagine, ma solo di parte di essa. A tal scopo, i programmi di fotoritocco dispongono di specifici strumenti, definiti selezioni e maschere, che permettono di isolare una o più porzioni della scena ed applicare solo ad esse gli effetti. Gli strumenti che si possono utilizzare cambiano a seconda che si stia elaborando un'immagine *raster* o una vettoriale. Per quanto riguarda le immagini *raster* si possono impiegare diversi *tools* come: “strumenti selezione”, che isolano la parte di immagine attraverso forme geometriche rettangolari, ellittiche o attraverso righe o colonne¹⁸³; il “lazo”, che può esser impiegato a mano libera, con forma poligonale andando a disegnare segmenti intorno all'area prescelta o attraverso il “lazo magnetico”, che segue la forma dei *pixel* che presentano una forte differenza di contrasto con lo sfondo¹⁸⁴; oppure attraverso algoritmi che agiscono sui *pixel* che presentino una forte

¹⁸² Limoncelli 2012, pp. 55-56; Gabellone 2022, pp. 52-53

¹⁸³ Eismann *et al.* 2013, pp. 150-159

¹⁸⁴ Eismann *et al.* 2013, pp. 159-168 e 177-180; Guida Adobe Photoshop, selezionare con gli strumenti lazo, <https://helpx.adobe.com/it/photoshop/using/selecting-lasso-tools.html> (Ul. Con. 09/03/2023)

similarità cromatica, come “intervallo di colori” o “bacchetta magica”¹⁸⁵. Nel caso dei vettori, invece, si creano dei tracciati, aperti o chiusi, che seguono i contorni delle forme e che possono essere trasformati in selezioni. Le selezioni, essendo elementi a sé stanti rispetto all’immagine, possono essere modificate, spostate, copiate e incollate su altri *layer*, o memorizzate e salvate nelle maschere¹⁸⁶.

Queste ultime, invece, funzionano all’opposto delle selezioni e vengono impiegate nel momento in cui si vuole evitare che alcune parti dell’immagine subiscano modifiche, per cui vengono “mascherate”. La loro memorizzazione, nei progetti dei software di fotoritocco, avviene tramite il Canale Alpha, “una maschera di ritaglio” che permette di escludere parte dell’immagine di un *layer* sovrastante, mostrando il contenuto di quello sottostante. Per fare ciò il Canale Alpha, che riproduce l’immagine in scala di grigi, identifica con il colore nero le aree da proteggere dalle modifiche, mentre con il bianco quelle modificabili. Le maschere, similmente alle selezioni, si dividono in: “maschere di livello” che, se di tipo *raster*, sono associate alla risoluzione del progetto e vengono prodotte o modificate tramite gli strumenti di pittura; e le “maschere vettoriali” che, nascendo come tracciati, vengono ricalcolate al variare dello zoom e, quindi, non sono legate alla risoluzione¹⁸⁷.

Ulteriori parametri che devono essere considerati in fase di ottimizzazione di un’immagine sono il tono e il contrasto. Per tono si intende tutta la “gamma tonale”: cioè l’insieme dei toni bassi, le aree che si presentano più scure, anche dette neri; dei toni alti, le zone più chiare definite bianchi; e la gamma dei toni medi, o grigi, a metà tra alti e bassi, dell’immagine. Per contrasto si intendono le differenze di tono dell’immagine, dovute alle divergenze tra ombre, mezzitoni e luci. Se un’immagine ha una forte distinzione tra zone chiare e zone scure, quindi con pochi mezzitoni, allora è molto contrastata e viceversa. Questi due parametri vengono descritti “dall’istogramma dei livelli di grigio che è la rappresentazione grafica della distribuzione e della quantità dei pixel che compongono l’immagine secondo i valori di luminosità per ciascun livello di grigio”¹⁸⁸. L’istogramma è composto, lungo l’asse X, dai valori di grigio che vanno dal nero a sinistra, che equivale al valore 0, al bianco a destra, con valore 255, mentre in mezzo vi sono i mezzitoni; l’asse Y, invece, riporta diverse linee verticali di varia altezza, che sono equivalenti ai livelli di grigio presenti nell’immagine, in base alla quantità di *pixel* corrispondente ad ognuno di essi (Fig. 14).

¹⁸⁵ Eismann et al. 2013, pp. 169-174 e 194-204

¹⁸⁶ McClelland 2001, pp. 67-78

¹⁸⁷ Fodde 2013, pp. 164-172

¹⁸⁸ Limoncelli 2012, p. 64

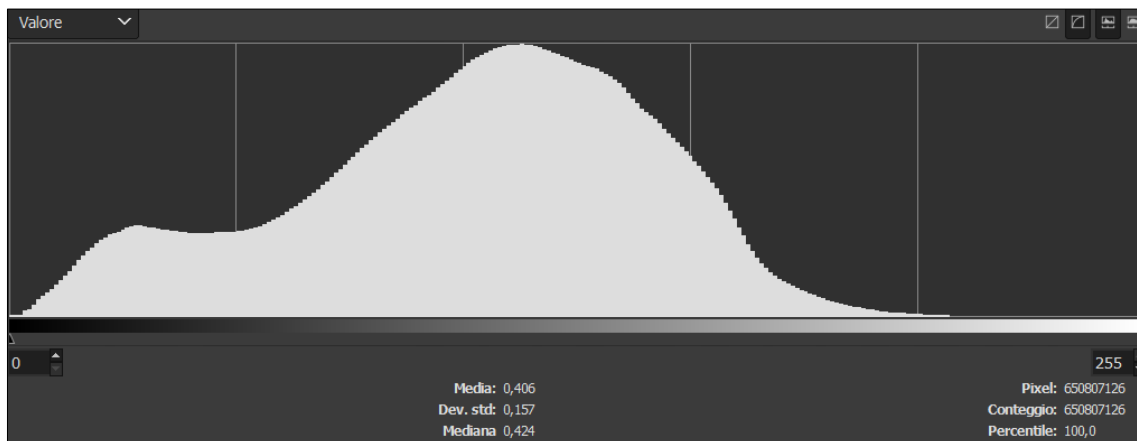


Figura 14 - L'istogramma dell'ortomosaico relativo ad uno dei casi studio visibile nello specifico pannello di GIMP®.

Quindi, in base alla posizione di tali linee si avrà un'immagine chiara quando esse sono concentrate a destra e una scura quando, invece, si trovano sulla sinistra. Un buon contrasto corrisponde ad una disposizione delle linee uniforme. Vi sono poi degli strumenti che permettono di modificarne i parametri per riportare l'immagine ai corretti valori tonali. Attraverso lo strumento "livelli" si ha la possibilità di aggiustare la gamma tramite i tre cursori presenti che corrispondono alle luci, ai mezzitoni e alle ombre. I livelli permettono di lavorare o sui tre canali in contemporanea o singolarmente su ognuno di essi.

Un'ulteriore possibilità che i "livelli" offrono è quella di modificare i punti di nero e bianco, per fare ciò ci si può avvalere del livello di regolazione "soglia", che aiuta ad identificare la giusta posizione di questi due parametri, trasformando l'immagine a colori in una in bianco e nero ad alto contrasto, non andando però a modificare i dati originali. Lo strumento "soglia" permette di utilizzare un cursore sull'istogramma che identifica i *pixel* più scuri e più chiari. Una volta individuati, si può spegnere questo livello di regolazione e con lo strumento contagocce si può campionare il colore di quei determinati *pixel*, attribuendo quello specifico valore alle luci o alle ombre sull'istogramma¹⁸⁹.

Un altro strumento di correzione che offre maggiori possibilità, rispetto ai livelli, sono le "Curve". Queste permettono di disporre di ben 14 punti sui valori della gamma tonale. Il grafico che le rappresenta vede sull'asse X i livelli originari dell'immagine, mentre sull'Y quelli corrispondenti all'immagine modificata. Tale grafico può disporre di valori percentuali, da 0 a 100, o tonali, da 0 a 255. La "Curva", rappresentata da una retta che segue la diagonale, procede dal punto in basso a sinistra, ove identifica il colore nero, al punto in alto a destra, ove identifica il colore bianco. Per modificare il contrasto dell'immagine si possono inserire altri punti sulla retta, fino a 14, i quali, una

¹⁸⁹ Fodde 2013, pp. 143-146

volta portati o sopra o sotto la curva, modificandone quindi l'andamento, permettono di scurire o schiarire le varie zone della scala di grigi. Anche questo strumento permette la modifica di tutti e tre i canali di colore o solo di uno di essi alla volta (Fig. 15)¹⁹⁰.

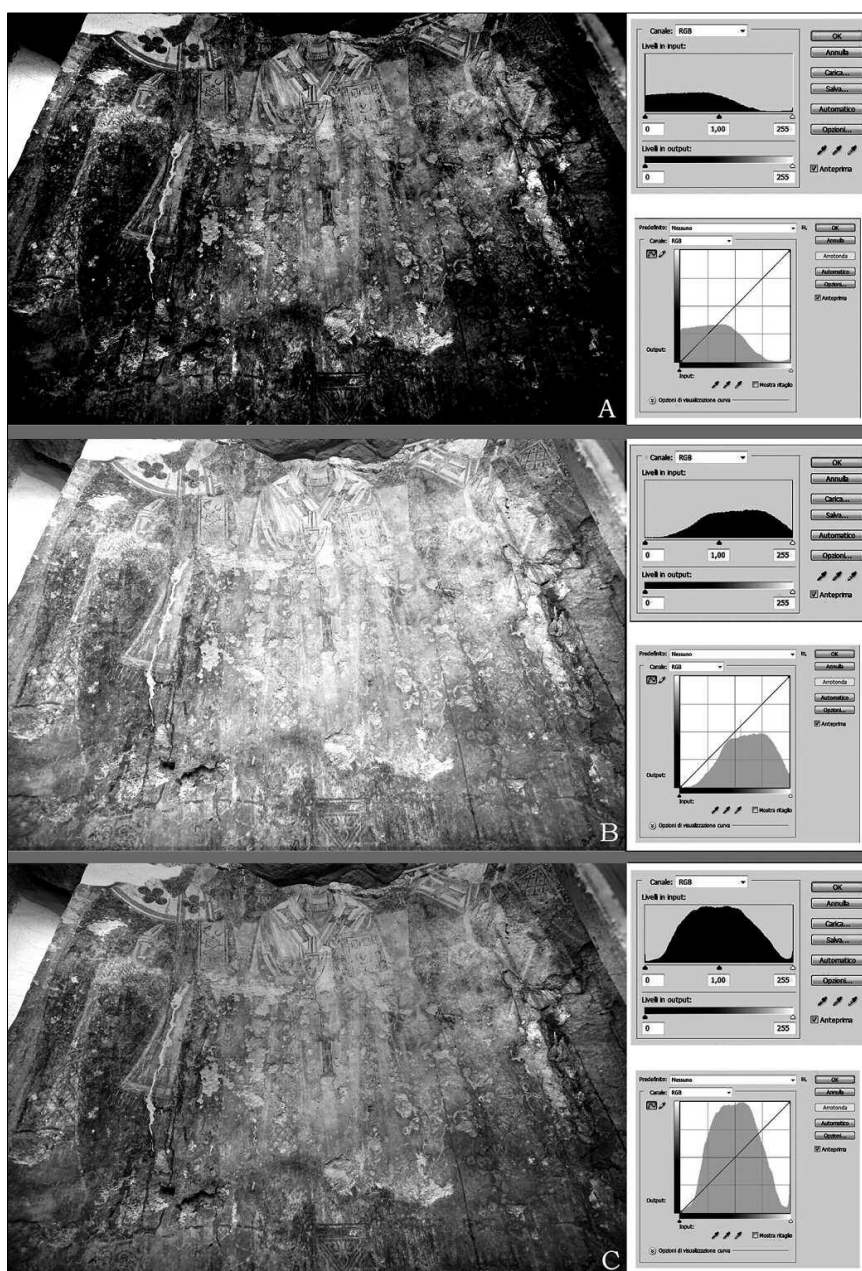


Figura 15 - La stessa immagine sottoesposta (A), sovraesposta (B) e correttamente esposta (C), con visibili i pannelli dei “livelli” e delle “curve” su photoshop® (da Limoncelli 2012).

Infine, un'ulteriore possibilità è data dai “metodi di fusione” che permettono di fondere due livelli attraverso l'interazione tra il colore derivante dall'applicazione degli strumenti di modifica e pittura sul livello sovrastante e il colore originario del livello sottostante. I “metodi di fusione” si

¹⁹⁰ Fodde 2013, pp. 147-152

dividono in: metodi per scurire, in cui i colori presentano percentuali di grigio superiori al 50%, come “Scurisci”, “Moltiplica”, “Colore Bianco”, “Colore Brucia”, “Brucia lineare” e “Colore più Scuro”; metodi per schiarire, in cui i colori presentano percentuali di grigio minori del 50%, come “Schiarisci”, “Scolora”, “Colore Scherma”, “Scherma Lineare”, “Colore più chiaro”; infine, quelli che aumentano il contrasto, scurendo le zone più scure e schiarendo le aree più chiare, come “Sovrapponi”, “Luce Diffusa”, “Luce Intensa”, “Luce Vivida”, “Luce Lineare” e “Luce Puntiforme”¹⁹¹.

Un altro parametro da considerare in questa fase è l’esposizione, il quale è strettamente legato al sensore della fotocamera impiegata nella fase di acquisizione e alla luce che lo raggiunge. Per regolare la quantità di luce in entrata si devono considerare tre parametri che sono in rapporto tra di loro: il livello di emissione luminosa in ingresso viene regolato dal diaframma, si tratta di una ghiera di lamelle nell’obiettivo che amplia o riduce il foro di ingresso per la luce; il tempo di esposizione che, controllato dall’otturatore una sorta di tendina che si apre esponendo il sensore alla luce per un determinato tempo, viene misurato in frazioni di secondo; e, infine, gli ISO (*International Organization of Standard*), che misurano la sensibilità del sensore alla luce, più il valore sarà alto più il sensore sarà sensibile. La regolazione di questi parametri permette di avere una corretta esposizione, l’errata regolazione produrrà o immagini sottoesposte, in cui vi è un appiattimento del contrasto in quanto mancano informazioni dovute alla maggior presenza di toni di grigio scuro (mezzi toni), a discapito dei toni di bianco e di nero; o immagini sovraesposte, dove vi è una maggior presenza di toni bianchi sulla gamma cromatica che aumentano le aree chiare¹⁹². Questi parametri risultano fondamentali per una corretta esposizione dell’immagine, per questo gli scatti devono essere prodotti in formato RAW, così da poter successivamente disporre di tutte le informazioni della ripresa nella fase di elaborazione e riuscire ad intervenire, là dove necessario, in post-produzione¹⁹³. Infatti, l’esposizione è un parametro che può essere corretto successivamente non solo nelle immagini prodotte da fotocamere, ma anche negli ortomosaici, là dove possono riscontrarsi errori di esposizione dovuti agli algoritmi di elaborazione fotogrammetrici.

¹⁹¹ Limoncelli 2012, p. 67; Eismann *et al.* 2013, pp. 236-242

¹⁹² Harrington 2012, pp. 72-75

¹⁹³ Fodde 2013, pp. 77-80

Infine, ultimo parametro da considerare è la calibrazione del colore. Il primo passaggio da eseguire è la correzione cromatica globale dell'immagine per andare ad individuare e rimuovere le dominanti di colore. Esse sono legate al diverso bilanciamento del colore RGB della fotocamera impiegata rispetto al monitor, la quale presenta circa la metà della distorsione cromatica. Le dominanti cromatiche devono essere regolate tramite la variazione di mescolanza individuale dei colori primari RGB con i complementari. Quindi, il rosso con il ciano, il verde con il magenta e il blu con il giallo. Gli strumenti e i livelli di regolazione per produrre questi risultati sono: il “Bilanciamento colori” e delle “Variazioni”, i quali agiscono sia sulla mescolanza dei colori sia sulle luci, mezzitoni e ombre di ogni colore; le “Curve” e i “Livelli” che lavorano sulla ricollocazione dei *pixel* su ogni distinto canale di colore (Fig. 16); il “Filtro fotografico” che simula un effetto in cui un filtro viene applicato all'obiettivo; infine, vi è la “Correzione di colore automatico” che permette di disporre di buoni risultati di base.

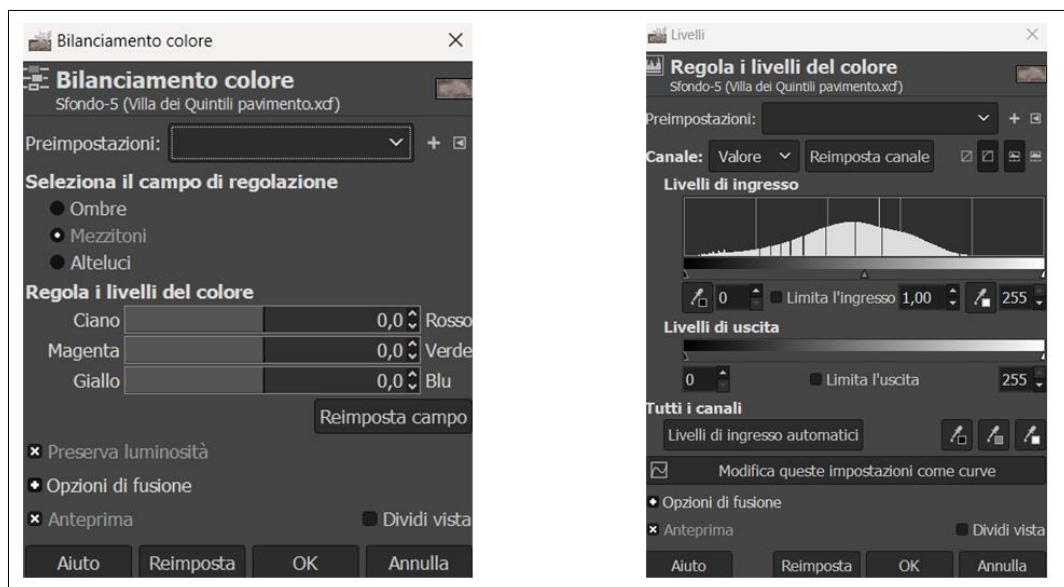


Figura 16 - I pannelli del "Bilanciamento colore" e dei "Livelli" in ambiente GIMP®.

La correzione globale, quindi, lavora su tutta l'immagine. Vi è, però, uno strumento che può essere impiegato per tutti i casi in cui serve una elaborazione solo di parte dell'immagine. Tale strumento da applicare è la “Correzione colore selettiva” che permette di controllare la quantità dei colori CMYK o RGB in ogni componente colorimetrica primaria senza modificare gli altri colori. Infine, si possono apportare modifiche, sia singolarmente per ogni colore che contemporaneamente, anche alla tonalità, alla saturazione e alla luminosità di un'immagine attraverso il livello “Correzione della tonalità e della saturazione”. I parametri di questo livello sono legati: alla tonalità intesa come colore di riflessione o trasmissione da parte di un oggetto; alla saturazione come grado di purezza o

intensità del colore (croma), calcolata tramite la presenza di grigio rispetto alla tonalità; alla luminosità come quantità percentuale presente del grigio in ogni singolo colore, in una scala che va da 0 a 100¹⁹⁴.

2.4.1 Analisi non invasive

Un ulteriore passaggio necessario ai fini delle attività di restauro virtuale è l'esecuzione di analisi non invasive con lo scopo di mappare il livello conservativo e i processi di degrado.

In primo luogo, vi è l'osservazione macroscopica legata alle alterazioni chimiche, biologiche o fisiche che hanno condizionato lo stato dell'opera. Questi degradi sono ascrivibili a quattro principali cause: gli agenti esogeni, a cui si ascrivono quei tipi di alterazioni legati a fattori meteorologici, termoigrometrici e biologici che alterano lo stato fisico, biologico o chimico dell'opera, causando problemi di varia natura e dimensione; gli agenti endogeni, alterazioni dovute ad organismi, forze e sostanze che colpiscono le materie costituenti dell'opera dal loro interno; gli agenti biotici, alterazioni dovute ad agenti esterni come funghi, batteri, insetti, ecc.; infine, le azioni antropiche, tutte quelle attività legate all'intervento umano, quali restauri, scalfitture, atti vandalici, che modificano le materie costituenti dell'opera¹⁹⁵.

Quando si parla dei degradi rapportandoli all'ambito del restauro virtuale bisogna sempre considerare che, mentre il restauro reale deve fare i conti con tutti questi tipi di alterazioni e agenti, il restauro virtuale risente, analizza e può elaborare solamente i degradi ascrivibili alla superficie dell'opera visibile nelle fotografie o nell'ortomosaico¹⁹⁶.

Per cui i primi elementi da considerare e produrre, nell'ambito di una elaborazione di restauro virtuale, sono la mappatura dei degradi e quella degli interventi. Questi strumenti permettono, attraverso specifiche regole di graficizzazione, di identificare e mappare sia le tipologie di degrado riscontrate sulla superficie dell'opera, sia di identificare le aree su cui effettuare l'azione di restauro virtuale. Graficamente si tende ad utilizzare linee di contorno, cioè vettori chiusi come polilinee e poligoni, riempiti da pattern o retinature di natura differente, accompagnate da una legenda esplicativa, per indicare le varie tipologie di degrado o intervento.

Altre analisi importanti sono quelle qualitative e quantitative, legate alle mancanze, cioè le incompletezze di parte dell'opera, e/o lacune, perdite cromatiche di natura differente, presenti nell'opera. L'analisi quantitativa riguarda tutti quegli aspetti che sono legati alle catalogazioni, alla tipologia di mappatura e alle mancanze o lacune presenti, calcolate in percentuali, sull'opera; mentre

¹⁹⁴ Limoncelli 2012, pp. 68-69

¹⁹⁵ Giannini, Roani 2010, pp. 19-20, 61 e 126;

¹⁹⁶ Limoncelli 2012, p. 70

l'analisi qualitativa è legata a livello di affidabilità dell'intervento iconografico di ricostruzione e integrazione¹⁹⁷. Tali tipologie di analisi vengono eseguite sulle parti che risultano illeggibili dell'opera, nel momento in cui alterazioni di varia natura ne hanno colpito la superficie. L'analisi quantitativa si può eseguire direttamente sull'ortomosaico in quanto, essendo metricamente corretto, permette di produrre dati metrici assoluti o percentuali. Se si vuole disporre di valori numerici, quali i cm², m², ecc., allora si andrà prima a vettorializzare la mappatura dei degradi per calcolare la superficie di ogni singola lacuna o mancanza. Se invece si vuole avere una quantificazione percentuale dei degradi, allora si lavorerà direttamente con l'immagine *raster* dove si selezioneranno le aree legate alle singole lacune o mancanze. Si potranno visualizzare così, attraverso la "Palette Info", le percentuali numeriche di *pixel* che presentano tali degradi e, successivamente, quantificare il dato percentuale totale una volta messe in relazione con il numero massimo di *pixel* presenti nell'immagine, il quale risulta equivalente al 100% (Fig. 17).

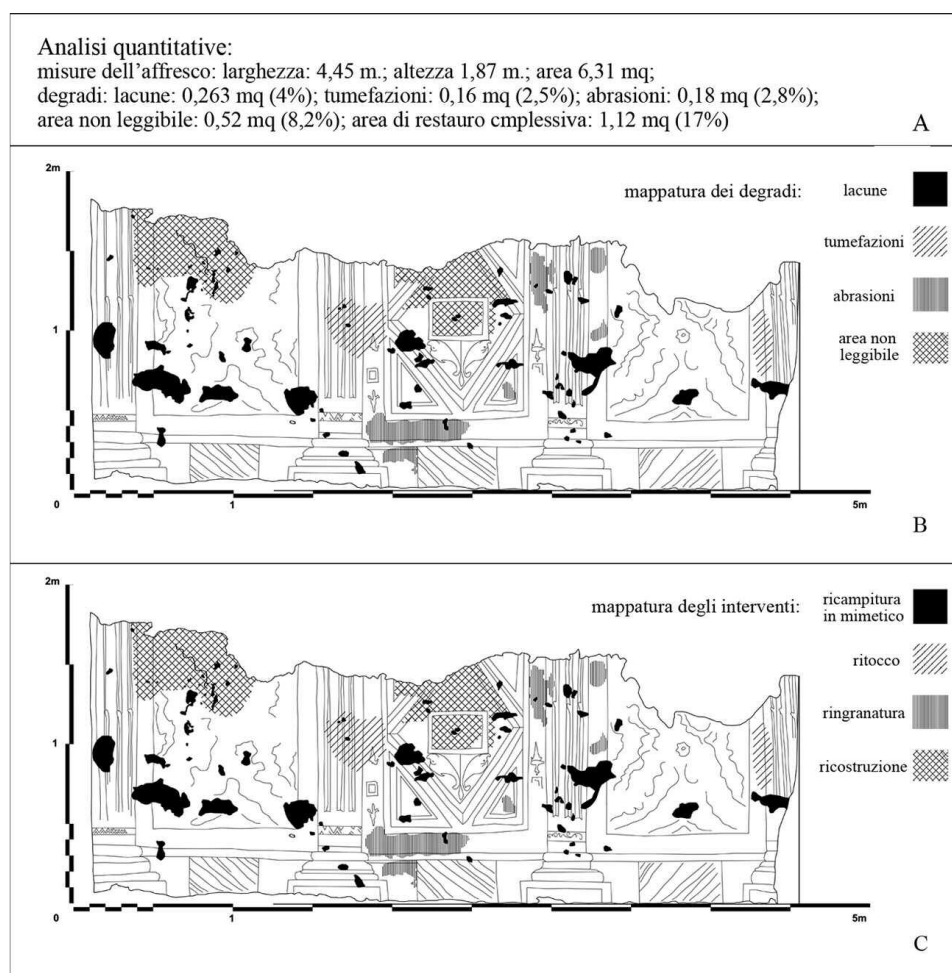


Figura 17 - Esempio di analisi quantitativa (A), mappatura dei degradi (B) e mappatura degli interventi di restauro virtuale (C) (da Limoncelli 2012).

¹⁹⁷ Limoncelli 2012, p. 73

L'analisi qualitativa, invece, risulta essere più difficoltosa in quanto non esistono parametri specifici che ne permettano una quantificazione costante. Tale problematica nasce dal fatto che tale analisi è legata al tipo di degrado e alla sua posizione sull'opera, nonché alla sua dimensione. Per cui ogni caso è a sé stante e la mappatura darà risultati associabili solo a quell'opera specifica¹⁹⁸.

Ultima, ma non per importanza, è l'analisi del colore. È anch'essa di tipo quantitativo, ma con la finalità di campionare i colori, attraverso l'uso di un'immagine, o di un ortomosaico ottimizzato a tale scopo. Attraverso tale attività è possibile associare i colori reali dell'opera con quelli digitali derivati dalle elaborazioni per arrivare alla determinazione del giusto valore di neutro nell'integrazione. Per effettuare tale processo si deve passare per le "Tavole colore", tabelle formate da righe e colonne rispettivamente in numero di 16, con cromie ordinate secondo i criteri: dell'utilizzo, quanto frequentemente quel colore risulta presente nell'immagine; della luminanza, legata alla luminosità del colore; e della tonalità, la posizione dei colori legata alla ruota standard dei colori. Le "Tavole colore" sono legate ai formati per il Web, per cui risulta un passaggio fondamentale la conversione dell'immagine originale in uno di questi formati, GIF o PNG, al fine di ridurre la gamma cromatica da 16 milioni di colori, appartenenti un'immagine RGB *truecolor*, a 256 colori, facilitando, così, tali processi. Inoltre, ogni singolo colore può essere definito numericamente attraverso un modello di colore¹⁹⁹.

2.5 I processi del restauro virtuale bidimensionale

Una volta eseguite tutte le attività preliminari per una corretta predisposizione dell'intervento, si può passare al lavoro vero e proprio di restauro virtuale. Nell'esecuzione di tale elaborazione è importante tenere sempre in considerazione che le azioni di restauro virtuale che stiamo per eseguire risultino limitate alla superficie pittorica visualizzabile tramite l'immagine digitale e, che solo in pochissimi casi, si potrà disporre di dati che permettano un intervento anche sul supporto. Ciò non mette il restauro virtuale al di sopra delle tecniche di restauro reale, in quanto il confronto con esse risulta necessario al fine di comprendere da una parte i limiti di cui dispongono queste procedure digitali e dall'altra, invece, di riconoscerne le prerogative innovative e divergenti rispetto alle pratiche reali.

Partendo da tali considerazioni imprescindibili, si può giungere all'azione vera e propria di intervento di restauro virtuale bidimensionale che, elaborato su immagini digitali, viene eseguito

¹⁹⁸ Limoncelli 2012, pp. 73-74

¹⁹⁹ *Ibidem*, pp. 75-76

tramite programmi di fotoritocco quali strumenti impiegati dall'operatore per interpretare i dati e restituirne i risultati²⁰⁰.

In primis si eseguono quelli che vengono definiti processi di pulitura e rimozione. Nel restauro reale tali processi sono realizzati attraverso azioni di asportazione di tutti quei materiali, come polvere, ritocchi, ridipinture, vernici, stuccature, non facenti parte dell'opera originaria al fine di aumentarne la leggibilità. Questi processi sono eseguiti previa valutazione di tipo critico ed esami diagnostici che portano alla programmazione dell'intervento. Questa attività, infatti, appartiene alla categoria del "restauro di rivelazione", in quanto segue, nelle procedure di rimozione dei vari strati, la stratigrafia temporale, tenendo conto del valore storico dei vari interventi passati di restauro, che sono testimonianza delle attività susseguitesesi nel tempo sull'opera²⁰¹. Tale valutazione risulta necessaria considerando che l'esecuzione dell'intervento di ripulitura risulta irreversibile, in quanto lo strato formatosi dagli agenti biotici viene rimosso, in base al materiale che costituisce l'opera, tramite tecnica meccanica, fisica, chimica, chimico-fisica, biochimica o un mix di questi metodi²⁰².

La maggior parte delle patologie riscontrate sulle superfici pittoriche si possono riassumere nelle "patine", che si formano attraverso le dinamiche naturali di adattamento dei materiali superficiali, organici o inorganici, in base all'ambiente esterno nel corso del tempo. Questi processi possono essere rimossi tramite l'ablazione, cioè azioni di asportazione dei sedimenti, incrostazioni e alterazioni chimiche che si vengono a formare sull'opera²⁰³.

Nel restauro virtuale questa attività è possibile solamente nei casi in cui l'intervento riguardi macchie di piccole dimensioni dovute ad azioni quali colature o schizzi. Le casistiche come, ad esempio, i depositi di polvere, di carbonati, di solfati di calcio, di funghi non permettono, invece, la visibilità della superficie sottostante sull'immagine digitale, non risultando possibile, di conseguenza, ripulire la superficie senza la perdita di informazioni fondamentali.

Nei casi possibili, l'intervento si esegue attraverso alcuni strumenti di ritocco che riproducono sulla superficie da modificare, e quindi sui *pixel*, le informazioni derivanti da altri *pixel*. Proprio perché si esegue, quindi, una modifica delle informazioni grafiche, si può lavorare solo e quasi esclusivamente su piccole superfici, al fine di mantenere un grado di attendibilità dell'intervento sempre alto. Per produrre tali risultati si utilizzano quattro strumenti principali: Il "Timbro-Clone" che, come identifica il nome, clona i *pixel* della parte sostitutiva e li copia nell'area da sostituire; Il "Pennello correttivo" che presenta le stesse funzioni del "Timbro-Clone" ma permette di raggiungere un risultato più ammorbidito nelle sfumature, in quanto fonde i *pixel* campionati con quelli riceventi

²⁰⁰ Limoncelli 2012, p. 77

²⁰¹ *Ibidem*, p. 78

²⁰² Giannini, Roani 2010, p. 150

²⁰³ Giannini, Roani 2010, pp. 13 e 126; Cremonesi 2011, pp. 45-54

andando ad equilibrare la *texture*, la tonalità e le luci sui margini con una diffusione di 10-12 *pixel*; Il “Pennello correttivo al volo”, che risulta identico allo strumento “Pennello correttivo” ma non necessita di un’area, da cui campionare gli elementi, fornita dall’utente effettuando le elaborazioni prendendo a campione i *pixel* adiacenti all’area di lavoro; Infine, la “Toppa” che, campionando *texture*, tonalità e luci di una specifica area che gli viene fornita dall’utente, la copia sulla zona da correggere²⁰⁴.

Un altro processo fondamentale per il restauro reale è il consolidamento dell’opera, il quale è eseguito in tutti quei casi in cui vi siano sollecitazioni meccaniche. Esso si basa sul ripristino della coesione e stabilizzazione tramite l’impiego di strumenti adeguati a fornire una elasticità, una resistenza e una consistenza all’opera stessa²⁰⁵. Nel restauro virtuale, non potendo lavorare sui materiali costituenti il manufatto, queste pratiche non possono essere eseguite.

Un altro processo importante è la correzione delle alterazioni cromatiche, cioè il mutare di uno o più parametri, tinta, saturazione e luminosità, che identificano un colore. Tale problematica nasce da fattori come: l’esposizione alla luce e all’aria; la consunzione, cioè lo sfregamento delle superfici, che può avvenire anche a seguito di interventi di puliture eccessive; processi da cui risulta una perdita di tono o l’attenuazione del timbro cromatico²⁰⁶.

Nel restauro virtuale si può intervenire tramite tre tipi di strumenti principali: La “Spugna” che intensifica o riduce il livello di saturazione colorimetrica di una precisa area selezionata; “Brucia” che data una determinata area ne aumenta l’esposizione scurendo i *pixel*; “Scherma” che, invece, funziona al contrario dello strumento precedente e schiarisce i *pixel* attraverso la riduzione della luce²⁰⁷.

Tale intervento va eseguito solamente nelle aree di interesse con un’attenzione particolare ad evitare la perdita di omogeneità coloristica e tonale della pittura, con conseguente appiattimento dei colori²⁰⁸.

Un’ulteriore tipologia di intervento è la reintegrazione, che è legata al recupero della leggibilità dell’opera, attenuando la presenza delle lacune a favore di una migliore godibilità, considerandone però gli aspetti estetici e filologici, nonché i principi di compatibilità, riconoscibilità e reversibilità²⁰⁹.

La scomparsa di parte della pellicola pittorica può essere legata:

²⁰⁴ Limoncelli 2012, pp. 79-80; Fodde 2013, pp. 248-251

²⁰⁵ Castelli, Santacesaria 2012, p. 170

²⁰⁶ Giannini, Roani 2010, p. 22

²⁰⁷ Fodde 2013, pp. 254-256

²⁰⁸ Limoncelli 2012, pp. 80-81

²⁰⁹ *Ibidem*, p. 81

- alla presenza di lacune, quindi a “una mancanza, un vuoto o una perdita delle superfici pittoriche (pitture murali, dipinti su tela e tavola, materiale cartaceo), del colore e del volume (scultura lapidea, metalli, scultura lignea, materiali ceramici)”²¹⁰, che può essere ricostruibile nel momento in cui vi siano ancora riconoscibili gli elementi fondamentali di tipo disegnativo, cromatico e luministico;
- alle abrasioni nel qual caso si intende “l’asportazione superficiale della pellicola pittorica da un dipinto, da una pergamena, dalla superficie di una scultura lignea o marmorea provocata da attrito accidentale, da logorio, oppure dovuta a una cancellatura intenzionale”²¹¹;
- alle crettature o craquelure, dovute a fenomeni fisici e chimici che, producendo processi di trazione sulla superficie dell’opera, creano screpolature. Queste problematiche, se sono legati al naturale invecchiamento dei materiali, possono anche essere lasciate, mentre, se derivano da una processo non corretto di essiccamento del colore, vanno rimossi;
- alla craterizzazione, riconducibile alle alterazioni di tipo chimico-fisico del supporto o degli strati preparativi che producono trazioni di tipo meccanico finendo per formare piccoli crateri sulla superficie;
- alla esfoliazione, un processo associato con la quantità di acqua contenuta nell’impasto che, esercitando pressione, solleva il colore con una tipica forma a lamelle e, nei peggiori casi, comporta un distacco del colore stesso;
- alle fratture, che sono legate al degrado del supporto, il che comporta la perdita della superficie pittorica. La tipologia di frattura è strettamente collegata al tipo di supporto che, nel caso dei legni, può essere dovuta ad errori nei processi di stagionatura o ai movimenti e al distacco delle assi, prendendo i nomi di fenditure e fessure, mentre per gli affreschi può avvenire per un difetto nel tiraggio della calce con l’inerte, provocando spaccature e, infine, sulle tele si possono identificare in forma di lacerazioni e di strappi;
- alle scalfitture che, invece, sono incisioni leggere, causate da azioni meccaniche volontarie o involontarie, da distinguersi dalle martellinature o spicchettature, legate al migliore ancoraggio sulla superficie per una nuova intonacatura o pittura degli affreschi, e quindi eseguite volontariamente attraverso la rimozione parziale della superficie pittorica tramite strumenti a punta²¹².

²¹⁰ Giannini, Roani 2010, p. 96

²¹¹ *Ibidem*, p. 13

²¹² *Ibidem*, pp. 57-167

Nel restauro virtuale si possono applicare molte tecniche derivate dal restauro reale, al fine di ridare continuità al testo figurativo dell'opera e tali da poter essere suddivise in integrazioni in monocromia, a tratteggio e in mimetico.

Le integrazioni in monocromia interessano il risarcimento di medie e grandi lacune o il rifacimento delle mancanze delle opere. Questa tecnica viene impiegata attraverso semplificazioni cromatiche o volumetriche astratte delle parti dell'opera secondo il principio dell'astrazione.

La modalità attraverso cui svolgere una simile elaborazione può essere la campitura, una “stesura di colore uniforme all'interno di un campo definito da un contorno”²¹³. La campitura digitale avviene, quindi, tramite l'impiego di un colore monocromo desunto dai valori cromatici delle lacune della superficie con un abbassamento di colorazione (sottotono), che nel caso del restauro virtuale si attua attraverso la modifica del parametro di opacità. In alternativa, si può scegliere di applicare una integrazione in colore neutro attraverso la stesura di un colore monocromatico, generalmente in tonalità di grigio, senza alcuna definizione ricostruttiva del tessuto figurativo. Nel restauro virtuale questo risultato può essere raggiunto tramite le “Tavole colore”, che ci permettono di identificare il giusto neutro compatibile con le lacune della pellicola pittorica che, per quelle di grandi dimensioni, viene elaborato attraverso il campionamento di due o più colori presenti nell'opera, mentre nel caso delle lacune di piccole dimensioni, viene campionato sui margini della lacuna stessa²¹⁴.

Le integrazioni a tratteggio, invece, non risultano essere impiegate, se non in rari casi, negli interventi di restauro virtuale²¹⁵.

Da ultimo, la tecnica del mimetico è quella maggiormente utilizzata nei processi di restauro virtuale, meno in quelli di restauro reale, spesso per l'impossibilità di fornire un dato attendibile e per non rischiare di porsi in competizione con l'autore finendo per produrre un falso storico. Questa tecnica si divide in: ricostruzione mimetica, cioè un intervento di tipo imitativo che non necessita la distinzione con l'opera originaria; ringranatura, piccoli interventi di ritocco delle zone abrase, nelle quali si riconoscono ancora gli elementi distintivi per arrivare ad una uniformità della cromia; ridipintura, eseguita su una superficie cromatica ancora esistente, utile a far scomparire le lacune attraverso l'intervento in mimetico; ombreggiatura, tecnica che utilizza un tratteggio per produrre un

²¹³ Giannini, Roani 2010, p. 43

²¹⁴ Limoncelli 2012, pp. 82-83

²¹⁵ Pur presentando una così bassa casistica, per dovere di completezza, tale tecnica viene suddivisa in astrazione cromatica, selezione cromatica e rigatino. L'astrazione cromatica per le aree di grandi dimensioni, dove non è possibile ricostruire una continuità formale con l'opera rimasta, si esegue attraverso un “tratteggio incrociato dei tre colori primari con l'aggiunta del nero e dei colori dominanti presenti sulla pittura che formano così una tessitura cromatica che si armonizza con la pellicola pittorica” (Limoncelli 2012, p. 85). La selezione cromatica si basa sugli stessi principi dell'astrazione cromatica, ma con un tratteggio divisionistico e con pennellata con specifico andamento o ductus. Infine, il rigatino che si evidenzia per essere tratteggiato solo verticalmente e con colori vicini ai valori cromatici dei bordi della lacuna. Giannini, Roani 2010, pp. 30, 150 e 161

effetto a rilievo nel tratto disegnativo; ritocco, ultima tipologia di integrazione legata alla stesura uniforme di colore da sovrapporre alla superficie cromatica presente²¹⁶.

L'intervento di restauro virtuale, come elaborazione con il fine di mostrare i risultati di un ipotetico restauro reale, a questo punto può ritenersi concluso. Il frutto di tale processo però può, in un secondo momento, essere impiegato quale base per un'ulteriore fase relativa alla "ricostruzione iconografica virtuale"²¹⁷. Questo tipo di intervento si pone lo scopo di riportare l'opera ad una fase il più vicina possibile all'originale, attraverso degli interventi integrativi che nascono da uno studio filologico scientificamente accurato. Quindi, questa soluzione non può essere applicata a tutte le casistiche. Tecnicamente, tale processo può attuarsi su ricostruzione e ricomposizione di affreschi o dipinti frammentati a causa di eventi accidentali; ricostruzioni plastiche per "ripristinare la continuità volumetrica e strutturale del supporto ligneo ed eseguire la reintegrazione cromatica"²¹⁸ per i dipinti su tavola, sui quali si può tentare anche il riassemblaggio delle assi. Come sopra menzionato, l'obiettivo è quello di riportare virtualmente l'opera alla sua unità formale, favorendone la leggibilità. Questa soluzione, come si vedrà successivamente per il restauro virtuale tridimensionale architettonico, soprattutto nei casi in cui si parla di affreschi e mosaici, sarà necessaria nella fase di ricollocamento di pitture e pavimentazioni nella struttura originaria, nel tentativo di ricontestualizzazione delle varie opere.

Ulteriore passaggio imprescindibile ai fini di un risultato scientificamente corretto è l'analisi delle fonti indirette. Con tale termine si va ad indicare tutta quella documentazione, sviluppata nel corso del tempo, che non può essere reperita da una analisi diretta della superficie attuale dell'opera²¹⁹. Le principali fonti indirette sono: le fotografie che, conservate in diverse strutture e archivi, spesso legate a musei e/o alle Soprintendenze, possono darci informazioni relative ad uno stato precedente dell'opera, in un momento in cui possibilmente non erano avvenute alcune alterazioni, come quelle legate all'invecchiamento dei materiali, agli eventi traumatici o agli interventi di restauro precedenti; le incisioni, stampe, disegni e dipinti che forniscono similmente le informazioni sull'iconografia dell'opera, ma relative a fasi storiche precedenti all'invenzione della fotografia. Queste ultime risorse, però, vanno vagliate attentamente, in quanto possono, in alcuni casi, non essere attendibili a causa di fattori come il gusto artistico del tempo o le integrazioni fantasiose dell'artista²²⁰.

²¹⁶ Giannini, Roani 2010, pp. 120, 149, 151 e 153-154

²¹⁷ Limoncelli 2012, p. 87

²¹⁸ *Ibidem*

²¹⁹ De Vita 2012, pp. 21-23

²²⁰ Limoncelli 2012, p. 88

Successivamente alla fase di reperimento, studio e consultazione delle fonti vi è un ulteriore processo che è la restituzione in *outline* dell'opera. Si tratta di un'immagine vettoriale che riproduce solamente i contorni e i bordi delle figure appartenenti all'opera. Il fine è quello di analizzare le forme principali dell'apparato iconografico nel tentativo di ricostruirne le parti mancanti attraverso il confronto con altre fonti coeve. Elemento chiave di tale tecnica è la possibilità di mantenere distinguibili le parti originali da quelle ipotizzate. Altro aspetto da tenere in conto sono i livelli di corrispondenza del dato derivanti dalle analisi qualitative che, riportate sull'immagine attraverso campiture specifiche e una legenda che ne descriva le caratteristiche, permettono di restituire quanto sia affidabile la ricostruzione. Infine, il ripristino iconografico virtuale vero e proprio può avvenire attraverso la ricostruzione delle parti mancanti in sottotono o in mimetico (Fig. 18)²²¹.

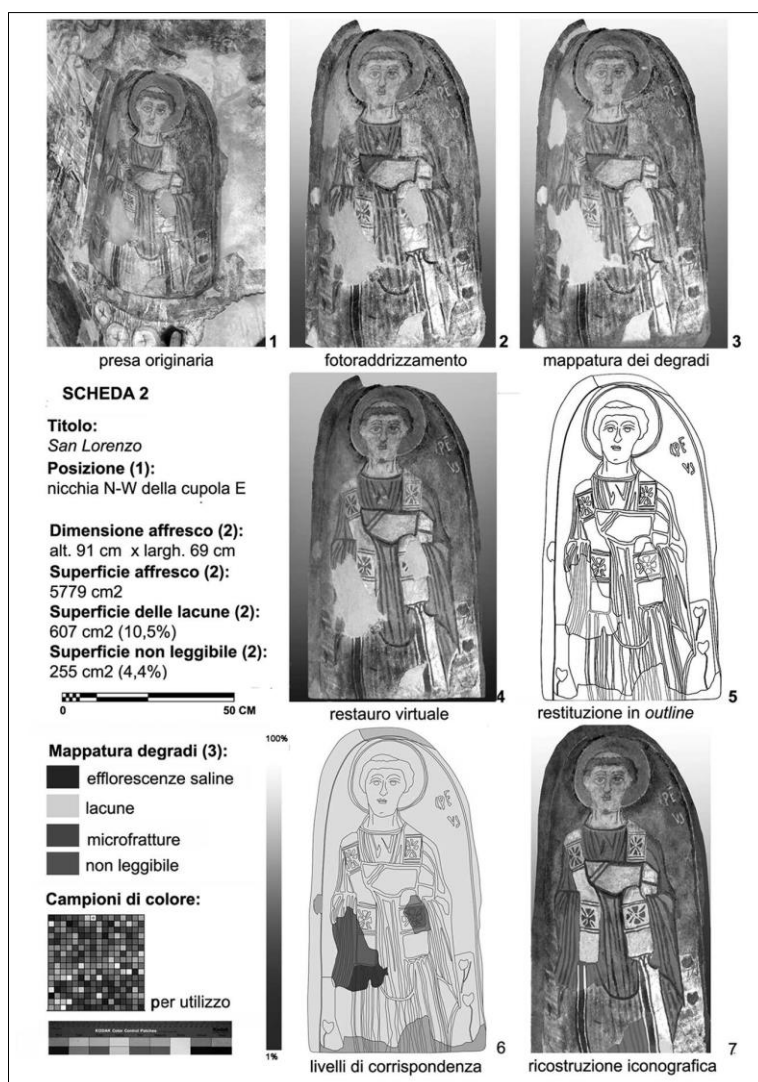


Figura 18 - Esempio delle varie fasi di elaborazione di un restauro virtuale e ipotesi di ricostruzione iconografica (da Limoncelli 2012).

²²¹ Limoncelli 2012, p. 88

2.6 Il restauro virtuale bidimensionale delle pitture

Una volta prodotta e recuperata tutta la documentazione necessaria alla corretta scientificità dell'intervento, si può passare finalmente alla fase di esecuzione del restauro virtuale bidimensionale.

Le azioni da eseguire cambiano a seconda del tipo di opera su cui si sta lavorando. Pertanto, è d'uopo effettuare una distinzione dei vari processi, a partire da quelli legati alle pitture.

Con il termine pittura si tende a definire l'arte di dipingere esprimendo l'idea, il pensiero e l'attività dell'autore, tramite l'uso del disegno e dei colori nelle varie tonalità e valori²²². Questa può essere categorizzata attraverso i suoi due principali elementi che sono il supporto, cioè ogni tipo di materiale destinato ad accogliere un rivestimento pittorico (superficie parietale, assi di legno²²³, tela²²⁴ o superficie vascolare²²⁵), e la tecnica utilizzata per creare tale pellicola pittorica (affresco²²⁶, pittura a secco²²⁷, pittura a calce²²⁸, pittura a tempera²²⁹, pittura ad olio²³⁰, encausto²³¹).

I processi di intervento di restauro virtuale agiscono maggiormente sui degradi che danneggiano la pellicola pittorica e quasi per nulla su quelli legati al supporto, se non in quei casi in

²²² Limoncelli 2012, p. 93; Pittura, Treccani Vocabolario Online, <https://www.treccani.it/vocabolario/pittura/> (Ul. Cons. 23/10/2023)

²²³ Queste venivano poste di solito in verticale, legate tramite un sistema ad incastro o incollate e agganciate posteriormente tramite l'utilizzo di traverse, non prima di aver sottoposto ogni asse a processi di stagionatura, piallatura e levigatura. Per permettere la pittura sul supporto veniva applicata l'imprimatura, uno strato steso uniformemente di colla animale mischiata a gesso, uova, miele, olio di lino che serviva come isolante tra il supporto e il livello pittorico, che veniva eseguito o con la tecnica a tempera o ad olio. Questa categoria di dipinti di cui si attestano primi esempi, principalmente dalle fonti, dall'età antica fu impiegata fino al XVI secolo, quando pian piano fu sostituita dall'uso della tela come supporto. Maltese 1990, p. 317; Ciatti 2012, pp. 17-20

²²⁴ La pittura su tela era eseguita stendendo il colore al di sopra di un supporto tessile, costituito da un intreccio di fili di densità variabile posti di trama e di ordito, preparato con una imprimatura. Inizialmente, la tela era applicata in qualità di rivestimento sulle pale lignee. Successivamente, dal XVI secolo, essa sostituì il supporto ligneo grazie all'uso di telai che mantenevano costante la tensione della tela tramite l'impiego delle chiavi. Costato Costantini 2011, pp. 34-48

²²⁵ Il supporto vascolare veniva decorato con forme geometriche, naturalistiche o con scene figurate. Limoncelli 2012, p. 94; Su tale tipologia di opere si discernerà maggiormente nel capitolo dedicato ai reperti mobili, in quanto categoria inclusa nell'ambito del restauro virtuale tridimensionale.

²²⁶ L'affresco si esegue tramite colori ad acqua che vengono applicati sull'intonaco ancora umido. Tale tipo di esecuzione sfrutta la chimica dell'intonaco che da idrossido di calce, nel momento in cui è ancora fresco, si trasforma in carbonato di calcio durante la fase di asciugatura, attraverso processi di combinazione con l'anidride carbonica, per poi, infine, cristallizzarsi in calcite. È proprio grazie a questa ultima trasformazione che l'intonaco ormai divenuto calcina, quindi un minerale con proprietà trasparenti, permette la visione dei colori sottostanti. Giannini, Roani 2010, p. 19; Piva 1984, p. 26

²²⁷ Nella pittura a secco i colori con legante organico vengono applicati direttamente sull'intonaco asciutto. Giannini, Roani 2010, p. 133

²²⁸ Nella pittura a calce i pigmenti mischiati con il latte di calce, un grassello molto diluito, vengono stesi nuovamente sull'intonaco asciutto, ma questa volta attivando gli stessi processi della tecnica ad affresco. Giannini, Roani 2010, p. 133

²²⁹ Nella pittura a tempera i colori prodotti tramite la polverizzazione di elementi vegetali, o dalla macinazione di pietre dure o da sintesi chimiche solubili in acqua, venivano agglutinati a sostanze grasse, ma non oleose, come la cera, la colla, il tuorlo d'uovo, l'olio, il latte con lo scopo di "stemperare" i colori, per poi essere applicati o sulla tela o sulla tavola. Piva 1988, pp. 71-220; Botticelli *et al.* 1992, p. 30

²³⁰ Nella pittura ad olio i pigmenti in polvere, venivano, amalgamati con leganti a base di olio, come il lino, la noce, il papavero, l'oliva, la trementina e l'essenza di rosmarino, e applicati ai supporti su tela o tavola. Costato Costantini 2011, pp. 44-46

²³¹ La tecnica ad encausto unisce i colori con la cera liquida per poi legarli al supporto attraverso il processo di cauterizzazione, eseguito tramite specifici strumenti metallici (cestri). Aletti 1951; Amato, Ventrella 2009, p. 140; Cerasuolo 2019, pp. 90-91

cui esso abbia portato ad un danneggiamento della pellicola pittorica stessa. Su queste tipologie di problematiche si può intervenire virtualmente solamente attraverso tecniche e strumenti che permettano, tramite la copia, il campionamento del colore o lo spostamento di *pixel*, di ricomporre, riavvicinare e integrare gli elementi. Sulle opere su supporto ligneo le tecniche di restauro virtuale permettono di andare a rimuovere in mimetico, tramite i vari *tools* precedentemente menzionati, solamente le fenditure²³² e le fessure²³³, mentre per tutte le altre casistiche come le contusioni, il sollevamento della pellicola pittorica, l'imbarcamento, la falcatura e lo svergolamento purtroppo in digitale non può essere eseguito alcun tipo di intervento (Fig. 19)²³⁴.

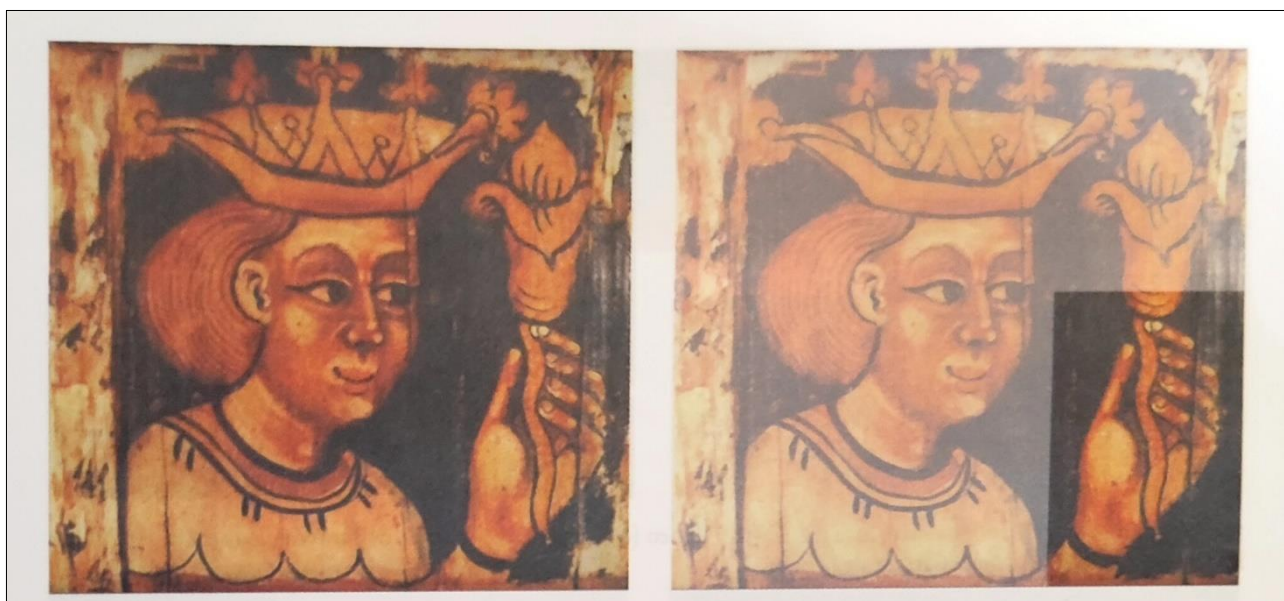


Figura 19 - Esempio di restauro virtuale bidimensionale di un dipinto su supporto ligneo proveniente dalla cattedrale di Nicosia (da Ghidara 2017).

Similmente anche per le opere su tela si può intervenire solamente sulle lacerazioni, integrandole in mimetico²³⁵, mentre tutte le problematiche relative al supporto che causano un distacco della pellicola pittorica non possono essere risolte²³⁶.

²³² Le fenditure sono una o più fratture che seguono un andamento longitudinale rispetto all'opera e che sono dovute principalmente ad una non perfetta stagionatura del legno. Castelli, Santacesaria 2012, p. 177

²³³ Le fessure sono rotture minori dovute ai movimenti, quali dilatazione o restringimento, e agli assestamenti delle assi che possono portare ad un distacco di parte della pellicola pittorica e alla creazione di lacune. Uzielli, Fioravanti 2012, p. 70

²³⁴ Limoncelli 2012, p. 100

²³⁵ *Ibidem*

²³⁶ Per i dipinti su tela le maggiori problematiche sono legate ad una perdita di elasticità del supporto e ad un suo dilatamento o restringimento. Tali situazioni sono la causa del distacco della pellicola pittorica dalla preparazione e/o tra quest'ultima e il supporto, nonché alla formazione di borse sulla tela dovute all'allungamento e raggrinzimento del supporto. Nel restauro reale tale situazione può essere risolta con un ri-tensionamento del supporto cercando di evitare, all'opposto, il fenomeno dello stiramento. Fiori 2011, pp. 67-71

Infine, nei casi dei dipinti murali si può intervenire virtualmente in mimetico, vagliando caso per caso²³⁷, sui degradi causati da alterazioni chimiche che hanno prodotto fenomeni di diminuzione della coesione tra pellicola pittorica e preparazione come: la tasca²³⁸, l'esfoliazione²³⁹ e le spaccature²⁴⁰. Gli interventi di restauro virtuale per le pitture, quindi, possono solamente agire su tutte quelle problematiche che risultino visibili sull'immagine bidimensionale o sull'ortomosaico, permettendo un intervento che consenta di calibrare colorimetricamente, riunire, ripulire, integrare o ricostruire, principalmente, lo strato superficiale che corrisponde alla pellicola pittorica dell'opera²⁴¹. L'intervento, a partire dall'ortomosaico prevede, come descritto nei paragrafi precedenti, la mappatura dei degradi integrata dallo studio delle fonti, su cui elaborare e poi eseguire il restauro virtuale vero e proprio. Successivamente, in base alle finalità dell'elaborazione, può essere portato avanti l'eventuale processo ricostruttivo. Il quale viene eseguito a partire da un disegno in outline della rappresentazione, che definisce e delimita le parti originali da quelle da elaborare, per poi, da ultimo, produrre una o più ricostruzioni della raffigurazione sia in mimetico che in sottotono (Figg. 20-21)²⁴².



Figura 20 - Esempio di elaborazione di restauro virtuale su di un affresco proveniente dalla chiesa di Santa Marina a Muro Leccese (da Limoncelli 2011).

²³⁷ Limoncelli 2012, p. 101

²³⁸ La tasca identifica un distacco tra l'intonaco e l'arriccio o tra questo e la superficie muraria, che nel peggiore dei casi porta alla caduta della pellicola pittorica. Giannini, Roani 2010, p. 179; Per arriccio si intende uno strato di malta grossolana posto tra l'intonaco ed il muro al fine di livellare la superficie prima della stesura della pittura. Giannini, Roani 2010, p. 28

²³⁹ L'esfoliazione è un processo legato alla pressione esercitata dall'acqua presente nel composto della preparazione, che porta al sollevarsi, sotto forma di lamelle, della pellicola pittorica. Botticelli *et al.* 1992, p. 65; Giannini, Roani 2010, p. 69

²⁴⁰ Le spaccature sono vere e proprie crepe createsi sul supporto dell'affresco, dovute a “variazioni igrometriche, ovvero a sollecitazioni esogene” (Giannini, Roani 2010, p. 167)

²⁴¹ Per maggiori informazioni sui vari progetti legati a tale categoria si guardi: De Nicolò Salmazo *et al.* 2006; Basile 2010; Lanitis *et al.* 2012; Leronis *et al.* 2014; Lahiri, Bandyopadhyay 2015; Amura *et al.* 2019; Corallini, Limoncelli 2020.

²⁴² Limoncelli 2011, pp. 51-52



Figura 21 - Esempio di restauro virtuale con tecnica in mimetico di affreschi romani a Pompei (da Corallini, Limoncelli 2020).

2.7 Il restauro virtuale bidimensionale dei mosaici

Tra le tipologie di opere che rientrano all'interno del più ampio gruppo del restauro virtuale bidimensionale troviamo quelle musive in quanto, pur trattandosi, ovviamente, di tecniche e materiali differenti da quelli impiegati nella pittura, vengono elaborate tramite le stesse procedure di fotoritocco.

Il mosaico è una tipologia di decorazione, geometrica o figurata, policroma o bianco e nero, che ha la funzione di rivestimento per pavimenti, soffitti, pareti, sculture ed elementi architettonici²⁴³. La sua esecuzione avviene tramite un'applicazione di tessere²⁴⁴, create a partire da pietre naturali come, ad esempio, il marmo o tramite la produzione di elementi di terracotta, pasta vitrea o smalto²⁴⁵, sulla parte superficiale di una preparazione in malta²⁴⁶.

Le forme di degrado, invece, sono legate ai due elementi principali del mosaico, cioè alle tessere o al supporto. Nel primo caso rientrano la formazione di patine, le incrostazioni, le alterazioni chimiche, il deposito di guano, sfaldamento della vetrina con conseguente caduta stratificata della

²⁴³ Il mosaico viene convenzionalmente categorizzato tramite due suddivisioni, pavimentale e parietale, che nascono dalla differenziazione del tipo di supporto impiegato per la sua messa in posa. Nella prima categoria si possono annoverare ritrovamenti archeologici già nella Mesopotamia della seconda metà del III millennio, per poi osservare il diffondersi e lo svilupparsi della tecnica nella storia della cultura egizia, greca e romana. Farneti 1993, pp. 24-32; Vlad Borrelli 2016, pp. 35-36; Il mosaico parietale, invece, è probabile che fu inventato in epoca romana, come riportato da Plinio nella *Naturalis Historia*: "Pulsa deinde ex humo pavimenta in camaras transiere vitro. Novicium et hoc inventum" Plin., *Nat. Hist.*, XXXVI, 189; Farneti 1993, p. 38; Dunbabin 1999, p. 2.

²⁴⁴ La messa in opera delle tessere seguiva la gerarchia interna, almeno in epoca romana, in cui il maestro mosaicista costruiva le scene più complesse e le figure, lasciando agli allievi meno esperti gli sfondi o le aree con decorazioni meno impegnative. Le tessere venivano allettate, non prima di aver rimosso parte della sinopia e dello strato di gesso, tramite l'aggiunta di uno strato di calce mischiata a polvere di marmo e un elemento organico come l'olio di lino o l'albume d'uovo. Questa attività scandiva il tempo con cui il mosaicista poteva portare a termine l'opera, le "giornate" di lavoro, che in alcuni casi risultano visibili nelle differenze riscontrabili nella malta di allettamento. Rinaldi 2011, pp. 62-63; Seccaroni 2010, pp. 24-26

²⁴⁵ Le tessere erano composte da elementi di forma parallelepipedica, che potevano variare in regolarità e dimensioni in base alla funzione nella composizione, ma anche all'epoca e all'area di influenza in cui ricadeva l'opera stessa. Il colore veniva dato o dalla natura fisica del materiale o da pigmenti, come nel caso delle tessere vitree. Il vetro poteva risultare opaco, lucido o trasparente, effetto che poteva essere ricavato anche solo dal tipo di taglio effettuato sulla superficie della tessera. Inoltre, nelle tessere vitree poteva essere inserita una foglia d'oro o di argento. Nel mosaico parietale la gamma cromatica poteva essere modificata anche dalla posizione delle tessere, che venivano inserite seguendo uno specifico angolo di riflessione. Rinaldi 2011, pp. 56-70; Concina 2011, pp. 42-43; Pogliani 2010 pp. 48-53

²⁴⁶ Bovini *et al.* 1986, p. 26; Farneti 1993, p. 22; Mosaico, Treccani Enciclopedia on line, <https://www.treccani.it/enciclopedia/mosaico/> (Ul. Cons. 07/08/2023); Sia il mosaico pavimentale che quello parietale presentano uno strato preparatorio di base che può essere distinto per le specifiche esigenze dovute ai differenti posizionamenti. Per quanto riguarda i mosaici pavimentali, in particolare quelli di epoca romana, si realizzavano tre strati principali: Il primo di questi era lo statumen, composto di ciottoli agglomerati; vi era poi il rudus uno strato formato da una parte di calce e tre di pietrisco frantumato, per uno spessore di circa 20-25 cm; infine, veniva posto il nucleus, composto da cementizio, formato da polvere di marmo, calce e sabbia. Il mosaico parietale si differenziava principalmente per il fatto che il supporto era composto da pozzolana, con l'aggiunta di polvere di mattone o marmo, calce spenta e acqua miscelati in proporzioni non definite, che veniva steso sulla superficie con uno strato variabile e che, una volta seccato e trasformatosi in uno strato gessoso, faceva da supporto alle tessere musive. In tutti e due i casi sullo strato finale veniva ricalcata la "sinopia", il disegno preparatorio, che fu successivamente sostituito dall'incisione indiretta. Questa tecnica veniva applicata tramite l'uso di cartoni, che potevano presentarsi in alcuni casi già colorati, sui quali venivano definite quelle che erano le forme principali della raffigurazione, un passaggio necessario al fine di disporre nella giusta posizione le tessere, che erano l'unico elemento visibile alla fine di tutti i passaggi. Farneti 1993, pp. 102-103; Limoncelli 2012, p. 103; Giangrosso 2018, pp. 72-74; Fischer 1981, pp. 133-138; Seccaroni 2010, p. 24; Rinaldi 2011, p. 62

foglia d'oro o d'argento e la consunzione da sfregamento. Per i supporti uno delle principali problematiche è legata alla non perfetta esecuzione degli strati di preparazione che può portare allo sviluppo di fratture o distacco e successiva caduta delle tessere²⁴⁷.

I processi di restauro virtuale di questa tipologia di opere si eseguono partendo, come per le pitture, dal raddrizzamento dell'immagine del mosaico o dalla creazione dell'ortomosaico fotogrammetrico. Su queste basi si vanno ad eseguire tutti i processi e procedure necessari ad ottimizzare l'immagine, per poi poter effettuare analisi non invasive e restituire vettorialmente in *outline* le tessere. Questo passaggio si esegue ponendo particolare attenzione alla disposizione e andamento delle tessere, cercando di definirne dimensioni e forme. Questo permetterà di disporre, infine, di tutti gli elementi necessari ad una corretta ipotesi di ricostruzione e di intervento di restauro, nonché al possibile tentativo di ricollocamento della pavimentazione in un ambiente 3D ricostruttivo dell'architettura.

Il restauro virtuale, quindi, si esegue attraverso la creazione di campiture in monocromo, in sottotono e con integrazioni in mimetico. Per effettuare tali elaborazioni si clonano, tramite gli strumenti di fotoritocco, parti dell'apparato decorativo di interesse, che andranno a raccordarsi ed integrarsi con quelle originali, ponendo particolare attenzione alla disposizione, dimensione e forma delle tessere e cercando di mantenerne inalterato il rapporto che intercorre tra di esse (Figg. 22-23)²⁴⁸.

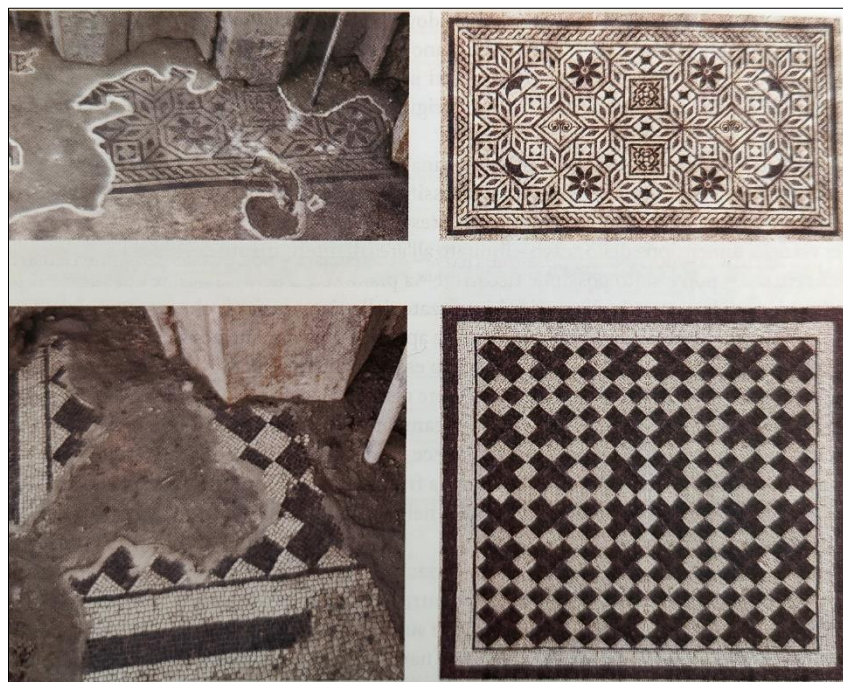


Figura 22 - Esempi di restauro virtuale bidimensionale di mosaici provenienti da Ravenna (da Monti 2017b).

²⁴⁷ De Palma *et al.* 2002, pp. 658-665; Nardi 2010, p. 7; Cagnini *et al.* 2015, p. 330

²⁴⁸ Limoncelli 2012, pp. 105-107

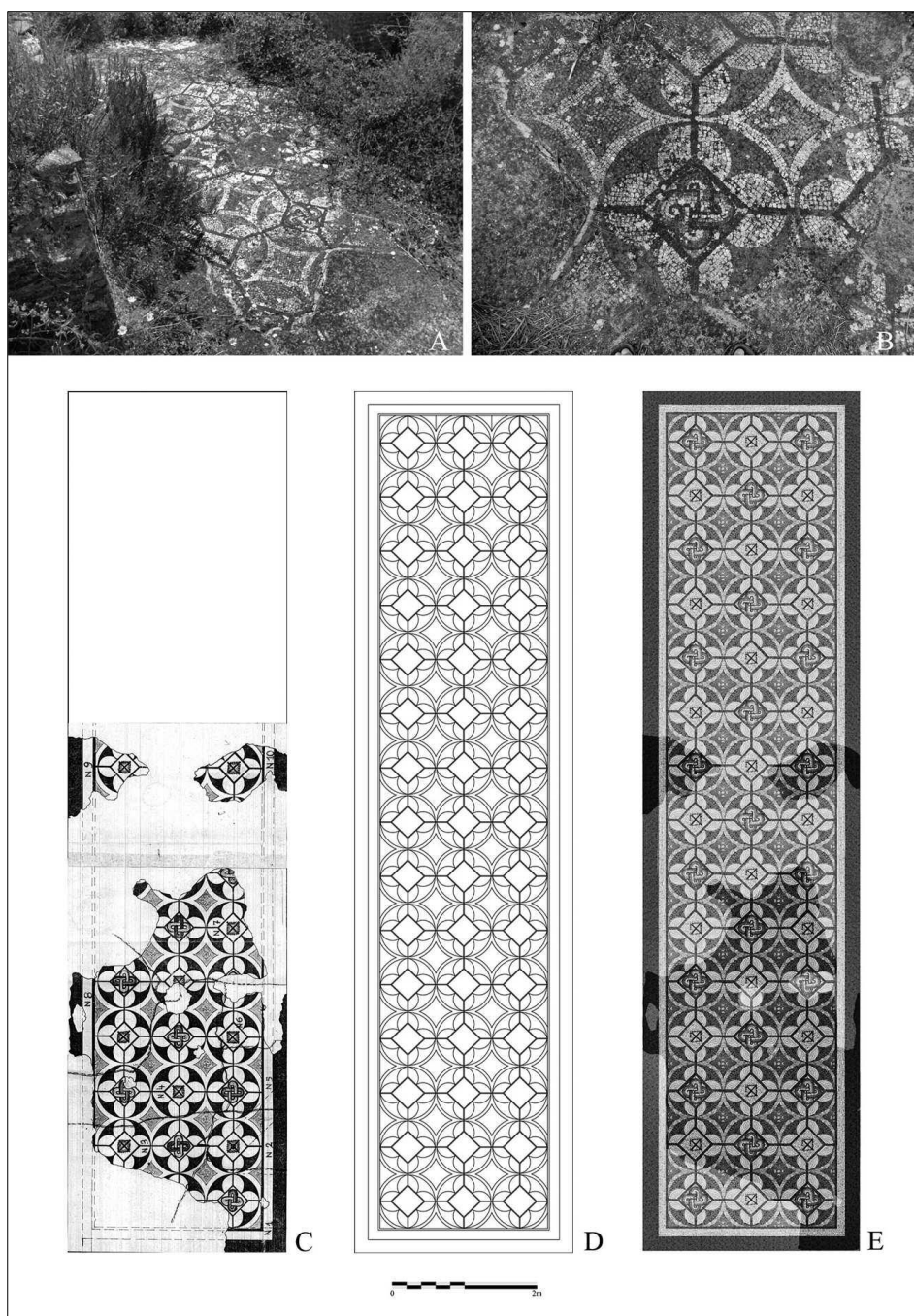


Figura 23 - Esempio di restauro virtuale bidimensionale di un mosaico proveniente da una villa romana a Roggia Gravina (da Limoncelli 2012).

2.8 Il restauro virtuale bidimensionale dei documenti librari

Nell'ambito del restauro virtuale bidimensionale viene fatta rientrare anche la categoria del restauro dei documenti librari, ma limitata solo ed esclusivamente ai manoscritti²⁴⁹. Di tale tipologie di opere si andranno ad analizzare principalmente quelle create attraverso l'impiego dell'inchiostro²⁵⁰ e di un supporto papiraceo²⁵¹, pergameneo²⁵² o cartaceo²⁵³.

Le problematiche maggiori per questi materiali sono soprattutto dovute agli specifici agenti di degrado endogeni, come: il *foxing*²⁵⁴; le muffe; i parassiti o i processi di naturale invecchiamento²⁵⁵. Nello specifico caso dei manoscritti miniati si possono avere perdite o distacchi dei colori dovute a processi di abrasione, stress meccanici o per le pergamene, perdita di elasticità²⁵⁶. Tramite gli interventi di restauro virtuale, si può agire in tutte quelle situazioni in cui vi sono: attività di decolorazione, alterazione dell'inchiostro, perdita dei pigmenti colorati o della foglia d'oro, oppure la presenza di due scritture e, quindi, l'esigenza di distinguerle, come nel caso specifico dei palinsesti.

²⁴⁹ *Ibidem*, p. 109; Con tale termine si va ad indicare qualsiasi documento manus scriptus, scritto a mano. Strepparola 2005, p. 181

²⁵⁰ Con il termine inchiostro si intende una soluzione liquida che poteva presentarsi in vari colori a seconda delle componenti miscelate. Il nero era ricavato da miscele a base ferro-gallica, o a base di carbone come il nerofumo, o dal nero di seppia; il marrone prodotto dalla fuliggine del faggio o dalla noce di galla, miscelati con acqua o aceto; vi erano poi il rosso, il verde, il violetto, e altri inchiostri prodotti in base al colorante di origine vegetale, animale o minerale, che veniva inserito nella miscela acquosa. Maniaci 2002, pp. 58-61; Barbier 2004, p. 94; Strepparola 2005, p. 156; Pastena 2019b, pp. 27-31.

²⁵¹ Il papiro veniva prodotto dal taglio in listelli sottili dello stelo della pianta nella sua parte interna, la quale risulta bianca e ruvida. Questi elementi venivano poi incrociati similmente ad una stoffa, inumiditi e pressati, per poi essere lasciati asciugare. L'ordito così ottenuto veniva protetto e reso maggiormente stabile tramite soluzioni contenenti resine ed altri materiali organici, quali l'uovo, la gomma arabica, l'amido, la caseina e il latte. Da tali processi, che in alcuni casi richiedevano ulteriori passaggi di raschiatura e martellatura, si venivano a creare dei fogli che una volta incollati producevano un volumen, una sorta di striscia, che poteva essere arrotolata. Il papiro veniva scritto in colonne affiancate. Convenzionalmente viene definita recto la parte di papiro che presenta le strisce parallele alla scrittura, mentre verso l'opposto. Pastena 2019a, p. 12; Maniaci 2002, pp. 69-70; Strepparola 2005, pp. 221-229; Barbier 2004, pp. 35-36

²⁵² La pergamena, creata a partire dalla pelle animale (agnello, pecora, montone o capra), veniva prima macerata con calce, per poi essere tesa e raschiata superficialmente tramite l'utilizzo di una pietra pomice o di un osso di seppia e, infine, messa a seccare. Inizialmente, anch'essa veniva impiegata sotto forma di rotolo e scritta solamente su una faccia, finché si cominciò ad impiegarla come fogli singoli sotto forma di quaderni, che permettevano l'impiego per la scrittura di entrambi i lati. Strepparola 2005, p. 206; Pastena 2019a, p. 16; Barbier 2004, pp. 55-56

²⁵³ La carta Questa veniva creata a partire da differenti tipologie di fibre vegetali, tra le quali quelle più impiegate erano il lino, il cotone o la canapa. Queste fibre venivano inserite in vasche di pietra dove, attraverso azioni di sfibratura e sbattitura, divenivano una sorta di polpa o pasta di carta. Successivamente si passava al processo di lisciviazione con cui si raccoglieva la pasta attraverso una sorta di setaccio. Da ultimo, si eseguivano processi di pressatura, essiccazione e il prodotto finale veniva coagulato tramite l'impiego di gelatina animale. Tra i manufatti di questa tipologia troviamo rotoli liturgici e codici. Questi ultimi constano in manoscritti che presentavano più fogli uniti e derivano il nome dal codex (dal latino "caudex" che identificava l'interno dell'albero). Tra di questi, inoltre, si possono ritrovare anche i palinsesti, cioè, tutti quei manoscritti che presentano, dopo una raschiatura, una seconda scrittura. Pedemonte 2008, pp. 21-34; Strepparola 2005, p. 77; Maniaci 2002, pp. 21-22

²⁵⁴ Il foxing è strettamente legato al materiale del supporto e si presenta tramite macchie o puntature di colore bruno-giallastre o bruno-rossastre dovute a depositi di metalli come ferro e rame presenti nel materiale stesso. Copedé 2003, p. 101

²⁵⁵ Ad esempio, l'ingiallimento della carta, degrado causato dalla lignina della cellulosa che ingiallisce quando esposta per lungo tempo al sole. Copedé 2003, pp. 51-79

²⁵⁶ Bollati, Petoletti 2022, p. 64; Giardulo 1999, p. 90; Per ovviare a queste problematiche le tecniche di restauro reale si avvalgono di azioni di incollaggio, riadesione, rattoppo e rinsaldatura, nel momento in cui si ravvisano processi di decoesione in atto. Giannini, Roani 2010, pp. 17-151

In questi casi, risultano necessarie le tecniche di spettroscopia di immagine (IS) come la fluorescenza ultravioletta (UV)²⁵⁷, la fotografia ad infrarossi a falsi colori (IR)²⁵⁸ e la transilluminazione²⁵⁹.

Tutte queste analisi possono essere utili nella fase di ricostruzione digitale, durante la quale si possono eseguire, tramite tecniche di fotoritocco, smacchiamenti, ripuliture, ripristino delle lacune, correzioni delle alterazioni cromatiche, reintegrazioni delle scritture e della pellicola pittorica (Figg. 24-25)²⁶⁰.



Figura 24 - Esempio di restauro virtuale di un manoscritto proveniente dalla Herzog August Bibliothek di Wolfenbüttel in Germania (da Bennardi, Furferi 2007).

²⁵⁷ La fluorescenza ultravioletta (UV) è una tecnica che viene prodotta tramite l'impiego di lampade Wood, che fungono da stimolanti della luce visibile attraverso l'eccitazione ultravioletta, perché composte da un filtro di vetro a base di ossido di nichel che fa passare solamente la radiazione UV. Tramite questa tecnica possono essere prodotte due immagini sovrapponibili, una a colori e l'altra a UV. Attraverso la lettura e lo studio di queste due immagini, si possono ricavare informazioni sulle sostanze organiche, e in specifici casi inorganiche, presenti. Essa viene spesso utilizzata sui manoscritti, ad esempio sui palinsesti in cui la differenza di colore di due inchiostri può essere segno distintivo di scritture appartenenti a due epoche differenti. Poldi, Villa 2006, pp. 157-161; Bennardi, Furferi 2007, pp. 64-66

²⁵⁸ Nella fotografia ad infrarossi a falsi colori (IR) le lampade a incandescenza permettono di stimolare la luce visibile, restituendo un'immagine tricromatica che presenta due colori legati allo spazio visibile, rosso e verde, e uno di quello infrarosso. Effettuando poi una ricombinazione in RGB delle bande del vicino IR, è possibile arrivare a vedere una lunghezza d'onda fino a 900 nm. Questa tecnica permette di riconoscere, attraverso la risposta alla stimolazione che varia in relazione alle sostanze impiegate, differenti scritture, disegni preparatori, restauri e ridipinture. Poldi, Villa 2006, pp.127-132

²⁵⁹ La transilluminazione è una tecnica che consiste nell'effettuare degli scatti al documento librario con una luce retrostante, in grado di agevolare la comprensione della possibile presenza di strati pittorici, ridipinture, filigrane, strappi o lacerazioni grazie alla visione in trasparenza dovuta a questo processo di indagine. Poldi, Villa 2006, pp. 144-145

²⁶⁰ Bennardi, Furferi 2007, pp. 64-66; Limoncelli 2012, pp. 110-113



Figura 25 - Esempio di restauro virtuale di un manoscritto miniato proveniente dalla Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (da Bennardi, Furferi 2007).

3. I processi del restauro virtuale tridimensionale: architetture, statue e manufatti

I processi e le tecniche di restauro virtuale tridimensionale vengono eseguiti su tutti quegli elementi che sono definiti concettualmente come modelli digitali. Una denominazione che identifica tutte quelle forme geometriche, contenute all'interno di uno spazio virtuale chiamato scena, descritte da una funzione matematica che ne determina lo stile e il metodo di visualizzazione e rappresentazione. Il restauro virtuale tridimensionale si avvale dei modelli digitali allo scopo di replicare e rappresentare matematicamente oggetti reali, alla loro scala originaria, all'interno di una scena virtuale costituita da un sistema di assi cartesiani²⁶¹. Tali elementi “hanno dunque un indubbio valore conoscitivo”²⁶².

Nell'ambito del restauro virtuale, però, si deve tenere bene a mente che anche la modellazione, intesa come fase primaria di esecuzione nei vari processi di elaborazione, deve essere legata a un'idea conoscitiva in cui, il fine ultimo, è quello di riportare l'opera ad una maggiore leggibilità e, dove possibile, il più vicino alla sua originaria forma²⁶³.

A tale scopo la modellazione tridimensionale permette di disporre di tre metodologie di indagine: la modellazione geometrica, lo *sculpting* tridimensionale e la modellazione procedurale.

A prescindere da quella che si decida di utilizzare, o ad un mix delle tre, tutte queste tecniche impiegano uno spazio virtuale tridimensionale di tipo cartesiano costituito dagli assi, denominati convenzionalmente, x, y e z (Fig. 26).

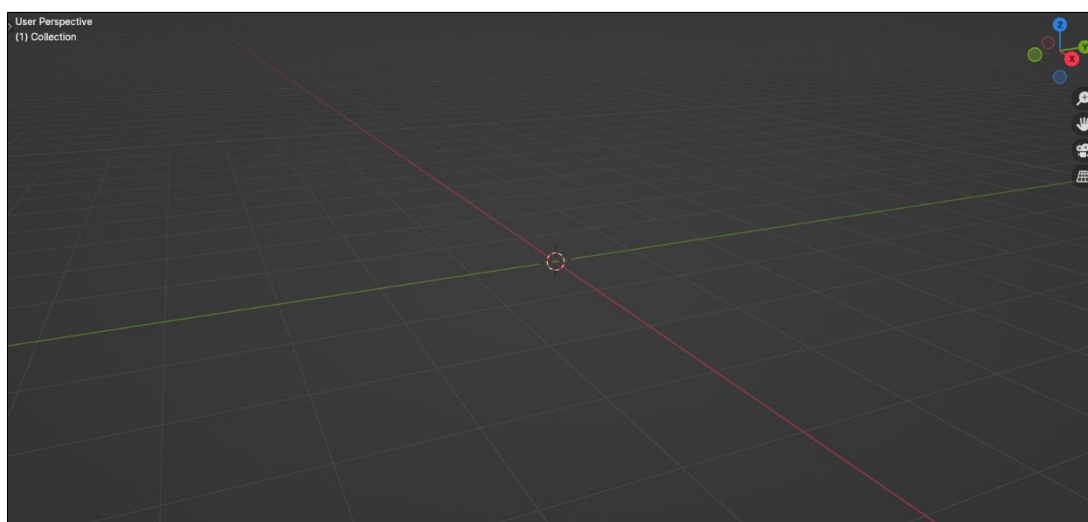


Figura 26 - Spazio virtuale tridimensionale cartesiano con gli assi X (in rosso), Y (in verde), Z (in blu) di Blender®.

²⁶¹ Limoncelli 2012, pp. 119 - 120

²⁶² Maldonado 1993, pp. 68-69

²⁶³ Borra 2000, pp. 266-270

Questa scena può essere predisposta o tramite un ambiente in cui le coordinate risultino relative, cioè, associate alle dimensioni inserite dall'utente del singolo oggetto o degli oggetti (*User Coordinate System* - UCS); o essere connessa ad un sistema di riferimento con coordinate assolute²⁶⁴. All'interno di questo spazio virtuale vengono, quindi, disposti tutti gli elementi necessari alla rappresentazione. In quest'area i volumi e le superfici possono essere manipolati e controllati tramite azioni che non ne modificano la geometria, come quelle di spostamento, scalatura, rotazione, oppure, tramite differenti tecniche, ne variano le forme, aggiungendole, modificandole o sottraendole nella geometria stessa del modello. Inoltre, la percezione tridimensionale è data e resa tramite i metodi di rappresentazione che effettuano proiezioni prospettiche e imitano matematicamente illuminazioni e ombreggiature naturali. Un aspetto rilevante della *Computer Graphic* 3D è che, pur lavorando con oggetti tridimensionali in un'ambiente virtuale, il risultato finale di visualizzazione, che, come vedremo, è legato al *rendering* finale, è comunque un elemento bidimensionale. Un'altra nozione che potrebbe portare concettualmente ad una certa confusione è l'impiego errato del termine disegno 3D per identificare un modello virtuale. Infatti, il disegno 3D si compone di curve e linee che costruiscono un oggetto solido rappresentandone solo ed esclusivamente i contorni, non disponendo all'interno di essi di una superficie di riempimento²⁶⁵. Nella modellazione solida, invece, tali superfici interne presentano non soltanto un riempimento superficiale, ma anche ulteriori proprietà intrinseche al modello stesso come il volume, il centro di gravità e i momenti di inerzia²⁶⁶. Tramite, poi, il calcolo dell'illuminazione e delle ombreggiature, eseguito con gli algoritmi di *Ray Tracing*, *Ray Casting* e di illuminazione Globale, di cui si parlerà più avanti nella trattazione, si vengono a riprodurre tutti quegli elementi illuministici che rendono ancora più realistica e tridimensionale la scena, quali la rifrazione, riflessione e trasparenza degli oggetti²⁶⁷. Il processo di verosimiglianza viene maggiormente acuito, inoltre, attraverso l'impiego delle tecniche di *texture mapping*, che aggiungendo ulteriori dettagli alle superfici, attraverso l'applicazione di un colore o un'immagine di base e tramite la simulazione di specifiche caratteristiche legate ai materiali associati agli oggetti nella scena, rendono il tutto il più vicino possibile alla realtà²⁶⁸.

²⁶⁴ Bianchini 2008, pp. 257-263

²⁶⁵ Limoncelli 2012, p. 122; Questo tipo di rappresentazione viene definito *wireframe* (a filo di ferro). Gallippi 2006, p. 556

²⁶⁶ Limoncelli 2012, p. 122

²⁶⁷ Gabellone 2022, pp. 23-24

²⁶⁸ *Ibidem*, p. 38

3.1 Tecniche di Modellazione

La modellazione tridimensionale si avvale di una serie di soluzioni e tecniche differenti che permettono la creazione di oggetti di varia forma e dimensione. Scegliere di utilizzare uno o più di tali processi è subordinato al risultato finale che si vuole ottenere e, soprattutto, alla forma dell'elemento stesso. Questo aspetto varia molto le soluzioni che si andranno ad impiegare, le quali tenderanno ad essere più “geometriche” per le forme meno complesse e più squadrate, come ad esempio gli oggetti meccanici; mentre saranno più “organiche”, nel momento in cui si andranno ad elaborare elementi più naturali e geometricamente complessi perché ricchi di dettagli²⁶⁹.

La prima tecnica esplicita in questa sezione²⁷⁰ viene definita parametrica ed è tipologicamente geometrica. Alla base di questa procedura risiede l'impiego di elementi tridimensionali o bidimensionali, detti primitive, prodotti tramite formule matematiche che permettono di creare dei modelli tridimensionali predefinendone i valori. In questa tipologia di modellazione vi sono due tipi di rappresentazioni principali che si differenziano perché o vengono definiti dal loro volume, *Constructive Solid Geometry* (CSG), o dalle *Boundary Representation* (B-rep), cioè le superfici esterne che vengono delimitate tramite degli elementi geometrici essenziali. Questi elementi si caratterizzano per avere come geometria primaria il punto o vertice (*vertex*), mentre l'unione di due vertici crea una linea o bordo (*edge*) e, infine, tre o più vertici collegati tra loro, e che presentano un riempimento, creano una superficie o faccia (*face*) (Fig. 27)²⁷¹.

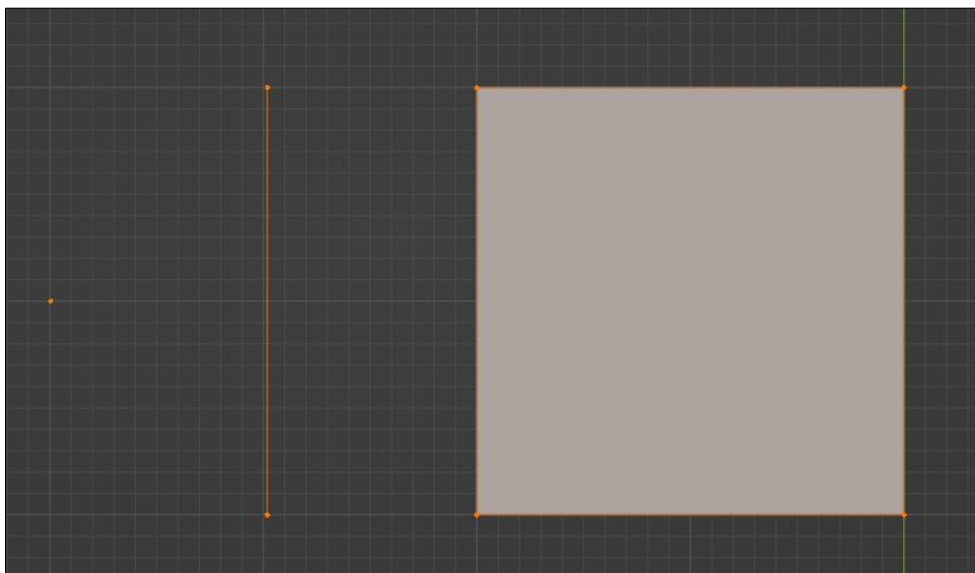


Figura 27 - Gli elementi di base per la modellazione dal vertice, a sinistra, al bordo, al centro, fino alla faccia, a destra.

²⁶⁹ Limoncelli 2012, p. 130

²⁷⁰ Nonché la prima ad essere impiegata in ambito informatico già a partire dagli anni Settanta. Coward 2019, p. 5

²⁷¹ Nasr, Kamrani 2007, pp. 83-123

La modellazione parametrica nasce, quindi, da un numero di primitive di base che, pur variando da programma a programma, si rifanno sempre a forme geometriche semplici quali: cubo, sfera, cilindro, cono, piramide, toro, piano, disco, ecc (Fig. 28).

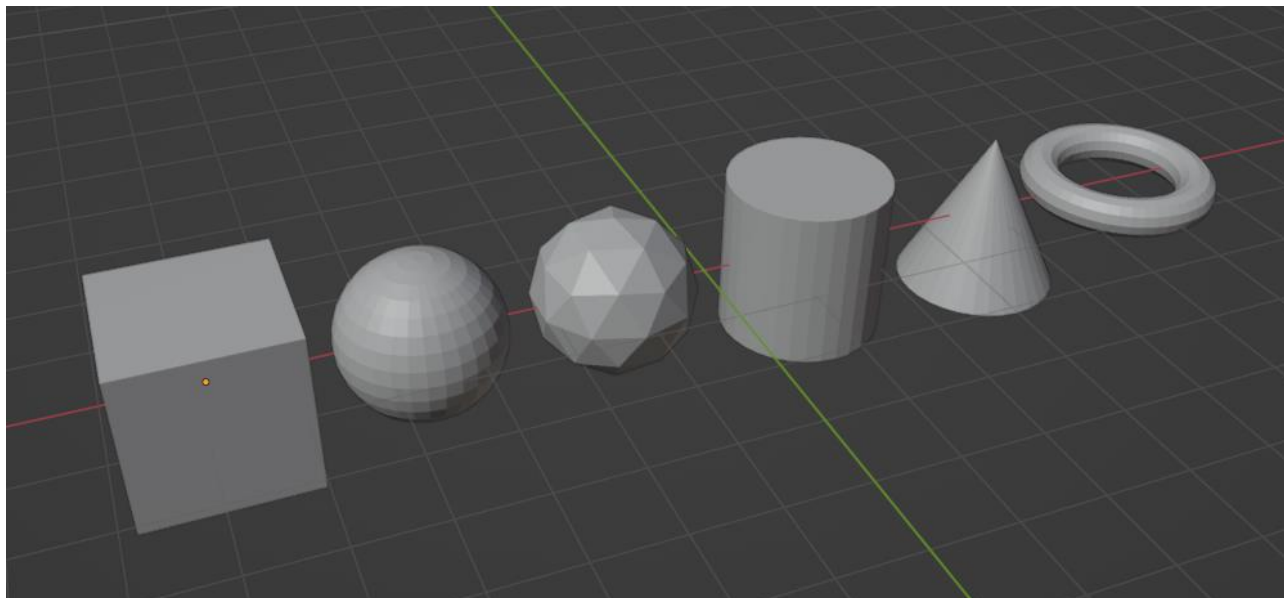


Figura 28 - esempio di primitive geometriche presenti nel software Blender®.

I parametri di queste forme come la lunghezza, la larghezza, l'altezza, il raggio e l'orientamento possono variare in base ai valori inseriti dall'utente. Inoltre, vi sono serie di attributi che possono essere successivamente specificati quali, ad esempio, la quantità di smussatura degli spigoli o quanti angoli e quante suddivisioni delle superfici devono presentare le forme sferiche, coniche o cilindriche al fine di aumentarne o diminuirne qualità e rotondità²⁷².

Ulteriori parametri che possono essere applicati agli oggetti derivano dai “deformatori” e dagli “oggetti funzione”. Per “deformatori” si intendono quelle funzioni parametriche che, una volta aggiunte ai modelli, ne modificano la struttura e la superficie, piegandola, inclinandola, torcendola, gonfiandola, assottigliandola e arrotondandola²⁷³. Per “oggetti funzione”, invece, si intendono tutte quelle operazioni che modificano l'oggetto stesso ma non lo deformano. Tra di questi troviamo le funzioni di specchiatura (*mirror*), di moltiplicazione dell'oggetto (*array*) e le operazioni booleane²⁷⁴. Con questo ultimo termine si vanno ad indicare tre tipi di trasformazione (intersezione, sottrazione e unione) che, derivate dall'algebra di Boole, producono dei modelli geometricamente complessi partendo da due oggetti più semplici²⁷⁵.

²⁷² Limoncelli 2012, p. 123

²⁷³ Riddell *et al.* 2006, pp. 331-356

²⁷⁴ Limoncelli 2012, p. 123

²⁷⁵ Bianchini 2008, pp. 266-267

All'interno del più ampio ambito della modellazione geometrica possiamo trovare anche un'altra tipologia di tecnica, denominata NURBS (*Non Uniform Rational B-spline*) con cui, attraverso tracciati bidimensionali, detti *spline*, composti da vertici e linee in sequenza, si possono generare geometrie tridimensionali complesse. Nelle *spline* il legame tra linee e vertici può avvenire o tramite l'impiego di linee dritte, oppure attraverso un'interpolazione mediante equazioni matematiche. Questi tracciati possono presentarsi come primitive e, quindi, disporre di parametri e forme già definite da formule matematiche, o essere sviluppate liberamente a partire da caratteristiche matematiche specifiche²⁷⁶. Le NURBS permettono, quindi, la creazione di superfici o solidi complessi²⁷⁷, molto dettagliati e poco sfaccettati (*smooth surface*)²⁷⁸.

I software di modellazione dispongono di molteplici tipologie di NURBS, che possono essere suddivise in quattro classificazioni principali: *Extrude* NURBS, che crea l'elemento a partire da una *spline* lungo una linea retta, attribuendogli un parametro di profondità che ne definisce il livello di estrusione; *Sweep* NURBS, che produce l'oggetto tramite l'impiego di due *spline*, in cui la prima definisce il profilo e la seconda, invece, il percorso di estrusione; *Loft* NURBS, che produce il solido o la superficie tramite l'interpolazione di due o più *spline* sequenziali presenti nello spazio tridimensionale; *Rotation* NURBS, infine, che crea l'oggetto tramite la rotazione della *spline* intorno un asse prescelto (Fig. 29)²⁷⁹.

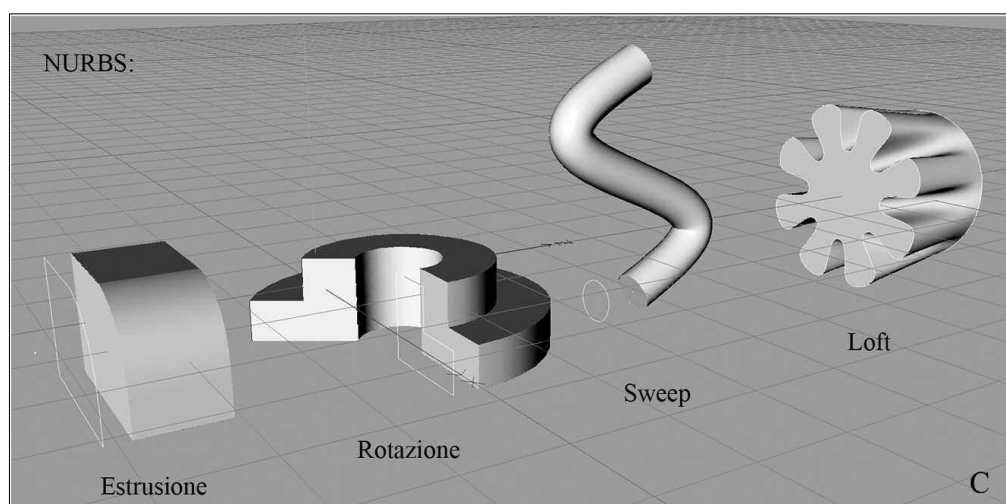


Figura 29 - Differenti tipologie di NURB (da Limoncelli 2012).

²⁷⁶ Tra di queste le più impiegate derivano da interpolazioni che seguono delle specifiche caratteristiche legate a formule matematiche, di cui la più semplice è quella lineare; ma vi è anche la curva di Bezier, che modifica la curva seguendo specifici punti di controllo legati tra loro da una spezzata denominata "poligono della curva", in cui quelli ai margini sono di passaggio mentre tutti quelli intermedi fungono da guida per la curva; la B-spline, simile alla Bezier ma legata da poli principali che ne modificano la forma e, infine, la curva di Akima che invece modifica i suoi parametri, e quindi la forma della curva, in base alla posizione dei punti e segmenti vicini. Per maggiori informazioni si consultino: Biswas, Lberluekeliaooovell 2008; Albertario 2002, pp. 301-302; Bergquist, Söderholm 2016, pp. 335-336

²⁷⁷ Tale differenziazione deriva dal fatto che la *spline* può presentare un tracciato aperto o chiuso. In quest'ultimo caso il primo vertice della *spline* e l'ultimo disporranno delle medesime coordinate.

²⁷⁸ Rogers 2001, pp. 5-6; Bianchini 2008, pp. 273-276

²⁷⁹ von Koenigsmarck 2002, p. 124; von Koenigsmarck 2007, pp. 98-99; Limoncelli 2012, pp. 123-125

All'interno della modellazione geometrica possiamo individuare un ulteriore tipo di modellazione, oltre ai due appena descritti, che è quella poligonale. Tramite tale tecnica può avvenire la produzione di oggetti complessi attraverso l'impiego di più poligoni, di varia forma e dimensione, in connessione tra loro. In tale tipologia di modellazione l'elemento base del poligono risulta essere il vertice o nodo, mentre, l'unione tra due nodi crea il lato, *Isoparms* o *edge*, e gli stessi nodi, nel momento in cui siano almeno del numero di tre, producono una faccia (superficie, *Patch*). Le facce possono, quindi, presentarsi con un minimo di tre lati fino ad n-lati, anche se, come si vedrà, si preferisce evitare di disporre di una faccia che abbia più di quattro lati. Ogni poligono o faccia dispone di un orientamento all'interno della scena che si basa sulla direzione della sua normale. La normale è un vettore posto perpendicolarmente al piano che corrisponde alla faccia e che giace nel suo baricentro. Le normali vengono orientate in base alla faccia esterna dell'oggetto (Fig. 30)²⁸⁰.

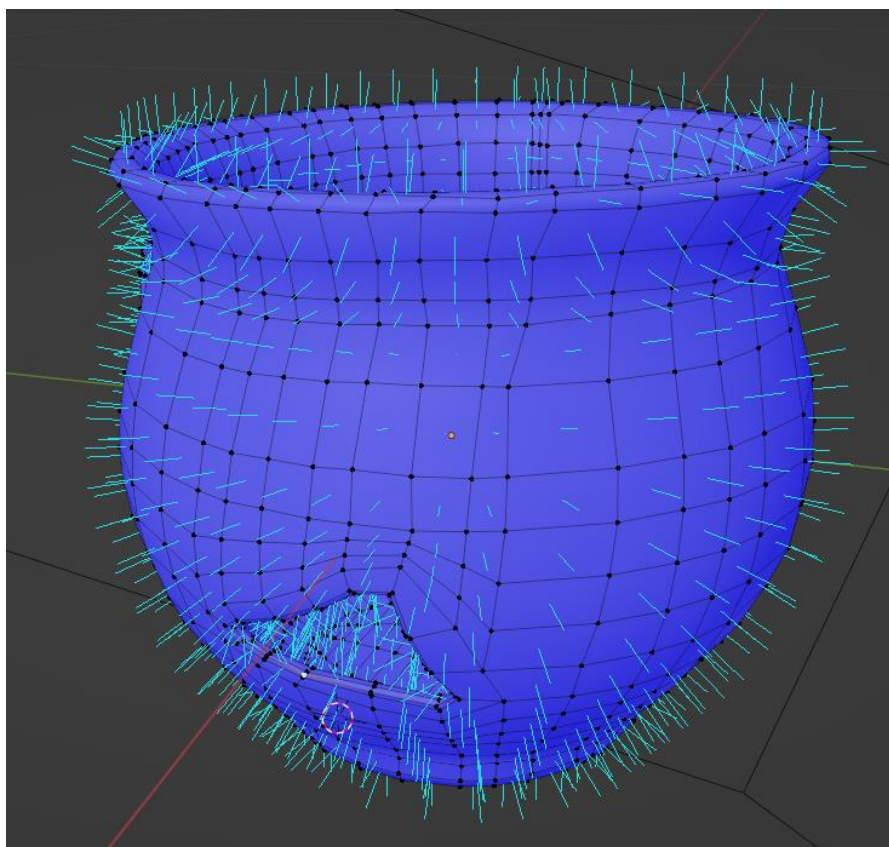


Figura 30 - Le normali rappresentate tramite una linea che è perpendicolare alla faccia e giacente nel baricentro.

²⁸⁰ Per faccia esterna si intende la superficie che si troverà in direzione della camera e/o della fonte di luce. Tale orientamento risulta molto importante al fine di evitare alcune problematiche di calcolo, visibilità e di comportamento della superficie non conformi al tipo di struttura, illuminazione e ombreggiatura presente.

La modellazione poligonale prende avvio da elementi prodotti tramite l'impiego di differenti tecniche come: l'uso di superfici parametriche o di solidi, la conversione delle NURBS in superfici, l'uso diretto di primitive poligonali, oppure, sviluppando una superficie attraverso la creazione di una serie di poligoni che si legano tra di loro, tramite la tecnica *point to point*²⁸¹. Il risultato finale risulta essere un reticolo, o *mesh*, poligonale che riproduce una superficie aperta o una forma chiusa. Uno degli aspetti fondamentali da tenere in considerazione quando si lavora con dei modelli poligonali è il livello di dettaglio (*Level of Detail*) che si vuole ottenere, cioè quanto il modello risulti definito nelle forme, soprattutto curve²⁸². Tale aspetto, quindi, incide notevolmente sul numero maggiore o minore di poligoni impiegati (*High e low poly*), che comporterà però un uso maggiore o minore della memoria del proprio dispositivo²⁸³. Inoltre, risulta indispensabile tenere presente che più il numero totale di poligoni sarà basso, più sarà semplice eseguire modifiche morfologiche della geometria generale del modello²⁸⁴. Ne deriva che, sulla base di tale considerazione si dovrà eseguire un processo che aumenta in maniera progressiva il numero di poligoni presenti, con lo scopo di arrivare al risultato finale desiderato tramite il giusto compromesso tra dettaglio e numero di elementi. Inoltre, tale processo deve essere eseguito facendo attenzione ad alcune situazioni problematiche che possono nascere durante la fase di modellazione, quali, ad esempio, la presenza di un lato o un vertice che disponga di tre o più facce collegate o la direzione delle facce delle normali che non ricadano all'esterno della superficie in maniera uniforme. Le superfici che presentino tali situazioni vengono denominate *non-manifold subdivision* e pongono delle problematiche e delle limitazioni nella costruzione poligonale e nella topologia dei modelli che devono essere risolti²⁸⁵. Per topologia si intende la disposizione, distribuzione e struttura dei vertici, lati e poligoni della *mesh*, ed è corretta quando essi sono omogenei su tutta la superficie, non vi sono vertici e/o lati duplicati, liberi o connessi con tre o più facce, e quando i poligoni della *mesh* presentano tutti la stessa forma, quadrangolare o triangolare (Fig. 31)²⁸⁶.

Una tecnica che riesce a migliorare la qualità dei modelli poligonali senza aumentarne il numero di poligoni è la *subdivision surface* (superfici di suddivisione). Tale metodologia lavora arrotondando gli angoli della *mesh* attraverso la suddivisione di tutte le superfici presenti. Assegnando maggiore o minore “peso” ai vertici della *mesh* originaria, si potrà anche controllare il grado di curvatura delle superfici²⁸⁷. Si può ottenere così una maggiore qualità dell'oggetto in termini di

²⁸¹ Limoncelli 2012, p. 125

²⁸² Luebke *et al.* 2003, pp. 8-13

²⁸³ Un aspetto che risulta condizionato anche dai limiti di calcolo dati dalla macchina impiegata.

²⁸⁴ Limoncelli 2012, pp. 125-126

²⁸⁵ Luebke *et al.* 2003, pp. 21-23; Limoncelli 2012, p. 126

²⁸⁶ Luebke *et al.* 2003, pp. 14-17

²⁸⁷ Limoncelli 2012, p. 126

risoluzione senza andare a variare la forma e rendendone più semplice la modifica. Lo svantaggio è la maggiore quantità di memoria impiegata e, quindi, il maggior tempo in fase di *rendering*²⁸⁸.

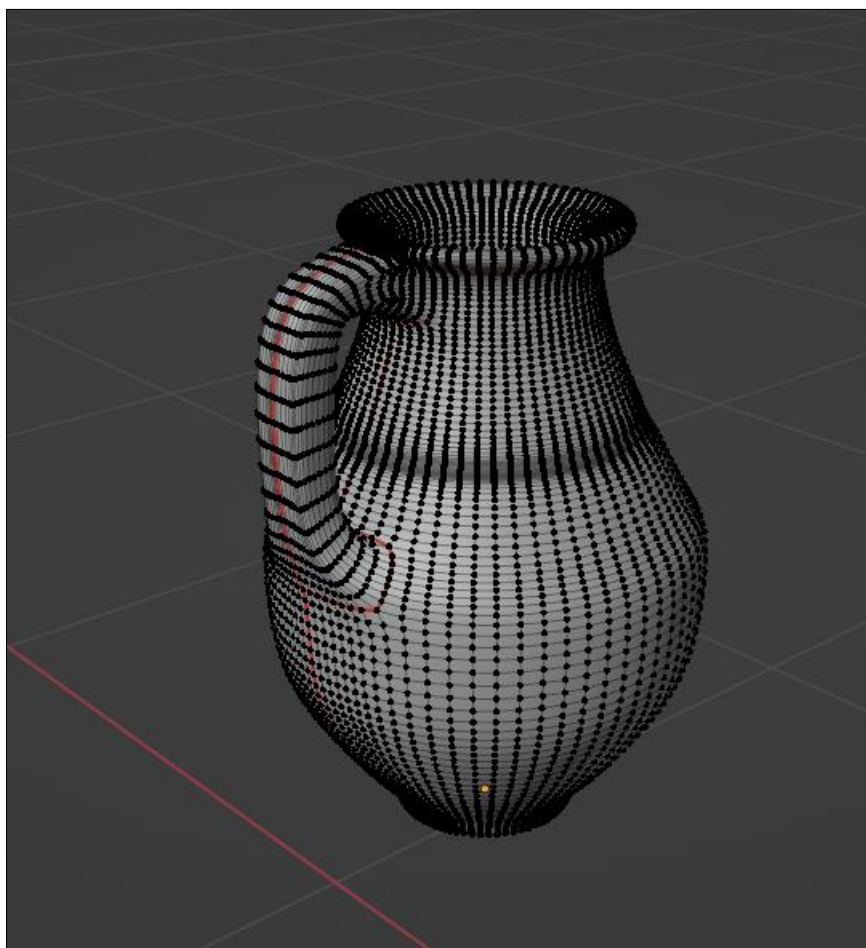


Figura 31 - Esempio di un modello tridimensionale raffigurante una brocca che presenta una topologia quad corretta.

Queste superfici possono essere ottenute attraverso dei modificatori che permettono di elaborare il risultato direttamente sul modello originario, oppure manualmente, tramite l'uso di primitive o di modelli poligonal e NURBS convertiti con la finalità di ottenere tale risultato²⁸⁹. Questa tipologia di elaborazione risulta correttamente funzionante solamente nel momento in cui vi sia a monte una topologia omogenea e quadrangolare, non siano presenti superfici *non-manifold* e le normali siano orientate tutte nella stessa direzione (Fig. 32)²⁹⁰.

²⁸⁸ Liao *et al.* 2017, pp. 1-10

²⁸⁹ *Ibidem*, pp. 15-93

²⁹⁰ Pharr, Humphreys 2010, pp. 178-179

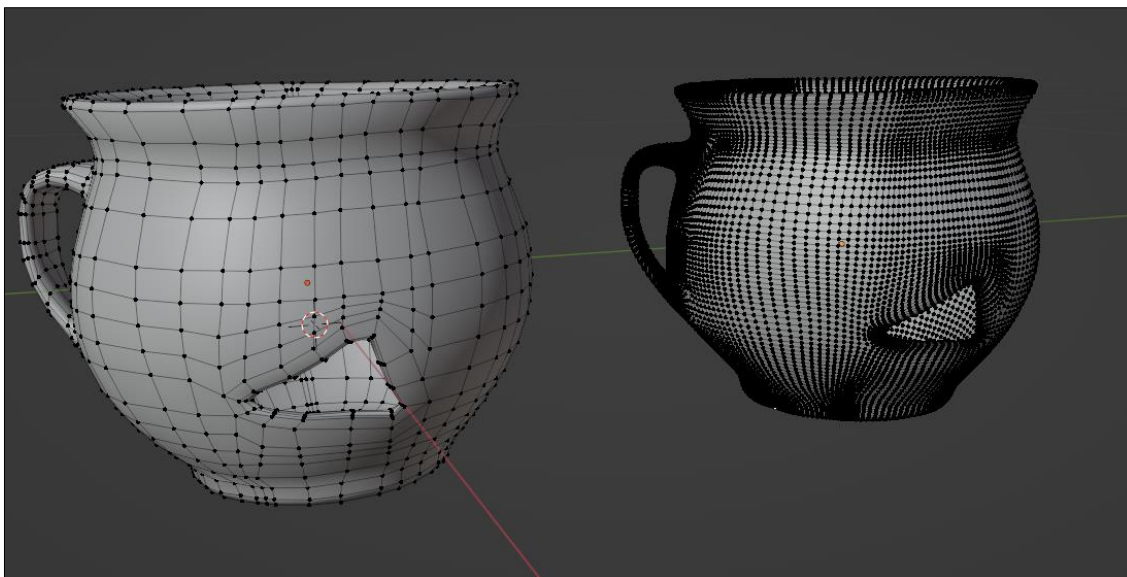


Figura 32 - Modello tridimensionale a bassa poligonazione, a sinistra, a cui è stata applicato un modificatore *subdivision surface*, a destra.

Ulteriori tecniche di modellazione 3D sono quelle legate alle superfici implicite (*implicit surfaces*) e alle *metaballs*. La prima elabora i propri risultati attraverso l'uso dei *voxel*, elementi che riescono a produrre delle volumetrie di tipo organico a partire da geometrie quali poligoni, primitive o *spline*. La seconda tecnica, invece, sfrutta le *metaballs*, elementi che presentano un nucleo centrale da cui viene sviluppata la superficie e che dispongono di un campo che le circonda di forza, o influenza, verso l'esterno. Queste possono, a differenza delle superfici implicite, essere trasformate in *mesh* poligonali (Fig. 33).

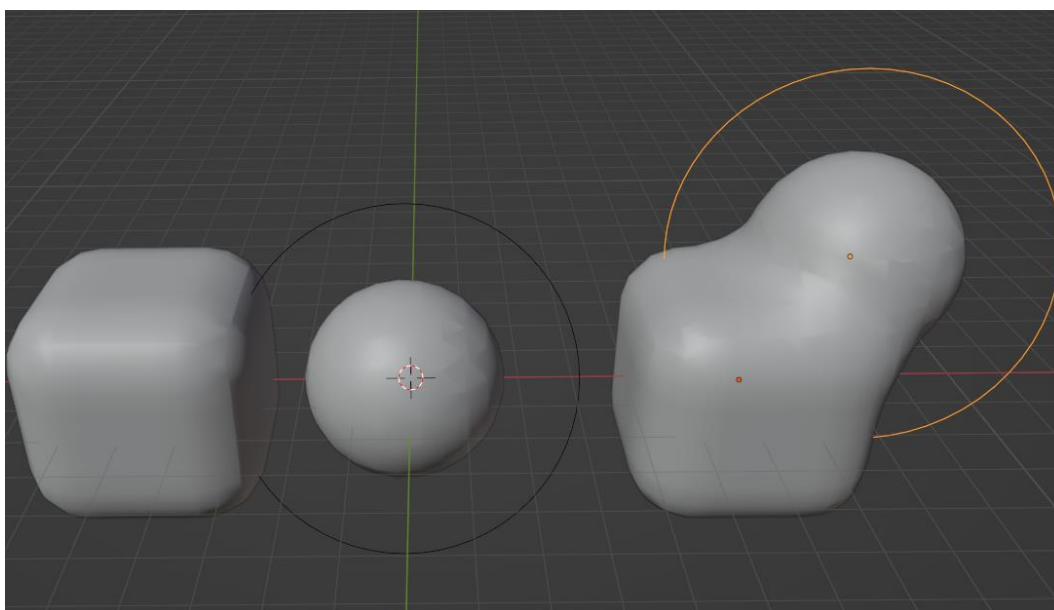


Figura 33 - A sinistra due *metaballs* troppo distanti tra loro per risentire del campo di influenza dell'altra, a destra invece risentono del campo di influenza reciproco producendo una forma più complessa ed organica.

Queste tecniche hanno lo scopo di creare modelli complessi di tipo organico. Inoltre, le *metaballs* vengono applicate anche nella modellazione procedurale, di cui si parlerà più avanti, come emettitori di particelle al fine di simulare e animare gli elementi fluidi o gassosi²⁹¹.

Un'altra tecnica di modellazione 3D è quella in cui si viene ad impiegare la *displacement mapping* (mappa di spostamento) per deformare una *mesh* attraverso il movimento dei vertici lungo la direzione della normale. Per effettuare tale processo si impiega una *texture* in scala di grigi che dispone di una quota assoluta come attributo di ogni *pixel*. Questo elemento comporterà che più la tonalità tenderà verso il bianco più si avrà un movimento maggiore e viceversa. Quindi, ne risulta che più gradazioni di grigio saranno presenti, più il risultato tenderà a migliorare nei dettagli. Inoltre, una maggiore suddivisione della superficie, su cui verrà applicata la *displacement mapping*, porterà a un miglior risultato, in quanto questa tecnica ha una influenza maggiore sui bordi dei poligoni²⁹². Questa pratica, definita anche *geometric displacement*, agendo permanentemente sugli oggetti, produce risultati che dispongono di geometrie complesse ma pesanti, in termini di memoria e numero di poligoni, e, quindi, poco gestibili (Fig. 34). Tale tipologia di modellazione, però, risulta essere alla base di un'altra tecnica, di cui si parlerà maggiormente più avanti, denominata *sub-polygonal displacement* (SPD) o *microdisplacement*, nella quale il processo di deformazione della superficie viene ad attivarsi solamente nella fase di *rendering*²⁹³. Questo algoritmo permette di disporre di modelli più leggeri e gestibili e sui quali regolare, in maniera più semplificata, il grado di suddivisione dell'oggetto e, di conseguenza, la sua resa finale.



Figura 34 - *Displacement mapping* utilizzata per la modellazione con valori di deformazione differenti (da Limoncelli 2012).

²⁹¹ Goulekas 2001, pp. 311-312; Flavell 2010, pp. 123-128; Limoncelli 2012, p. 128

²⁹² Doggett 2002, pp. 5-37

²⁹³ McQuilkin 2015, pp. 105-107

Infine, l'ultima tecnica ascrivibile alla modellazione di tipo manuale è quella che viene definita come *3D sculpting*. Essa si caratterizza per essere maggiormente dinamica in quanto permette la creazione di modelli 3D ad alta risoluzione e molto particolareggiati. Queste elaborazioni avvengono attraverso strumenti e processi simili a quelli che sono impiegati nella creazione di elementi reali in argilla e plastilina. Per arrivare a tale risultato ci si avvale di strumenti virtuali, definiti pennelli, che permettono, in base alla dimensione in *pixel* e alla “forza” prescelta, di variare, in maniera fluida, la geometria del modello aggiungendo, sottraendo, allungando, tagliando, spostando e unendo il materiale (Fig. 35)²⁹⁴.

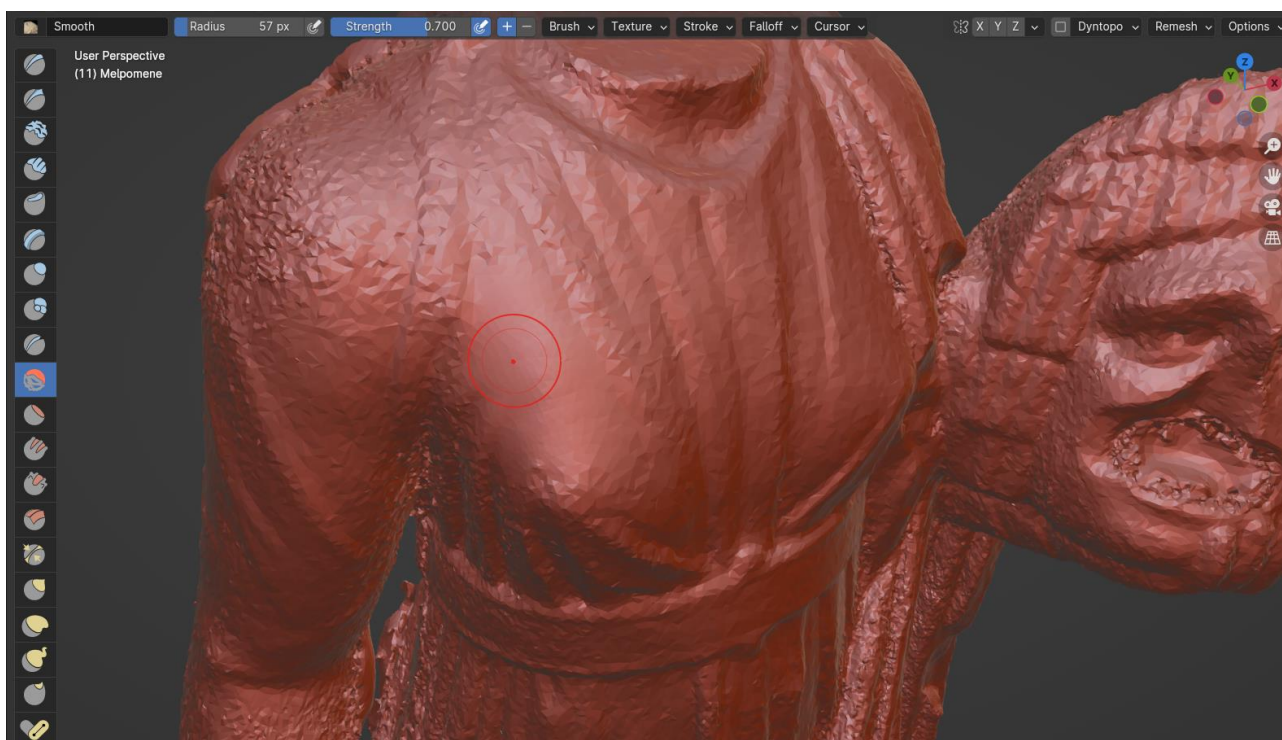


Figura 35 - Esempio di modellazione tramite tecniche di *sculpting* 3D in ambiente Blender ®.

Da ultimo, si riporta un'ulteriore tecnica di modellazione automatizzata che impiega parametri e dati numerici per creare superfici e volumi, denominata procedurale. Essa viene impiegata nella creazione di forme astratte o “frattali”, si tratta di elementi geometrici che si ripropongono identici nella struttura a differenti scale seguendo un andamento preciso, secondo il principio della *self similarity*. Ad esempio, tale tecnica viene impiegata nella creazione di vegetazione, di un terreno, o di fluidi. Per tali motivi risulta di minore impiego nel restauro virtuale, ma può essere maggiormente utilizzata nel momento in cui si intenda effettuare, successivamente agli interventi di restauro virtuale,

²⁹⁴ Flavell 2010, pp. 55-64

una modellizzazione ricostruttiva nel tentativo di effettuare una ricollocazione di un'opera, sia essa un manufatto, una statua o una architettura in una scena²⁹⁵.

3.2 Stili di visualizzazione

Gli stili di visualizzazione sono quegli elementi che permettono di visualizzare il modello che si sta elaborando attraverso differenti tipi di rappresentazioni. Ne risulta che essi siano elementi essenziali per la modellazione tridimensionale. Tra i vari stili possibili ve ne sono alcuni, di natura più complessa, che permettono, attraverso il calcolo dell'illuminazione e quindi dello sviluppo delle ombre, non solo di visualizzare la forma geometrica del modello, ma anche di percepirne il volume e caratterizzarne la superficie. Si avvalgono per questo di uno o più processi che vanno a variare la cromia della luminosità della superficie in base all'angolo di incidenza e alla distanza dalla fonte luminosa, al fine di arrivare ad un risultato che sia il più fotorealistico possibile. Nella fase di modellazione, inoltre, si vengono ad impiegare, come impostazione di *default*, due fonti di illuminazione opposte che si adattano all'area di visualizzazione dell'utente e servono a disporre di una luce uniforme per tutta la scena²⁹⁶.

Gli stili di visualizzazione sono molteplici (Fig. 36), ma i principali per i software di modellazione²⁹⁷ sono:

- *Wireframe*: che rappresenta, rendendo trasparenti le facce, gli oggetti tramite gli spigoli della geometria poligonale 3D come, appunto, fosse fatto di “filo di ferro”, tale tipo di struttura viene tal volta chiamato anche “scheletro” del modello;
- Isoparametri: che è quasi identico al *Wireframe* ma permette la visualizzazione delle linee isoparametriche che descrivono l'andamento degli oggetti NURBS;
- Linee nascoste: che permette la visualizzazione in *Wireframe* solo degli spigoli del modello che si presentino in primo piano, nascondendo gli altri, tramite il riempimento delle facce rispetto al punto di vista della camera;
- *Shading* costante: in cui gli oggetti vengono mostrati solo tramite la *texture*, senza ombre linee o vertici, appiattendolo la forma del modello. Questo tipo di visualizzazione risulta utile nel momento in cui viene associato a quello *Wireframe*.
- *Flat shading* o ombreggiatura piatta: è legato alla variazione della cromia tonale dei poligoni dell'oggetto determinata dall'angolo di incidenza e dall'intensità della fonte luminosa, risultando maggiormente efficace sugli oggetti con spigoli definiti. Una delle impostazioni che può

²⁹⁵ Limoncelli 2012, p. 130-131

²⁹⁶ *Ibidem*, p. 140

²⁹⁷ Della Calce 2005, pp. 27-29; Koenigsmark 2007, pp. 13-16; Limoncelli 2012, pp. 141-143;

essere attivata è il *Falloff*, si tratta di un effetto ottico che rende maggiormente luminosi gli oggetti posti in primo piano;

- *Gouraud shading*: si tratta della visualizzazione a più alta qualità in quanto permette la simulazione di effetti di luminosità e cromia attraverso una variazione di colore graduale su *mesh* create con un numero basso di poligoni (*Low poly*), ammorbidendo così le ombreggiature. Ovviamente, più i modelli presenteranno poligoni, qualitativamente maggiore sarà la resa finale²⁹⁸.
- *Phong shading*: tecnica che va a migliorare i risultati del *Gouraud shading* perché fornisce “una maggiore approssimazione delle sfumature, combinando la riflessione diffusa data dalle superfici ruvide con quella speculare creata dalle superfici lucide”²⁹⁹. Inoltre, tramite tale tecnica si riesce a riprodurre un effetto smussato dei modelli senza il bisogno di disporre di un maggior numero di elementi poligonali. A monte vi devono essere le normali correttamente disposte verso l'esterno perché subiscono un processo di interpolazione³⁰⁰.
- *Quick shading*: che risulta simile al *Gouraud shading* differenziandosi solo nel fatto che impiega una luce automatica invece di quella impostata dall'utente per la scena³⁰¹.

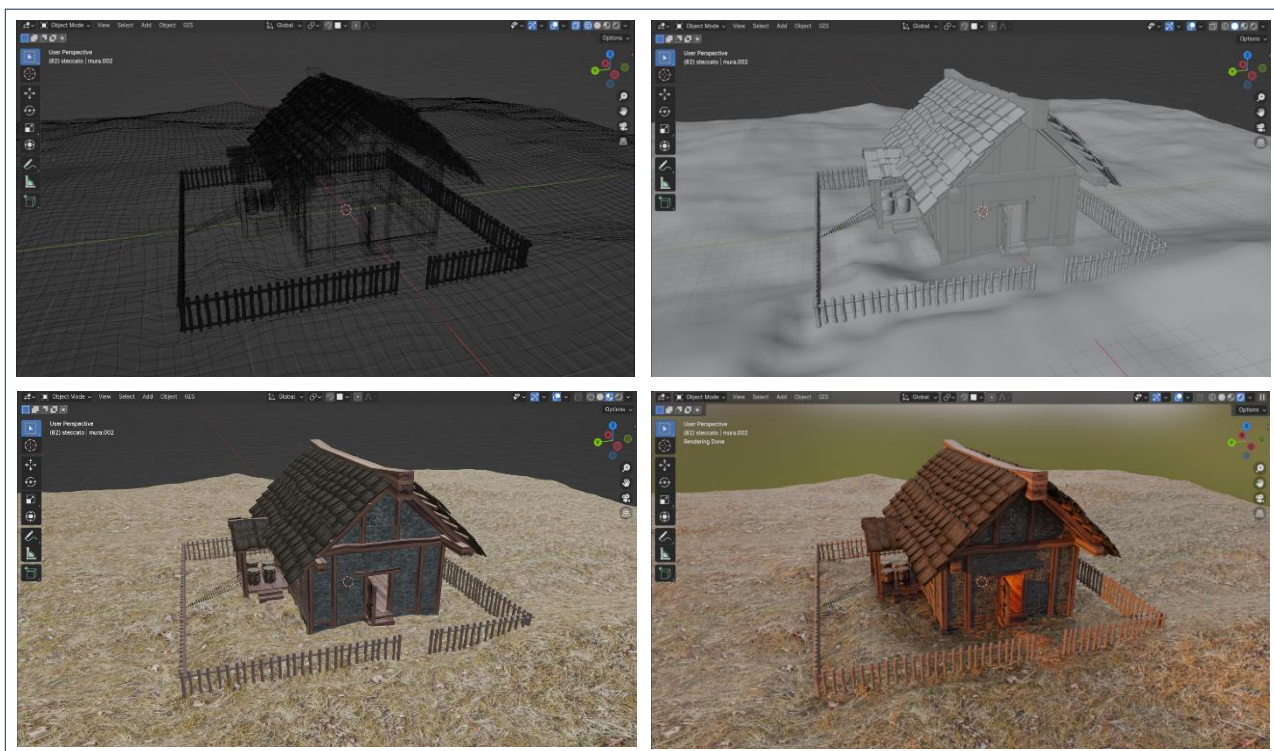


Figura 36 - Stili di Visualizzazione in Blender®: *Wireframe*, in alto a sinistra; *Solid*, in alto a destra; *Material preview*, in basso a sinistra; *Rendering*, in basso a destra.

²⁹⁸ Forte, Beltrami 2000, p. 276

²⁹⁹ Limoncelli 2012, p. 143

³⁰⁰ Forte, Beltrami 2000, p. 276

³⁰¹ Koenigsmark 2007, p. 16

3.3 Texture mapping

Con il termine *texture mapping* si definisce il processo con cui si assegnano i materiali alle superfici della *mesh* ai fini di una maggiore fotorealisticità. I materiali di base sono legati ad un colore assegnato alla superficie oppure ad una o più *texture*, che in alcuni casi specifici può essere procedurale³⁰². Ogni materiale, inoltre, presenta dei parametri, definiti canali, che possono essere aggiunti, rimossi o modificati in base alle impostazioni desiderate e, una volta combinati, permettono di aumentare la qualità di dettagli presenti sulle superfici³⁰³.

Le *texture*, o anche *texture bitmap*, sono immagini a tutti gli effetti e quindi risentono di tutti quegli aspetti che ne possono ridurre la qualità, quali: il livello di risoluzione, i metodi e la profondità di colore, ma anche il tipo di compressione e il relativo formato utilizzato. Tali tipologie di immagini sono oggetti bidimensionali che vengono associati ad un elemento tridimensionale, quindi, dispongono solamente di due coordinate che, convenzionalmente, vengono definite dalla lettera “U” per l’asse orizzontale e dalla lettera “V” per l’asse verticale. L’applicazione di queste immagini avviene attraverso l’attribuzione di una coordinata UV ad ogni singolo vertice del poligono che corrisponde ad una precisa posizione sull’immagine stessa e, quindi, ad uno specifico *pixel* o a più *pixel*. Questo tipo di attribuzione risulta efficace per elementi come primitive e NURBS, ma non viene applicata alle *mesh* poligonali sulle quali si preferisce non fissare determinati *pixel* ai vertici dell’oggetto, ma impiegare delle proiezioni che possono essere cubiche, cilindriche, sferiche, lineari, ecc. Tramite tale soluzione, non essendoci vincoli tra i vertici della geometria e la *texture*, la proiezione può essere modificata tramite i settaggi di scala, rotazione e spostamento. Inoltre, essa permette anche di associare una *texture* o più *texture* allo stesso modello, aspetto che risulterà di fondamentale importanza per il corretto impiego delle texture PBR (*Physically Based Rendering*), o solamente ad una parte di esso³⁰⁴. Un’ulteriore tecnica di mappatura, nonché una delle maggiormente impiegate nella modellazione tridimensionale, perché permette di suddividere la superficie tridimensionale e proiettarla su di un piano bidimensionale, è quella dell’*Unwrapping*, letteralmente “scucitura”. Tramite questo processo le linee principali del modello vengono marcate, manualmente o automaticamente dal software, al fine di identificare le linee di “scucitura” con cui “aprire” la superficie e riproiettarla, sopra la superficie 2D della *texture*, seguendo le coordinate UV. In questo modo avviene una proiezione che lega la *texture* o le *texture* alle superfici e, di conseguenza, una maggiore precisione nel posizionamento del materiale (Fig. 37)³⁰⁵.

³⁰² Nieves 2007, pp. 108-109

³⁰³ Limoncelli 2012, p. 143

³⁰⁴ Gordon 2005 pp. 283-305; Limoncelli 2012, pp. 143-144

³⁰⁵ Flavell 2010, pp. 97-107

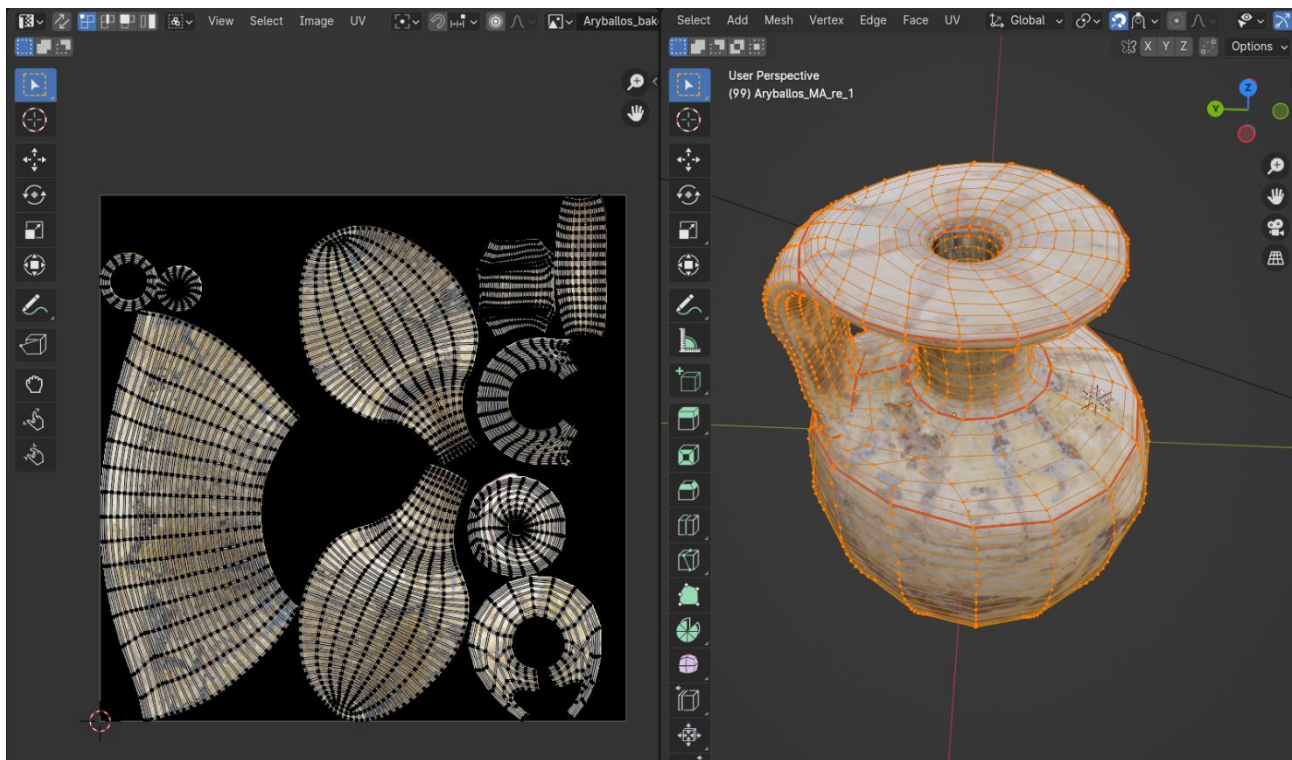


Figura 37 - Mappa UV e processo di *Unwrapping* di un modello 3D di un Aryballos proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone.

Un'altra tipologia di texture, impiegate nei processi di *mapping*, sono quelle procedurali, che sono create direttamente dal software prescelto seguendo degli specifici algoritmi e dei parametri. Queste sono maggiormente utilizzate nella creazione di *texture* naturali e in particolari effetti di invecchiamento, sporco, ruggine, acqua e fuoco di alcuni materiali. Diversamente dalle *texture bitmap*, esse non sono legate ad immagini *raster* e tengono conto di elementi quali la direzione delle normali, la fonte di luce e la sua intensità e la posizione della camera. Le *texture* procedurali, inoltre, sono sia bidimensionali, e quindi, possono essere associati alle superfici come materiali, sia tridimensionali, così da poter considerare anche il volume dell'oggetto al fine di produrre degli effetti volumetrici 3D, indipendentemente dalla forma del modello stesso e dalla sua proiezione della *texture*. Le *texture* procedurali, quindi, non vengono applicate, se non in rari casi, nelle elaborazioni di restauro virtuale 3D, ma risultano importanti in eventuali fasi successive di ricostruzione di una scena³⁰⁶.

Un'ulteriore e importante tipologia di *texture*³⁰⁷ è quella che viene definita PBR (*Physically Based Rendering*). Una tipologia di *texture* che sfrutta un insieme di mappe immagine per gestire i diversi parametri dello specifico materiale prescelto.

³⁰⁶ Ebert *et al.* 1994, pp. 5-192

³⁰⁷ Queste risultano le più impiegate sia nel campo della modellazione e animazioni sia in quello dei videogiochi perché sono compatibili con la maggior parte dei software proprietari e open-source in circolazione. Dinur 2022, p. 147

Le *texture* PBR risultano essere composte dalle seguenti mappe principali (Fig. 38)³⁰⁸:

- *Base Color* o *Diffuse* o *Albedo Map* (Mappa del colore base o diffuso): Si tratta dell'immagine che definisce il colore e tutte le caratteristiche di base del nostro materiale, che sia di tipo dielettrico o metallico³⁰⁹. Si tratta quindi di una vera e propria fotografia del materiale che non presenta solamente un colore monocromatico ma si caratterizza per definirne l'aspetto finale, senza però presentare caratteristiche di rugosità, riflessione o elevazione della superficie.
- *Roughness Map* (Mappa di rugosità): Si tratta di una immagine in scala di grigi che definisce quali siano le parti della *texture* che presentino maggiore rugosità e quali meno. Questo incide sull'effetto della superficie che sarà più lucida dove i valori di *roughness* sono minori e, viceversa, più opachi dove i valori saranno più alti.
- *Metallic Map* (Mappa metallica o anche detta *Metalness*): è una immagine in scala di grigi che, nei materiali metallici o che presentino parti metalliche, definisce quali siano le aree con proprietà metalliche. Per arrivare a tale risultato le aree della mappa più tendenti al bianco saranno maggiormente metalliche e, viceversa, quelle più nere meno, o quasi per nulla, metalliche. Risulta molto utile nel definire aree dove vi siano, ad esempio, parti arrugginite al fine di ridurre od eliminare l'effetto di riflessione metallica di quell'area.
- *Bump* o *Normal Map* (Mappa delle "protuberanze" o delle normali): Si tratta di una *texture* RGB che rappresenta un rilievo tridimensionale della superficie, per caratterizzarne le aree andando a delineare le zone che risultino in rilievo rispetto alla superficie. Questa mappa non va a modificare la geometria reale del modello ma crea, in fase di *rendering*, degli effetti di microrilievo, attraverso lo spostamento dell'inclinazione delle normali sulla superficie, andando a creare un risultato realistico.
- *Ambient Occlusion Map* (Mappa di occlusione ambientale): Si tratta di una *texture* in scala di grigi che definisce le aree che presentano un'occlusione ambientale maggiore, definite dai *pixel* più scuri, e quelle che non la presentano affatto, caratterizzate da *pixel* più chiari. Tramite questa mappa, quindi, si vanno a definire maggiormente le aree che presentino angoli e fessure attraverso un effetto che scurisce il colore di base nelle zone più occluse. Questa *texture* viene impiegata principalmente nel momento in cui si vogliono alleggerire i processi di calcolo della luce del *rendering*, venendo molto impiegata ad esempio nei videogiochi.

³⁰⁸ Dinur 2022, pp. 147-154

³⁰⁹ Nel campo del *texturing* si intendono per materiali dielettrici tutti i tipi di materiali non metallici e, ovviamente, metallici tutti quelli che lo sono. Tale distinzione nasce dalla differenza di comportamento delle due *texture*: nel primo caso la *texture* rappresenta il colore che viene diffuso tramite la riflessione, definendo quali onde vengono assorbite e quali riflesse; nel secondo caso invece definisce quale colore viene riflesso specularmente. Dinur 2022, pp.148-149

- *Displacement* o *Height Map* (Mappa di spostamento o delle altezze): Si tratta di una immagine in scala di grigi che va a definire le aree più in rilievo, maggiormente tendenti al bianco, rispetto a quelle più depresse, che tenderanno, al nero, mentre si avrà un appiattimento nelle zone tendenti ai mezzitoni, quindi, a metà tra i valori di bianco e nero. A differenza delle *Bump/Normal Map*, questo tipo di mappa modifica la geometria di partenza, per cui maggiore sarà il numero di poligoni e suddivisioni presenti, più il risultato sarà definito. Tale tipologia di mappa viene, quindi, maggiormente impiegata quando il risultato finale del rilievo è più accentuato, ma può essere anche utilizzata insieme alla *Normal/Bump Map* per arrivare ad effetti più complessi e dettagliati.

- *Transparency Map* (Mappa di trasparenza): Si tratta di una immagine in scala di grigi che permette di definire le aree maggiormente opache, caratterizzate da *pixel* tendenti al bianco, rispetto a quelle trasparenti, identificate dai *pixel* che virano verso il nero, attraverso il livello di trasmissione della luce del materiale, più tale valore sarà basso, più il materiale sarà trasparente. La mappa di trasparenza non ha effetto sul livello di riflessione e sulla *Bump/Normal Map*, permettendo così ad un materiale trasparente, quale può essere il vetro, di essere riflettente e presentare asperità sulla superficie.

- *Opacity Map* (Mappa di opacità o Alpha): Simile alla mappa di trasparenza, si tratta di una immagine in scala di grigi che definisce le aree trasparenti, più tendenti al nero, da quelle visibili, che virano verso il bianco. È una mappa, quindi, che non considera il livello di trasmissione del materiale ma definisce le aree visibili da quelle non visibili, in cui il valore di opacità corrisponde a zero. Viene spesso impiegata per creare oggetti come recinzioni, reti, foglie e ramoscelli, ciglia senza doverne modellare i dettagli o come maschera di ritaglio per materiali complessi.

Tutti i materiali, quindi, che siano *texture* singole o PBR, presentano parametri specifici, o canali, che combinati, tramite gli *shader*³¹⁰ (Fig. 39), determinano il comportamento fotorealistico della *texture* nella fase di *rendering*.

I principali canali, presenti negli *shader* e nei programmi di modellazione, sono³¹¹:

- Colore (*Color*): che, come dice il nome, definisce la cromia di base del materiale determinato da un valore RGB o da una *texture*;

³¹⁰ Per *Shader* si intendono delle funzioni che combinando i diversi canali permettono di simulare e calcolare in maniera realistica la quantità di illuminazione di ogni punto sulla superficie del modello. Esistono moltissimi tipi di *shader* differenti, come ad esempio il BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), che impiegati da soli o in gruppi e/o tramite l'uso delle *texture* PBR permettono di raggiungere un aspetto fotorealistico dei materiali, oppure simulare degli effetti quali liquidi, fiamme e gas volumetrici o capelli e peli. Per maggiori informazioni si guardi: Dinur 2022, pp. 133-145

³¹¹ McQuilkin, Powers 2011, pp. 136-141; Limoncelli 2012, pp. 144-146; Dinur 2022, pp. 132-160

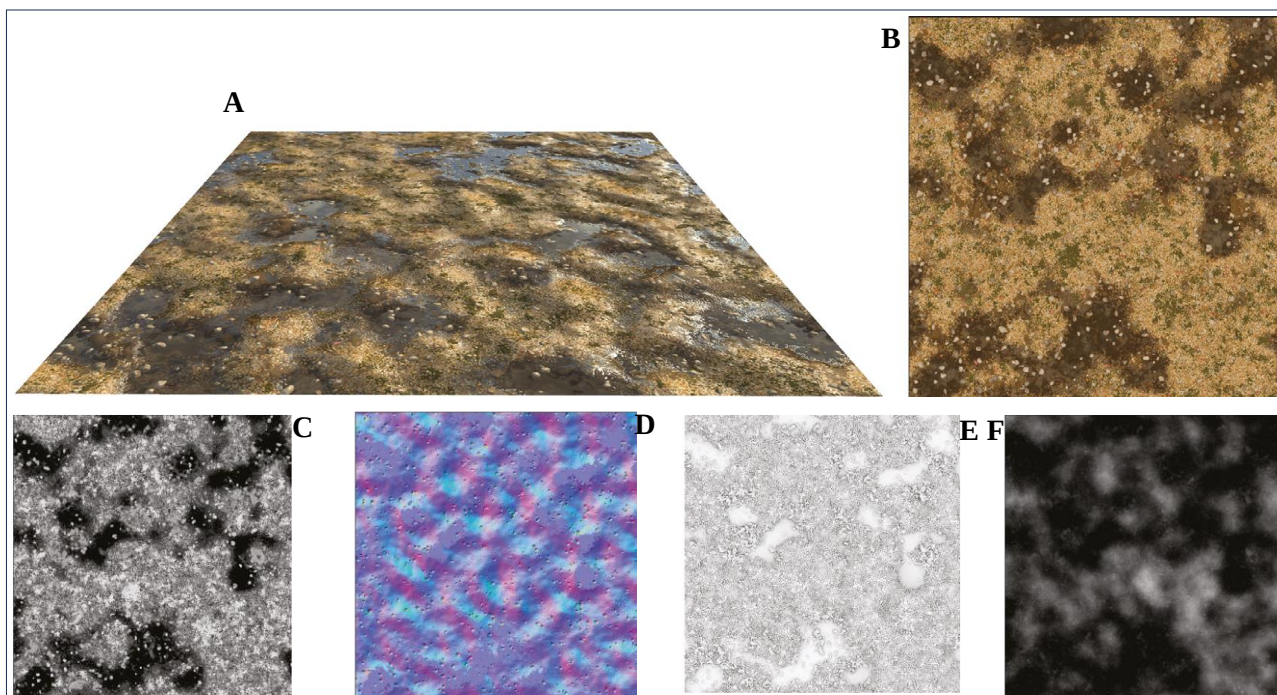


Figura 38 - Esempio di texture PBR, con in alto il risultato finale in fase di *rendering* dell'unione delle varie mappe (A), (B) la *diffuse map*, (C) la *roughness map*, (D) la *normal map*, (E) l'*ambient occlusion map*, (F) la *displacement map* (da Dinur 2022).

- Diffusione (*Diffusion*): che attraverso l'impiego di una *Diffusion map* in scala di grigi, definisce delle aree specifiche più chiare e/o più scure del canale Colore;
- Luminanza (*Luminance*): che tramite una *Luminance map* definisce le aree dell'oggetto che sono luminescenti per sé stesse, senza un'illuminazione esterna;
- Trasparenza (*Opacity*) o Canale Alfa (*Alpha Channel*): in cui lavorando sui parametri in percentuale, dove 0% indica la massima trasparenza e 100% la minima, si può ridurre o aumentare l'opacità. È possibile anche utilizzare una *opacity map*, attraverso un'immagine in scala di grigi in cui i *pixel* più chiari saranno maggiormente trasparenti e viceversa, quelli più scuri lo saranno meno. La trasparenza, inoltre, gestisce anche l'indice di rifrazione del materiale, cioè quanto un fascio di luce che attraversa il materiale trasparente viene deviato producendo una distorsione ottica, e la riflessività legata ai principi della legge di Fresnel³¹². Ogni materiale presenta determinati indici di rifrazione e riflessività che devono essere impostati. Inoltre, si possono aggiungere i valori di colore, distanza di assorbimento e dispersione della luce con cui si vanno a identificare i livelli di sfocatura;

³¹² I principi della legge di Fresnel mettono in correlazione l'angolo di visuale con l'intensità delle riflessioni speculari, in cui più l'angolo tenderà ad essere ampio e parallelo alla superficie più la riflessione sarà forte e viceversa. Questo permette ad esempio di simulare l'effetto dell'acqua di uno stagno calmo, dove se guardiamo ai nostri piedi, quindi perpendicolari all'acqua, vedremo anche il fondale, mentre spostando lo sguardo verso l'orizzonte si avrà un effetto di opacizzazione e riflessione che ci impedirà di vedere il fondale. Dinur 2022, p. 95-96

- Riflessione (*reflection*): che determina la capacità di riflessione del materiale in base alle sue superfici. Per questo si possono impiegare o un colore o una *reflection map* in scala di grigi in cui i *pixel* bianchi avranno maggiori proprietà riflettenti e viceversa.
- Rilievo (*Height*): che impiega una *Height map* in scala di grigi, in cui i *pixel* chiari identificano le aree a maggior depressione e quelli scuri l'opposto, per produrre su una superficie liscia effetti di rilievo tridimensionale. Attraverso questa mappa vengono condizionate le inclinazioni dei vettori normali in base alla disposizione nell'immagine del bianco, dei mezzitoni e del nero.
- *Normal* o *Bump Map*: Un canale che ha le stesse proprietà e funzioni del canale rilievo non impiega un'immagine in scala di grigi, bensì ne utilizza una in RGB, ottenendo risultati più fotorealistici³¹³.
- Nebbia (*Fog*): Un canale che simula la presenza di nebbia o gas nella scena volumetricamente all'interno di un oggetto chiuso tramite un effetto traslucido;
- Specularità (*Specular*): permette la regolazione della “riflessione della luce tra l'angolo generato da un singolo raggio incidente in entrata con la normale di superficie dell'oggetto che genera un solo raggio riflesso in uscita”³¹⁴. Questa tecnica è molto impiegata al fine di rendere i materiali metallici o plastici perché lucidi.
- Rugosità (*Roughness*): permette la regolazione della opacità del materiale rendendolo più o meno rugoso, in contrapposizione con la specularità³¹⁵.
- Alone (*Halo*): permette la creazione di un effetto di alone intorno al modello in fase di rendering.

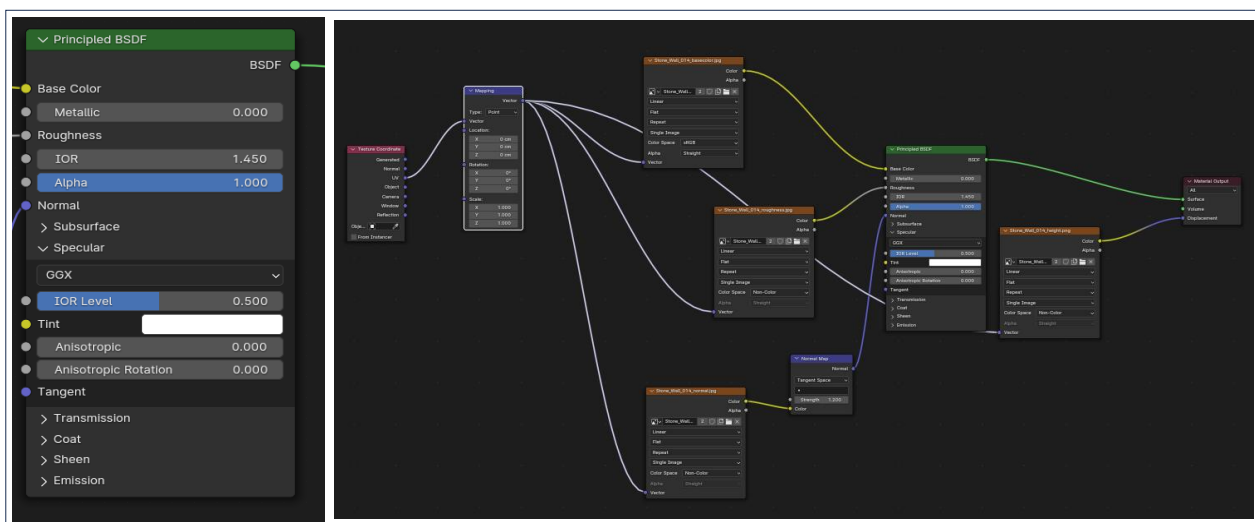


Figura 39 – A sinistra lo *shader principle* BSDF, che raggruppa diversi canali di regolazione, e, a destra, i vari *shader* che compongono un singolo materiale PBR.

³¹³ Dinur 2022, p. 151

³¹⁴ Limoncelli 2012, p. 146

³¹⁵ Dinur 2022, pp. 136-137

Come sopra accennato, un ulteriore aspetto fondamentale per il *texture mapping* sono le mappe di proiezione che identificano come le *texture* devono essere associate con le superfici³¹⁶. La scelta del tipo di proiezione è collegata alla superficie stessa e alla sua geometria.

Tra le varie disponibili per ogni software, quelle maggiormente impiegate sono³¹⁷:

- Mappatura UVW: nella quale la superficie viene legata ai *pixel* della *texture* sulla base delle coordinate UVW dei suoi vertici. In questo modo tutte gli spostamenti e le modifiche della geometria comportano anche uno spostamento della *texture*.
- Cubica: la *texture* viene proiettata sulle facce di un cubo.
- Sferica: la *texture* viene proiettata su una sfera, non è proiettabile su una superficie piana mentre viene distorta se applicata ad un cilindro.
- Cilindrica: la *texture* viene proiettata su un cilindro, non si può adattare ad una superficie piana e viene distorta se associata ad una sfera. Essa viene proiettata solo sulla parte cilindrica del cilindro, mentre non vengono considerate le facce superiori e inferiori circolari.
- Piatta: la *texture* viene proiettata direttamente sulle superfici secondo una direzione planare, solo per superfici piate.
- Frontale: la proiezione della *texture* avviene frontalmente rispetto alla visuale della camera in quel momento.
- Camera mapping: la proiezione della *texture* parte direttamente dalla visuale della camera. Ed è soprattutto impiegata nel *texturing* di oggetti complessi quali, ad esempio, quelli rupestri.

3.4 Il rendering e le fonti di luce

Con il termine *rendering* si intendono tutta una serie di processi atti alla generazione di un'immagine a partire da una scena digitale che presenta, al suo interno, diversi modelli digitali e, al contempo, dispone di parametri che simulano differenti sistemi di illuminazione e ripresa. Per arrivare ad elaborare tale risultato i software di modellazione si avvalgono di specifici programmi che possono essere sia integrati sia esterni. Questi sono strettamente dipendenti dalla quantità e qualità delle informazioni di *input* e *output* della scena. Infatti, tale aspetto incide sulle tempistiche di elaborazione che possono andare dai pochi secondi, fino a diversi giorni. I software di *rendering* impiegano a tali scopi differenti tipologie di algoritmi, tra di essi i più utilizzati risultano essere:

³¹⁶ Riddell *et al.* 2006, p. 383

³¹⁷ Kundert-Gibbs, Lee 2004, pp. 661-666; Riddell *et al.* 2006, pp. 383-384; McQuilkin, Powers 2011, p. 137; Limoncelli 2012, p. 147

- Lo *scanline renderers* (anche chiamato *Rasterized Rendering*), che comprende un insieme di algoritmi atti alla determinazione delle superfici, o oggetti, che risultano invisibili, a partire dal punto di vista della ripresa, al fine di eliminare il calcolo di tali elementi dal computo finale del *rendering*. Questo tipo di elaborazione viene eseguito tramite l'algoritmo di *z-buffering* (buffer di profondità) che, attraverso l'impiego di coordinate tridimensionali, riesce a calcolare e variare la profondità d'immagine al fine di escludere, nella fase di renderizzazione, tutti i *pixel* appartenenti ad elementi che non sono visibili nella scena, in quanto coperti da altri oggetti o dalle superfici delle *mesh* stesse. Questa tipologia di renderizzazione calcola per ogni *pixel* il colore di *output* determinato dallo *shader* associato alla superficie. Lo *shader* determina quali siano le proprietà del materiale e la quantità di luce che colpisce i vari punti ricadenti nel determinato *pixel*. Tale processo avviene per ogni *pixel* dell'immagine e, a differenza di quello che si potrebbe pensare, è il sistema più veloce e leggero, in termini di memoria, per effettuare i processi di *rendering*³¹⁸;

- L'altra tipologia di algoritmi di renderizzazione è il *raytracing*, in grado di simulare il movimento dei raggi di luce naturale prodotti da una fonte di emissione luminosa. Quando il tragitto dei raggi di luce viene interrotto dall'incontro con una superficie, contemporaneamente si andranno a produrre delle ombre. Inoltre, in base alla tipologia di materiale simulato, vi è una parte di raggi che verrà assorbita, mentre l'altra parte verrà riflessa e/o rifratta seguendo "l'angolo di incidenza della luce"³¹⁹. Se, invece, si tratterà di elementi con superfici parzialmente o del tutto trasparenti, questi raggi saranno canalizzati internamente seguendo un senso diametralmente opposto rispetto a quello originario. I raggi rifratti e/o riflessi a loro volta, colpendo altre superfici, verranno assorbiti, riflessi e rifratti. Tale processo continuerà finché i raggi non ritorneranno alla camera favorendo la visione, e conseguentemente l'elaborazione, della scena. Il *raytracing*, quindi, riesce a calcolare sia l'intero percorso della luce, dalla fonte di illuminazione alla camera, sia le varie interazioni che avvengono tra gli oggetti e i raggi luminosi nella scena;

- Similmente si verifica il funzionamento degli algoritmi di *raycasting* che semplificano, in parte, i processi del *raytracing*, in quanto impiegano per il calcolo i raggi luminosi che iniziano il loro percorso non dalla fonte di luce, ma dalla camera;

- Infine, vi è il *path tracing* un ulteriore insieme di algoritmi di *rendering* della famiglia del *raytracing* che, attraverso il cosiddetto approccio Monte Carlo, permette di velocizzare i processi computazionali attraverso un campionamento randomico dei raggi luminosi in relazione ai parametri di importanza e qualità decisi dall'utente. Maggiore sarà il numero di campionamenti assegnato,

³¹⁸ Questa tipologia di rendering è quella più impiegata nel mondo dei *game engine*, perché permette di non appesantire i processi di calcolo delle luci nella scena favorendo una maggiore fluidità dei fotogrammi, e quindi degli scenari in movimento, ad una risoluzione qualitativamente alta. Dinur 2022, p. 116

³¹⁹ Limoncelli 2012, p. 149

maggiore sarà la qualità, ma a discapito dei tempi di renderizzazione che saranno più elevati e viceversa (Fig. 40)³²⁰.



Figura 40 - Rendering del medesimo soggetto, in ambiente Blender®, con algoritmi *rasterized rendering* (motore di rendering Eevee), sopra, e *raytracing* (motore di rendering Cycles), sotto.

³²⁰ Limoncelli 2012, pp. 148-149; Dinur 2022, pp. 120-121; Questo tipo di approccio apre il discorso ai motori di rendering definiti “*Biased*” (parziale), in cui avviene questo approccio di campionamento randomico, e “*Unbiased*” (imparziale), dove viceversa avviene tutto il calcolo di ogni percorso di raggio luminoso. L’utilizzo di uno o l’altro sistema dipende dal tipo di scena, dall’hardware impiegato, dai tempi necessari e soprattutto dalla qualità finale del risultato che si vuole ottenere. Infine, si deve considerare che, per quanto possano essere categorizzati come *Unbiased*, tutti i motori di rendering alla fine presentano una approssimazione più o meno evidente legata ai limiti dei calcoli possibili. Per maggiori informazioni si vedano Gabellone 2022, pp. 30-31; Dinur 2022, pp. 121

Gli algoritmi di renderizzazione non sono, però, l'unico elemento necessario all'elaborazione di un *rendering* da una scena tridimensionale. Uno degli aspetti più importanti è, come già affermato più volte, la camera. Le camere, o *physically based camera*, sono degli oggetti che riescono a simulare tutte le componenti di una reale videocamera, permettendone, quindi, la regolazione di tutti i parametri quali, ad esempio, velocità dell'otturatore e apertura del diaframma. Infatti, uno degli effetti maggiormente impiegati, che nasce dalla simulazione della velocità di apertura dell'otturatore, è il *motion blur* (l'effetto movimento), che riproduce un effetto di sfocatura in un'animazione nel momento in cui o si dispone nella scena di un oggetto che si muove molto velocemente (*object motion blur*, OMB), o è la camera che esegue uno spostamento rapido (*scena motion blur*, SMB). Un altro effetto simulato, che in questo caso riproduce il prodotto risultante dalla maggiore o minore apertura del diaframma, è quello della *depth of field* (profondità di campo) che permette di sfuocare le varie parti dell'immagine in base a dei punti di fuoco prescelti nella scena (Fig. 41). Inoltre, possono essere inseriti nella ripresa anche altri effetti come quelli dovuti al riflesso sulla lente della luce (*lens flares*). Tale soluzione riesce a simulare gli effetti, ad esempio, di una fonte di luce troppo luminosa, così da far risultare uno sbiadimento dell'immagine, tramite un effetto nebbia che ne riduce contrasto e saturazione dei colori o, ancora, permette di simulare gli effetti dei raggi del sole contro l'obiettivo della camera³²¹.

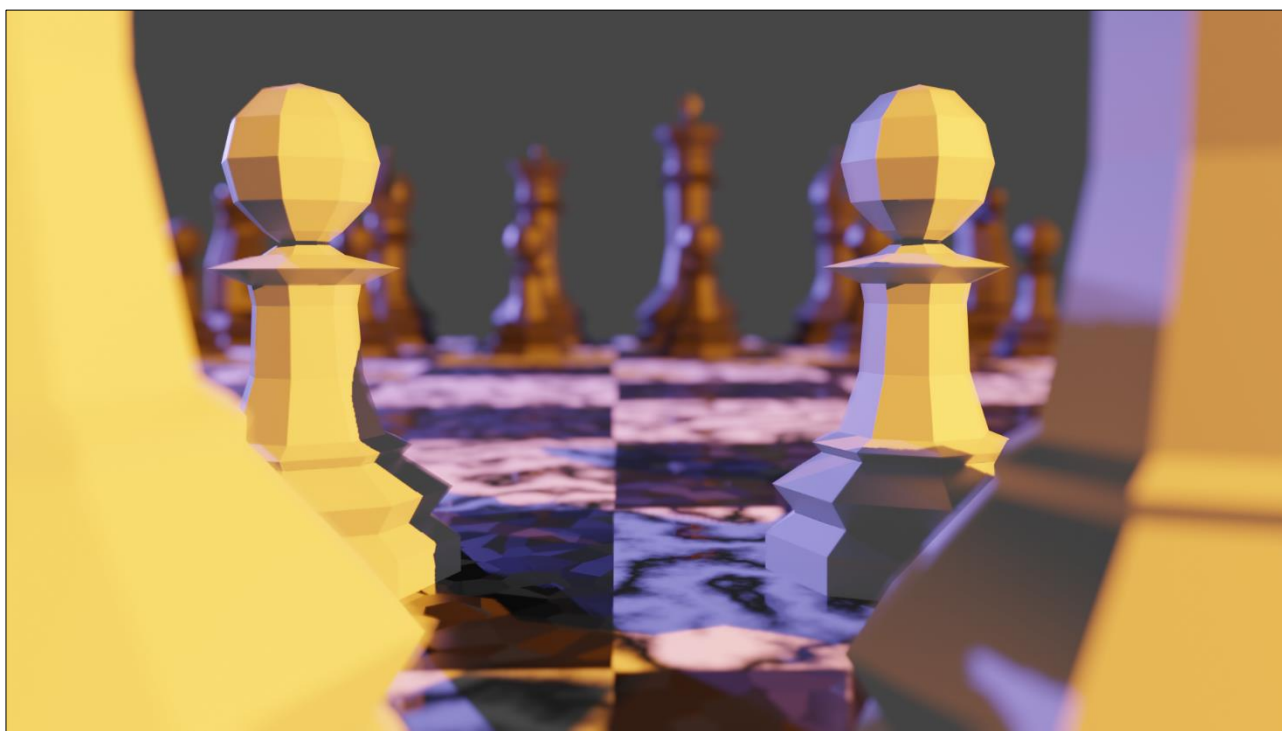


Figura 41 - Esempio di simulazione in fase di rendering della *depth of field* per mettere in risalto i pedoni nella scacchiera.

³²¹ Dinur 2022, pp. 99-111

Oltre alla camera, vi sono ulteriori elementi che sono imprescindibili ai fini di una corretta renderizzazione della scena. Questi oggetti e parametri possono essere sintetizzati in: un piano posto lungo l'asse orizzontale che possa fungere da elemento di posizionamento per tutti gli altri; un elemento sferico con raggio infinitamente grande, definito Cielo, che abbia come centro il punto di origine in coordinate assolute del sistema e che sia texturizzabile attraverso l'uso di mappe di proiezione di tipo sferico o cubico; possibilmente, uno sfondo, come ad esempio un'immagine paesaggistica adattata alla scena; devono essere inseriti, quando necessari, effetti di *distance fog* che simulino, attraverso l'inserimento di una nebbia sempre più densa, gli effetti naturali di diffrazione degli oggetti lontani dall'osservatore, secondo il quale principio all'aumentare della distanza si avrà una visualizzazione meno nitida degli oggetti³²².

I processi di *rendering* richiedono un ulteriore elemento che deve essere presente nella scena, l'illuminazione. Un parametro senza il quale non potrebbe avvenire alcun tipo di elaborazione.

L'obiettivo finale di riprodurre fotorealisticamente una scena deve, quindi, passare imprescindibilmente attraverso i processi che simulano la luce naturale e il suo comportamento fisico. Questi modelli di illuminazione vedono, nelle casistiche più semplificate, l'uso di una luce diretta. Tramite tale fonte l'emissione luminosa risulta direzionata solo ed esclusivamente verso gli oggetti, che escludendo parte di questa luce, producono ombre. La problematica di tale soluzione è che gli oggetti nascosti dagli elementi in primo piano, non ricevendo totalmente l'emissione luminosa, resteranno in ombra. Per ovviare a questa problematica, che porterebbe ad un risultato ovviamente innaturale, alla scena viene aggiunta una illuminazione indiretta generata dalla riflessione della luce da un oggetto ad un altro. L'inserimento di questa seconda tipologia di illuminazione attiva un effetto, legato al movimento dei raggi luminosi derivanti dalle riflessioni tra oggetti, che sviluppa quella che viene denominata illuminazione globale (*Global illumination*) e, al contempo, definisce il valore colorimetrico degli oggetti stessi³²³.

Nei software di renderizzazione, i processi di illuminazione diretta sono prodotti tramite l'addizione dell'algoritmo di riflessione diffusa con quello di riflessione speculare.

Il primo, definito anche riflettanza lambertiana, equivale al modello di riflessione omnidirezionale del fascio luminoso in maniera ugualitaria dall'oggetto, mentre il secondo corrisponde al modello della riflessione della luce su una superficie speculare, quindi, come se si simulasse uno specchio.

³²² Limoncelli 2012, p. 151

³²³ *Ibidem*, pp. 151-152

Per rendere fotorealistica la scena serve, come sopra menzionato, l'inserimento di una illuminazione di tipo indiretto e, a tale scopo, oltre a questi due algoritmi legati alla luce diretta, viene aggiunto il calcolo puntuale della cromia delle superfici, attraverso il modello di riflessione ambientale Phong³²⁴.

Oltre a questi modelli, però, per arrivare alla creazione di una corretta illuminazione della scena devono essere inseriti degli oggetti che abbiano la funzione di fonti di luce e altri elementi che permettano la creazione di ombre che siano parallele, divergenti o convergenti verso la sorgente, come, ad esempio, le *shadow mapping* (mappe delle ombre).

Nell'ambito dei software di rendering esistono diverse fonti di emissione di luce che si possono suddividere nelle seguenti categorie³²⁵:

- Omnidirezionale: che, simulando gli effetti di una lampadina, emette dei fasci luminosi che si muovono in tutte le direzioni a partire da un punto centrale;
- Infinita o *Sun light*: che inonda la scena secondo una specifica angolazione, generando, quindi, solo ombre parallele, senza bisogno di una distanza predeterminata o un elemento geometrico di origine, per questo viene definita anche luce solare.
- *Spot light*: simula l'effetto di un faretto che emette raggi unidirezionali. Il fascio di luce può essere reso visibile e presentarsi come un cono rotondo o quadrato o un cilindro.
- Area: un emettitore di luce omnidirezionale che si presenta come una superficie. Si ha così una luce più ricca, ma per riuscire ad evidenziare in maniera netta un oggetto deve essere disposta ad una vicinanza ridotta (Fig. 42).

Il secondo elemento associato alle fonti di luce sono le *shadow mapping*, che vengono riprodotte seguendo tre principi di diffusione³²⁶:

- Ombre nette: caratterizzate da una forma poco realistica e molto squadrata nel passare dall'area d'ombra a quella di luce, vengono maggiormente impiegate nella realizzazione di immagini tecniche;
- Ombre morbide: dove vi è una transizione graduale tra ombra e luce, attraverso una scala di grigi, legata alla direzione della fonte di luce, che fornisce, quindi, una visione più realistica, ma che presenta una maggiore richiesta di calcolo;
- Ombra area: che rende ancora più naturale l'effetto finale simulando la creazione di ombre più nette e morbide in base alla distanza, minore o maggiore, della fonte luminosa indipendentemente dalla sua tipologia. Ovviamente, ne risulterà che per, produrre tale effetto, la

³²⁴ Oren, Nayar 1994, pp. 239-245; Limoncelli 2012, p. 152

³²⁵ Flavell 2010, pp. 77-78; Dinur 2022, pp. 122-124

³²⁶ Limoncelli 2012, pp. 152-154

richiesta di calcolo sarà maggiore rispetto a quello della mappa delle ombre morbide, necessitando di un maggior tempo di *rendering*.

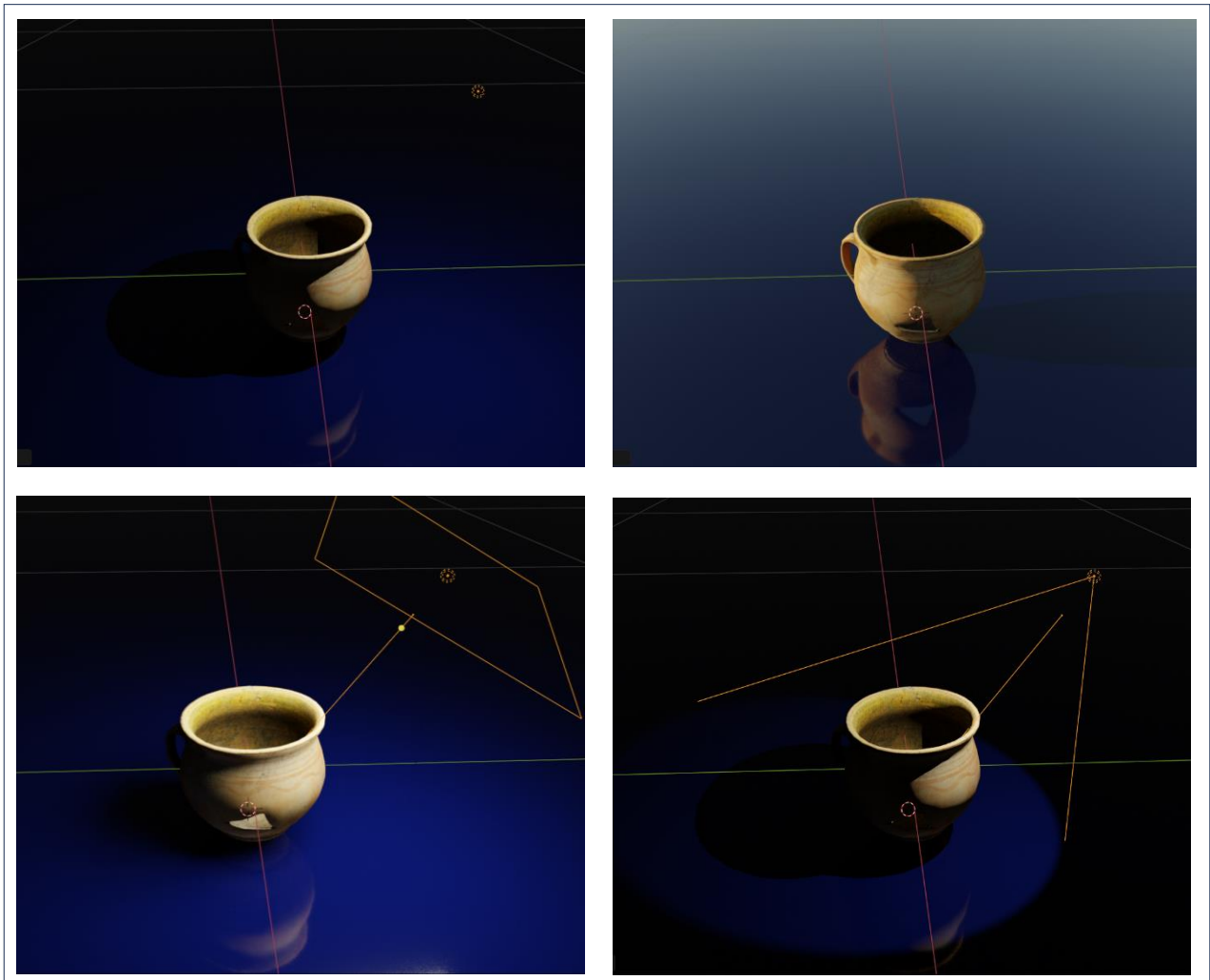


Figura 42 - Le quattro fonti di emissione: in alto a sinistra la *point light* o omnidirezionale, in alto a destra la *sun light*, in basso a sinistra l'area e in basso a destra la *spot light*.

Oltre a tutti questi oggetti e parametri, vi sono anche altre tipologie di algoritmi che permettono di ottenere una scena ancor più fotorealistica, perché più vicini al comportamento della luce naturale. Tali algoritmi vengono racchiusi nel concetto di *Global illumination* o illuminazione indiretta. La radiazione luminosa globale viene prodotta tramite l'uso di diverse sorgenti che irradiano fasci di luce. Questi raggi illuminano i diversi elementi presenti nella scena e, allo stesso tempo, in parte rimbalzano verso gli altri oggetti, producendo, a loro volta, ulteriori rimbalzi. Tale processo continua finché tutti i fasci di luce non esauriscono la propria energia. Come per gli algoritmi di illuminazione diretta sono presenti anche in questo caso i modelli di luce diffusa riflessa e speculare, anche se il loro funzionamento risulta essere diverso. La componente di luce riflessa è determinata dal fascio luminoso emesso dal rimbalzo da un oggetto su di un altro, il quale, a sua volta, assorbendo

una lunghezza d'onda specifica dello spettro della luce incidente e respingendo i rimanenti raggi luminosi, produce una luce riflessa di un colore differente da quello con cui è illuminato³²⁷. La luce riflessa speculare, invece, viene visualizzata come “la concentrazione della radiazione luminosa in un determinato punto di una superficie descritta matematicamente con la funzione di distribuzione della riflessione bidirezionale (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF), che tiene conto del materiale illuminato”³²⁸. Vi sono vari algoritmi che ricadono in questo tipo di illuminazione, ma i più utilizzati sono³²⁹:

- *Radiosity*: legato all'idea di trasferimento del colore e si basa sulla suddivisione della scena in superfici, dette *patches*, sulle quali basare il calcolo della luce assorbita e irradiata. Il processo parte dal calcolare la luce diretta che illumina e raggiunge tutti gli oggetti della scena, per poi elaborare, in vari passaggi, le emissioni di rimbalzo che avvengono tra le *patches*, fino al completo assorbimento dei raggi luminosi da parte delle *patches* nella loro totalità, che fornirà il livello di luminosità definitivo. Il calcolo di questo sistema prende avvio dalla luce sprigionata dalla *patch* che deriva dall'addizione della luce emessa dalle sorgenti con la luce dell'ambiente che la circonda che viene riflessa uniformemente, secondo il modello di Lambert, rispetto “all'emisfera centrata sulla sua normale di superficie”³³⁰.

- *Photon mapping*: in cui si simula, tramite una *Photon tracing* (mappa di fotoni), il comportamento del fascio luminoso a contatto con elementi diversi e la radianza riflessa che le fonti di illuminazione producono sulle superfici. Essa riesce così a simulare gli effetti della rifrazione della luce sui materiali trasparenti o traslucidi, come quelli di vetro, liquidi, come l'acqua, gassosi, come il fumo, vapore acqueo e caustiche, le quali sono una concentrazione di raggi, prodotta da una luce riflessa o rifratta, molto intensa che si proietta su altri oggetti³³¹ e si dividono in caustiche di superficie e caustiche volumetriche.

- *Ambient occlusion* (occlusione ambientale): tecnica che approssima l'illuminazione globale nel tentativo di semplificare la *radiosity* e il *photon mapping*. Questa permette di simulare l'ombra che viene a formarsi tra i punti di intersezione che si creano tra due o più facce di una *mesh* o tra due elementi ravvicinati. Tiene conto delle tipologie di materiali non riflettenti e dell'attenuazione della luminosità che avviene quando vi sono delle volumetrie occluse. Questa viene prodotta tramite il calcolo del tracciamento dei raggi in tutte le direzioni dalla superficie, in cui quelli che arrivano fino allo sfondo producono una maggiore luminosità sulla superficie, mentre quelli

³²⁷ Limoncelli 2012, p. 154; Dinur 2022, pp. 117-119

³²⁸ Limoncelli 2012, p. 154

³²⁹ Limoncelli 2012, pp. 155-156; Gabellone 2022, pp. 23-25; Dinur 2022, pp. 119-121

³³⁰ Oren, Nayar, p. 240

³³¹ Gabellone 2022, p. 21

ostacolati da altri elementi non apportano alcun valore. In questo modo i punti che sono contenuti all'interno di molti oggetti risultano più in ombra nel *rendering* e viceversa.

- Illuminazione HDRI (*High Dinamic Range Imaging*): Si ottiene attraverso l'illuminazione globale sommata ad immagini ad alto range dinamico e che, quindi, dispongono di una quantità maggiore di dati relativi alla luce, perché presentano una gamma di luminosità di 32 *bit* per canale³³². Tramite queste immagini oltre ai valori di illuminazione si producono degli sfondi legati con il “cielo”, che possono essere impiegati come elementi di *rendering*.

3.5 Il restauro virtuale tridimensionale delle architetture

L'elaborazione digitale tridimensionale delle strutture architettoniche presenta due finalità principali che sono quella dello studio e ricerca, in cui viene compreso anche il restauro, e quella della ricostruzione a fini divulgativi. Il restauro virtuale, pertanto, si prefigura come processo modificabile e ripetibile, nonché come metodologia di verifica dei dati scientifici prodotti attraverso gli studi storici e archeologici. Un secondo elemento che differenzia le elaborazioni di restauro virtuale delle architetture dalle altre è che all'interno di tale contenitore si possono ritrovare tutti i processi e le tipologie di tali applicazioni. Questo aspetto deriva dal fatto che gli edifici sono composti non solamente dalle volumetrie, ma anche da tutti quegli elementi, decorazioni pittoriche, pavimentazioni, mosaici, statue, rilievi e manufatti, che determinano la forma originaria della struttura stessa e ne decorano le superfici in un elemento complesso e completo solamente se visto nel suo insieme³³³.

Per tali motivazioni il primo aspetto che deve essere tenuto in conto, al fine di comprendere le operazioni più adeguate a effettuare una corretta elaborazione di restauro virtuale, è il processo edilizio.

Con il termine edilizia si intendono tutte quelle tipologie di opere e azioni, effettuate dall'uomo, atte a rendere un territorio adatto agli scopi insediativi³³⁴. Quindi, con tale terminologia si andrà a considerare l'azione vera e propria di riorganizzazione del territorio e dell'insediamento, attraverso elementi edilizi che presentino uno scopo ben preciso e funzionale alla vita stessa nel territorio, sia a carattere politico e religioso, che abitativo, viario e produttivo.

Dall'altra parte, anche il termine architettura custodisce un più vasto concetto che viene espresso dalle radici che compongono la parola stessa: “arch-” che indica la fondazione, l'impresa, la guida e “tekton-” che si ricollega all'inventare, plasmare, costruire. Tali termini entrano in rapporto tra di loro nel momento in cui l'edilizia indica, nell'accezione di “espressione del costruito”, il luogo

³³² le immagini normali presentano una gamma di luminosità di solo 8 bit per canale. Limoncelli 2012, p. 156

³³³ Limoncelli 2012, p. 163

³³⁴ Edilizia, Treccani Vocabolario online, <https://www.treccani.it/vocabolario/edilizia/> (Ul. Cons. 08/03/24)

in cui l'architettura si esprime manifestandosi artisticamente. In tal senso l'architettura compone il "processo edilizio" creativo attraverso le fasi di "progettazione" e "costruzione"³³⁵. Questo processo vede in queste due fasi l'interfacciarsi di tre figure principali che possono essere identificati nei protagonisti, nelle operazioni e nei materiali.

I protagonisti riguardano tutte quelle figure che ruotano attorno ai processi a partire dai committenti, che incarnano coloro che richiedono e finanziano la costruzione e che, talvolta, possono essere anche gli utenti, cioè i fruitori della struttura finale. I tecnici, i professionisti e le maestranze, cioè, tutte quelle figure che elaborano e, successivamente, producono fisicamente la struttura.

Le operazioni, cioè i vari momenti in cui si svolge la costruzione a partire dal "programma", definiscono il frangente in cui si vanno a delineare quali siano le finalità e l'estensione del progetto in rapporto alle finanze disponibili messe dalla committenza. Per poi passare alla fase del progetto architettonico, che riguarda tutti i processi di elaborazione metodologica e teorica, e che è legata all'ideazione, cioè la fase in cui avviene la trasformazione delle idee del programma in volumi e spazi, e alla soluzione costruttiva, con la quale si vengono a riconoscere le giuste modalità di costruzione a partire dalle tipologie di materiali disponibili e alla loro messa in opera in base alle leggi della fisica. Infine, avviene l'attività costruttiva, ovvero la fase in cui l'edificio viene materialmente costruito a partire dalle fondazioni, per poi proseguire con gli alzati e le coperture e, infine, intervenire su tutte le parti accessorie, come le pavimentazioni, i rivestimenti, ecc³³⁶.

Partendo da questi presupposti fondamentali, si può giungere ad una migliore comprensione dei vari approcci scientifici che vengono applicati per rispondere a quesiti e problematiche differenti. Uno dei primari aspetti di indagine viene a svilupparsi dall'analisi tecnica dell'edificio per comprenderne la logica strutturale e funzionale. Pertanto, risulta fondamentale conoscere la Scienza dei materiali da costruzione, che studia il comportamento statico e dinamico dei materiali e del loro equilibrio nella struttura sotto la spinta di carichi permanenti o accidentali. Ulteriore elemento, che risulta indispensabile conoscere e considerare ai fini di questa tipologia di studio, è legato alle variazioni strutturali o decorative subite dall'edificio nel corso del tempo, che possono aver comportato un cambiamento delle forze di equilibrio statico originarie³³⁷.

Questa tipologia di indagine risulta di vitale importanza ai fini di un restauro reale sull'edificio, per poterne comprendere la sequenza di degrado, cioè quel processo post-deposizionale passivo o trasformativo, causata dall'azione chimico-fisica sui materiali costruttivi³³⁸. Questi agenti di degrado derivano da elementi naturali, come l'acqua, la vegetazione invasiva o i cambiamenti

³³⁵ Gregotti 2002, p. 69; Landsberger 2015, p. 178

³³⁶ Argan 1958, p. 60; Samonà 1968, p. 11; De Rubertis 2000, pp. 475-481; Limoncelli 2012, p. 166

³³⁷ Giuliani 1989, pp. 13-25; Corradi 1996, pp. 101-107; Limoncelli 2012, p. 167

³³⁸ Brogiolo 1997, pp. 181-184

climatici; o da azioni antropiche che siano collegate o a processi di lunga durata, come l'usura delle superfici, o di breve durata e maggiormente traumatici, come un evento bellico o l'abbandono. Gli agenti di degrado e invecchiamento sono comunque elementi esterni al materiale, che devono essere presi in considerazione sia nella fase di costruzione che di manutenzione e restauro; perciò, è importante tenere a mente che le costruzioni architettoniche presentano una moltitudine di materiali differenti, lapidei, argillosi, legni, metalli, vetri, leganti, intonaci e stucchi, che presentano molteplici problematiche³³⁹. Sulla base di questi dati vengono condotte le analisi, per le quali ci si avvale dell'archeometria, che determina la natura minero-petrografica e chimica dei materiali, ma anche le caratteristiche fisiche chimiche e tecnologiche e il loro comportamento in risposta ai degradi. Da tali analisi possono essere determinati i luoghi di provenienza dei materiali stessi, un fattore determinante per un corretto restauro reale o virtuale³⁴⁰.

Un approccio differente è quello dello studio delle tecniche murarie e costruttive con il conseguente studio dei cicli produttivi. Con tale termine si indicano tutti quei passaggi che permettono di trasformare una materia naturale in un materiale da costruzione specifico. Tale processo inizia con la risorsa naturale, che rispecchia un ambiente in cui vi sia una disponibilità adeguata di materie prime, cioè quegli elementi che qualitativamente possono essere trasformati in prodotti edilizi. Il primo processo è quello dell'estrazione, eseguito da maestranze specializzate, per poi essere trasportato al cantiere, dove avviene la lavorazione, la rifinitura del materiale e la sua messa in opera³⁴¹.

Un'ulteriore tipologia di approccio è data dall'analisi etno-antropologica, con la quale si cerca di identificare, attraverso uno studio diretto della muratura, quale fosse l'"obiettivo" tecnico del costruttore. Questo aspetto si basa sul principio che ogni attività è legata alle nozioni tecniche dei produttori, all'ambiente economico e al grado di scolarizzazione dei committenti e, soprattutto, alla tipologia di materiali da costruzione disponibili³⁴². Tale analisi, quindi, cerca "il rapporto tra le evidenze murarie e le dinamiche dei processi tecnologico-cognitivi, oltre che naturalmente i meccanismi di trasmissione di tali conoscenze, e il loro nesso con l'ambiente culturale e l'organizzazione politico-sociale del tempo"³⁴³.

Tutte queste differenti tipologie di indagine forniscono una serie di informazioni che risultano importanti nella comprensione della struttura stessa e delle ideologie e concetti che rappresenta³⁴⁴.

³³⁹ Mannoni 1996, pp. 97-106; Musso 2016, pp. 469-517

³⁴⁰ Francovich, Manacorda 2017, pp. 28-34

³⁴¹ Giannichedda 1996, pp. 11-26; Cagnana 2000, pp. 9-15;

³⁴² Bianchi 1997, pp. 53-64

³⁴³ *Ibidem*, p.53

³⁴⁴ Molti degli approcci sopra presentati possono rientrare nell'ambito dell'archeologia della costruzione che relativo ai processi di restauro virtuale e ricostruzione potrebbe fornire ulteriori conoscenze legate alle dinamiche cantieristiche. Per maggiori informazioni su tale tematica si guardi: Cagnana 2000; Mannoni, Boato 2002; Brienza 2017; Fiorini 2023.

Tutti questi sono elementi utili anche ai fini di un intervento di restauro virtuale, in quanto fonti determinanti nella scelta dei materiali virtuali da utilizzare e delle tecniche da impiegare. La realizzazione di un restauro virtuale, però, deve prevedere primariamente una documentazione adeguata dello stato attuale della struttura attraverso un'analisi diretta³⁴⁵. Risulta, quindi, imprescindibile effettuare un rilievo architettonico, inteso come “l'insieme di operazioni di studio, di misurazione e di analisi che permettono di comprendere e documentare il bene architettonico, sia in sé stesso che nel rapporto con il contesto urbano o territoriale, nelle sue caratteristiche geometriche, dimensionali, strutturali e costruttive, oltre che formali e funzionali”³⁴⁶. Questo tipo di indagine si avvale sia dei processi di triangolazione, ai fini della produzione manuale di piante, sezioni e prospetti, sia delle tecniche di rilievo digitale tramite fotogrammetria e laser scanner. Le elaborazioni, risultato di tali processi, forniscono dati tematizzati come quelli relativi al “rilievo geometrico”, che permette di calcolare perimetro e misure degli elementi costitutivi della struttura, o al “rilievo tettonico”, che invece fornisce dati associati alle tecniche costruttive, in ottica storico-tecnica, e alle azioni di degrado e alterazione per fini diagnostici. Questi dati forniranno le informazioni necessarie all'elaborazione della ricostruzione degli alzati. Infatti, la produzione di una pianta bidimensionale, intesa come un piano orizzontale posto ad una quota ben precisa che seziona idealmente l'edificio rappresentando convenzionalmente tutti gli elementi architettonici e strutturali sottostanti tale sezione, e/o il rilievo tridimensionale delle rimanenze, ottenuto dal rilievo fotogrammetrico o da laser scanner, saranno la base da cui far partire le ipotesi ricostruttive. Mentre, le sezioni e i prospetti forniranno i dati necessari alla comprensione degli aspetti tecnico-costruttivi e per il calcolo delle quote sia degli alzati ancora in piedi, sia di quelli ipotizzati nella ricostruzione. Da ultimo, la produzione di assonometrie permetterà di visualizzare, attraverso una proiezione geometrica su un piano di proiezione, l'architettura contemporaneamente sugli assi x, y e z³⁴⁷.

Un'ulteriore tecnica di indagine utile alla comprensione del monumento è l'analisi stratigrafica muraria che ha il fine di individuare, direttamente sull'architettura, tutte le fasi e i processi formativi. Per arrivare a tale risultato si dovranno applicare tutti gli strumenti di rilievo e i processi cognitivi relativi allo studio della stratigrafia alla stregua di un “deposito verticale”, per individuare le tracce presenti sull'opera che siano in grado di descrivere le fasi di costruzione originali, delle modifiche subite nel corso del tempo e/o delle ricostruzioni totali o parziali. Alla base di questo tipo di analisi si trova l'individuazione dei rapporti stratigrafici e cronologici tra i vari

³⁴⁵ Limoncelli 2012, p. 169

³⁴⁶ Carmassi 2001, p. H10

³⁴⁷ Limoncelli 2012, pp. 169-171

elementi, che devono essere indagati tramite la compilazione di specifiche schede e la produzione di rilievi grafici e fotografici, per arrivare, infine, allo sviluppo del diagramma stratigrafico³⁴⁸.

Si deve, però, considerare che un manufatto architettonico non è composto solamente dalle sue murature, ma anche da spazi, volumi, percorsi e piani che devono essere documentati, al fine di disporre di un'analisi storica e tipologica complessiva dell'architettura nella sua totalità. Tale struttura, identificabile convenzionalmente come complesso architettonico (CA), è divisibile in uno o più corpi di fabbrica (CF), cioè unità che si possono distinguere tra loro per le caratteristiche architettoniche. Questi elementi possono essere isolati, e quindi permettere lo studio di tutti e quattro i prospetti generali (PG), o addossati tra di loro, permettendo, così, l'analisi solo dei prospetti visibili. I corpi di fabbrica possono poi essere suddivisi in unità funzionali (UF), gli ambienti che definiscono come si articolano internamente gli spazi attraverso pareti divisorie, che sono visibili sui prospetti particolari (PP). Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione sono le superfici orizzontali (SO), soprattutto nel momento in cui l'edificio si articola su più piani e dispone, quindi, di più pavimenti, soffitti e coperture. Le superfici murarie possono, a questo punto, essere analizzate stratigraficamente, ma solo nei casi in cui non vi siano rivestimenti quali, ad esempio, gli intonaci. In queste situazioni risulta fondamentale la documentazione stratigrafica delle unità stratigrafiche di rivestimento (USR), che rappresentano a propria volta azioni che forniscono informazioni cronologiche sull'edificio (Fig. 43)³⁴⁹.

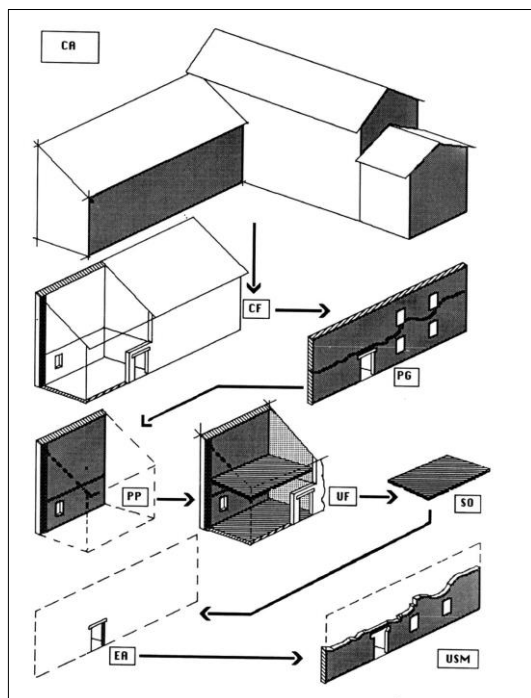


Figura 43 - Gli elementi che compongono un edificio e la loro gerarchia a partire dal complesso architettonico fino alla unità stratigrafica muraria (da Brogiolo 1988).

³⁴⁸ Parenti 1988, pp. 249-279

³⁴⁹ Brogiolo 1988, pp. 15-16

Il limite della comprensione e analisi dell'attività costruttiva è che non permette da sola di arrivare alla logica funzionale e strutturale dell'architettura e degli elementi connessi con il progetto architettonico originario. Arrivare ad intuire tale disegno, che sta all'origine dell'edificio, “è uno dei fini principali del restauro virtuale di un monumento che ha come obiettivo ricostruire integralmente, comprese quindi le parti mancanti o non più visibili, una costruzione attraverso un processo induttivo basato sui dati archeologici disponibili in modo compatibile con le leggi della fisica, della statica e della scienza delle costruzioni”³⁵⁰.

Per comprendere le intenzioni progettuali originarie si deve cercare di arrivare ai processi cognitivi e ai condizionamenti esterni che hanno avuto un peso nei processi esecutivi dell'edificio. Questi elementi di condizionamento nascono dall'ambiente fisico, come il clima e la disponibilità di materiali da costruzione, e sociale, come la struttura economica, religiosa e politica, in cui l'opera architettonica viene progettata e poi prodotta. Proprio per questo un ruolo importante nel lavoro di progettazione lo occupa la committenza, le tecniche di costruzione impiegate e il contesto, elementi che devono essere considerati durante i processi di analisi delle evidenze dell'attività di costruzione³⁵¹.

La prima fase, quindi, di tale processo è la progettazione architettonica che si identifica nella “visualizzazione dell'idea formale attraverso una serie di mezzi direttamente visivi o convenzionali, cioè un progressivo trasporto di essa da uno spazio ipotetico e puramente mentale ad uno spazio determinato e concreto”³⁵².

Se la progettazione risulta essere solo una delle fasi dell'architettura, l'edificio è la sua espressione come “volume costruito in uno spazio”³⁵³. Tale rapporto spazio-volume si riconosce nella “composizione architettonica” che identifica, delineato geometricamente attraverso piante, prospetti e sezioni, l'aspetto interno ed esterno di un'architettura. Ma, oltre a questo rapporto, si deve tenere in conto un ulteriore parametro che è quello della stabilità, intesa come l'equilibrio tra la forza gravitazionale e le forze contrarie prodotte dai materiali, dalle tecniche di lavorazione e dalla loro messa in opera, tutti elementi che sono soggetti alle leggi della statica e della scienza delle costruzioni³⁵⁴.

³⁵⁰ Limoncelli 2012, p. 174

³⁵¹ *Ibidem*

³⁵² Argan 1958, p. 60

³⁵³ Muller, Vogel 2000, p. 5

³⁵⁴ Pevsner *et al.* 1996, p. 623; Carpinteri 2023, pp. 1-24

Il restauro virtuale tridimensionale delle architetture non può, quindi, non considerare tutti quegli aspetti e principi che regolano il restauro architettonico reale attraverso un approccio di tipo filologico.

Proprio su questa tematica di riflessione metodologica, il restauro architettonico reale ha visto contrapporsi, dall'Ottocento fino ad oggi, due concezioni discordanti. La prima delle quali legittimava le ricostruzioni per arrivare ad un'ipotetica forma originale; mentre l'altra aveva lo scopo primario di mantenere l'edificio nella sua situazione attuale, rispettandone, quindi, anche le modifiche e le mancanze.

La prima ideologia, definita anche restauro stilistico o alla "maniera", venne concepita dall'architetto Eugène Viollet-le-Duc. Secondo tale tecnica i monumenti dovevano essere restaurati, con l'obiettivo finale di riportarli ad una originaria forma, attraverso l'impiego delle conoscenze, tecnologie e materiali dell'epoca, rendendo, così, di fatto irriconoscibile l'intervento moderno³⁵⁵. Tali teorie vennero riprese alla metà del Novecento anche da Alfredo Barbacci che riteneva il ripristino e la ricostruzione di un monumento come elementi essenziali per il restauro³⁵⁶.

In contrapposizione a queste teorie, nasceva in Inghilterra, alla fine dell'Ottocento, l'*Antirestoration Movement* o *Antiscrape* sotto la spinta dello SPAB (*Society for Protection of Ancient Building*), che vedeva come presidente l'artista e designer William Morris. Questo movimento nasceva dalle teorie di John Ruskin e si basava sull'idea di non effettuare alcun tipo di restauro sulle architetture se non interventi collegati al mantenimento e alla conservazione³⁵⁷.

In contemporanea a queste due tesi così antitetiche, si affermò un'ulteriore teoria, denominata restauro filologico, che ebbe come primo promotore l'architetto Camillo Boito. Questa tesi riteneva importante e lecito l'intervento di restauro solo nei casi in cui vi fosse un'esigenza di un consolidamento o di una riparazione, seguendo però i concetti del minimo intervento e della riconoscibilità delle parti restaurate. Tale ideologia andava di fatto contro l'idea della reintegrazione mimetica di Viollet-le-Duc, supportando invece il mantenimento dei segni del tempo sulle superfici, perché legati alla storia del monumento stesso³⁵⁸.

All'interno di tale dibattito, si inserì anche l'architetto Luca Beltrami che, con la teoria del restauro storico, pose l'accento sull'utilizzo della documentazione storica come base scientifica ai fini dell'intervento³⁵⁹.

³⁵⁵ Crippa 1982, p. 247

³⁵⁶ Barbacci 1956, pp. 141-145

³⁵⁷ Ruskin 1982, pp. 226-227; Limoncelli 2012, p. 181

³⁵⁸ Dezzi Bardeschi 2007, pp. 48-50

³⁵⁹ Baldrighi 1997, p. 13

Per comprendere a pieno i principi del restauro architettonico dobbiamo considerare che proprio mentre queste ideologie continuavano a contrapporsi, agli inizi del Novecento, stavano nascendo dei primi tentativi di redazione di legislazioni nazionali con finalità di tutela attraverso principi per la salvaguardia del patrimonio artistico e architettonico³⁶⁰. In Italia in questi anni si sviluppa l'idea del restauro filologico-scientifico, promossa da Gustavo Giovannoni, che da una parte incorporava l'idea dell'équipe multidisciplinare e dall'altra promuoveva l'utilizzo di tecniche moderne per la manutenzione e il consolidamento, ponendo comunque una forte attenzione al rispetto della storia dell'edificio. Questa teoria si poneva a metà tra il restauro a maniera e quello del minimo intervento, favorendo la possibilità di intervenire sull'opera attraverso differenti "tipologie" di restauro:

- quello di consolidamento, che si occupa di riportare l'opera ad una situazione di sicurezza statica;
- quello di ricomposizione o anastilosi, che permette la ricostruzione di un monumento ricomponendone le parti conservate e frammentarie;
- quello di liberazione, con cui si vanno ad eliminare le parti di minor importanza storica artistica;
- quello di completamento che applica nuovi elementi di restauro, ma seguendo il principio della riconoscibilità;
- quello di innovazione, che inserisce elementi del tutto innovativi spesso per finalità di riutilizzo dell'architettura o di parti di essa³⁶¹.

L'approccio teorico al restauro di Giovannoni fu alla base della "Teoria del caso per caso" dell'architetto Ambrogio Annoni, la quale rifiutava degli schemi o teorie assolute, ma riteneva ogni intervento un caso a sé che richiedeva, quindi, metodologie differenti in base alle problematiche individuate. Per poter seguire questo tipo di metodologia, quindi, vi doveva essere in principio un'attenta ricerca delle fonti storiche sulla base delle quali ipotizzare l'intervento, che poteva avvenire o tramite l'inserimento di strutture moderne o attraverso la conservazione di tutti gli elementi dell'edificio, anche se appartenenti a differenti epoche, considerandole parti integranti della storia del monumento ed evitando così soluzioni che potessero portare alla realizzazione di un falso storico³⁶².

È solo dal secondo dopoguerra che la teoria predominante divenne quella di Brandi, del restauro critico³⁶³. Mentre dagli anni Settanta divenne preponderante la teoria della conservazione

³⁶⁰ Volpe 2006, pp. 70-95

³⁶¹ Giovannoni 1946, pp. 1-83

³⁶² Annoni 1946, pp. 14-51

³⁶³ Brandi 1977

che abiurava ogni tipo di integrazione³⁶⁴. Infine, dagli ultimi decenni la riflessione si è spostata sul restauro critico-conservativo che si basa sulla conservazione della materia esistente finché non vi siano esigenze strutturali, conservative o di ripristino dell'immagine storica. Il tutto impiegando gli edifici attraverso un riuso compatibile che possa garantirne una cura e manutenzione costanti³⁶⁵.

L'approccio metodologico al restauro virtuale può, quindi, in parte esulare da tali problematiche teoriche, in quanto esegue le sue elaborazioni su un modello digitale dell'architettura, potendo, di fatto, ambire a proporre una o più restituzioni dell'edificio corrispondenti ad una o più fasi di completa o quasi integrità. Ma tale libertà non deve essere preponderante in quanto potrebbe facilmente portare alla creazione di un falso storico, un concetto che come abbiamo potuto osservare, ha da sempre avuto peso nelle teorie sopra citate, per cui le ipotesi che si andranno a sviluppare devono comunque essere ricondotte ai concetti di un restauro guidato che prenda avvio da una documentazione storica e filologica, per elaborare dei modelli di corrispondenza del dato che siano il risultato della riflessione a partire dalle teorie sopra menzionate³⁶⁶.

Proprio a tale scopo risulta necessario anche per il restauro virtuale seguire dei principi che possano definirne dei limiti nella elaborazione e che derivino da quelli del restauro architettonico reale. Tali principi possono essere così esposti³⁶⁷:

- della leggibilità, per il quale, attraverso le tecniche di restauro, si devono evidenziare le fasi di crescita della struttura e farne comprendere le stratificazioni avvenute nel tempo. Questa tipologia di intervento viene valorizzata dalle possibilità date dalle tecniche in virtuale che permettono una scomposizione del modello, e quindi dell'edificio, nelle sue possibili fasi, dalla più recente alla più antica, basate sulle evidenze ancora presenti;
- della reversibilità, attraverso l'impiego di materiali che siano reversibili e compatibili con le materie originarie dell'edificio. In virtuale tale principio viene espresso dal concetto di ripetibilità dei processi che vengono richiamati in causa nel momento in cui vi siano nuovi dati provenienti da ricerche recenti o nuove tecnologie che permettano un avanzamento dello studio;
- delle varianti in corso d'opera, con il quale si esprime la possibilità di modifiche all'elaborazione in base a nuovi dati provenienti dal cantiere;
- della riconoscibilità, con cui vi deve essere una distinzione sia di carattere estetico che temporale, al fine di evitare possibili interpretazioni errate. In virtuale essa è garantita attraverso differenti modelli di corrispondenza dei dati, che permettono di identificare il livello di affidabilità dell'intervento, i dati di origine dell'elaborazione e i metodi e processi induttivi impiegati;

³⁶⁴ Gioeni 2011, pp. 328-347; Dezzi Bardeschi 1991

³⁶⁵ Limoncelli 2012, p. 183; Lumia 2016, pp. 13-122

³⁶⁶ Limoncelli 2012, p. 183

³⁶⁷ Manieri Elia 2010, pp. 62-74; Limoncelli 2012, pp. 184-186

- dell'uso di materiali e tecnologie originali, con l'obiettivo di fornire il migliore effetto di continuità funzionale e formale con quelle originali. In virtuale tale principio viene basato sulla qualità e la cura del rilievo e della texturizzazione a partire da immagini di campionatura delle superfici murarie;
- del ripristino o conservazione del comportamento statico originario. In virtuale si possono simulare, solo in casi specifici, i comportamenti legati alla statica dei singoli elementi dell'edificio, effettuando analisi strutturali che possono fungere da ricerca e studio preliminare all'intervento di consolidamento reale;
- della cura delle relazioni con il contesto fisico che, quindi, definisce l'importanza del contesto in cui è collocato l'edificio ai fini della corretta interpretazione funzionale e formale dell'architettura stessa;
- della cura nel recupero dei significati e delle relazioni col contesto antropologico, con cui si definisce l'importanza degli aspetti simbolici, immateriali e psicologici dell'edificio;
- del riconoscimento, salvaguardia e valorizzazione dei caratteri specifici e di unicità dell'edificio storico su cui si interviene, che definisce l'identità dell'edificio stesso. Tali valori possono essere risaltati dal restauro virtuale favorendone maggiormente la comprensione attraverso specifici interventi;
- del minimo intervento, che serve a limitare e calibrare il grado di azione dell'intervento legandolo alle necessità di consolidamento in relazione ai problemi di statica dell'edificio. Lo studio ricostruttivo tridimensionale può in certi casi esulare da questo principio fornendo, però, i vari livelli di attendibilità;
- della durabilità, che riguarda il tempo di durata dei materiali, legata anche agli interventi di manutenzione e all'evitare possibili alterazioni del monumento. Questo principio non riguarda, se non marginalmente, il restauro virtuale;
- altri principi del restauro architettonico reale, come la destinazione d'uso compatibile, la compatibilità fisico-chimica, la manutenibilità, non hanno ripercussioni nel restauro virtuale.

3.5.1 Modelli di corrispondenza del dato

I modelli di corrispondenza del dato raffigurano il percorso congetturale di interpretazione ed elaborazione di tutte le fonti dirette ed indirette legata all'opera architettonica³⁶⁸. Questo processo,

³⁶⁸ Limoncelli 2012, p. 190; Queste fonti possono, per prima cosa, essere dirette quando derivano direttamente dall'osservazione sull'opera. Tramite tale studio, che si avvale dei processi di rilievo e analisi degli alzati e della loro stratigrafia, si può comprendere quale sia lo stato attuale di conservazione dell'architettura, un elemento che definisce i processi successivi dell'intervento. Vi sono poi le fonti indirette che riguardano le categorie delle fonti scritte e delle fonti

quindi, prende ispirazione dai principi del restauro architettonico reale al fine di creare diversi modelli che si caratterizzano per fornire informazioni differenti ma contigue, secondo l'approccio del restauro critico³⁶⁹.

In primis vi è il modello dello stato di fatto, cioè di tutte le strutture ancora presenti sia *in situ* che in giacitura secondaria. Questo modello si caratterizza per permettere di analizzare l'architettura nella sua interezza e di comprenderne le fasi nelle varie epoche. In questa fase si possono produrre, attraverso *texture* tematizzate appositamente, mappature dei degradi e degli interventi o si possono caratterizzare attraverso delle immagini da analisi diagnostiche.

In secundis, viene prodotto il modello di anastilosi con cui si tenta di riassembleare tutte le parti ascrivibili all'edificio, ma che non sono più in giacitura primaria. Tramite tale modello, oltre a visualizzare tutti gli elementi ancora esistenti appartenenti all'edificio, si possono effettuare analisi quantitative, come ad esempio la percentuale del sopravvissuto, e si possono, inoltre, verificare l'attendibilità e qualità dei dati. Questo passaggio risulta fondamentale perché ci permette di comprendere, sulla base dei dati ancora esistenti, la fattibilità del restauro virtuale e l'utilità della sua realizzazione per fini scientifici.

Vi è poi il modello di reintegrazione con cui si vanno a ricostruire, dove possibile, tutti gli elementi mancanti attraverso le tecniche di modellazione 3D. Alla base di tale ricostruzione vi deve essere sempre una documentazione storica attendibile e filologica, inoltre va rispettato il criterio della riconoscibilità.

Successivamente, si può passare al modello delle fasi costruttive con cui, attraverso la creazione di differenti modelli, si possono ricostruire, dove ancora evidenti, le fasi di vita del monumento. Le ricostruzioni così prodotte saranno legate alle fasi cronologiche dell'edificio, a partire dalla situazione odierna per muoversi a ritroso fino alla più antica. L'obiettivo di tale modello è quello di disporre di uno studio che possa mettere in evidenza i cambiamenti dell'edificio e allo stesso tempo anche i possibili cambiamenti d'uso.

Si può poi passare ai modelli di verifica che permettono di effettuare un'analisi tecnica per la comprensione della logica funzionale e strutturale dell'edificio. Questo modello viene quindi sottoposto, tramite appositi software, alle analisi *Finite Element Method Processing* (FEM, metodo

iconografiche. Tali documenti sono essenziali per la comprensione dell'opera architettonica, ma vanno anche vagliate al fine di verificarne la veridicità. Tra di queste vi sono: le fonti archivistiche e letterarie che ci forniscono dati descrittivi dell'edificio e dei suoi spazi, eventuali modifiche e restauri; altre tipologie di fonti documentarie che ci possono fornire informazioni, più o meno dettagliate, sull'edificio, come quelle prodotte nelle descrizioni dei viaggiatori o i trattati veri e propri di architettura; fonti fotografiche, che permettono di visualizzare un edificio immortalato in un preciso momento storico in cui poteva aver avuto fattezze differenti; ; almeno a partire dal XV secolo, una delle principali fonti disponibili sono le incisioni e le stampe; fonte indiretta importante sono i dipinti che, oltre a definire le fattezze degli edifici, ci forniscono anche la loro cromia; infine, i disegni, i rilievi e i plastici che riguardano la parte più tecnica della progettazione e che, quindi, riportano tutte le misure e le dimensioni originarie. Fancelli 2001, pp. E13-E20

³⁶⁹ Limoncelli 2012, pp. 190

degli elementi finiti) che effettuano, attraverso specifici algoritmi, simulazioni dei fenomeni di deformazione e tensione che agiscono sulle murature ricostruite dell'architettura del monumento³⁷⁰. Questo processo permette di valutare scientificamente le ipotesi di restauro e, quindi, anche la validità costruttiva delle fonti impiegate e viene prodotto attraverso l'inserimento di poligoni in numero adeguato alla suddivisione e corrispondenza con le superfici. Questi poligoni sono in relazione con gli altri tramite dei nodi o punti di vertice che dispongono di attributi legati ad equazioni che possono regolare la tensione e la deformazione. Tramite tale sistema, quindi, si instaura un vincolo tra elementi adiacenti che sono soggetti ad una specifica dose di forze. Per ricostruire e analizzare la dinamica strutturale dell'oggetto basterà, pertanto, applicare ad ogni poligono le equazioni di deformazione e tensione³⁷¹.

Infine, vi è il modello di edizione, che risulta il più rifinito per forme e *texture*. Esso tende, da una parte, a seguire i concetti del restauro alla maniera di Le-Duc ma, dall'altra, si pone in antitesi ad esse. Questo duplice aspetto è associabile al fatto che si ipotizza una ricostruzione dell'architettura nella sua integrità, ma al contempo si permette la costruzione di più ipotesi di pari dignità scientifica. Il modello finale ha anche lo scopo di mettere in risalto tutta la mole di dati scientifici analizzati e prodotti, permettendone la comprensione e la riconoscibilità sia agli studiosi che ai fruitori (Figg. 44-45-46)³⁷².

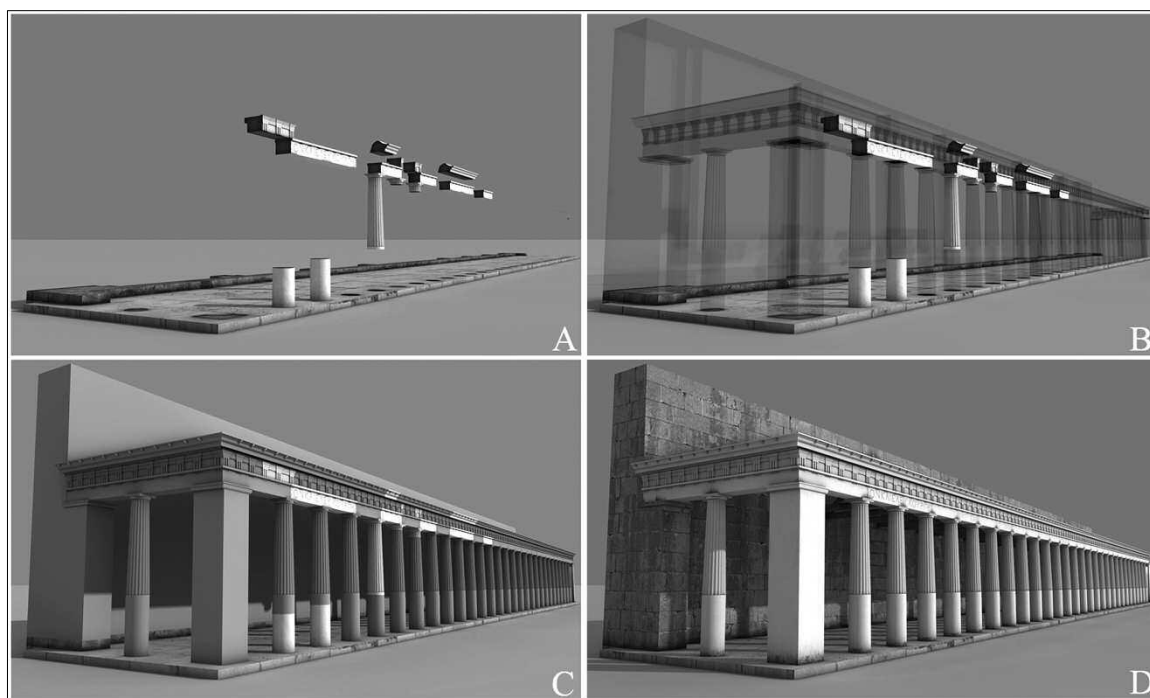


Figura 44 - I modelli di anastilosi (A), reintegrazione (B), verifica (C) ed edizione (D) di una Stoà da Hierapolis di Frigia (da Limoncelli 2012).

³⁷⁰ Limoncelli 2012, p. 194; Marino 2016, p. 55

³⁷¹ Limoncelli 2012, p. 206

³⁷² Barcelò 2001, pp. 233-242; Limoncelli 2012, pp. 190-196



Figura 45 - Modelli tridimensionali che mostrano le due fasi costruttive, del XIII secolo sopra e ottocentesca sotto, dell'abbazia di Santa Maria di Cerrate a Squinzano (da Gabellone 2022).

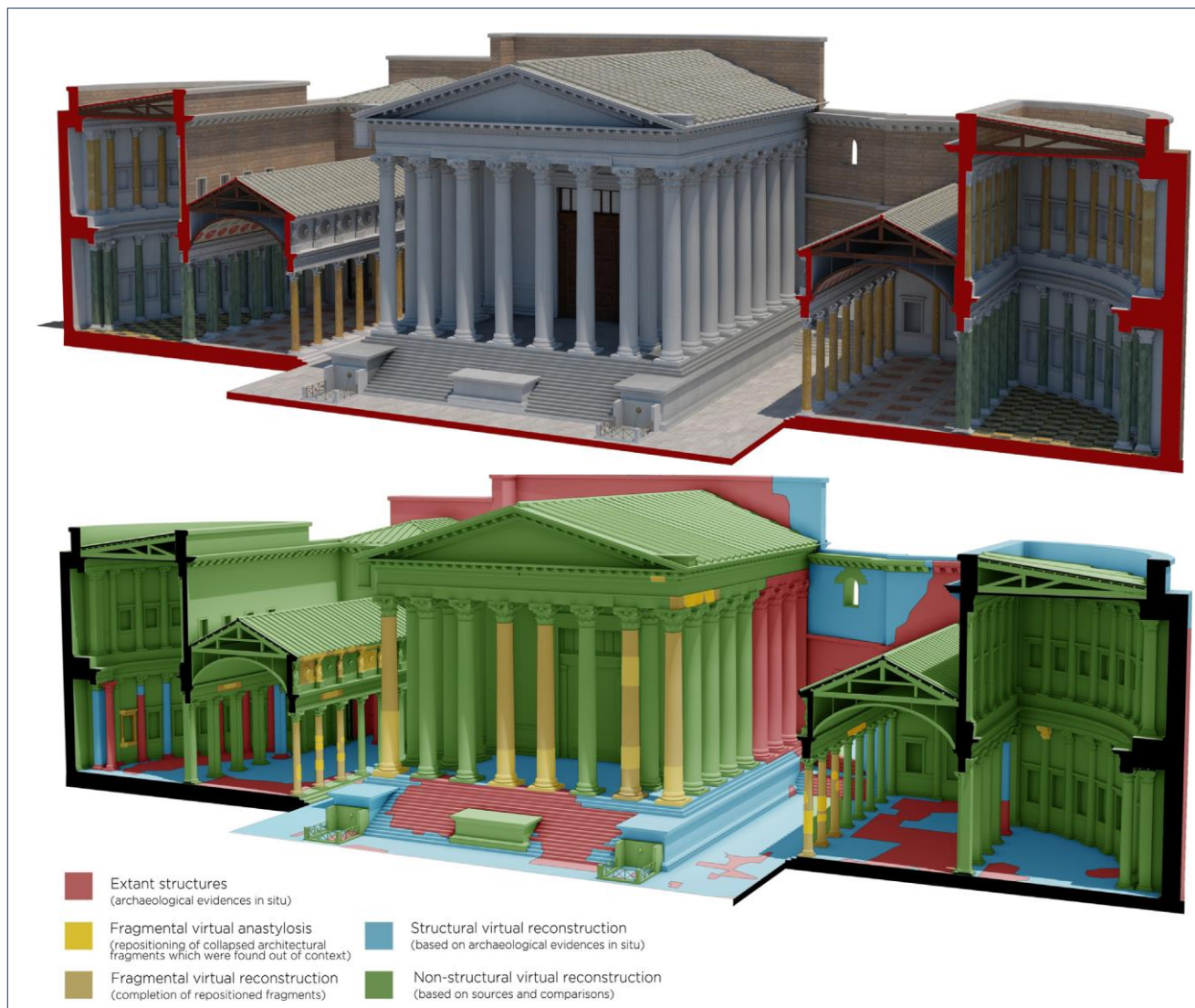


Figura 46 - Ricostruzione del tempio di Marte Ultore nel Foro di Augusto, l'immagine al di sotto mostra l'attendibilità della ricostruzione a partire dagli elementi ancora presenti, in rosso, fino a quelli, in verde, che derivano da fonti e comparazioni (da Ferdani *et al.* 2020).

3.6 Il restauro virtuale tridimensionale delle sculture

All'interno del panorama dei campi di applicazione del restauro virtuale tridimensionale, uno spazio a sé stante è proprio delle sculture. Per comprendere a pieno i processi necessari alla progettazione e produzione di un corretto intervento di restauro virtuale di tale tipologia di opere si ritiene doveroso cercare di delineare sinteticamente quali siano le principali tecniche scultoree. La scultura, quindi, può essere intesa come arte e processo dello scolpire su differenti materiali. Eppure, tale distinzione non risulta omnicomprensiva, in quanto sotto questa terminologia si celano varie tipologie di opere che vengono categorizzate in base alla modalità con cui vengono riprodotte nello spazio e per la tecnica di esecuzione.

La differenza nella rappresentazione spaziale, quindi, permette di distinguere le opere in³⁷³:

- basso rilievo, in cui la decorazione viene eseguita in rilievo rispetto al fondo, ma non in maniera troppo accentuata. All'interno di tale categorizzazione possono essere incluse differenti denominazioni legate al grado di riduzione proporzionale dei piani plastici: mezzo rilievo, quando le figure sono solo in buona parte distaccate dallo sfondo³⁷⁴; basso rilievo, quando lo spessore in rilievo risulta meno della metà della lastra; e rilievo schiacciato, quando lo spessore è quasi inesistente e si tratta di una visuale data dalle superfici piane³⁷⁵;
- alto rilievo in cui la scultura risulta ancora vincolata ad un piano, ma tende nelle figure ad avvicinarsi al tutto tondo attraverso effetti plastici;
- a tutto rilievo o a tutto tondo che rappresentano un soggetto tridimensionale, isolato nello spazio e visibile da tutte le direzioni.

Il secondo parametro di distinzione, come precedentemente anticipato, è la tecnica esecutiva, la quale ha un peso determinante sulla decisione del tipo di materiale utilizzato e, di conseguenza, sulle tipologie di degrado riscontrabili sull'opera stessa.

La tecnica esecutiva può essere tipologicamente suddivisa in:

- sculture ad intaglio: che riguardano tutti quei processi, eseguiti su pietra, legno e avorio, in cui vi sia rimozione della materia. La pietra è un tipo di materiale che presenta differenti varietà tipologiche e di durezza, il che richiede l'uso di strumenti differenti per la sua lavorazione. Pietre morbide sono il gesso, la pomice, il tufo e la pietra ollare, più dure sono il calcare e, soprattutto, il marmo che richiedono l'impiego di strumenti in ferro e abrasivi per la loro lavorazione; mentre, ancora più dure sono le pietre vulcaniche come il porfido, le rocce metamorfiche, il basalto e il granito che sono di difficile lavorazione anche con utensili in ferro o acciaio. Gli strumenti maggiormente

³⁷³ Tolazzi 2015 pp. 183-186; Tavola 2010, pp. 12 e 34; Per maggiori informazioni sui vari progetti legati a tale categoria si guardi: Forte 2007; Almagro 2007; Milella 2007; Masino *et al.* 2011; Stampouloglou 2019; Limoncelli, Potenza 2020.

³⁷⁴ Mezzorilievo, Treccani Vocabolario on line, <https://www.treccani.it/vocabolario/mezzorilievo/> (Ul. Cons. 23/09/2023)

³⁷⁵ Tolazzi 2015, pp. 183-184;

impiegati nell'esecuzione di tale attività risultano essere: a percussione diretta, dei quali un esempio sono gli scalpelli nelle varie forme e impieghi; a percussione indiretta, che quindi riguardano i mazzuoli e le mazze, le lime, i trapani; e, infine, gli abrasivi di origine naturale come lo smeriglio o la pomice³⁷⁶. Un secondo materiale lavorato tramite tale tecnica è il legno, per il quale gli utensili impiegati sono simili a quelli per l'intaglio della pietra, ma con l'aggiunta di seghe, raspe, cote, asce e scuri. Inoltre, i legni vengono scelti in base a caratteristiche precise e differenti come, ad esempio, il pino cembro o il larice che risultano essere morbidi e resinosi, presentando così una maggiore resistenza ai tarli; oppure, la quercia, il cipresso o il noce che, risultando più duri, vengono meno condizionati dai cambi di umidità e temperatura³⁷⁷. Infine, un ultimo materiale che viene manipolato tramite le tecniche di intaglio è l'avorio che, lavorato attraverso gli stessi strumenti della scultura lignea, trova maggiormente impiego nella scultura di piccole dimensioni. Questo prodotto viene ottenuto dai denti e dalle zanne di specifici animali come il narvalo, l'elefante, il rinoceronte, il tricheco e l'ippopotamo. Tutte queste tipologie di sculture su pietra, legno o avorio possono essere realizzate tramite la lavorazione di un unico pezzo o attraverso l'impiego di più elementi che compongono le parti dell'opera tenute insieme tramite incastri e perni metallici³⁷⁸.

- **Sculture a modellato o plastiche:** questa tipologia, a differenza di quella precedente, prevede la modellazione dell'opera tramite l'aggiunta di materia. I materiali maggiormente impiegati per la produzione di queste sculture sono l'argilla, che prevede una successiva fase di cottura, la cera e il gesso. Lo scopo finale delle opere create tramite questa tecnica è duplice, in quanto possono essere utilizzate per produrre opere finite, oppure come modelli o bozzetti per sculture di altra natura, come quelle di metallo fuso o a incisione. Le sculture plastiche possono essere generate manualmente, oppure attraverso l'uso di matrici apposite che fungono da stampo in negativo, nel quale viene colato o inserito il materiale, sia esso argilla o cera, che prenderà l'aspetto, in positivo, del disegno interno dello stampo. Quest'ultima categoria, che può anche prevedere l'uso di più stampi uniti insieme, può suddividersi in: a forma perduta, quando viene previsto che lo stampo venga rotto una volta completato il processo di creazione e, quindi, risulti inutilizzabile; a buona forma o tasselli, se lo stampo può essere smontato e rimpiiegato. La scultura a modellato viene principalmente impiegata nella coroplastica o per le terrecotte architettoniche e gli stucchi ornamentali, una tipologia di decorazione plastica che impiega come materiale principale la calce e la sabbia³⁷⁹.

- **Sculture a fusione:** Questa tipologia di produzione è strettamente legata alle tecniche di fusione dei metalli come quella "a cera persa" e "a sabbia". I processi di fusione, cioè da uno stato

³⁷⁶ Rockwell 1993, pp. 15-87; Beghelli 2014, pp. 13-18

³⁷⁷ Perusini 1989, pp. 211-229;

³⁷⁸ De Grossi Mazzorin 2011, pp. 21-104

³⁷⁹ Vaccari 1996; Cagnana 2000, pp. 145-149;

solido ad uno liquido, dei materiali metallici avvengono, in base alla natura del materiale stesso, a differenti temperature. Una volta raggiunte tali temperature e, quindi, liquefatto il metallo, può avvenire l'azione di colatura in specifiche forme, per poi essere lasciato raffreddare, così da avviare i processi di solidificazione, tramite cui, una volta completati, ottenere, infine, l'opera desiderata³⁸⁰. Le sculture a fusione, come anticipato, possono essere prodotte tramite due tecniche specifiche³⁸¹. Quella maggiormente utilizzata è quella definita "a cera persa". Tale tecnica si avvale di uno stampo in negativo del modello in cui viene colata la cera fusa, che verrà successivamente lasciata raffreddare. Una volta solidificata la cera, il calco viene riempito con materiale refrattario percorso da vari canaletti grazie all'inserimento di un'armatura al suo interno. La forma viene, quindi, cotta in forno per far sì che la cera fondendosi coli dai canaletti. Nell'intercapedine creata, una volta rovesciato il tutto, si viene a colare la lega metallica fusa che segue, quindi, le forme lasciate vuote dalla cera. Si elimina poi, una volta raffreddato, lo stampo e lo strato interno e, come ultimo processo, si può rifinire la statua. Il secondo metodo è quello della fusione "a sabbia", la quale impiega un mix di sabbia da fonderia e argilla posta all'interno di una cassa-telaio per ottenere, attraverso l'inserimento di metà del modello in questa miscela, un'impronta, la quale viene poi lasciata essiccare. Successivamente sono inseriti nella cassa i condotti di alimentazione, mentre il modello spolverato di talco viene di nuovo posto nell'impronta. Dopo aver svolto lo stesso procedimento con l'altra metà e aver unito le due forme, si può passare alla fase di versamento del metallo nell'intercapedine creatasi eliminando progressivamente i condotti. Questa tipologia di fusione viene principalmente utilizzata nella creazione di medaglie e bassorilievi. I metalli maggiormente impiegati nei processi di creazione di queste sculture possono essere sia di natura preziosa come il platino, l'oro e l'argento, sia di altra tipologia come il ferro, lo stagno, il piombo, lo zinco, l'alluminio e il rame sia, infine, essere prodotti tramite leghe come l'ottone (rame e zinco), e il bronzo (rame e stagno)³⁸².

3.6.1 Tecniche e processi del restauro virtuale per le sculture

Gli interventi di restauro virtuale delle sculture possono essere condotti secondo tre modalità che, in base all'obiettivo finale, possono essere anche combinate. *In primis*, si possono applicare in ambiente virtuale una serie di analisi e operazioni non invasive allo scopo di indagare la struttura dell'opera. *In secundis*, può avvenire un intervento di ricostruzione di tipo plastico con lo scopo di ricondurre l'opera ad una unità formale. Da ultimo, si può passare alla correzione delle problematiche

³⁸⁰ Giuffredì 2006, pp. 59-61 e 152-157; Azéma *et al.* 2011, pp. 71-73

³⁸¹ Giuffredì 2006, pp. 61-108

³⁸² *Ibidem*, pp. 152-157

superficiali, dettate dalle differenze di materiali e tipologia scultoria, nel tentativo di proporre una completezza estetica della scultura³⁸³.

Tutte queste modalità di intervento, però, devono sempre partire da una discriminante di applicazione che risulti essenziale alla comprensione delle problematiche e quindi alla tipologia di azione. Questo compito è demandato alle analisi preliminari che possono fornirci informazioni sull'opera, sulle forme di degrado presenti e, di conseguenza, sul tipo di intervento da eseguire. Il primo processo da effettuare nell'elaborazione del restauro virtuale è disporre di un modello digitale dell'opera o delle varie parti che vanno a comporre la statua stessa. Il modello tridimensionale così creato ci fornisce uno strumento essenziale per effettuare analisi quantitative come la misura del volume, della superficie e le dimensioni della scultura, o per effettuare simulazioni associate alla stabilità statica dell'opera attraverso l'identificazione del suo baricentro e delle linee verticali di caduta. Questo modello permette, inoltre, di poter effettuare sulle *texture*, e di conseguenza in tre dimensioni, mappature dei degradi. Un altro aspetto importante, relativo alla creazione del modello stesso, è quello di permettere l'esecuzione delle analisi delle dinamiche strutturali, nei quali rientrano le indagini di FEM *processing*, per determinare se vi siano fratture o microfratture, applicando su di esso fenomeni di deformazione e tensione³⁸⁴.

Il restauro virtuale delle sculture, a questo punto, una volta effettuate le analisi sopra citate, deve seguire un iter legato alla produzione di differenti modelli di corrispondenza del dato³⁸⁵. Il primo modello è relativo al riassettraggio di tutti gli elementi esistenti collegati all'opera, il quale, proprio per tale motivo, viene definito modello di assemblaggio. Questa tipologia di elaborazione è applicabile sia alle opere che già in origine erano composte da più elementi, sia a quelle che, per varie vicende e vicissitudini, sono arrivate a noi in frammenti. In questa fase si può intervenire su tutte quelle problematiche dovute alla presenza di fessurazioni, spesso causate dal movimento e assestamento delle varie parti, che sono la ragione della presenza di alterazioni fisiche quali fratture, spaccature e fenditure.

Successivamente, si può elaborare il modello di reintegrazione, fase in cui si può intervenire direttamente sulla presenza di mancanze e lacune. Tale processo è eseguito tramite l'uso delle tecniche di modellazione manuale e deve sottostare al principio della riconoscibilità. La creazione di tale modello di reintegrazione, inoltre, non può essere eseguita per tutte le casistiche, ma solo in quelle situazioni in cui le lacune risultino ricostruibili o da dati certi conservati sull'opera o, soprattutto nei casi non desumibili da un'analisi diretta, non prima di aver effettuato uno studio di tutte le fonti

³⁸³ Limoncelli 2012, p. 204

³⁸⁴ Limoncelli 2012, p. 206; Smith *et al.* 2014, pp. 1-25

³⁸⁵ Limoncelli 2012, pp. 205-212

iconografiche necessarie alla corretta scientificità dell'intervento, seguendo i processi che possono essere così ricollegati al concetto di "restauro storico" (Fig. 47).

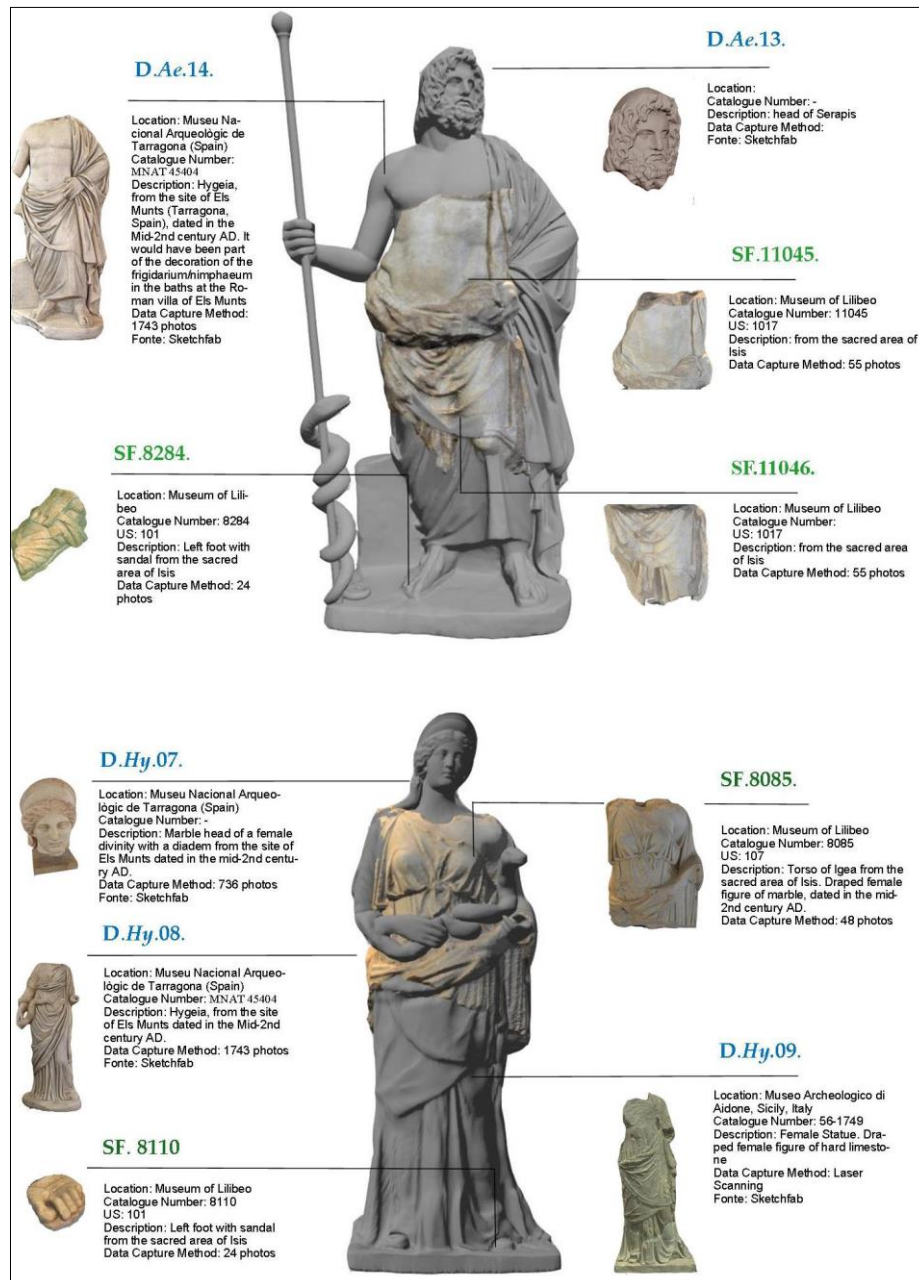


Figura 47 - Ricostruzione virtuale delle statue di Esculapio e Igea dal santuario di Iside a Lilybaeum con riportate tutte le fonti e i confronti utilizzati per eseguire l'intervento ricostruttivo (da Fazio *et al.* 2022).

Da ultimo, vi è il modello di edizione che tende a raggiungere dei risultati, attraverso la rimozione dei degradi e difetti, il più completi per forma e *texture* all'originale, rendendo indistinguibili anche gli interventi eseguiti. La correzione delle problematiche superficiali serve a dare un aspetto alle superfici che risulti esteticamente gradevole. Tali azioni vengono condotte tramite la modifica delle *texture*, a partire dall'osservazione dei degradi, peculiari alle diversità materiche di

cui è costituita l'opera³⁸⁶, per poi tendere, seguendo le stesse tecniche del restauro virtuale bidimensionale, al fotoritocco delle *texture* stesse che, essendo immagini bidimensionali, permettono la rimozione di chiazze, macchie, sporco o patine sulle superfici. Per le sculture in metallo si possono rimuovere tutte quelle problematiche visive collegate ai processi di ossidazione, un degrado chimico in cui avviene una corrosione per ossido-riduzione di elettroni provocata da agenti atmosferici.

Inoltre, tramite il restauro virtuale si può tendere anche a ricostruire quella che presumibilmente poteva essere la policromia originaria delle superfici. Molte delle statue antiche, infatti, presentavano una pellicola pittorica che le rivestiva. Tali operazioni rappresentano l'ultimo step del restauro virtuale delle sculture nel tentativo di ristabilire l'unità formale dell'opera³⁸⁷. Questo processo non può essere eseguito se non prima di aver effettuato tutta una serie di studi e di campionamenti superficiali sull'opera e aver recuperato tutte le fonti bibliografiche e iconografiche disponibili (Fig. 48)³⁸⁸.



Figura 48 - Le tre fasi dell'intervento di restauro virtuale eseguite su di un'antefissa fittile da Pompei. A sinistra, rilievo digitale dell'opera, al centro, modellazione tridimensionale degli elementi e a destra, applicazione dei colori sulle superfici basata sui confronti e sulle tracce ancora presenti (da Gabellone 2022).

³⁸⁶ I fattori di degrado per le sculture dipendono dalla tipologia di materiale impiegato e possono essere ricondotti a; fattori esogeni, come quelli meteorologici, biologici e termoigrometrici; fattori endogeni, organismi, forze o sostanze che lavorano dall'interno o esterno dell'opera; o infine, antropici, come precedenti restauri, martellature, scalfiture o atti vandalici. Perusini 1989, 153-168; De Grossi Mazzorin 2011, pp. 21-34; Limoncelli 2012, pp. 208-211; Anzani *et al.* 2019, pp. 196-200;

³⁸⁷ Peral *et al.* 2005, pp. 5-6;

³⁸⁸ Limoncelli 2012, pp. 204-212; Per maggiori informazioni sui vari progetti legati a tale categoria si guardi: Gruen *et al.* 2003; Scopigno 2006; Di Paola 2014; Boninno, Costanzi Cobau 2015; Di Paola, Milazzo 2017; Frischer 2020

3.7 Il restauro virtuale tridimensionale dei reperti mobili

Il restauro virtuale tridimensionale dei reperti mobili si occupa di tutti quei manufatti, spesso provenienti da campagne di scavo archeologico, prodotti tramite l'impiego di differenti materiali quali quelli ceramici, vitrei, litici, numismatici, metallici, lignei, di avorio o osteologici. Queste categorie di opere, essendo produzioni di varia natura e forma, presenteranno al contempo differenti tipologie di degrado³⁸⁹. Proprio a tal proposito, la ceramica, soprattutto quella proveniente dalle indagini archeologiche, risente di tutta una serie di fattori come, ad esempio, il grado di coesione dovuto ai processi di cottura, la durezza e la porosità del materiale, che favoriscono o meno i processi di assorbimento capillare dell'acqua dal terreno. Tale liquido, che può avere un minore o maggiore grado di corrosione e presentare al suo interno sali solubili, può interferire sulla concentrazione di alcune sostanze all'interno del manufatto stesso. Inoltre, lo scavo stesso produce una rottura degli equilibri ambientali che induce in una trasformazione chimico-fisica degli elementi presenti nell'opera nel tentativo di riadattamento al nuovo ambiente. Tale situazione potrebbe portare, ancora, ad una evaporazione dell'acqua che trasporterebbe così sulla superficie del manufatto i sali solubili, processo che è la causa dello sviluppo di cristallizzazioni e microfessurizzazioni. Al fine di ridurre al minimo questi processi, l'intervento di restauro reale prevede una sequenza ben precisa di azione che deve partire da una diagnosi dello stato conservativo, successivamente alla quale avviene la pulitura e, se necessario, un consolidamento con resina acrilica. In seguito, si potrà passare alla ricomposizione dei frammenti in maniera provvisoria, che verrà completata dall'incollaggio vero e proprio tramite l'uso di resine reversibili o, tal volta irreversibili, ma non prima di aver passato uno strato di primer. Infine, nei casi necessari, si eseguirà una reintegrazione, spesso legata a motivi statici, in leggero sottosquadro e prodotta attraverso l'uso di gesso dentistico o polyfilla, un riempimento a base di cellulosa. L'integrazione deve essere poi colorata, nella maggior parte dei casi, riprendendo il tono della superficie del manufatto. Un'altra problematica per la categoria della ceramica è relativa alla sotto-tipologia di quelle rivestite di vetrina o smalto, nelle quali può avvenire una devetrificazione o sfaldamento che provoca la formazione di frammentazione della superficie e conseguentemente un suo distacco dalla base ceramica³⁹⁰.

Nei manufatti in vetro lo stato di conservazione può essere deteriorato da errori nella fabbricazione come, ad esempio, una temperatura non adeguata di fusione o una non corretta dosatura degli elementi. Eppure, l'agente che maggiormente produce effetti di deterioramento e cambiamento

³⁸⁹ Molte di tali tipologie di degrado, soprattutto per i materiali litici, metallici e lignei, sono state già definite sinteticamente nel corso dei vari capitoli, per cui si eviterà nuovamente la loro ripetizione per evitare ridondanze.

³⁹⁰ De Palma 2002, *La Ceramica e il Vetro*, Treccani Il mondo dell'archeologia, https://www.treccani.it/enciclopedia/la-conservazione-e-il-restauro-dei-manufatti-archeologici_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/ (Ul. Cons. 27-09-2023)

chimico è, come per la ceramica, l'acqua, soprattutto se in concomitanza sono presenti degli acidi umici e dei terreni basici. Il vetro, inoltre, col passare del tempo può presentare delle iridescenze sulla superficie, dovute ad alterazioni chimiche. Altra problematica risulta essere la devetrificazione, la quale viene prodotta dal cambiamento fisico dovuto alla cristallizzazione della struttura amorfa del vetro e provoca squilibri tensivi che producono fratture e fessurazioni. Si possono, inoltre, riscontrare degradi dovuti a macchie createsi all'interno della pasta vitrea che risultano in un'alterazione cromatica. Tali degradi sono denominati "a stella", mentre un'altra tipologia sono le erosioni di tipo "a cratere", le quali vengono prodotte dai licheni o, ancora, "ad anello" che si creano nei punti più fragili della fusione nel momento del raffreddamento a causa di bolle o fratture preesistenti. Visivamente sono caratterizzati come un punto scuro centrale da cui si sviluppano cerchi concentrici, i quali sono a loro volta ricoperti da una pellicola vetrosa molto sottile che si craterizza facilmente. Gli interventi di restauro vengono eseguiti seguendo gli stessi processi delle ceramiche. Ovviamente la natura più fragile del vetro crea l'esigenza di eseguire i processi in maniera più delicata, soprattutto nelle fasi di pulitura e di incollaggio, un processo che viene realizzato per infiltrazione con resine epossidiche. Le integrazioni, quando necessarie, possono avvenire tramite l'uso di resine che possono essere inserite o per colatura o tramite l'impiego di forme³⁹¹.

Da ultimo, i materiali ossei o in avorio risentono molto delle variazioni di temperatura e umidità. Tali cambiamenti producono effetti di espansione e contrazione con tempi e direzioni diverse nel materiale e sono la conseguenza principale della creazione di fessurazioni. Inoltre, l'esposizione alle radiazioni UV e a fonti luminose con intensità elevata possono essere conseguenza di ingiallimento delle superficie e di scolorimento dei pigmenti, se presenti. Infine, può avvenire una polimerizzazione degli oli naturali dell'avorio³⁹².

Nonostante la varietà, quindi, di materiali e problematiche differenti, gli interventi principali legati al restauro virtuale si caratterizzano per due tipologie di operazioni: ricomposizione e ricostruzione plastica ed estetica³⁹³.

Il primo passaggio fondamentale, come in tutti gli altri casi fin qui presentati, è la restituzione digitale del manufatto o delle sue parti o dei suoi frammenti. L'intervento successivo si caratterizza per la ricomposizione dei frammenti, che può risultare anche molto complesso soprattutto nella fase di ricollocazione e collegamento (Fig. 49).

³⁹¹ Limoncelli 2012, pp. 215-218; De Palma 2002, *La Ceramica e il Vetro*, Treccani Il mondo dell'archeologia, https://www.treccani.it/enciclopedia/la-conservazione-e-il-restauro-dei-manufatti-archeologici_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/ (Ul. Cons. 27-09-2023)

³⁹² Menegazzi 2002, *I materiali organici*, Treccani Il mondo dell'archeologia, https://www.treccani.it/enciclopedia/la-conservazione-e-il-restauro-dei-manufatti-archeologici_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/ (Ul. Cons. 27-09-2023)

³⁹³ Limoncelli 2012, p. 215



Figura 49 - Riassemblaggio e restauro virtuale di una vaso frammentario (da Hermon *et al.* 2011).

Un'elaborazione che, se non eseguita con attenzione, può comportare la creazione di scalini o pareti non combacianti. Una volta eseguito il riassemblaggio delle varie parti, si può passare alla ricostruzione plastica al fine di integrare in virtuale tutte le mancanze, variabili sia per dimensione che per forma, nel tentativo di restituire una comprensibilità formale e un valore estetico all'opera. Anche in questo caso si deve valutare e vagliare la fattibilità della ricostruzione al fine di non incombere nella creazione di un falso, se pur in virtuale. Questa elaborazione può essere eseguita tramite tre soluzioni: o direttamente sul modello scansionato, una volta importato in un software di modellazione e *sculpting* 3D; o attraverso tecniche di ricostruzione tridimensionale partendo dalle misure e dalle forme originarie del manufatto³⁹⁴; o, infine, attraverso l'impiego del modello 3D scansionato come modello ad alta poligonazione (*High poly*), sul quale creare, tramite tecniche di *retopology* all'interno di un software di modellazione, un secondo modello che presenti una geometria maggiormente pulita e a bassa poligonazione (*Low poly*). Una volta prodotto questo secondo oggetto, identico per forme e dimensioni all'opera originale, si possono effettuare processi di *baking* (cottura) delle *texture*, i quali permettono, attraverso specifici algoritmi, di derivare dal modello fotogrammetrico *High poly* una *texture* e di associarla al modello *Low poly*. Lo scopo è quello di ottenere un modello tridimensionale, identico per fattezze e cromia all'opera originale, più semplice da elaborare, gestire e modificare al fine di effettuare le integrazioni in maniera più accurata. Indifferentemente dalla tecnica impiegata, il risultato finale derivante da tali operazioni è un modello 3D identico all'originale che esprime le stesse caratteristiche estetiche e, al contempo, attraverso le integrazioni effettuate, possa tendere a rispecchiare una o più ipotesi legate all'idea formale originaria dell'opera stessa. Elemento imprescindibile di tale elaborazione è il mantenimento del principio della

³⁹⁴ Limoncelli 2012, pp. 215-218

riconoscibilità, al fine di produrre un risultato che possa essere il più vicino possibile a quello di un restauro reale. Proprio a tale scopo, le nuove parti prodotte per tentare di ridare un'unità formale al modello devono essere caratterizzate attraverso una colorazione che tenda alla riconoscibilità e, *in secundis*, ad una cromia più possibile neutra rispetto al colore originario della superficie del manufatto (Fig. 50).



Figura 50 - Restauro virtuale di un kantaros da Karabournaki, grecia, in cui le parti restaurate rispettano il principio della riconoscibilità (da Tsiadaki *et al.* 2016).

Infine, ultimo passaggio è quello della ricostruzione di tipo estetico per rimuovere eventuali difetti sulle superfici, processi che vengono eseguiti direttamente sulle *texture*. Il fine è ricostruire la policromia originaria e la percezione dei colori in situazioni in cui vi sia stata una perdita della pellicola pittorica. Questa fase, di solito, si esegue con la tecnica del mimetico con cui si possono correggere sia fessure dovute, principalmente, al movimento delle varie parti che possono comportare la presenza di fratture, spaccature e fenditure, sia le cadute della pellicola pittorica dovute alla consunzione³⁹⁵.

³⁹⁵ Limoncelli 2012, p. 218

Un'ulteriore elaborazione che si può eseguire, soprattutto per tutti quei materiali provenienti da un'indagine archeologica e sui quali si può disporre di una documentazione adeguata, è la ricostruzione del contesto e, conseguentemente, la ricollocazione geografica dei materiali. A tale scopo ci si può avvalere di due tecniche: in primo luogo, a partire dalle piante e dai rilievi di scavo bidimensionali, si possono ricostruire, tramite l'uso di un software di modellazione tridimensionale, il contesto nel quale ricollocare i materiali restaurati al fine di produrre dei *rendering*; in secondo luogo, le elaborazioni possono essere eseguite, nuovamente tramite l'impiego di un software di modellazione e *rendering* 3D, a partire dai rilievi tridimensionali, fotogrammetrici o laser scanner, del contesto originario (Fig. 51).



Figura 51 - Ricostruzione della tomba Regolini Galassi e restauro virtuale, nonché ricontestualizzazione, di alcuni elementi del corredo per il progetto Etruscanning (Pietroni, Ferdani 2021).

Quest'ultima soluzione, partendo da una documentazione che risulta essere alla base dei processi di restauro virtuale, permette di disporre di modelli georeferenziati propedeutici all'inserimento in ambiente GIS 3D. All'interno del quale si instaura un rapporto di tipo non solo geografico e contestuale, ma anche documentativo, in quanto il materiale ricontestualizzato e restaurato virtualmente viene associato con tutta la documentazione, relativa all'intervento stesso, presente all'interno del database relazionale. Tale collegamento permette, da una parte, di visualizzare il modello 3D dell'intervento e la documentazione associata e, dall'altra, di effettuare interrogazioni e analisi a partire dai dati legati alle varie schede preposte. Una soluzione che verrà enucleata maggiormente in uno dei casi studio del progetto³⁹⁶.

³⁹⁶ Per maggiori informazioni sui vari progetti legati a tale categoria si guardi: Peloso 2005; Aliaga *et al.* 2008; Dionisio, Licari 2014; Bigliardi 2017.

4. GIS 3D e Database Relazionali

I GIS (*Geographic Information System*) sono software che permettono di collegare dati di origine diversa con la loro posizione geografica attraverso l'uso di uno spazio cartesiano bidimensionale, se definito dai due assi x e y (o Nord ed Est), o tridimensionale, con l'aggiunta dell'asse z . Inoltre, essi possono gestire un'ulteriore variabile, identificata dalla lettera "t" o "m", che definisce il dato temporale³⁹⁷. I GIS permettono, quindi, di catastare, presentare, analizzare e processare i dati relativi ad un contesto territoriale, o ad un oggetto, rappresentato nella sua realtà³⁹⁸. Per poter giungere a questi risultati, però, un sistema GIS deve disporre di tre aspetti principali³⁹⁹:

- Il primo è legato alle analisi e descrizione dei fenomeni che devono presentare una dimensione spaziale;
- Il secondo è collegato all'impiego di *Database Management Systems* (DBSM) per strutturare l'informazione;
- Infine, il terzo è definito dalle capacità del sistema di elaborare le informazioni attraverso la creazione di nuovi dati a partire dalla manipolazione di quelli originali.

Un'ulteriore elemento di forza dei GIS è la loro multiscalarità la quale permette di indagare e rappresentare gli stessi elementi sia come una geometria puntuale all'interno di un ampio ambito territoriale sia come singolo modello 3D, o 4D se si considera l'elemento temporale, che viene descritto dalle coordinate x, y, z e m ⁴⁰⁰.

4.1 Tipologie di dati del GIS

I dati in un GIS possono essere di due tipologie: grafici o alfanumerici. Questi sono contenuti all'interno di un *Geodatabase Management System* (GDBMS), il quale è strutturato, a sua volta, seguendo specifiche regole topologiche, domini e relazioni tabellari che consentono l'analisi e il recupero coerente delle informazioni spaziali⁴⁰¹. Della tipologia grafica fanno parte i dati *raster* e vettoriali, mentre in quella alfanumerica compaiono le banche dati o dati tabellari, archivi in cui vengono salvate le informazioni e i dati descrittivi riguardanti tutto l'apparato documentario. I dati

³⁹⁷ Bogdani 2009, pp. 421-422; Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 5

³⁹⁸ Valenti, Nardini 2004, p. 347

³⁹⁹ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 5

⁴⁰⁰ Landeschi 2019, pp. 19-26; A tal proposito è da notare che i dati relativi ai beni culturali sono per loro natura 4D, in quanto l'aspetto temporale è legato al numero di eventi succedutesi sugli strati, murature e oggetti di uno scavo archeologico o sugli elementi di un'opera. Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 9

⁴⁰¹ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 9

alfanumerici vengono messi in relazione con quelli grafici in modo tale da georeferenziarli, cioè da collocarli, tramite specifiche coordinate, sulla superficie terrestre⁴⁰².

4.1.1 Dati raster e vettoriali

Il formato *raster*, come già precedentemente definito, è un documento rappresentato da una immagine costituita da *pixel* che hanno una posizione (x,y) all'interno di una griglia o matrice (suddivisa per righe e colonne), ed un attributo espresso da un valore numerico che indica un livello di intensità legato a differenti parametri e fenomeni del mondo reale (temperatura, altitudine, ecc.). A questa categoria appartiene la documentazione cartografica e fotografica digitale o digitalizzata. Restringendo il campo all'utilizzo del GIS nell'ambito dei beni culturali, in genere si tratta di piante, fotografie di scavo o di restauro, ortofoto, ortomosaici e fotopiani, fotografie aeree, da drone e satellitari, cartografia generale, cartografia a scala topografica, cartografia storica, cartografia tematica, mappature, ecc (Fig. 52).

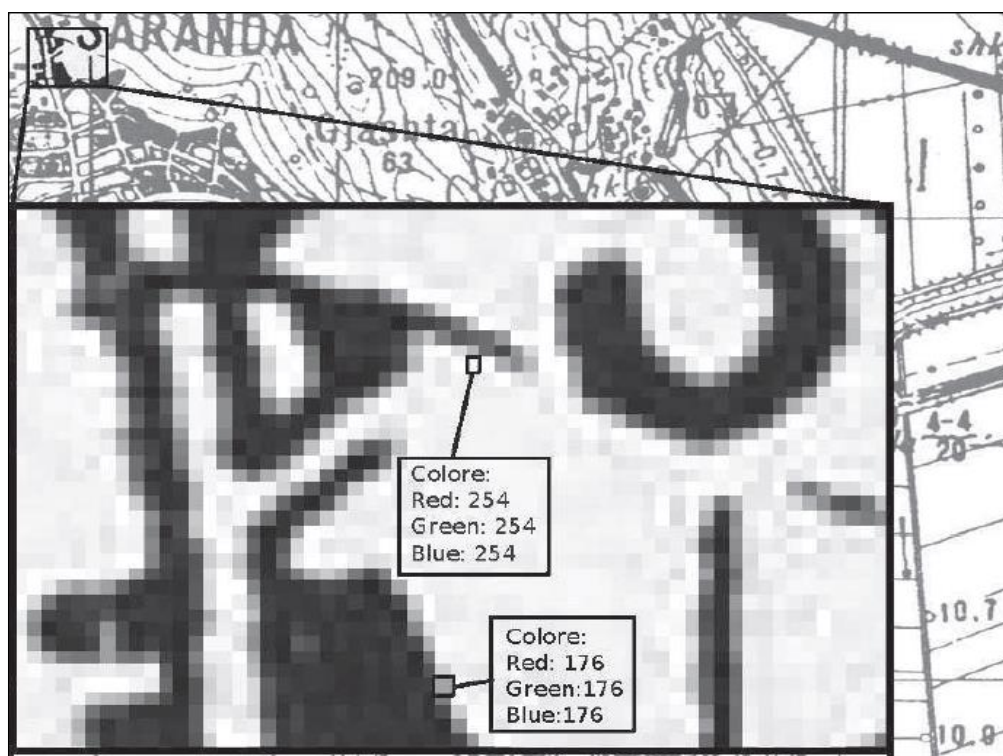


Figura 52 - Esempificazione di una struttura di un'immagine *raster* composta da una griglia di regolare di *pixel*, ciascuno con un'informazione sul colore (da Bogdani 2009).

⁴⁰² Bogdani 2009, p. 422

La qualità dei dati *raster*, quindi, viene definita dai metadati presenti nel file finale che identificano la geo-localizzazione, la data di acquisizione e la risoluzione spaziale. Inoltre, il livello di attendibilità di queste informazioni è legato alle tecniche e ai dispositivi impiegati per la loro creazione, a partire dal sensore della fotocamera e dai parametri di scatto che ne definiscono la scala, la risoluzione radiometrica e il numero di bande spettrali. In aggiunta, anche i software impiegati e le scelte nelle impostazioni di salvataggio del dato ne definiscono il grado di qualità. Ne sono un esempio i *Digital Elevation Model* (DEM) una tipologia di immagini che vengono prodotti da nuvole di punti da fotogrammetria o rilievo laser, nel quale gruppo ricade anche il LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Essi sono il risultato di un algoritmo di interpolazione dei vari punti, scelto preventivamente dall'utente, che produce una griglia di *pixel* che presenta, come attributo di ogni elemento, il valore specifico di altitudine⁴⁰³. Dobbiamo, inoltre, considerare che sotto la denominazione cappello di DEM vi sono altre sottocategorie che identificano specifici modelli di elevazione. Questi modelli sono i *Digital Surface Model* (DSM) e i *Digital Terrain Model* (DTM). Sotto la prima denominazione ricadono tutti quei modelli digitale in cui le informazioni prodotte sono legate a tutte le superfici superiori catturate, in tal senso vengono considerate anche le chiome degli alberi, i tetti delle case, ecc. Con DTM invece si intende tutti quei modelli che, attraverso operazioni di filtraggio dei dati, vengono a rappresentare l'elevazione solo della superficie del terreno. Il limite di questi modelli *raster* è dato dal fatto che il valore di altitudine è unico per ogni *pixel*, ciò comporta che la rappresentazione finale non sia un modello 3D completo ma più una versione 2,5D (Fig. 53)⁴⁰⁴.



Figura 53 - Confronto tra una superficie 3D (A) e una superficie 2,5D (B). Come si può notare, nella superficie 2,5D disponendo di un solo valore di altitudine per ogni *pixel* non si ottiene una corretta rappresentazione tridimensionale dell'oggetto in ogni sua parte (da Dell'Unto, Landeschi 2022).

⁴⁰³ Dell'Unto, Landeschi 2022, pp. 10-11

⁴⁰⁴ *Ibidem*, p. 13

Un documento in formato vettoriale è espressione di informazioni frutto della composizione, più o meno complessa, di primitive geometriche (punti, linee e poligoni), con le quali è possibile rappresentare tutti gli elementi necessari alla definizione di un apparato cartografico finalizzato e redatto alla massima scala di dettaglio o legato alla documentazione relativa ad un intervento di scavo, restauro o musealizzazione.

Le geometrie puntuali vengono prodotte a partire dalle coordinate x e y , se bidimensionali, o x , y e z , se tridimensionali, dello spazio cartesiano prescelto, che è associato al sistema di riferimento impiegato. Il punto viene normalmente utilizzato nell'identificare un singolo oggetto reale che dispone di una posizione spaziale precisa e grazie alla quale può essere messo in relazione con una mappa di riferimento.

Le geometrie lineari sono caratterizzate da un elemento che dispone di almeno due vertici collegati tra loro. Sono gli stessi vertici con coordinate x , y e, talvolta, z a definirne l'andamento e gli elementi di inizio o fine. Le linee generalmente, essendo oggetti monodimensionali, vengono impiegati maggiormente per rappresentare reti stradali o corsi d'acqua.

Infine, le geometrie poligonali sono prodotte tramite un insieme di linee e vertici che chiudono un preciso spazio. La creazione di questo poligono avviene tramite la corrispondenza delle coordinate del primo vertice con quelle dell'ultimo. Tale elemento geometrico viene, inoltre, descritto attraverso le dimensioni di larghezza e lunghezza. I poligoni sono generalmente impiegati per rappresentare superfici estese, mentre la loro combinazione favorisce la mappatura di aree che risultino condividere specifiche similarità⁴⁰⁵.

Inoltre, anche i dati raccolti sul campo utilizzando strumentazione topografica (Stazione Totale, GNSS (*Global Navigation Satellite System*), laser scanner 3D, ecc.) o in laboratorio (rilievo 2D o 3D dei materiali, punti di spot delle analisi, ecc.) possono essere acquisiti in ambiente GIS come dati vettoriali, sia direttamente che opportunamente convertiti⁴⁰⁶. Modelli digitali del terreno sono realizzabili anche in formato vettoriale interpolando una serie di punti quotati del terreno (misurati ad esempio con un sistema GNSS) per restituire un TIN (*Triangular Irregular Network*) cioè una struttura dati vettoriale basata su triangoli con maglia irregolare (Fig. 54).

⁴⁰⁵ Dell'Unto, Landeschi 2022, pp. 11-12

⁴⁰⁶ Bogdani 2009, pp. 432-425

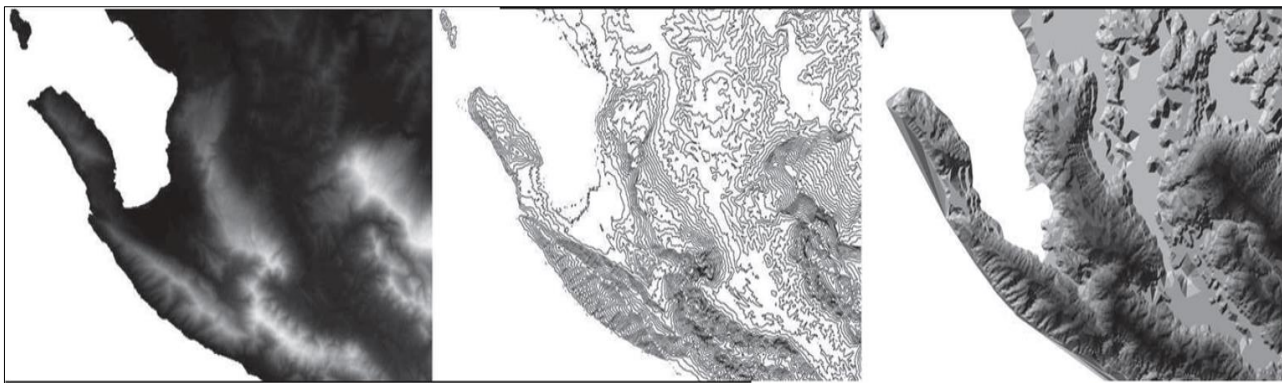


Figura 54 - Tre modi di rappresentare la superficie del terreno: a sinistra un raster DEM, al centro una sua elaborazione vettoriale a curve di livello, a destra un'ulteriore rielaborazione a triangoli (da Bogdani 2009).

4.1.2 Dati tabellari

Un GIS non può essere chiamato tale senza disporre di dati alfanumerici racchiusi all'interno di tabelle. L'informazione spaziale raccolta o prodotta deve essere gestita considerando che ogni elemento dovrà disporre di una parte descrittiva atta a contenere tutti i dati alfanumerici collegati con l'oggetto, ma anche elementi come le proprietà geometriche e le sue coordinate. I dati prodotti vengono quindi inseriti, manualmente o automaticamente, all'interno di una tabella formata da righe, o *record*, e colonne, o campi. Ogni singolo elemento geometrico, sia un punto, una linea o un poligono, deve essere associato ad un unico *record* della tabella. Viceversa, non è detto che una tabella per esistere deve possedere degli elementi spaziali. Infatti, si possono creare tabelle che non necessitano di coordinate, ma che possono essere collegate successivamente a delle geometrie tramite le operazioni di "Join" o "relate". Inoltre, le tabelle del database vengono spesso organizzate strutturalmente tramite relazioni, in cui uno stesso campo condiviso da due tabelle funge da elemento di unione e connessione. Questo tipo di struttura, di cui si parlerà maggiormente più avanti, viene definito database relazionale e permette di velocizzare e semplificare le interrogazioni tabellari al fine di produrre nuovi dati o recuperare informazioni tra grandi quantità di *record*.

4.2 Sistemi di riferimento, analisi spaziali, formati e WebGIS

Un altro aspetto che riguarda i dati del GIS è che devono possedere, come sopra definito, delle coordinate per poter permettere al programma di elaborare questa mole di informazioni, che verrà

espressa tramite un sistema di coordinate cartesiano, geografico o proiettato, definito sistema di riferimento (SR)⁴⁰⁷.

Il problema a cui si deve far più frequentemente fronte è quello di dover lavorare con dati che utilizzano SR diversi. Questa situazione è oltremodo frequente nel campo dei beni culturali, dove vengono quasi sempre interpolati dati provenienti da documentazione di natura differente e da rilievi realizzati utilizzando spesso sistemi di riferimento locali.

Per risolverlo ed uniformare tutti i documenti con lo stesso sistema di proiezione, si devono effettuare dei calcoli detti parametri di trasformazione, che molti software GIS oramai svolgono in automatico⁴⁰⁸.

Un altro aspetto non secondario delle applicazioni GIS riguarda la possibilità di effettuare analisi topologiche. Fino ad ora si è fatto riferimento ai formati geometrici, che distinguono gli oggetti per forma, superficie e volume, mentre la topologia distingue gli elementi nello spazio secondo le relazioni che intercorrono tra loro⁴⁰⁹. A tal proposito i sistemi GIS permettono di effettuare diverse analisi spaziali sui dati inseriti, al fine di studiare la distribuzione degli oggetti o delle problematiche, produrre sistemi di lettura oggettiva delle evidenze presenti o carte di predittività di natura differente, da quella della presenza archeologica, a quella del rischio strutturale degli edifici, ecc. Sfruttando tali sistemi si possono produrre informazioni atte a definire modelli storico-archeologici e socioeconomici del contesto indagato⁴¹⁰, ma anche progettazioni del rischio e degli interventi nell'ambito del restauro.

Di seguito si riportano alcuni tra i principali percorsi d'analisi⁴¹¹:

- effettuare un *overlay* topografico, cioè la sovrapposizione di diverse carte tematiche;

⁴⁰⁷ Semplificando un sistema di riferimento è dato da un datum geodetico e da un punto di origine per le coordinate, misurato in gradi, quindi, latitudine e longitudine o metri. Per datum si intende il tipo di elissoide di rotazione prescelto che risulti il più possibile tangente con il geoide, un tipo di modello matematico che approssima la superficie terrestre. Il datum può essere locale quando l'ellissoide di rotazione prescelto viene associato con una specifica area della superficie terrestre o geocentrico quando viene considerato il centro della terra come punto di origine. Questo ultimo sistema, di cui il più conosciuto e utilizzato è il WGS84, è quello impiegato maggiormente dai sistemi satellitari perché tridimensionale. Un Sistema di Riferimento può essere geografico quando utilizza coordinate in latitudine e longitudine e proiettato quando invece viene proiettato su un piano cartesiano ed impiega misurazioni metriche. Il Sistema di proiezione maggiormente impiegato è l'UTM (*Universal Transversal Mercator*), che suddivide il globo in 60 spicchi di 6 gradi di longitudine e 8 di latitudine proiettati su un piano. Il punto di origine è il meridiano di Greenwich. Salvemini *et al.* 2013, pp. 6-25; Sistema di Riferimento delle Coordinate, QGIS Documentation 3.28,

https://docs.qgis.org/3.28/it/docs/gentle_gis_introduction/coordinate_reference_systems.html (Ul. Cons. 30/09/2023)

⁴⁰⁸ Bogdani 2009, p. 431;

⁴⁰⁹ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 13

⁴¹⁰ Valenti, Nardini 2004, p. 351

⁴¹¹ Bogdani 2009, p. 434

- creare un *buffer*, cioè un'analisi topologica che permette di identificare aree in connessione con dati geografici ed estrapolare da un tematismo (*layer*) alcuni elementi che sono in una determinata relazione topologica con queste aree;
- realizzare analisi di rete o *Network analysis*, una analisi topografica che calcola i percorsi più veloci o diretti tra le varie aree di interesse;
- fare analisi topologiche generiche su un database con lo scopo di analizzare i dati a partire da variabili topologiche o qualitative;
- effettuare interazioni spaziali (o modelli di gravità) partendo da diverse variabili che registrano il flusso di popolazione, la cultura materiale ed altri aspetti simili;
- produrre simulazioni o analisi predittive, cioè la creazione di un modello ideale che viene applicato al dato con il fine di ricreare contesti ormai perduti.

Oltre alle analisi spaziali, un ulteriore aspetto da non trascurare è la scelta del formato del file di interscambio utilizzato per poter costruire correttamente le analisi e le interrogazioni. Il più usato è lo *shapefile* un formato vettoriale non topologico in grado di descrivere geometrie con allegati attributi di carattere alfanumerici⁴¹². Un'altra tipologia di file molto impiegata, soprattutto nell'ambito dei GIS *open source* è il GeoPackage che, basato su libreria di linguaggio SQLite (*Structured Query Language*), permette l'interscambio di più tipologie di dati ed informazioni, vettoriali, *raster*, alfanumerici, contenute all'interno di un unico file⁴¹³.

Infine, una caratteristica molto importante dei GIS è quella di poterli convertire, sia attraverso l'impiego di specifici software e plug-in sia manualmente tramite linguaggi di programmazione per lo sviluppo di siti web (html, php, xml, javascript, ecc.), da locali, quindi visualizzabili solo tramite software *desktop* sul proprio pc, a vere e proprie mappe Online, tramite la creazione di quello che viene definito un WebGIS (Fig. 55)⁴¹⁴.

⁴¹² Bogdani 2009, p. 437

⁴¹³ Geopackage, <https://www.geopackage.org/> (Ul. Cons. 30/09/2023)

⁴¹⁴ Bogdani 2009, p. 437

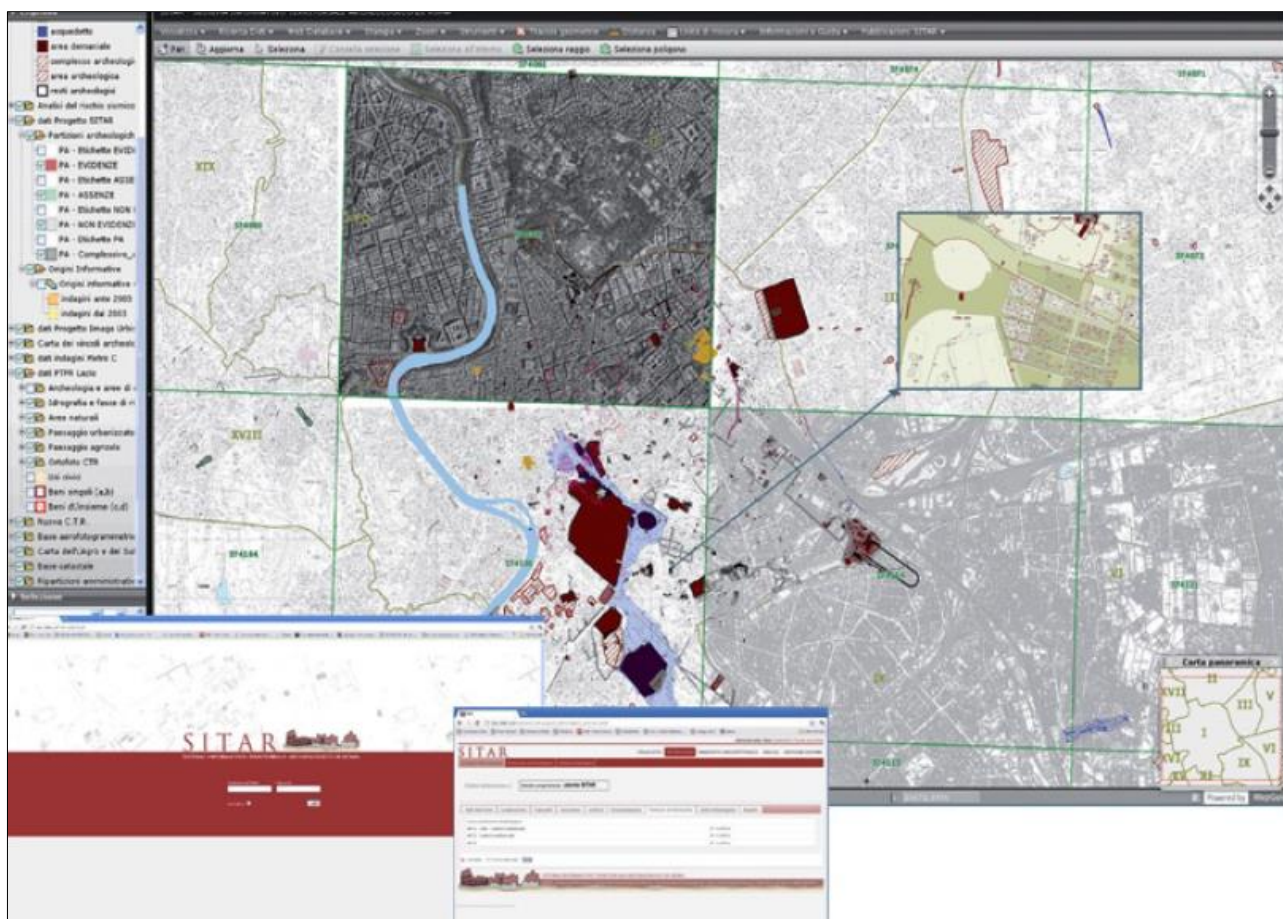


Figura 55 - WebGIS del Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma (da Serlorenzi *et al.* 2012).

4.3 GIS 3D

Sebbene i GIS siano strumenti che di base lavorano con dati bidimensionali, possono essere implementati, con alcune limitazioni più o meno accentuate, anche con oggetti tridimensionali, divenendo a tutti gli effetti GIS 3D.

L'idea di unire dei modelli tridimensionali ad un ambiente GIS era già stata teorizzata a partire dagli inizi degli anni '90, con la coniazione del termine "GIS 3D", ma da allora, e ancora i molti casi a tutt'oggi, la loro implementazione è stata ostacolata da limiti tecnici che hanno impedito lo sviluppo di *workflow* sistematici⁴¹⁵.

Inoltre, fino all'avvento dei processi di scansione laser, geofisici e di fotogrammetria tridimensionale, gli unici sistemi impiegati per visualizzare una superficie tridimensionalmente in un

⁴¹⁵ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 29; Castleford nel 1991 introduce anche il concetto di GIS 4D per l'archeologia, considerando il fattore temporale. Castleford 1991, pp. 95-104; Per una maggiore conoscenza della tematica si consultino: Jones 1989; Pigot 1991; Goodchild 1991; Pigot 1992; Reynoso, Castro 1994; Harris, Lock 1996; Lock 2003, p. 182; Connolly, Lake 2006; Merlo 2016.

GIS erano ricollegabili ai DEM e ai TIN che, come sopra specificato, risultano essere delle rappresentazioni 2,5D⁴¹⁶. Il che risulta problematico nel momento in cui si vuole creare un vero GIS 3D che raffiguri uno spazio che permetta la visione di contenuti e relazioni topologiche attraverso la gestione di modelli volumetrici che dispongano di differenti *layer*, più oggetti e varie caratteristiche fisiche⁴¹⁷.

Un ulteriore aspetto da tenere a mente del GIS è che, come definito da Gillings e Wheatley, può essere considerato come un insieme interattivo di cinque sistemi⁴¹⁸:

1. Il primo è quello che permette l'importazione dei dati spaziali;
2. Il secondo è legato alla memorizzazione delle informazioni spaziali, degli attributi e dei dati topologici, il tutto avvenendo tramite l'impiego di un geo database;
3. Il terzo sistema riguarda la trasformazione dei dati attraverso la loro analisi e manipolazione;
4. Il quarto è responsabile della creazione dei grafici e, al contempo, di visualizzare i risultati;
5. Infine, il quinto è l'interfaccia stessa che viene impiegata come elemento di raccordo per tutti i sistemi al fine di inviare le istruzioni e ottimizzare i processi in maniera fluida tra gli utenti.

Tutti questi sistemi che caratterizzano il GIS, per Klinkenberg, devono essere gestiti anche nelle tre dimensioni se si vuole disporre di un sistema GIS 3D completamente funzionante⁴¹⁹. Con tale concezione, quindi, non si vuole solo ribadire l'importanza dell'implementazione di strumenti nuovi, ma anche un cambio radicale della *pipeline* generale nella quale le informazioni possano essere da subito raccolte, riunite, elaborate e analizzate in maniera “multidimensionale”⁴²⁰.

Se in un primo momento lo sviluppo di questa sistematicità sembrava ostacolata dal costo e dalla difficile reperibilità di strumenti e sistemi per l'acquisizione, la gestione e l'analisi di elementi tridimensionali⁴²¹, oggi, con le recenti possibilità date dai nuovi software, si sono innescate e si stanno innescando diverse sperimentazioni che hanno mostrato e continuano a mostrare nuove possibilità

⁴¹⁶ Questi elementi però sono impiegati per riprodurre ampie porzioni di paesaggio ma risultano non adatti per la riproduzione di oggetti più complessi e discontinui non permettendone una corretta visualizzazione. de Cambray 1993, pp. 338-347; Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 29

⁴¹⁷ Van Leusen, Van Gessel 2016, p. 34

⁴¹⁸ Gillings, Wheatley 2002, pp. 10-11

⁴¹⁹ Klinkenberg 2016, p. 40

⁴²⁰ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 30

⁴²¹ Merlo 2016, p. 2; Van Leusen, Van Gessel 2016, p.35

ma che, al contempo, presentano l'insorgenza di ostacoli di natura differente e, talvolta, maggiormente concettuali (Fig. 56)⁴²².

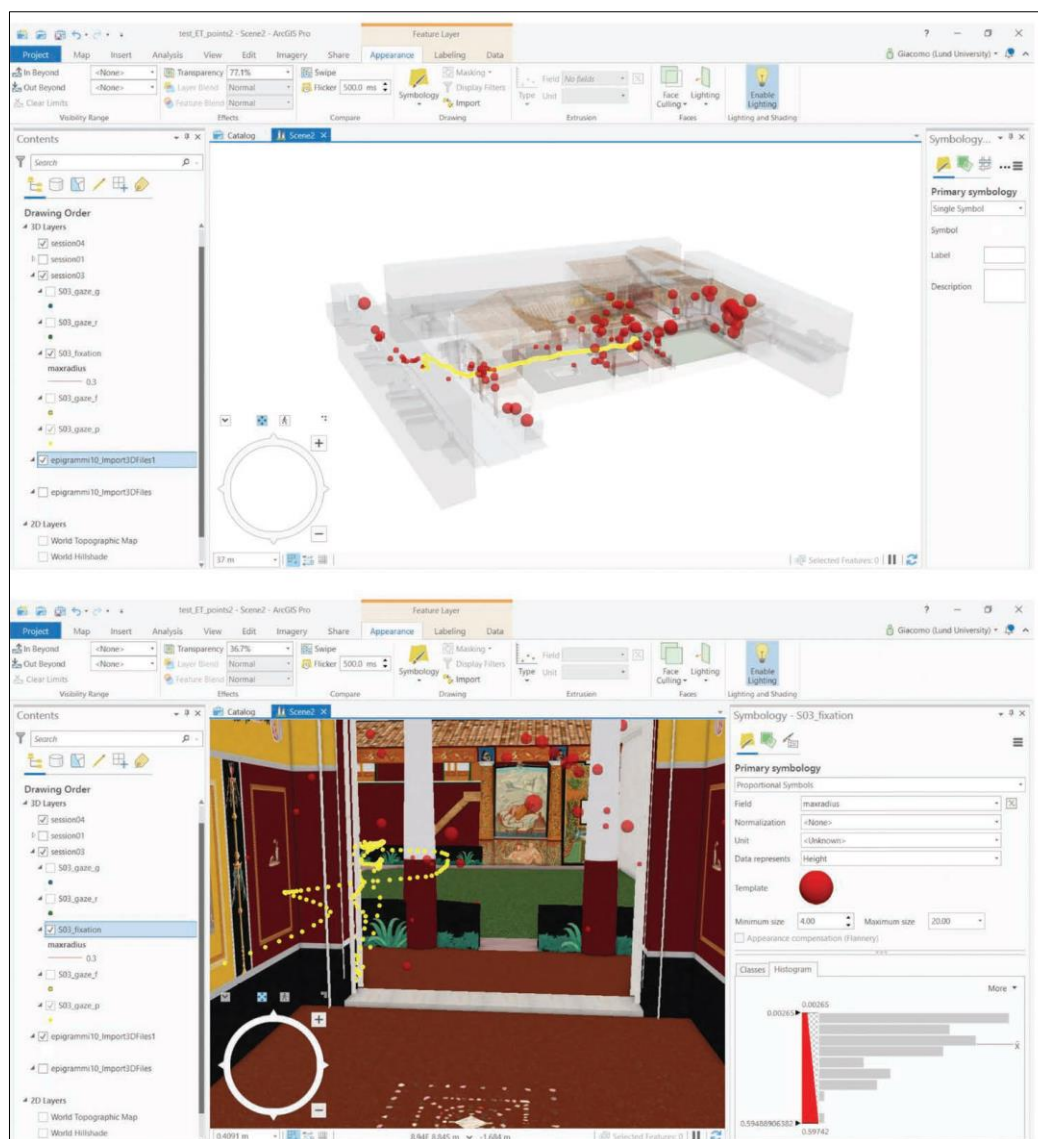


Figura 56 - Un GIS 3D, prodotto tramite ArcGIS pro®, associato con la documentazione proveniente da uno studio della percezione, in realtà virtuale, degli ambienti e decorazioni di una domus pompeiana (da Dell'Unto, Landeschi 2022).

In tali sperimentazioni oltre alle piattaforme GIS 3D sono rientrati anche altri sistemi che, in base alle differenti finalità dei progetti, riescono a gestire e analizzare i dati spaziali tridimensionali in autonomia o tramite l'impiego di diversi software. Essi sono i *Building Information Modelling* (BIM) e i *Game-Based Visualisation Systems* (GBVS).

⁴²² Ad oggi, le piattaforme GIS 3D permettono lo studio e la mappatura anche di aspetti più complessi come quelli immateriali associabili alle esperienze sensoriali, che vengono simulate tramite specifici parametri e algoritmi. Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 30

I BIM sono software creati al fine di fornire un supporto ai progetti architettonici e ingegneristici. Per quanto riguarda i beni culturali è stato impiegato principalmente come sistema di analisi degli edifici storici venendo definito *Heritage Building Information Model* o H-BIM. I programmi BIM impiegano una modellazione di tipo parametrica per la costruzione di volumetrie e superfici, che può essere definita da una struttura semantica adattata ai diversi scopi e finalità quali: la descrizione di sequenze stratigrafiche, l'analisi dei degradi o deformazioni, ecc. Inoltre, gli elementi del BIM, che possono essere scomposti secondo una gerarchia che identifica le varie componenti dell'edificio, sono legati a differenti tipi di informazioni, quali i lavori di restauro e lo stato di conservazione ma anche la datazione e la fase di costruzione, in un connubio che permette di effettuare interrogazioni complesse⁴²³.

Alcuni limiti di tali software, riguardanti i contesti storici, sono legati alla loro caratterizzazione delle geometrie tramite delle primitive standardizzate e soprattutto una uguaglianza nelle proporzioni. Nonostante ciò, il BIM è risultato comunque uno strumento con un significativo impatto per lo studio e la percezione degli edifici storici e archeologici. Un esempio di tale sperimentazione può essere ritrovato nel progetto dell'Università di Bologna di simulazione dei processi di costruzione e di deduzione dell'aspetto originario del tempio etrusco di Uni a Marzabotto, condotto, appunto, tramite l'impiego di un software BIM (Fig. 57)⁴²⁴.

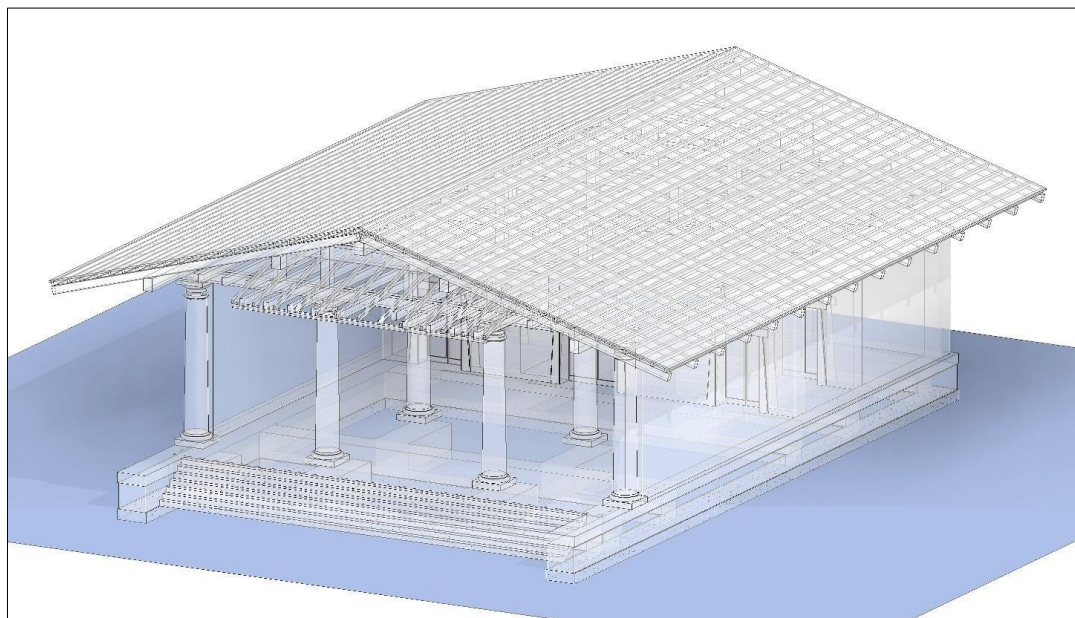


Figura 57 - Il BIM del tempio di Uni a Marzabotto (da Garagnani et al. 2016).

⁴²³ Continenza et al. 2016, p. 319; Raco et al. 2022, pp. 2790-2795

⁴²⁴ Garagnani et al. 2016, pp. 82-84

Secondo tali caratteristiche, quindi, un BIM e un GIS 3D sono strumenti con finalità e metodologie differenti, che però, una volta integrati, possono permettere la creazione di risultati nuovi e forse migliori⁴²⁵.

L'altra categoria sopra menzionata è quella delle GBVS che permettono, a differenza dei GIS e dei BIM, l'implementazione di interfacce grafiche progettabili in base alle esigenze e all'ambiente 3D indagato, nonché di effettuare simulazioni di diversi fenomeni e di inserire, all'interno della scena, personaggi virtuali. Nonostante tali possibilità, ad oggi sono state maggiormente impiegate nelle fasi post-investigative con finalità principalmente rivolte alla divulgazione per il grande pubblico⁴²⁶.

I GIS 3D, quindi, fanno parte di tale categoria di sviluppo, mostrando una sempre maggiore efficacia nei processi di visualizzazione, integrazione di formati e nella costruzione di nuovi strumenti per la gestione e analisi in tre dimensioni⁴²⁷.

Questi processi però sono solo il più recente risultato di una serie di fasi che sono, come già anticipato, iniziati tra la fine del XX e gli inizi del XXI secolo. In questo periodo i limiti, dettati maggiormente dall'elaborazione di dati con geometrie complesse, hanno portato all'impiego di software esterni o aggiuntivi, sfavorendo però i processi di contestualizzazione e integrazione con il resto della documentazione.

Un primissimo esempio di tale soluzione è stata l'implementazione di ESRI⁴²⁸ ArcView® il quale permetteva di visualizzare TIN, dati da Computer-Aided Design (CAD) e *shapefile* nella stessa interfaccia, consentendo anche di effettuare analisi come le mappe di visibilità in 3D⁴²⁹.

Per quanto riguarda invece il mondo *open source*, alcuni tentativi furono condotti tramite il software GRASS GIS per la gestione dei dati volumetrici tridimensionali, mentre la visualizzazione veniva demandata a programmi esterni, ad esempio nviz o Para View, che consentivano, inoltre, l'esecuzione di analisi più complesse sui dati⁴³⁰.

Il principale problema di tale soluzione era che suddividendo la visualizzazione delle informazioni su due sistemi differenti si poteva rischiare di perdere quell'unità di insieme, di tutti i

⁴²⁵ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 31

⁴²⁶ *Ibidem*, pp. 32-33

⁴²⁷ Nonostante, quindi, tali migliorie si presentano, però, ancora alcune limitazioni nell'editare e modellare i vari elementi tridimensionali una volta inseriti nel geodatabase. Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 31

⁴²⁸ ESRI (*Environmental System Research Institute*) è una delle società private più importanti per la produzione e lo sviluppo di software GIS. Per maggiori informazioni: ESRI, Azienda <https://www.esri.com/it-it/about/about-esri/company>; ESRI Italia, <https://www.esriitalia.it/esriitalia/l-azienda> (Ul. Cons. 04/10/2023)

⁴²⁹ Ormsby, Alvy 1999, pp. 337-444

⁴³⁰ Lieberwith 2008, pp. 92-93; Bezzi *et al.* 2006, L'Utilizzo di Voxel in Campo archeologico, https://www.geolab.polimi.it/wp-content/uploads/2020/10/voxel_archeologia_it.pdf (Ul. Cons. 04/10/2023)

dati grafici e alfanumerici, necessaria alla comprensione di tutti i processi o all'identificazione di modelli univoci⁴³¹.

Infatti, l'approccio più recente è quello di integrare nella piattaforma GIS tutte le informazioni di natura tridimensionale, cercando proprio di evitare tale divisione.

In tal senso una delle prime proposte è stata quella di ESRI di impiegare, nello stesso sistema del loro software commerciale ArcGIS®, ArcScene® una finestra di visualizzazione specifica per tutti i dati tridimensionali. Nello stesso frangere il mondo *open source* vedeva lo sviluppo del software GVSIG che permetteva di integrare specifici dati tridimensionali, come modelli di superfici e di confine, direttamente in un sistema georeferenziato tridimensionale, associato con la documentazione grafica e alfanumerica. Purtroppo, subito dopo l'implementazione di tale *feature*, lo sviluppo di tale piattaforma fu interrotto.

Molte società, successivamente, tra cui la stessa ESRI hanno iniziato negli ultimi anni lo sviluppo di piattaforme GIS che possano gestire e analizzare i dati nella loro tridimensionalità. Un esempio di tale situazione, più orientato all'ambito archeologico, è Intrasis, un GIS, sviluppato dalla società Arkeologerna, che impiega l'architettura commerciale di ESRI ArcGIS® e le possibilità dei database PostgreSQL. Il sistema permette di inserire oggetti tridimensionali di tipo vettoriale sui quali possono essere mappati vari aspetti grazie alla possibilità di inserire polilinee 3D associate con i dati del database. Limiti di tale piattaforma sono dati dal fatto che gli oggetti 3D non possono essere salvati all'interno del database, impendendo il funzionamento di molti tipi di analisi, inoltre, il software per essere utilizzato richiede all'utente di disporre di una licenza ArcGIS®.

A differenza di Intrasis, le ultime versioni di ArcGIS Pro® di ESRI, permettono la gestione di oggetti 3D di vario formato, in vario numero e a differenti scale che possono essere poste in relazione, anche, con dati GIS 2D. Questi modelli, inoltre, possono essere salvati all'interno del geodatabase permettendo, quindi, di effettuare maggiori confronti tra i dati e maggiori tipi di analisi. Il più grosso limite di tale piattaforma è dato dai notevoli costi di licenza (Fig. 58)⁴³².

Anche nel mondo *open source* stanno avvenendo nuovi sviluppi, i quali, nello specifico, riguardano principalmente il software Quantum GIS® (QGIS). Una delle soluzioni adottate dagli sviluppatori riguarda l'integrazione tra questo software e il programma di modellazione 3D Blender®, attraverso uno specifico plug-in denominato Blender GIS. Questo permette di importare file di tipo *shapefile*, ma anche *raster*, all'interno dell'ambiente 3D di Blender®, non consente, però,

⁴³¹ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 34

⁴³² *Ibidem*, p. 35

l'inserimento dei dati tabellari o la produzione delle analisi tipiche dei GIS⁴³³. La seconda possibilità, invece, riguarda l'implementazione dei dati tridimensionali direttamente all'interno del software QGIS®, visualizzabili tramite una finestra specifica adibita a tale scopo. Questi oggetti, di vario formato, in vario numero e a differenti scale, possono essere visionati e manipolati. Inoltre, questi modelli possono essere associati ai dati tabellari del geodatabase e salvati come stili di visualizzazione. L'attuale limite risulta ancora l'impossibilità, se non in specifiche situazioni, di effettuare delle analisi complesse sulla geometria di tali dati (Fig. 59).

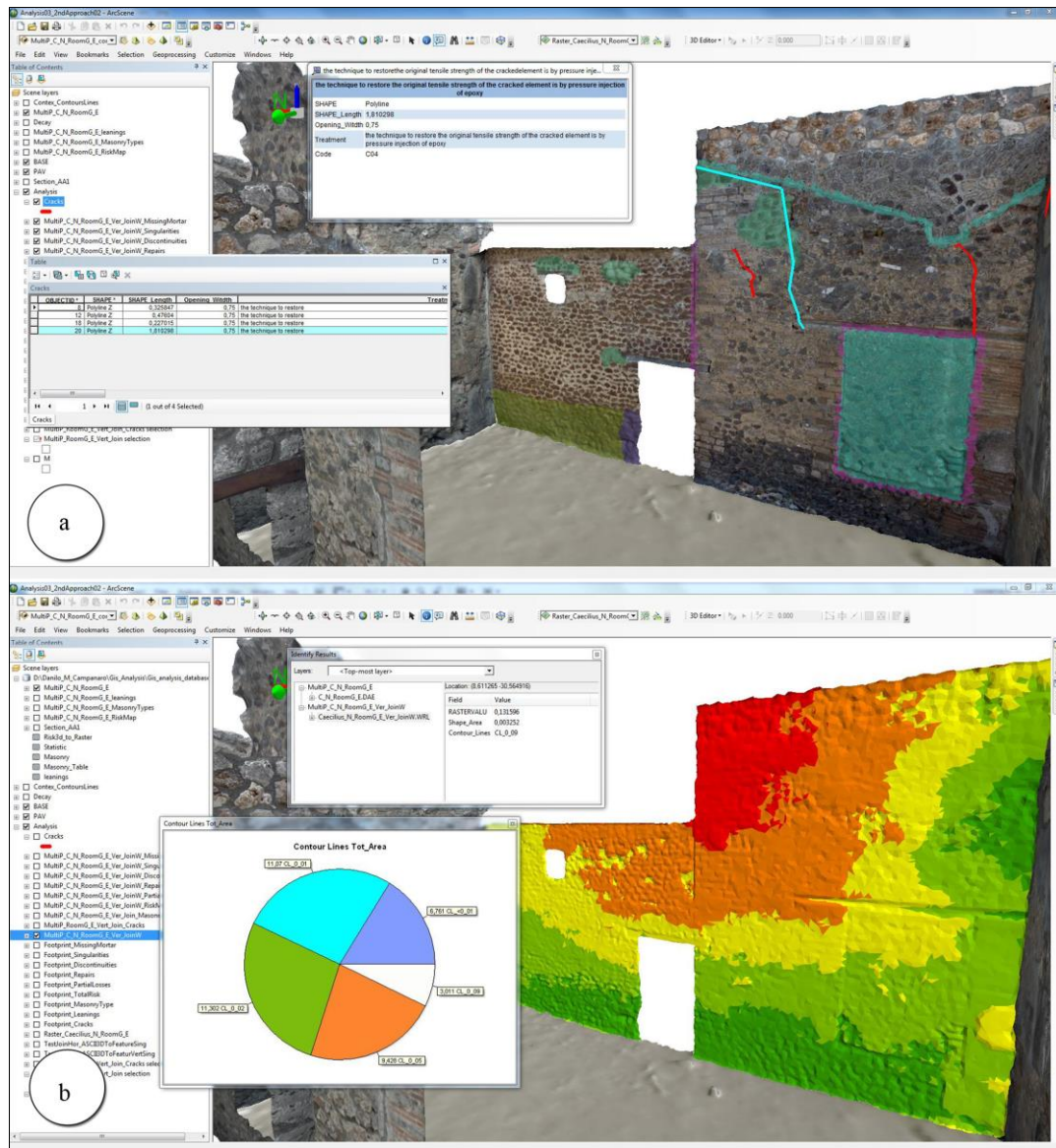


Figura 58 - Studio dello stato di conservazione delle mura di una domus a Pompei, elaborato in ArcScene® (da Campanaro *et al.* 2016).

⁴³³ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 35; Blender GIS, <https://github.com/domlysz/BlenderGIS> (Ul. Cons. 04/01/2023)

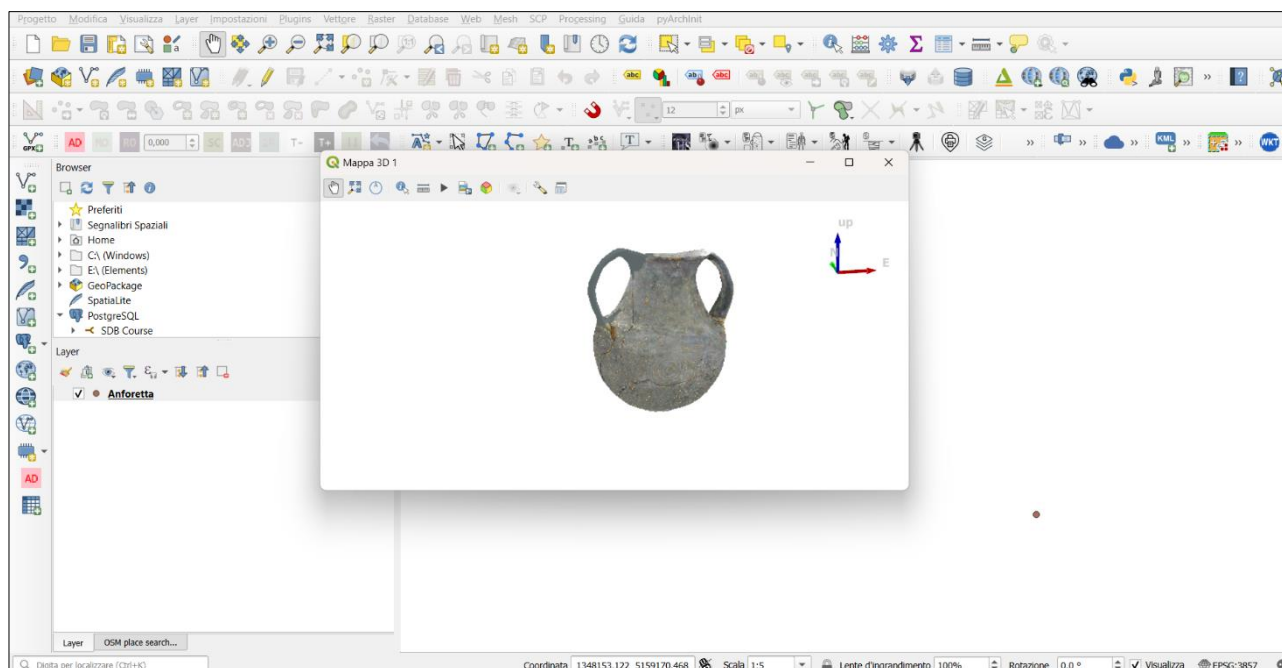


Figura 59 - Modello tridimensionale di una anforetta proveniente dal corredo della Tomba 643 di Monte Abatone visualizzato in QGIS®.

Infine, un ulteriore aspetto legato ai GIS 3D è quello di poterli trasformare in WebGIS 3D, rendendoli di fatto disponibili e fruibili online. Tali sistemi potrebbero ampliare in futuro le possibilità di interoperabilità e di interazione dei dati tra i vari applicativi desktop, limite che ancora risulta molto presente⁴³⁴. Ad oggi però tali piattaforme risultano essere maggiormente impiegate per la divulgazione e la fruizione dei dati (Fig. 60)⁴³⁵.

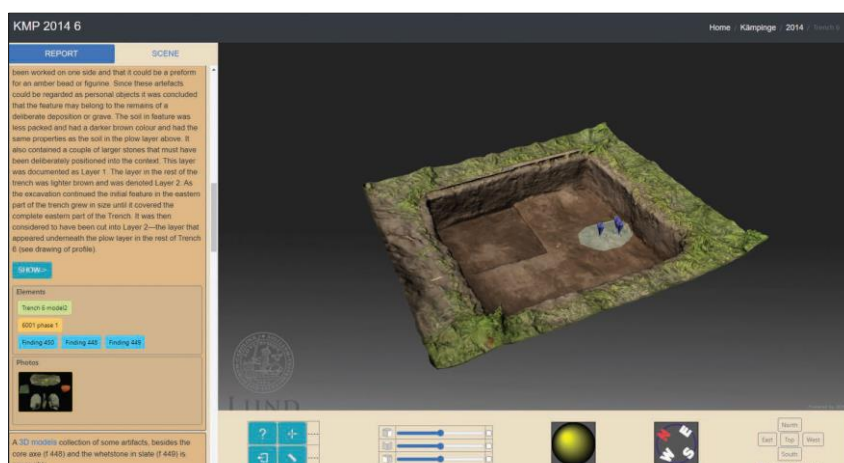


Figura 60 - L'Interactive Reporting Sistem (IRS) svedese, un esempio di WebGIS 3D (da Derudas et al. 2021).

⁴³⁴ Jensen 2018, pp. 32-33; Galeazzi, Richards-Rissetto 2018, p. 2

⁴³⁵ Dell'Unto, Landeschi 2022, p. 36

4.4 Database relazionali

Con il termine database si viene ad intendere un archivio digitale di informazioni organizzato secondo specifici criteri che ne favoriscono la gestione e, allo stesso tempo, l'interrogazione a partire da richieste dell'utente attraverso l'uso di linguaggi dedicati. Il programma di gestione di un database viene generalmente nominato *Database Management System (DBMS)*⁴³⁶. Esistono differenti modelli che permettono la creazione e gestione di un database, ma quello maggiormente impiegato, per le sue potenzialità date dalla possibilità di organizzare logicamente la banca dati senza il bisogno che vi sia un collegamento con la disposizione interna delle informazioni nella macchina⁴³⁷, è quello relazionale.

Tale concezione del modello relazionale per i database fu formulata da Codd nel 1970, per gestire la contabilità e i conti bancari. Sulla base di queste teorizzazioni furono prodotti due database denominati INGRES e R (rispettivamente, i futuri DBMS *open source* Postgres e commerciale Oracle®). Nello stesso frangente fu sviluppato anche il linguaggio *Structured Query Language (SQL)*, specifico per interfacciarsi con i database relazionali. Successivamente, alla metà degli anni Ottanta, fu creato l'approccio *Object Oriented* che registra e gestisce le informazioni considerandole oggetti. Questo passaggio fondamentale permise la gestione delle tabelle non solo come elementi assestanti ma come oggetti da mettere in relazione tra di loro. Infine, dagli anni Novanta con l'avvento del web furono sviluppati i database relazionali orientati agli oggetti o *Object Relational Database Management System (ORDBMS)*⁴³⁸.

I database relazionali si fondano su un principio di base che è quello di permettere la gestione di dati complessi attraverso la loro scomposizione in raggruppamenti omogenei e semplificati in relazione tra loro. Tale soluzione garantisce l'integrità e la coerenza dei dati ma anche l'esecuzione di analisi e interrogazioni complesse⁴³⁹.

Il modello relazionale per le basi di dati presenta due componenti principali, le entità e le relazioni.

⁴³⁶ Del Vecchio *et al.* 2015, p. 79

⁴³⁷ Per "scollegamento" con la disposizione interna delle informazioni nella macchina si intende "una serie di file e indici, la cui gestione è a totale carico del sistema informatico e non all'ideatore dello schema logico" Favretto *et al.* 2019, p. 425

⁴³⁸ Codd 1970; D'Andrea, Niccolucci 2001, p. 200; Favretto *et al.* 2019, p. 426

⁴³⁹ Baldini, Baldassarri 2009, pp. 76-77

Per entità, o tabelle, si intendono le specifiche classi di elementi presenti nel database che dispongono di attributi o campi, le colonne della tabella, e di *record* o oggetti, le righe della tabella.

Le relazioni, invece, come definito dal termine stesso, mettono in collegamento le entità. I tre principali tipi di relazioni sono⁴⁴⁰:

- 1 – 1 (Uno a Uno): in cui vi è un'unica connessione tra due oggetti di due entità diverse;
- 1 – n (Uno a Molti): in cui vi è una o più connessioni tra un oggetto di un'entità e uno o più elementi di un'altra entità;
- n – n (Molti a Molti): in cui vi sono una o più connessioni tra uno o più oggetti delle due entità.

Le relazioni 1-1 e 1-n vengono prodotte tramite una colonna definita chiave primaria (*Primary Key*), che identifica tramite valori univoci i *record* di una tabella, e la chiave o chiavi esterne (*Foreign Key*) con il quale termine si va ad individuare la colonna della tabella o delle tabelle associate che immagazzina i valori dei *record* provenienti dalla *Primary Key*, creando, quindi, una o più correlazioni.

Le relazioni n-n richiedono un'ulteriore tabella che dispone di due *Foreign Key*, le quali immagazzinano i vari *record* da correlare contenute nelle *Primary Key* delle due tabelle da mettere in connessione.

Oltre alle informazioni delle chiavi primarie ed esterne le tabelle possono immagazzinare differenti tipologie di dato, le quali si dividono nelle seguenti categorie:

- Testo: dati testuali di varia lunghezza, che può essere limitata o meno, e tipologia di carattere;
- Numero: campi che contengono *record* esclusivamente numerici, di varia lunghezza e precisione, che possono essere suddivisi in numeri interi (*Integer*) e numeri reali (*Real*) quindi che dispongono di decimali dopo la virgola;
 - Date, ore e intervalli di durata: campi con *record* relativi a periodi di tempo o a date precise;
 - Booleani: Tipi di dato che, seguendo l'algebra di Boole, possono disporre solamente di un valore tra "vero" o "falso";
 - Geometrici: Tipi di campi che dispongono di *record* che possono memorizzare le geometrie, come i dati vettoriali dei GIS.

⁴⁴⁰ Rocchini 2014, pp. 9-10

Un aspetto molto importante dei database è che una volta che un campo viene creato per contenere una tipologia di dato specifica esso deve includere solamente quella tipologia di informazione in maniera omogenea⁴⁴¹.

Un'ulteriore elemento delle tabelle nei database è che esse dispongono sempre di uno o più indici, spesso nascosti, che associati alle colonne permettono di velocizzarne la ricerca automatica. Tali indici possono essere creati in automatico, come quelli legati alle chiavi primarie, o impostati dall'utente in base a specifici parametri scelti. Inoltre, una volta creati, si aggiornano progressivamente in automatico quando vengono modificati i dati della tabella. Esistono poi degli specifici indici, detti spaziali, che permettono di velocizzare la ricerca all'interno delle geometrie vettoriali geografiche⁴⁴².

I database prevedono, infine, una suddivisione interna in schemi, i quali gestiscono i vari *cluster* di tabelle come fossero delle cartelle. In tale maniera si possono avere due tabelle con nomi univoci, cosa che sarebbe impossibile all'interno dello stesso database, in due schemi diversi.

Le basi di dati una volta prodotte, non permettono solamente l'immagazzinamento dei dati ma anche la loro interrogazione (*query*), al fine di ricavarne dei nuovi risultati in base ai criteri scelti. Le interrogazioni che risultano di maggior interesse possono essere salvate e richiamate velocemente tramite le *view* (viste). Le viste nei database presentano lo stesso comportamento delle tabelle, anche se i dati in esse sono solo il risultato dell'interrogazione e quindi non sono salvati all'interno della vista stessa. Proprio per questo la modifica dei dati richiamati dalle altre tabelle del database produce un cambiamento istantaneo anche della *view*.

Le interrogazioni, inoltre, non hanno effetto solamente sui dati alfanumerici delle tabelle ma anche su quelli spaziali, permettendo così di effettuare calcoli sulle distanze, sulle adiacenze tra oggetti, determinare aree di confine, ecc⁴⁴³.

Tutto questo non sarebbe possibile senza il linguaggio SQL lo standard impiegato per la creazione, l'archiviazione e l'elaborazione di informazioni dei database relazionali, che come già

⁴⁴¹ Rocchini 2014, pp. 10-13; Quindi, ad esempio una colonna di tipo numero *Integer* potrà contenere solamente numeri interi, quindi senza virgola. Esistono però degli algoritmi di trasformazione che permettono di trasformare l'intero campo da un tipo ad un altro per contenere informazioni differenti. Questo però può comportare una perdita dei dati o una loro trasformazione. Ad esempio, passando da un numero reale, con una precisione di 2 numeri decimali dopo la virgola, trasformandolo in numero *integer* perderà tutti i valori dopo la virgola.

⁴⁴² Rocchini 2014, pp. 13 e 32;

⁴⁴³ *Ibidem*, pp. 14-15;

anticipato nacque alla metà degli anni '70, ed a oggi risulta il più impiegato in tutti i software DBMS e GIS (Fig. 61)⁴⁴⁴.

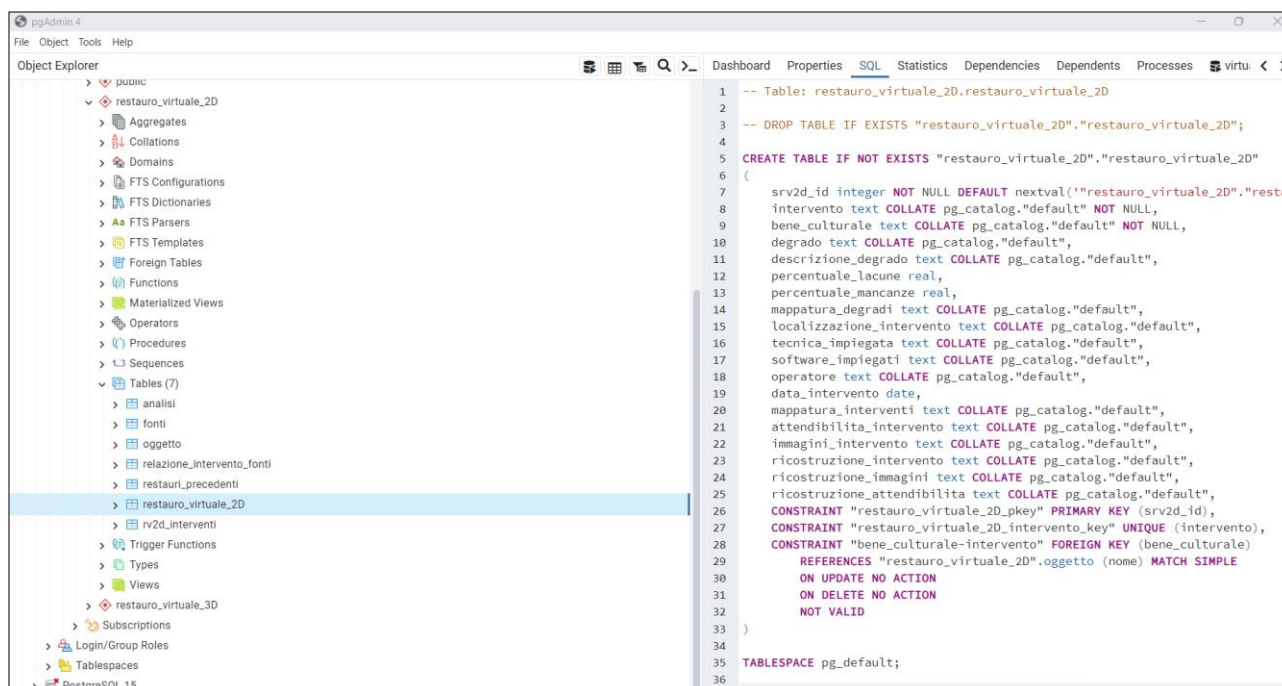


Figura 61 - Esempio di linguaggio SQL, prodotto tramite pgAdmin® 4 e PostgreSQL, per creare una tabella al fine di documentare le attività di restauro virtuale bidimensionale.

4.5 Esempi di applicazioni GIS e GIS 3D per i beni culturali

L'uso dei GIS nel campo dei beni culturali è divenuto oramai uno strumento d'indagine necessario per la gestione e l'elaborazione della mole di dati provenienti dalle diverse pratiche sul campo da quelle archeologiche, a quelle di conservazione e restauro. Pertanto, appare opportuno in questa sede ripercorrere brevemente, attraverso il resoconto su alcune delle esperienze che hanno indirizzato ad un uso sempre maggiore dei GIS, quelle che sono state le tappe della diffusione dei sistemi geografici informatizzati a supporto della ricerca nel campo dei beni culturali.

I GIS sono stati applicati principalmente, soprattutto all'inizio, in ambito territoriale di tutela e di intervento archeologico.

Tra i primi tentativi di associare piattaforme GIS al campo dei beni culturali troviamo il GIS del sito di Pontecagnano, denominato progetto Eurialo e sperimentato tra il 1996 e il 1998 dall'Istituto

⁴⁴⁴ Camagni *et al.* 2005, p. 163; Rocchini 2014, p. 17; Esistono anche database definiti NoSQL, termine che si deve allo sviluppatore Carlo Strozzi che per primo sviluppo nel 1998 un database di tipo relazionale senza l'impiego del linguaggio SQL. Tale metodologia però è frutto di diversi sviluppatori che l'attuaron singolarmente per risolvere i vari problemi riscontrati nella gestione di specifici dati che non potevano essere ricondotti a modelli relazionali. Ad oggi si trovano valide soluzioni NoSQL. Per maggiori informazioni si veda: Favretto *et al.* 2019

Universitario Orientale in collaborazione con l'Università degli Studi di Salerno, con la Soprintendenza Archeologica di Salerno, Avellino e Benevento, con il Comune di Pontecagnano e con IRSIP CNR dell'area di ricerca di Napoli. L'obiettivo era di definire alcune linee guida metodologiche e operative finalizzate alla creazione di un modello di dati standard applicabile all'analisi di contesti funerari. La documentazione grafica veniva mappata in forma vettoriale in ambiente CAD, dove ogni singolo oggetto veniva contrassegnato da un codice numerico che costituiva l'identificatore con cui veniva realizzata la connessione con il database (Fig. 62). Quest'ultimo era organizzato su un'architettura relazionale comprendente tre archivi collegati dal numero di tomba: il primo conteneva le informazioni generali sulla tomba, il secondo registrava i resti osteologici e gli altri materiali organici, il terzo ogni singolo corredo. La connessione tra parte grafica e database avveniva attraverso l'uso del programma GIS MapInfo®⁴⁴⁵.

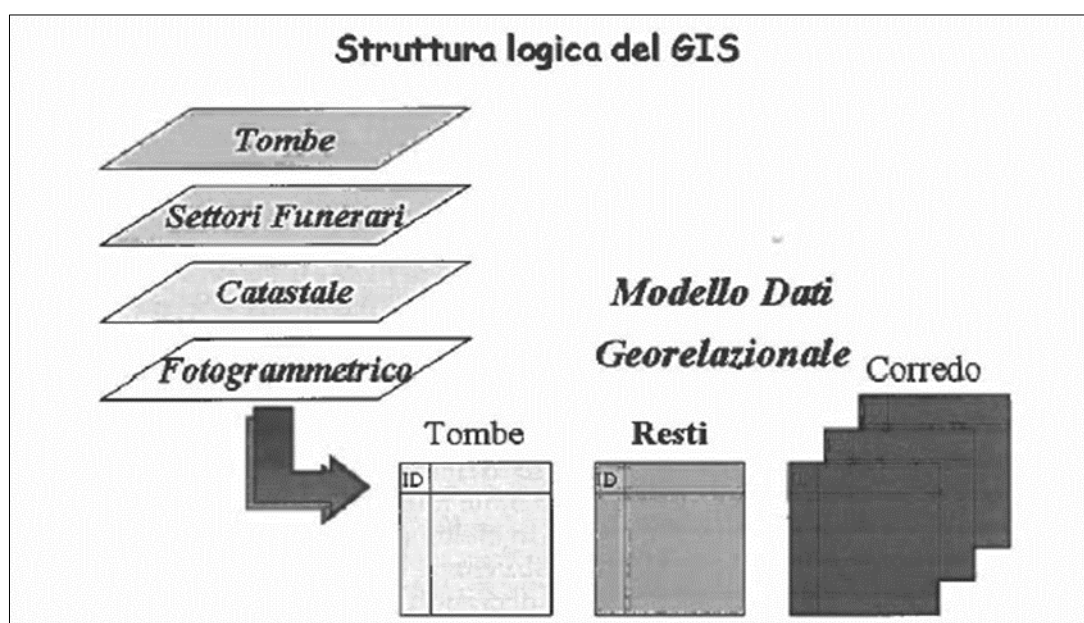


Figura 62 - Struttura logica del GIS di Pontecagnano: la relazione tra le informazioni cartografiche e il modello dati georelazionale (da D'Andrea 1999).

Altro tentativo fu la piattaforma GIS dello scavo di Poggio Imperiale a Poggibonsi dell'università di Siena. In questo caso si procedette direttamente ad inserire la grafica vettoriale all'interno del GIS e non come derivazione da ambiente CAD. A questo scopo fu utilizzato come piattaforma GIS il programma MacMap® che permetteva di costruire la struttura dei dati attraverso la creazione di un modello, organizzato per tipi e sottotipi, sia geometricamente con punti, linee e superfici, sia graficamente. I dati furono organizzati in 13 tipologie principali, che presentavano a loro volta sotto-categorie, che accoglievano in maniera stratificata l'intero patrimonio di informazioni

⁴⁴⁵ D'Andrea 1999, pp. 231 – 235

riguardanti il sito di Poggio Imperiale, tra cui: la morfologia della collina sia prima sia dopo l'intervento archeologico; le attività di ricognizione; l'intervento di scavo; le indagini paleopedologiche, i test geomagnetici e di resistività e gli studi antropologici dei reperti osteologici; le prospettive di musealizzazione con la creazione di un parco archeologico e le elaborazioni predittive sulla base dei dati acquisiti⁴⁴⁶.

Successivamente, l'uso di questi applicativi fu sviluppato per lo studio e la tutela dei centri urbani, ne è un esempio il SIT (Sistema Informativo Territoriale) archeologico della città di Parma. Progetto avviato dal Museo Archeologico Nazionale di Parma in collaborazione con il Comune di Parma, la Compagnia Generale di Riprese aeree e il centro di GeoTecnologie dell'Università di Siena, con il fine di rendere disponibile uno strumento di archiviazione, tutela e analisi che si rivelasse funzionale sia alle esigenze delle ricerche storico-archeologiche, sia alle esigenze dell'amministrazione comunale e delle imprese nelle fasi di programmazione urbanistica degli interventi da realizzare sulla città e sul territorio. La ricerca interessò il centro storico della città di Parma, con una cronologia delle evidenze che andava dalla media età del Bronzo fino ai rinvenimenti di età farnesiana del XVIII secolo. Tutta la mole di dati fu inserita all'interno del GIS che permise la creazione di carte tematiche riguardanti gli aspetti storico-archeologici e geografici del territorio⁴⁴⁷.

Altro progetto è quello del SITAR (Sistema Informativo territoriale della città di Roma) che nacque con lo scopo di indirizzare le nuove pianificazioni territoriali, di monitorare le attività d'indagine e tutela archeologica nel territorio della città di Roma e disporre a scopi scientifici e di studio di tutto il materiale disponibile rendendolo fruibile attraverso l'uso di un webGIS. L'architettura informativa del sistema si presentava come una banca dati geospaziale che pubblicava informazioni opportunamente digitalizzate e georiferite. La logica fondante su cui si era sviluppata tutta la costruzione del GIS si articolava in un numero definito di momenti consecutivi, necessari alla costruzione di un catasto dinamico delle informazioni scientifiche e amministrative. Partendo quindi dalla raccolta, informatizzazione e organizzazione della documentazione, si procedeva all'implementazione del sistema attraverso una schedatura sintetica delle informazioni, individuando i dati essenziali per descrivere e rappresentare spazialmente le evidenze individuate, per arrivare alla creazione di un'uniformità di dati che potesse essere di pubblico utilizzo⁴⁴⁸.

Altro esempio con un approccio geografico e topografico, fu il “Sistema Informativo Territoriale della regione Campania” un progetto condotto dalla Direzione Regionale in

⁴⁴⁶ Nardini 2000, pp. 112-115

⁴⁴⁷ Bigliardi 2007, pp. 77-97

⁴⁴⁸ Serlorenzi *et al.* 2012, pp. 33 – 35

collaborazione con le Soprintendenze archeologiche e la Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici e per il Patrimonio Storico – Artistico ed Etno – antropologico di Salerno e Avellino, fruendo della consulenza tecnico – scientifica del Dipartimento per i rapporti con le Regioni e dell’Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del CNR, nell’ambito del Programma Operativo Nazionale 2000 – 2006 “Sicurezza per lo sviluppo del Mezzogiorno d’Italia”, cofinanziato dalla UE e gestito dai Ministeri dell’Interno e della Difesa d’intesa con il Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC). Con tale progetto si intendeva realizzare un GIS su base cartografica georeferenziata a livello regionale, concepito come strumento per la produzione e lo scambio di dati finalizzati alla conoscenza, salvaguardia e gestione del patrimonio culturale attestato in Campania, ma anche come centro di servizio per l’elaborazione di carte tematiche funzionali alle attività di controllo preventivo da parte degli Organi statali e delle Forze dell’Ordine rispettivamente preposti alla tutela e al contrasto dell’illegalità, nonché utili per la pianificazione e la progettazione degli interventi sul territorio programmati dagli Enti locali, in aderenza con le attuali legislazioni che prescrivono le valutazioni di impatto ambientale e archeologico preliminari alla realizzazione dei piani paesaggistici e delle infrastrutture pubbliche. Esso si proponeva come obiettivo primario quello di monitorare i fattori di rischio ambientale e antropico, causa di potenziali o effettivi danni per la sicurezza e la conservazione dei beni archeologici, architettonici, storico – artistici e paesaggistici individuati nel territorio campano, quale presupposto fondamentale per dare concreta efficacia all’azione istituzionale di tutela preventiva e di valorizzazione del patrimonio culturale, in un contesto storicamente pluristratificato e assai diversificato dal punto di vista geografico, contraddistinto da una notevole densità demografica e da complesse problematiche socio-economiche (Fig. 63)⁴⁴⁹.

Riportato questo primo excursus generale sui GIS applicati ai beni culturali ci si concentrerà ora su quelli maggiormente legati alla tematica della ricerca. A tal proposito, in primo luogo, deve essere menzionato il sistema ministeriale WebGIS SICaR (Sistema Informativo per il Cantiere di Restauro). Tale sistema è associato ad una piattaforma WebGIS 2D per il restauro che permette di lavorare su una base ortofotografica, e quindi misurabile, della superficie sia in una fase precedente all’intervento che successiva, integrata da un database relazionale. Questo GIS dà la possibilità di mappare vettorialmente le evidenze e, al contempo, di contenere tutte le informazioni, alfanumeriche e *raster*, relative alle attività preliminari di restauro e di documentazione, ma anche di intervento vero e proprio (Fig. 64)⁴⁵⁰.

⁴⁴⁹ Cassata 2008, p. 11; Miele 2011, pp. 24-25

⁴⁵⁰ Il fattore WebGIS di questo progetto risulta importante non solo per l’inserimento dei dati ma anche per la consultazione e il controllo da parte di altri restauratori. Baracchini *et al.* 2005, pp. 735-737. per approfondire su tale tema si vedano gli articoli di: Baracchini *et al.* 2003; Siotto *et al.* 2016; Fabiani *et al.* 2016.

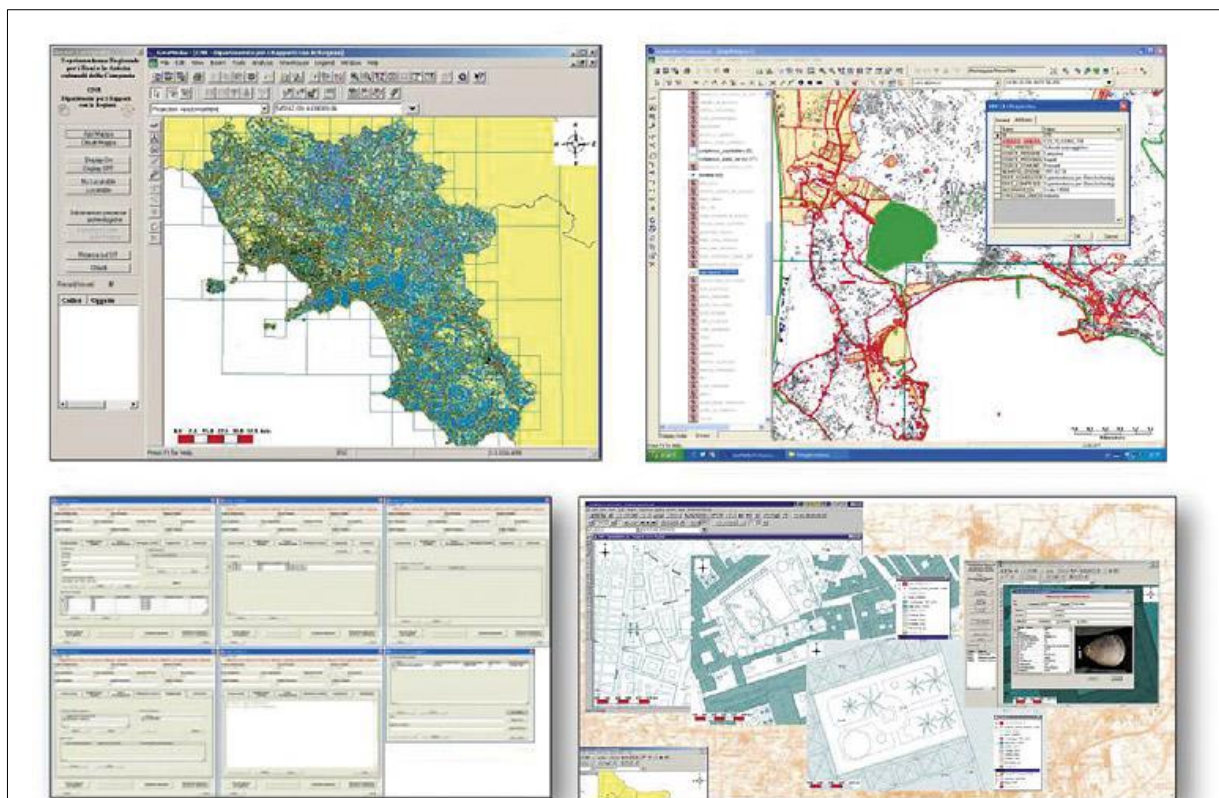


Figura 63 - Il Sistema Informativo Territoriale della regione Campania (da Miele 2011).



Figura 64 - Esempio di mappatura dei degradi, della facciata de I Quattro Canti a Palermo, tramite il SICaR (da Fabiani *et al.* 2016).

Un altro progetto simile, che riguarda l'ambito pittorico, è la ricerca portata avanti dall'Università degli Studi di Urbino relativa al tentativo di produrre una metodologia che permetta, in ambiente GIS, di effettuare analisi spaziali, tramite l'impiego di ortomosaici e DEM, con il fine di fornire informazioni sullo stato conservazione dell'opera ed evidenziare eventuali attacchi biologici, tramite analisi di riconoscimento di pattern simili. Inoltre, l'impiego di rilevazioni 3D delle superfici permette il monitoraggio dei supporti nel tempo e il controllo della morfologia dell'opera a fini di programmazione di intervento⁴⁵¹.

Un'ulteriore progetto da considerare è quello legato al restauro della copertura della pieve di Novi dove la complessità della struttura e la varietà delle informazioni prodotte ha richiesto l'impiego di uno strumento, nello specifico ArcGIS®, che potesse da una parte documentare vettorialmente tutte le componenti della copertura ed effettuare su di esse le varie mappature dei degradi e degli interventi, mentre dall'altra di connettere ad esse, in un sistema relazionale, i vari dati, alfanumerici, schede e fotografie, prodotte durante tutta l'indagine preventiva di restauro. I risultati di tale progetto hanno fornito uno strumento per valutare le attività ed effettuare previsioni dei costi e delle tempistiche (Fig. 65)⁴⁵².

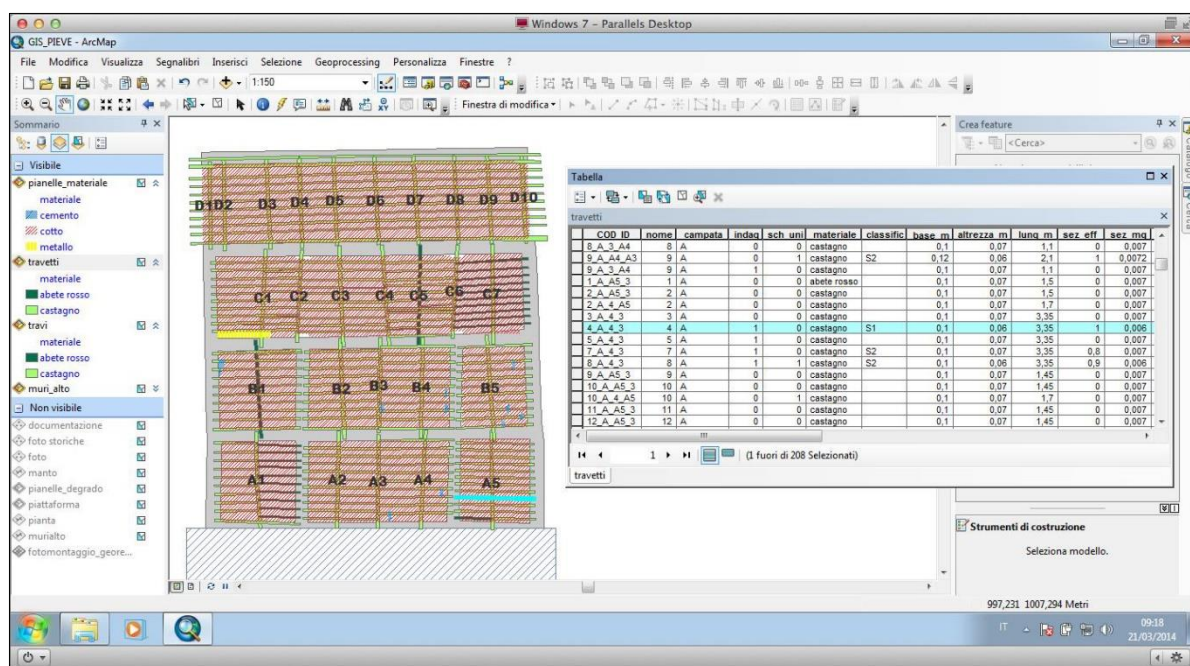


Figura 65 - GIS della copertura della pieve di Novi (da Casanova, Acacia 2014).

Gli esempi riportati, se pur non esaustivi di tutta la bibliografia esistente, mostrano però come ci sia ancora oggi una sperimentazione di tali sistemi tramite procedure diverse, che devono essere

⁴⁵¹ Bertozzi *et al.* 2015, pp. 1-4

⁴⁵² Casanova, Acacia 2014, pp. 2-5

calibrate sulle opere e gli interventi da eseguire. Il restauro reale e quello virtuale però lavorano maggiormente su oggetti che dispongono di una loro tridimensionalità, quindi, a questo punto della trattazione si ritiene doveroso concentrarsi brevemente su alcuni dei maggiori progetti che si sono mossi verso l'uso di un GIS 3D.

Un primo studio di questa tipologia di documentazione può essere individuato già nel 2001 in cui si tentò lo sviluppo di un sistema WebGIS 3D che potesse fornire informazioni testuali tramite interrogazioni, nonché permettere di navigare e visualizzare i dati visivi tridimensionali associati con le attività di restauro effettuate su otto piccoli sepolcri collocati lungo la via Appia antica a Roma⁴⁵³.

Successivamente nel 2012 venne sviluppato un GIS 3D per il progetto di reintegrazione delle lacune urbane. Il principale soggetto delle attività di restauro riguardava la torre di Santo Stefano di Sessanio, crollata a causa del terremoto che colpì l'Aquila, e i paesi limitrofi, nel 2009. Questo articolo evidenziava nell'uso del GIS 3D uno strumento di convalida delle ipotesi ricostruttive volumetriche fornendo anche dati sulla possibile stabilità e ricostruzione della torre. Il progetto si spostò poi sull'intero borgo, evidenziando come il GIS 3D potesse essere uno strumento per la produzione del piano di ricostruzione, in quanto forniva un valido supporto alla gestione dei dati tabellari relativi alle schede e ai report prodotti e permetteva la redazione delle elaborazioni grafiche atte ad evidenziare, ad esempio, le tipologie di intervento da eseguire sugli edifici⁴⁵⁴ (Fig. 66).

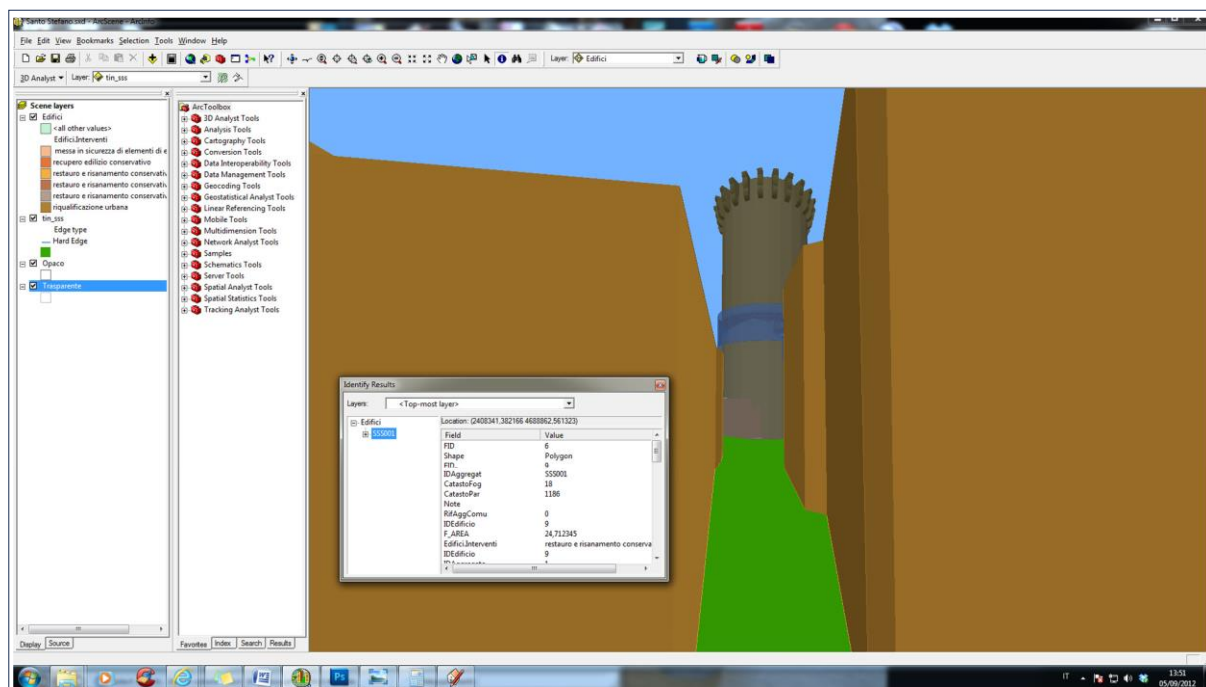


Figura 66 - Il GIS 3D della torre di Santo Stefano a Sessanio e dell'intero borgo (da Bartolomucci et al. 2012).

⁴⁵³ Gaiani et al. 2001, pp. 86-94

⁴⁵⁴ Bartolomucci et al. 2012, pp. 159-165

Del 2013 è il progetto dell'Università di Roma 3 di creare un GIS 3D, tramite software *opensource*, che potesse contenere tutte le informazioni grafiche e alfanumeriche legate agli interventi di restauro delle mura Aureliane a Roma. Il progetto partiva dalla restituzione 3D delle mura Aureliane nell'area di Porta Latina, da cui furono prodotti Ortomosaici e DEM che importati in QGIS® furono impiegati come base per mappare i vari interventi e per connettere ad esse le informazioni derivanti dalle schede ed immagini prodotte⁴⁵⁵.

Del 2016 è il progetto dell'Università di Lund associato con la creazione del GIS 3D dell'insula V 1 di Pompei nato all'interno del *Swedish Pompeii Project*. Questo strumento venne sviluppato, in ArcGIS Pro®, allo scopo di monitorare le strutture di Pompei a partire da una ricostruzione dell'insula V 1 prodotta tramite laser scanner. Le mappature delle murature bidimensionali DEM e TIN furono sovrapposte alle murature del rilievo 3D in ambiente GIS e tramite i *tools* e le analisi spaziali si produssero mappe del rischio con il fine di mettere in evidenza i punti critici delle murature stesse (Fig. 67)⁴⁵⁶.

Infine, del 2020 è lo studio portato avanti dall'Università di Urbino sugli interventi di restauro condotti sulla Porta Valbona di Urbino. In tale sistema i vari studi effettuati nel corso del tempo e la documentazione delle analisi prodotte per il restauro furono inseriti e, successivamente, gestiti all'interno del GIS, nello specifico ArcGIS®, tramite mappature vettoriali e tabelle associate. Inoltre, l'interrogazione delle varie informazioni avveniva in un ambiente GIS 3D, tramite ArcScene®, in cui coesistevano prospetti, piante e modelli (Fig. 68)⁴⁵⁷.

⁴⁵⁵ Canciani *et al.* 2013, pp. 143-148

⁴⁵⁶ Campanaro *et al.* 2016, pp. 1-11; Dell'Unto *et al.* 2016, pp. 74-92

⁴⁵⁷ Baratin *et al.* 2020, pp. 1045-1051

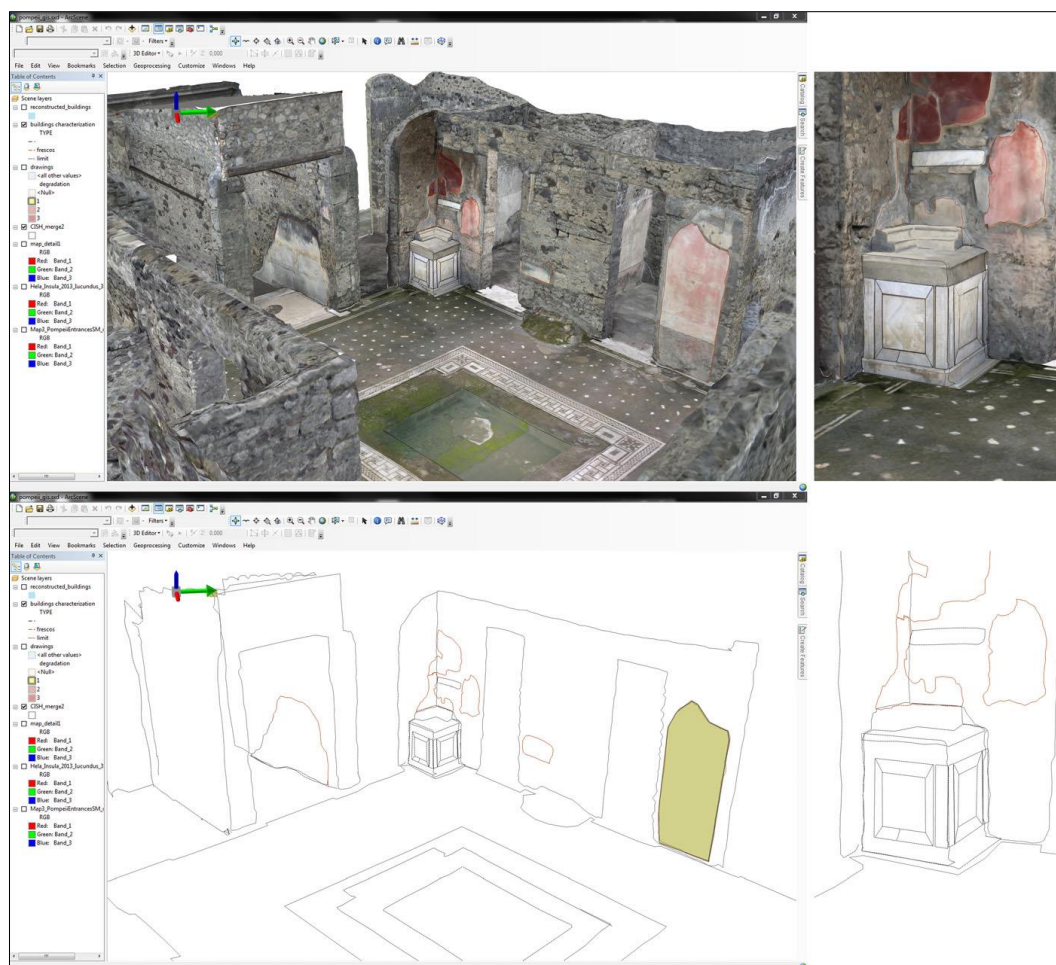


Figura 67 - Il GIS 3D della casa di Iocundus Metellus a Pompei, progetto legato allo Swedish Pompeii Project (da Dell'Unto *et al.* 2016).

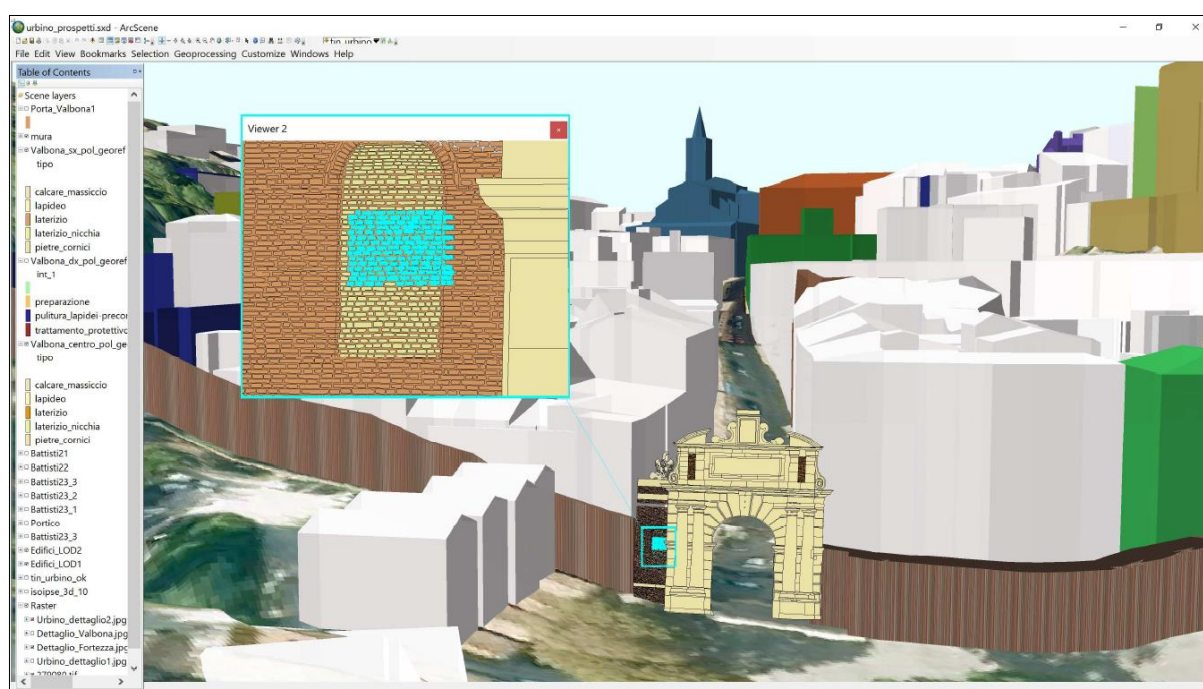


Figura 68 - GIS 3D degli interventi di restauro della Porta Valbona ad Urbino (da Baratin *et al.* 2020).

5. La piattaforma e il *workflow* di lavoro

5.1 Il Linguaggio Python e lo sviluppo della piattaforma

Il linguaggio di programmazione può essere definito come un “formalismo artificiale nel quale poter esprimere algoritmi”⁴⁵⁸, cioè un insieme di istruzioni che definiscono un programma controllato da regole e composto da una simbologia e da delle convenzioni⁴⁵⁹.

Prima di poter maggiormente comprendere cosa sia un linguaggio di programmazione si deve introdurre un ulteriore concetto, quello della macchina astratta. Con questo termine si intende l’astrazione dell’idea di calcolatore fisico. Un calcolatore, o computer, è uno strumento atto all’esecuzione di algoritmi che devono essere formalmente organizzati secondo i costrutti, o istruzioni, di un linguaggio di programmazione e devono essere comprensibili all’utente che esegue l’operazione. Il linguaggio di programmazione sarà quindi composto da una sintassi e da una semantica ben definiti che permettono di produrre dei programmi⁴⁶⁰. I programmi sono, in definitiva, un insieme di istruzioni mentre l’azione di delineare e descrivere queste istruzioni, verificandone la correttezza, è detta programmazione⁴⁶¹.

Volendo fornire, quindi, una definizione di macchina astratta possiamo considerarla come un qualunque gruppo di algoritmi e informazioni strutturate di dati che danno la possibilità di immagazzinare e svolgere programmi descritti in uno specifico linguaggio di programmazione.

In generale, la macchina astratta è prodotta tramite una memoria, che immagazzina programmi e dati, e da un interprete, cioè colui che permette l’esecuzione delle istruzioni che compongono un programma⁴⁶².

Ogni interprete, inoltre, in base al linguaggio da interpretare esegue delle specifiche operazioni, tra le quali se ne possono individuare alcune che risultano essere in comune tra gli operatori presentando similarità di esecuzione. Queste si possono distinguere tramite⁴⁶³:

- Le operazioni associate con la manipolazione dei dati primitivi, con il quale termine si indicano tutte quelle informazioni che possono essere rappresentate direttamente dal calcolatore. Un

⁴⁵⁸ Gabbrielli, Martini 2011, p. 27

⁴⁵⁹ Tesconi 2023, p. 1

⁴⁶⁰ Gabbrielli, Martini 2011, p. 1

⁴⁶¹ Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, p. 3, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24)

⁴⁶² Gabbrielli, Martini 2011, p.2

⁴⁶³ *Ibidem*, pp. 3-4

esempio di questi dati sono i numeri e le operazioni aritmetiche, o operazioni primitive, presenti di *default* all'interno della macchina.

- Le strutture dati e operazioni atte al controllo della sequenza dell'esecuzione delle istruzioni del programma. Tali operazioni di base sequenziali, possono subire delle variazioni, o salti nella sequenza, collegate con determinati accadimenti associati a delle specifiche condizioni. L'interprete, quindi, possiede delle strutture dati specifiche per la memorizzazione o l'aggiornamento delle istruzioni di esecuzione.

- Le strutture dati e le operazioni che controllano lo scambio delle informazioni tra l'interprete e la memoria.

- Infine, le strutture dati e le operazioni che gestiscono la memoria per i programmi e i dati.

Un altro aspetto che accomuna tutti gli interpreti è il ciclo di esecuzione che prende avvio dalla fase di acquisizione, direttamente dalla memoria, della nuova istruzione da eseguire. Questa viene interpretata per identificare l'operazione da svolgere e gli operandi, che devono essere prelevati dalla memoria, su cui eseguire questa operazione. Una volta conclusa la richiesta l'eventuale risultato può essere memorizzato. Infine, l'interprete passa all'istruzione successiva seguendo i medesimi passaggi. Tutto il processo continua ciclicamente finché l'operazione richiesta non presenta un'istruzione di arresto.

Quindi, ogni macchina astratta possiede uno specifico linguaggio macchina che si identifica come il linguaggio che comprende il suo interprete⁴⁶⁴. I programmi prodotti tramite tale codice saranno salvati nella memoria, ma in strutture distinte rispetto a quella dei dati primitivi.

Da questi aspetti si può comprendere come vi sono diverse tipologie di linguaggi di programmazione, i quali sono suddivisibili nelle seguenti quattro categorie⁴⁶⁵:

- Linguaggi di basso livello, ovvero tutti quei linguaggi che si pongono più vicini alle strutture della macchina hardware e che sono più difficili da comprendere per gli esseri umani. Ne è un esempio il linguaggio macchina o il linguaggio *assembly*. Spesso questi linguaggi non sono trasferibili tra differenti tipologie di hardware, proprio perché basati sulle strutture fisiche dell'hardware di riferimento.

- Linguaggi di alto livello, quelli diametralmente opposti rispetto ai linguaggi di basso livello e che, quindi, attraverso astrazioni, forniscono costrutti che non sono associati con gli elementi fisici della macchina. Ne risulta che gli algoritmi saranno più vicini al linguaggio naturale e, di

⁴⁶⁴ Gabbrielli, Martini 2011, p. 5

⁴⁶⁵ Gabbrielli, Martini 2011, p. 5; Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, p. 8, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9730-7_1 (Ul. Cons. 22/03/24); Tesconi 2023, p. 1

conseguenza, maggiormente comprensibili dall'utente. Tali operazioni però dovranno corrispondere a costrutti del calcolatore per permetterne l'esecuzione. Sono un esempio di tale categoria i linguaggi Python, Java, C++, JavaScript.

- Linguaggi di *scripting*, utilizzati per automatizzare tutte quelle operazioni che risultino ripetitive. Ne sono un esempio, Bash, Perl e PowerShell.
- Linguaggi di *markup*, impiegati nella definizione della formattazione e struttura di dati o documenti. Non si tratta, in questo caso, di veri e propri linguaggi di programmazione, ma il loro impiego è associato principalmente allo sviluppo di pagine internet. In questa tipologia di linguaggio sono presenti HTML, XML e Mark-down.

In definitiva si può comprendere come la macchina astratta concettualmente permette di definire differenti sistemi sia fisici, come l'hardware del computer, sia digitali, come può essere il World Wide Web.

Per comprendere a pieno le diverse componenti della macchina astratta però si deve far riferimento, come sopradetto, a quelle della macchina hardware.

Il calcolatore fisico è composto da dispositivi di tipo elettronico e circuiti logici che permettono il funzionamento delle varie componenti. In *primis* abbiamo una *Central Processor Unit* (CPU) o processore, la parte fisica che esegue le istruzioni.

Alla CPU sono legate diverse componenti di memoria che si suddividono in differenti livelli a partire dalla memoria principale, la quale immagazzina le informazioni e le istruzioni necessarie ai processi frequenti ed è direttamente accessibile dalla CPU. Inoltre, questa unità di memorizzazione è composta da celle, o parole, che, poste sequenziali in linea, dispongono di una lunghezza fissa di memoria⁴⁶⁶ e di una posizione univoca, o indirizzo, che le identifica. Tale stringa di riconoscimento risulta necessaria alla CPU per distinguere, prendere e memorizzare i dati, provenienti da un'istruzione, in una o più specifiche celle presenti all'interno della memoria primaria. La memoria primaria è, inoltre, composta da due elementi fisici: la *Random Access Memory* (RAM) che memorizza le istruzioni da eseguire e le invia alla CPU, ma che nel momento in cui l'hardware viene spento perde ogni dato memorizzato e che per questo viene definita anche memoria volatile; e la *Read Only Memory* (ROM), la memoria che presenta al suo interno solo alcuni specifici dati, necessari all'avvio e al funzionamento del computer e del sistema operativo e che è solamente leggibile dalla CPU⁴⁶⁷.

⁴⁶⁶ Tale grandezza di memoria è legata ai multipli di 8 bit. le componenti più recenti dispongono di 64 bit di memoria per ogni cella. Gabbrielli, Martini 2011, p. 6

⁴⁶⁷ Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, p. 8, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24); Barillaro 2023, *Differenza tra RAM e ROM*, <https://www.informaticapertutti.com/differenza-tra-ram-e-rom/> (Ul. Cons. 04/12/2023)

Vi è poi la memoria secondaria che, realizzata principalmente tramite sistemi ottici o magnetici, immagazzina una maggior quantità di dati e informazioni non perdendole una volta che viene spento il computer. Questa periferica però non essendo direttamente accessibile dalla CPU risulta più lenta rispetto a quella primaria. È, quindi, la memoria primaria che fa da ponte di congiunzione tra la CPU e la memoria secondaria immagazzinando i dati e i processi in entrata, che devono essere eseguiti dalla CPU⁴⁶⁸.

Programmi e dati sono memorizzati in entrambe le memorie attraverso l'impiego dell'alfabeto binario. I dati possono essere ricondotti a poche categorie o tipi primitivi. In aggiunta, a tipologie di dato diverse corrispondono rappresentazioni differenti che richiedono più o meno celle della memoria. La stessa macchina hardware presenta dei tipi standard di dati primitivi, definiti predefiniti, che può direttamente impiegare nelle elaborazioni del linguaggio macchina⁴⁶⁹.

La macchina hardware necessita, però, anche di un elemento che si ponga come interprete. Tale compito viene gestito dalla CPU. La quale risulta essere composta da diverse componenti distinte⁴⁷⁰:

- L'*Arithmetic Logic Unit* (ALU), l'unità preposta all'esecuzione delle operazioni logiche e aritmetiche.
- I registri, unità specifiche di memoria temporanea che eseguono diversi compiti. Ad esempio, vi è l'*Instruction Register* (IR) che memorizza l'istruzione del codice che deve essere svolta dalla CPU, o il *Program Counter* (PC) che identifica l'istruzione successiva che deve essere eseguita.
- Infine, la *Control Unit* (CU), l'unità che prende i dati e decifra le istruzioni, controlla lo spostamento delle informazioni tra la memoria e la CPU e svolge l'attività di coordinamento delle varie parti della CPU.

La CU, inoltre, si occupa del cosiddetto “ciclo *fetch-decode-execute*”. Questo ciclo prende il nome dalle tre fasi che lo compongono:

- Nella prima, quella di *fetch*, si recupera dalla memoria la successiva istruzione che deve essere eseguita, per fare ciò ci si avvale del registro PC il quale contiene l'indirizzo di tale informazione⁴⁷¹, che viene così immagazzinata nell'IR;
- Nella seconda, di *decode*, avviene la decodifica dell'istruzione presente nell'IR;
- Da ultimo, nella fase di *execute*, avviene l'esecuzione dell'operazione primitiva. Il risultato finale, se presente, può essere memorizzato in una specifica cella.

⁴⁶⁸ Malik 2015, pp. 4-6

⁴⁶⁹ Gabbrielli, Martini 2011, pp. 6-7

⁴⁷⁰ Malik 2015, p. 4

⁴⁷¹ Una volta presa la nuova istruzione dal PC, questo registro o viene incrementato sequenzialmente o, se vi sono nel codice dei salti, cioè dei processi che devono essere eseguiti prima di altri, viene memorizzato il nuovo indirizzo della cella che contiene la prima istruzione del salto. Gabbrielli, Martini 2011, p. 8

Tutto questo processo continua ciclicamente ripartendo dalla nuova fase di *fetch* finché l'istruzione che viene eseguita non risulti un comando di stop⁴⁷².

Specificate, quindi, quali siano le componenti e i processi di base della macchina hardware, si può ben comprendere come ad essa possa corrispondere solamente il suo linguaggio macchina, creato a partire dalle sue caratteristiche fisiche, mentre, all'inverso, un linguaggio di programmazione può divenire il linguaggio di più macchine astratte. Infatti, tale linguaggio verrà interpretato indifferentemente dalla tipologia di elementi fisici che compongono la macchina e l'interprete.

Un altro aspetto di tipo terminologico, legato direttamente ai linguaggi e alle macchine astratte, è il concetto di implementazione di un linguaggio. Con tale termine si viene a identificare il processo con cui si crea una macchina astratta che abbia come linguaggio macchina uno specifico linguaggio di programmazione.

L'implementazione di un linguaggio, che corrisponde, quindi, alla creazione della macchina astratta, passa per tre possibili casistiche⁴⁷³:

- La prima è, ovviamente, la costruzione hardware della macchina seguendo i suoi algoritmi e strutture di dati. Se tale soluzione permette da una parte una esecuzione rapida dei codici scritti nel linguaggio della macchina, dall'altra risulta molto difficile creare i complessi costrutti di un linguaggio di alto livello, il che rende quasi impossibile la modifica di tale struttura se non a costi molto elevati. Questa soluzione viene, quindi, impiegata solamente per i linguaggi di basso livello.
- La seconda possibilità è data dalla simulazione mediante l'impiego di software. Con tale ipotesi si andranno a produrre algoritmi e strutture dati del linguaggio che vogliamo implementare mediante un ulteriore linguaggio di programmazione che risulti già implementato. Ne risulta ovviamente che si avranno tempi più lunghi di esecuzione ma vi sarà al contempo una maggior semplicità nella modifica dei programmi che producono i costrutti del linguaggio da implementare.
- Infine, la terza soluzione, che risulta intermedia tra le due, è l'emulazione tramite *firmware*. Con tale termine si intende la simulazione degli algoritmi e delle strutture dati del linguaggio da implementare tramite microprogrammi che vengono poi eseguiti dalla macchina fisica. I microprogrammi sono dei programmi che impiegano un linguaggio di livello veramente basso, inoltre sono memorizzati in memorie che possono essere solamente lette. Ciò permette di disporre di una velocità in esecuzione più alta, rispetto a quella software, ma, al contempo, la modifica di questi microprogrammi risulta più complicata e caratterizzata dall'uso di specifici dispositivi per modificare i dati nelle memorie di sola lettura.

⁴⁷² Gabbrielli, Martini 2011, pp. 8-9

⁴⁷³ *Ibidem* pp. 9-12

Delle tre soluzioni quella maggiormente impiegata nell'implementazione di linguaggi di programmazione è, ovviamente, quella software che, pur essendo più lenta nell'esecuzione, lascia però al programmatore piena libertà di modifica del codice e della sua struttura.

Infatti, implementare un linguaggio tramite un secondo linguaggio di programmazione già implementato è un processo che richiede una “traduzione” tra i due linguaggi. Tale processo di traduzione può avvenire implicitamente se la simulazione dei costrutti del linguaggio da implementare viene prodotta tramite programmi scritti direttamente nel linguaggio implementato. Oppure, tale traduzione tra i due linguaggi, può avvenire esplicitamente attraverso la corrispondenza tra i programmi del linguaggio da implementare con quelli del linguaggio implementato⁴⁷⁴.

A tale suddivisione corrispondono due tipi di implementazione, quella interpretativa pura e quella compilativa pura.

Nel primo caso si produce un programma, scritto nel linguaggio implementato, che lavora come interprete di tutte le istruzioni prodotte tramite il linguaggio da implementare. Non si presenta, quindi, il caso della traduzione esplicita, ma avviene una “decodifica”, tramite l'impiego del programma interprete, delle istruzioni del linguaggio da implementare in gruppi di istruzioni del linguaggio implementato. Tale soluzione, però, presenta lo svantaggio di allungare i tempi di esecuzione in quanto ogni istruzione dovrà essere prima decodificata e poi eseguita. Inoltre, ogni qual volta lo stesso comando comparirà nel codice avverrà una nuova decodifica. D'altro canto, poter eseguire un'interpretazione dei costrutti del codice nel momento in cui lo stiamo eseguendo permette di interagire con il programma stesso e di facilitare i processi di verifica di eventuali errori nel codice. Inoltre, lo sviluppo di un interprete risulta relativamente semplice.

Nel caso dell'implementazione compilativa pura, invece, vi è una traduzione esplicita dei programmi prodotti tramite il linguaggio da implementare in programmi nel linguaggio implementato, tramite l'impiego di un programma specifico denominato compilatore. In tale situazione il linguaggio da implementare viene definito linguaggio sorgente, mentre quello implementato linguaggio oggetto. La differenza sostanziale risulta nel fatto che il processo di traduzione, o compilazione, non avviene nello stesso momento dell'esecuzione. La compilazione ha lo scopo di creare un programma, nel linguaggio oggetto, che è possibile eseguire anche in un secondo momento. L'implementazione compilativa pura permette di avere un'esecuzione più veloce perché non necessita della fase di decodifica delle istruzioni in contemporanea. Inoltre, la decodifica nel linguaggio oggetto di una istruzione ripetuta nel programma creato tramite il linguaggio sorgente avviene solamente una volta, permettendo così di impiegare la stessa istruzione all'occorrenza. Ne

⁴⁷⁴ Gabbrielli, Martini 2011, pp. 12-13

risulta, però, che ci sarà una perdita delle informazioni relative alla struttura del programma sorgente, rendendo più difficile anche l'eventuale individuazione e correzione di errori.

Nonostante tale suddivisione entrambe queste tipologie di implementazione vengono impiegate, quasi sempre, nelle implementazioni dei linguaggi reali⁴⁷⁵.

Un ulteriore aspetto dell'implementazione interpretativa reale è che, spesso, si avvale di un linguaggio intermedio, e quindi di una macchina intermedia, tra il linguaggio da implementare e quello implementato nella macchina hardware. Questo processo viene eseguito per evitare che tutti i costrutti del linguaggio da implementare debbano essere simulati dal linguaggio implementato nella macchina hardware. Infatti, solo alcuni di essi, tradotti nel linguaggio intermedio devono essere simulati, mentre altri presentano un corrispondente diretto nel linguaggio della macchina implementata. Nel caso, invece, dell'implementazione di tipo compilativo reale avviene una simulazione solo nei casi in cui i costrutti del linguaggio da implementare sono molto complessi. In questa situazione la macchina intermedia presenta un linguaggio più vicino a quello della macchina hardware con il quale condivide l'interprete. Così facendo la macchina intermedia può essere prodotta tramite le funzioni della macchina hardware, mentre sono simulati i costrutti del linguaggio da implementare che, una volta trasposti nel linguaggio intermedio, non risultano corrispondere ad elementi del linguaggio implementato.

Come si può intuire a questo punto, esistono moltissime casistiche, collegate con le macchine intermedie, in cui, in base alla lontananza dei costrutti tra il linguaggio da implementare e quello implementato, vi sarà più simulazione e meno traduzione e viceversa.

Come principio si cercherà di interpretare tutti quei costrutti legati al linguaggio da implementare che sono maggiormente distanti rispetto a quelli del linguaggio implementato, mentre, al contempo, tutte le altre situazioni saranno compilate⁴⁷⁶.

Il linguaggio di alto livello, quindi, una volta implementato su un calcolatore sarà solo l'ultimo gradino di un raggruppamento schematico di livelli arbitrati composto da macchine astratte alle quali corrispondono linguaggi specifici e differenti funzionalità. Tali gerarchie vengono impostate per fornire, tra un livello e l'altro, delle nuove funzionalità al livello soprastante prodotte tramite le funzioni del linguaggio del livello sottostante. Al contempo, però, questa suddivisione in livelli rende inaccessibili, mascherandole, le risorse delle macchine astratte corrispondenti a tutti i livelli sottostanti, in quanto il livello superiore potrà impiegare solo le funzionalità che gli vengono offerte da linguaggio subito al di sotto di lui.

⁴⁷⁵ Gabbrielli, Martini 2011, pp. 14-18

⁴⁷⁶ *Ibidem*, pp. 18-20

Ne consegue che la creazione di un programma in uno specifico linguaggio definisce in realtà un nuovo linguaggio, e relativa macchina astratta, che è composto da tutte le funzioni che il software rende disponibili all'utente. Questo programma può essere impiegato da un ulteriore programma per produrre nuove risorse, di conseguenza un nuovo linguaggio. Tale processo, quindi, può continuare ininterrottamente producendo nuovi linguaggi sempre più complessi⁴⁷⁷.

Un linguaggio di programmazione però, per essere riconosciuto come tale, deve presentare alcune caratteristiche⁴⁷⁸:

- In primo luogo, deve disporre di una grammatica definita da un alfabeto, da cui vengono ricavate le parole (*token*) tramite sequenze di simboli ritenuti corretti. Una volta stabiliti questi elementi, la sintassi permette di definire quali siano le relazioni di parole che formano frasi legali.
- In secondo luogo, vi deve essere una semantica che ha lo scopo di definire la relazione tra il significato e la corrispondente frase. Ad esempio, la funzione matematica che viene calcolata da un determinato programma potrebbe corrispondere al suo significato, la descrizione semantica, quindi, sarebbe prodotta da quei processi del programma che permettono di arrivare al calcolo della funzione.
- In terzo luogo, deve disporre della pragmatica che definisce come impiegare le frasi in modo corretto e sensato. Tale ambito risulta necessario per distinguere il diverso uso, in contesti differenti, di alcune frasi che hanno lo stesso significato.
- Infine, i linguaggi di programmazione devono disporre anche del livello dell'implementazione, cioè l'ambito in cui sono definite le modalità con cui vengono realizzate le azioni descritte nelle frasi.

Un ulteriore elemento associabile ai linguaggi di programmazione sono i paradigmi di programmazione. Ognuno di essi è collegato ad una filosofia di progettazione del programma che impiega specifiche tecniche e strumenti. Dei quali i principali sono⁴⁷⁹:

- Programmazione procedurale: che nasce dalla definizione di funzioni e procedure che eseguono operazioni specifiche sui dati del software. La sua filosofia è legata ad una logica strutturata e sequenziale, che suddivide il programma in blocchi di processi dettagliati. Questo paradigma è impiegato nella creazione di *driver* per i sistemi operativi o i dispositivi hardware.
- Programmazione orientata agli oggetti: per oggetti si intendono entità che dispongono al loro interno sia delle azioni che dei dati sulle quali le azioni possono essere eseguite. Tali oggetti

⁴⁷⁷ Gabbrielli, Martini 2011, pp. 21-22

⁴⁷⁸ *Ibidem*, pp. 27-28

⁴⁷⁹ Tesconi 2023, pp. 4-5

vengono raggruppati in specifiche classi create sulla base della corrispondenza dei comportamenti e delle proprietà comuni degli oggetti. Questa tipologia di programmazione viene impiegata nella creazione di software complessi, in quanto permette uno sviluppo flessibile, modulare ed estendibile con facilità.

- Programmazione funzionale: si tratta di funzioni che determinano, per lo stesso insieme in *input*, il medesimo risultato, non alterando al contempo lo stato del programma. Si tratta di una programmazione che utilizza funzioni pure che permettono, una volta unite tra di loro, di comporre un programma complesso. Viene impiegata principalmente per la creazione di programmi che hanno come risultato delle operazioni matematiche o algoritmiche.

- Programmazione a eventi: è un tipo di programmazione associata al controllo di eventi che si generano da azioni eseguite dall'utente o dal sistema. La gestione degli eventi avviene tramite l'uso di funzioni di *callback*⁴⁸⁰, che si attivano nel momento in cui avviene un determinato evento. Questa programmazione viene impiegata per le interfacce grafiche, come ad esempio nella programmazione di videogiochi o programmi desktop.

Oltre ai paradigmi di programmazione, un linguaggio di programmazione nasce da una serie di codici e algoritmi sviluppati per produrre un software. Strutturalmente un programma impiega questi codici seguendo dei modelli concettuali che risultano suddivisibili in quattro macrocategorie⁴⁸¹:

- quelli di Input, che permettono al programma di prendere dati provenienti da differenti dispositivi e apparecchi sia che si tratti di informazioni scritte sia di dati prodotti tramite strumentazioni esterne;
- quelli di Output, che quindi visualizzano, memorizzano o riproducono i risultati provenienti dalle elaborazioni;
- quelli legati alle esecuzioni di istruzioni, che possono essere di tipo sequenziale condizionale, attivandosi in determinate condizioni, o ripetute, istruzioni che si ripetono variando alcuni parametri;
- infine, i codici di riutilizzo, cioè quei codici che vengono scritti una volta e vengono poi richiamati all'occorrenza.

⁴⁸⁰ Con tale termine si intendono delle funzioni che vengono trasmesse come parametro di altre funzioni nel momento in cui si determina un determinato evento, ad esempio l'apertura di una finestra nel momento in cui viene cliccato un pulsante sullo schermo. *Function Callback*, 2020, <https://www.codingcreativo.it/function-callback/#:~:text=Le%20function%20callback%20sono%20utilizzate,della%20pagina%20html%2C%20ecc> (Ul. Cons. 05/12/2023)

⁴⁸¹ Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, p. 12, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24)

Lo sviluppo di un codice per un programma nasce attraverso l'unione e il reimpiego ripetuto di questi quattro elementi.

La scrittura di un programma però al contempo determina, inevitabilmente, la creazione involontari di errori. Anche questi elementi problematici possono essere schematizzati in tre tipologie⁴⁸²:

- Errori di sintassi, cioè quando viene violata la grammatica e conseguentemente le regole del linguaggio;
- Errori di logica, in cui l'errore nasce dalla non corretta disposizione delle istruzioni o all'interno delle relazioni che intercorrono tra di esse;
- Infine, vi può essere un errore di semantica, un errore non ben specificato che non è legato né alla grammatica né alla sintassi, elementi che nel codice risultano corretti. Tale errore però ha l'effetto di far sì che il codice non produca i risultati attesi. Questo, come si può facilmente comprendere, è il più difficile errore da individuare e correggere.

5.1.1 Il linguaggio di programmazione Python

Tra tutti i vari linguaggi di programmazione disponibili sul mercato si è deciso di utilizzare per la creazione della piattaforma il linguaggio Python. Tale scelta è legata a vari fattori: in *primis* perché si tratta di uno dei linguaggi, di alto livello orientato agli oggetti, più utilizzati al mondo; dispone di una sintassi semplificata e facilmente comprensibile; inoltre, ha facilitato la connessione tra i vari software della piattaforma in quanto utilizzano e riconoscono i costrutti di questo linguaggio⁴⁸³.

Il linguaggio Python fu sviluppato nel 1991 dal programmatore del Centro Nazionale per la Matematica e l'informatica olandese Guido Van Rossum. Il nome Python fu scelto dal programmatore per omaggiare uno dei suoi programmi televisivi preferiti, Monty Python's Flying Circus. Lo sviluppo di questo linguaggio da parte di Van Rossum dimostrò però ben presto le sue potenzialità come linguaggio di programmazione, tanto che nel 1991 si decise di rilasciare pubblicamente, attraverso la piattaforma di discussioni online Usenet, una primissima versione denominata Python 0.9.0.

Dal suo rilascio Python ha acquistato sempre più popolarità divenendo un'alternativa molto valida rispetto ad altri linguaggi come C++ o Java.

⁴⁸² Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, pp. 13-14, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24)

⁴⁸³ Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, p. 8, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24); Tesconi 2023, p.6

Tanto interesse, infatti, porto alla fondazione nel 2000 della Python Software Foundation (PSF), un'organizzazione senza scopo di lucro deputata al supporto, allo sviluppo e alla promozione del linguaggio Python⁴⁸⁴.

Attualmente l'ultima versione di Python è la 3.12.1⁴⁸⁵, ma, come si può ben comprendere, Python è stato implementato e sviluppato tramite il rilascio di molte versioni, nel corso degli anni. Infatti, a partire dal gennaio 1994 fu pubblicata la versione 1.0. che introdusse i concetti chiave del linguaggio.

Dal 2000 la versione 1.0 fu sostituita dalle varie serie della 2.0 che apportarono significativi miglioramenti al linguaggio⁴⁸⁶. Mentre, infine, Python 3.0 fu rilasciato, già nel 2008, al fine di risolvere alcune problematiche della serie 2, nonché per migliorare la sintassi e l'eliminazione di funzioni ormai obsolete⁴⁸⁷.

In linguaggio Python presenta una programmazione di tipo interpretata che, quindi, come in precedenza descritto, non necessita di compilare il codice prima dell'esecuzione. Al contempo però presenta un interprete compilato, creato tramite il linguaggio di programmazione C, che esegue le righe di codice che gli vengono fornite⁴⁸⁸.

Per queste caratteristiche e per la sua grande popolarità il codice Python può essere eseguito tramite l'impiego di diversi sistemi:

- Attraverso l'uso di una riga di comando direttamente nel *prompt* dei comandi⁴⁸⁹ dei sistemi operativi;
- tramite un *Integrated Development Environment* (IDE), un ambiente di sviluppo integrato per elaborare, sviluppare e debuggare il codice. Ne sono un esempio Visual Studio Code® di Microsoft® o PyCharm®, quest'ultimo dispone sia di una versione *opensource*, meno performante, sia di una completa a pagamento;
- infine, tramite degli interpreti online che non richiedono l'installazione di alcun software sul proprio sistema o computer⁴⁹⁰.

⁴⁸⁴ Tesconi 2023, pp. 7-8

⁴⁸⁵ Si fa riferimento alla data del 12/12/2023

⁴⁸⁶ Python 2.0 ha visto nel 2020 l'uscita dell'ultimo aggiornamento quando è stata abbandonata del tutto a favore della 3.0. Tesconi 2023, p. 8

⁴⁸⁷ Tesconi 2023, p. 8

⁴⁸⁸ Severance R. C., 2018, Python per tutti. Esplorare dati con Python 3, pp. 9-10, https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf (Ul. Cons. 22/03/24)

⁴⁸⁹ Per prompt dei comandi si intende un'interfaccia di tipo testuale che viene emulata su un sistema operativo a interfaccia Grafica, di solito Windows. *Prompt dei comandi: Cos'è e come utilizzarlo su un sistema Dell*, 2023, <https://www.dell.com/support/kbdoc/it-it/000130703/command-prompt-what-it-is-and-how-to-use-it-on-a-dell-system#:~:text=Nei%20sistemi%20operativi%20Windows%2C%20il,ed%20eseguire%20funzioni%20amministrative%20avanzate>. (Ul. Cons. 12/12/2023)

⁴⁹⁰ Tesconi 2023, pp. 11-13

5.1.2 Sviluppo della piattaforma

In contemporanea alla scelta del linguaggio di programmazione si è avviata la ricerca del software su cui si sarebbe sviluppata la piattaforma. La scelta è stata da subito indirizzata verso un software GIS *open source* che permettesse la creazione di plug-in⁴⁹¹ tramite il linguaggio di programmazione Python e che fosse un programma GIS di largo uso e con una forte community alle spalle. Seguendo queste prerogative la decisione è ricaduta su Quantum GIS o QGIS®, un sistema di informazione geografica *open source* nato nel 2002 e rilasciato sotto la licenza GNU⁴⁹² GPL (*General Public License*). È un progetto ufficiale della Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Si tratta di un software multiplatforma che può essere installato e utilizzato su sistemi Windows, Mac OSX, Unix, Linux e Android. QGIS supporta tantissime tipologie di dati e formati sia *raster* che vettoriali, nonché dispone di molte funzionalità. L'ultima versione rilasciata è la 3.34.3 che presenta un'interfaccia grafica GUI (*Graphical User Interface*) in cui in un'unica finestra si trovano i comandi, le mappe e i *layers*. QGIS si presenta come interfaccia del più potente software *open source* GRASS GIS, permette di realizzare complesse operazioni di analisi geografica ma offre anche molte funzionalità GIS di uso comune quali: visualizzare, analizzare, esplorare, interrogare, tematizzare, estendere le funzioni tramite l'aggiunta di plug-ins e organizzare per la stampa o la pubblicazione sul web mappe georeferenziate vettoriali e *raster* (Fig. 69)⁴⁹³.

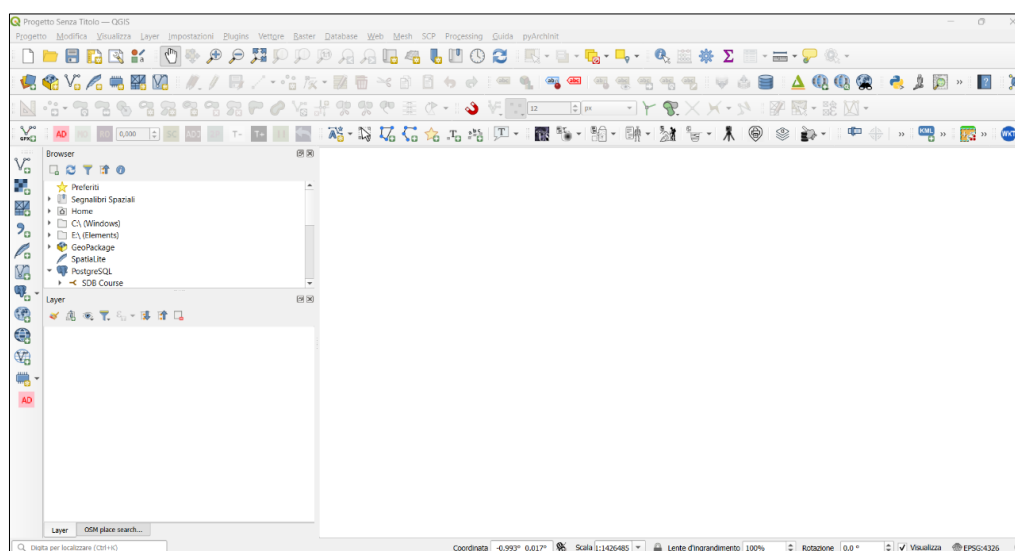


Figura 69 - L'interfaccia del software QGIS®.

⁴⁹¹ Nel campo dell'informatica, un plug-in (alternativamente scritto come plugin, add-in, addin, add-on o addon) è un componente software che introduce una funzione specifica in un programma informatico esistente. Quando un programma supporta i plug-in, apre la strada alla personalizzazione da parte di più utenti. De Mattia, 2016, *Cos'è un plugin?*, <https://blog.persaper.it/cos-e-un-plugin/> (Ul. Cons. 06/02/24)

⁴⁹² Per GNU si intende un sistema operativo libero scaricabile gratuitamente e quindi open source. Bella, Pescetti, 2021, *GNU in poche parole*, <https://www.gnu.org/gnu/about-gnu.html> (Ul. Cons. 06/02/24)

⁴⁹³ Marchesini 2012, pp. 19-24

Definito il software GIS su cui si sarebbe sviluppato il plug-in e il linguaggio di programmazione che sarebbe stato utilizzato per implementarlo, risultava necessario individuare i software che sarebbero stati richiamati dalla piattaforma e con cui essa si sarebbe dovuta relazionare.

La scelta di questi programmi si è mossa cercando, per quanto fosse possibile, di prediligere i software di tipo *open source*. Dopo un attento studio dei vari programmi disponibili sia *open source* che proprietari, la scelta è ricaduta su tre prodotti finali: Il software di fotogrammetria proprietario Agisoft Metashape®, Il programma di fotoritocco *open source* GIMP® e, infine, il programma di modellazione 3D *open source* Blender®⁴⁹⁴.

Agisoft Metashape® è un software stand-alone di fotogrammetria tridimensionale prodotto dalla Agisoft LLC, una società fondata nel 2006 che focalizza i suoi ambiti di ricerca nello sviluppo di software per la *computer vision*. Metashape® è riconosciuto come uno dei migliori software fotogrammetrici che, in continuo sviluppo, permette agli utenti di avere uno strumento atto alla creazione di ricostruzioni tridimensionali, visualizzazioni, rilievi e mappature⁴⁹⁵. Metashape® dispone di un *workflow* semi automatizzato che lascia agli utenti libertà di scelta sulla qualità del risultato finale e nell'applicazione di alcuni filtri di raffinamento del modello. Manualmente, attraverso dei *tools* specifici, possono essere aggiunte delle mascherature sulle immagini al fine di nascondere tale parte dall'elaborazione e, inoltre, possono essere inseriti dei punti di controllo con la finalità di scalare metricamente il modello o riposizionarlo sulla superficie terrestre, seguendo uno specifico sistema di riferimento, tramite punti GPS. Ovviamente, gli algoritmi del software non sono né visibili né modificabili dall'utente essendo un programma proprietario. Il *workflow* di elaborazione si presenta come un menu a tendina che parte dall'allineamento dei punti fino alla creazione della *texture*, degli ortomosaici e dei DEM (Fig. 70).

⁴⁹⁴ Per quanto riguarda i software di modellazione 3D sono stati vagliati vari software: Adobe Maya®, Rhinoceros 3D®, Z-brush®, Sketchup®, ma si è alla fine deciso di privilegiare Blender® sia perché si trattava di un software *open source*, sia perché è risultato un programma completo e perfetto per gli scopi del restauro virtuale. Il software GIMP® è stato scelto perché è la miglior alternativa *open source* per il fotoritocco rispetto a software proprietari come può essere ad esempio Adobe Photoshop®. Infine, il software fotogrammetrico prescelto, Agisoft Metashape®, è stato selezionato per la sua completezza e i suoi risultati, vagliando sia software proprietari come 3DF Zephyr® o Reality Capture®, sia software *open source* quali Meshroom, WebODM, Mic Mac.

⁴⁹⁵ Agisoft metashape, about, <https://www.agisoft.com/about/> (Ul. Cons. 06/02/24)

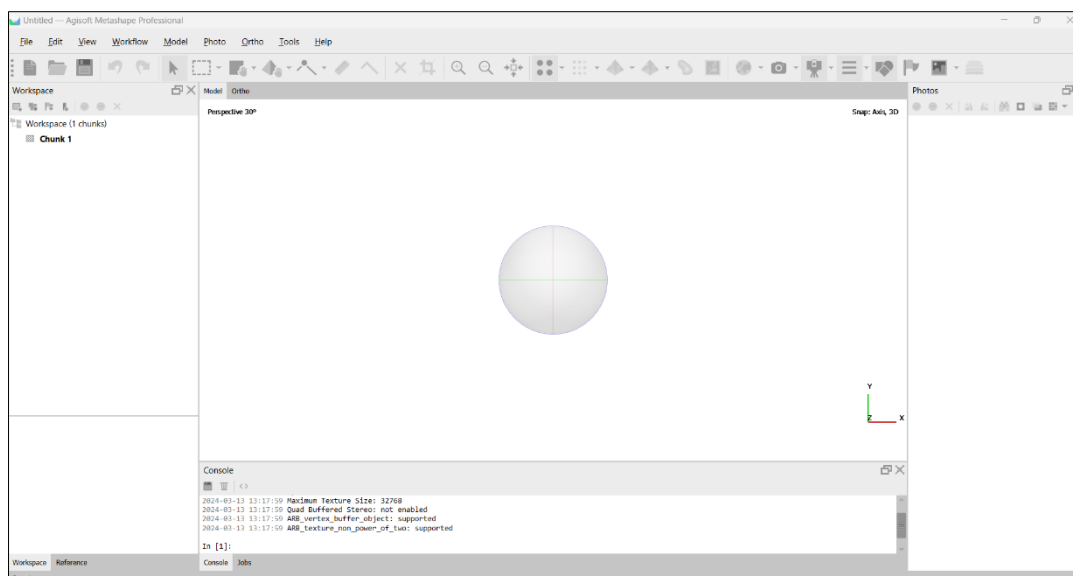


Figura 70 - L'interfaccia del software fotogrammetrico Agisoft Metashape®.

GIMP® (*GNU Image Manipulation Program*) è un programma *open source* per il fotoritocco, la produzione e composizione di immagini. Rilasciato nel 1995 con la versione 0.54, come primo programma libero di fotoritocco, è ancora oggi in continuo sviluppo, infatti, l'ultima versione disponibile è la 2.10.36. Il software può essere utilizzato su sistemi windows, macOS e Unix. È un programma espandibile ed estensibile tramite plug-in e dispone sia di una GUI sia di un'interfaccia di *scripting*. Il programma permette di effettuare elaborazioni di fotoritocco delle immagini tramite i vari pennelli disponibili, filtri e maschere, nonché permette la creazione e gestione di animazioni e la conversione dei file in moltissimi formati (Fig. 71)⁴⁹⁶.

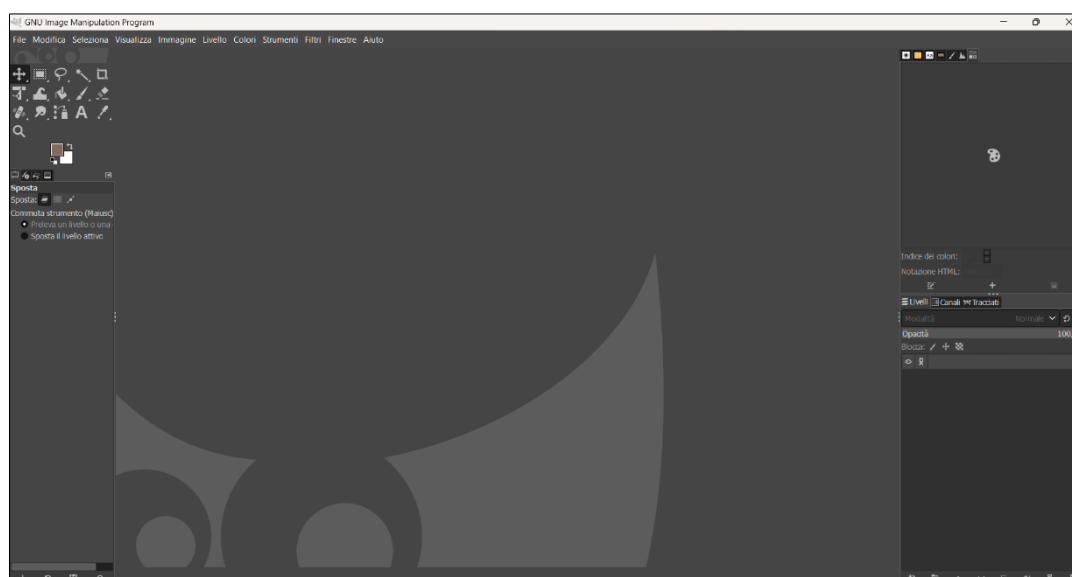


Figura 71 - L'interfaccia del software di fotoritocco GIMP®.

⁴⁹⁶ GIMP, *A Brief (and Ancient) History of GIMP*, https://www.gimp.org/about/ancient_history.html (Ul. Cons. 06/02/2024); GIMP, *About GIMP*, <https://www.gimp.org/about/introduction.html> (Ul. Cons. 06/02/24)

Infine, Blender® è un software *open source* con licenza GNU GPL di grafica e modellazione 3D creato nel 1994. Nel 2002 nacque la Blender Foundation per supportare lo sviluppo del software che ad oggi è arrivato alla versione 4.0. Blender® dispone di una *pipeline* 3D completa per la modellazione, l'animazione, la simulazione, lo *sculpting*, il *rendering*, il *motion tracking*, il video editing e il *compositing*. Può essere espanso liberamente, anche dalla community, tramite plug-in scritti in linguaggio Python per produrre nuove funzionalità. Il software è compatibile con sistemi windows, macintosh e linux. Blender® è un programma che, tra i tanti processi disponibili, permette: di modificare, elaborare e modellare *mesh* sia geometricamente che attraverso la modellazione organica; di gestire i processi di *unwrapping* UV; di modificare, correggere e dipingere le *texture*; e, infine, dispone di motori di *rendering* integrati sia di *rasterization rendering*, Eevee, che *raytracing*, Cycles (Fig. 72)⁴⁹⁷.

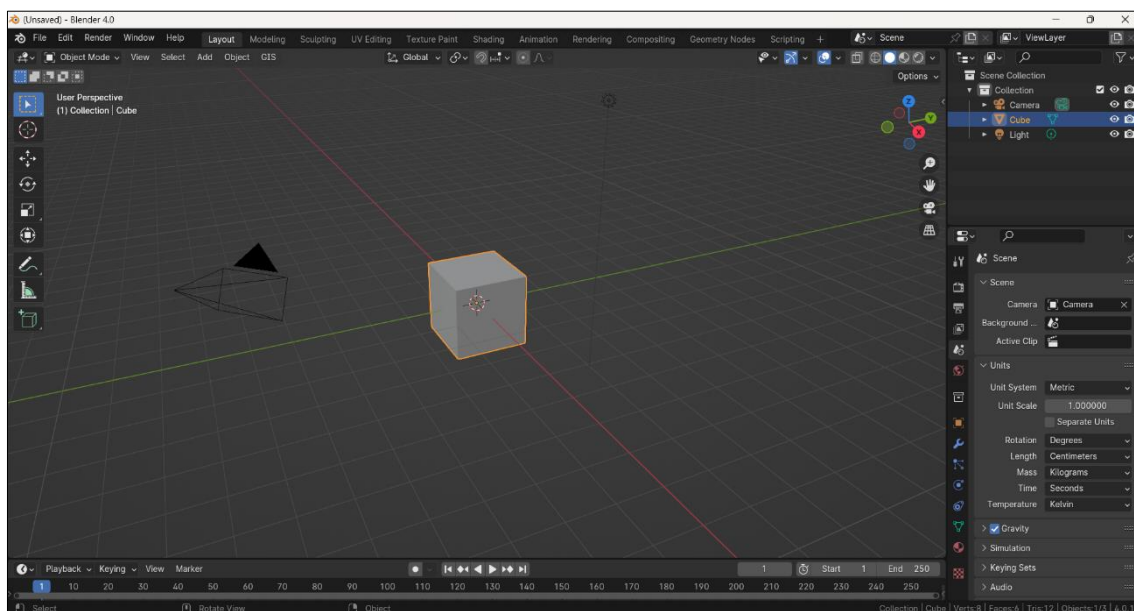


Figura 72 - L'interfaccia del software di modellazione 3D Blender®

Una volta scelti tutti i vari software da integrare, il passaggio successivo era quello di porli in relazione tra di loro e di creare la piattaforma con la sua interfaccia grafica⁴⁹⁸. All'interno del contesto di QGIS®, nelle fasi di implementazione del plug-in, l'uso delle API Python⁴⁹⁹, o librerie PyQGIS, è

⁴⁹⁷ Blender, *about*, <https://www.blender.org/about/> (Ul. Cons. 06/02/24); Blender, *History*, <https://www.blender.org/about/history/> (Ul. Cons. 06/02/24); Blender manual 4.0, *Eevee*, <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/eevee/introduction.html> (Ul. Cons. 06/02/24); Blender manual 4.0, *Cycles*, <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/introduction.html> (Ul. Cons. 06/02/24)

⁴⁹⁸ L'implementazione del plug-in è stata coadiuvata dal Dott. Kostantinos Fokeas e da Alma Sistemi, senza il loro grande supporto nelle fasi di programmazione e creazione dell'interfaccia GUI non sarebbe potuta nascere la piattaforma nelle vesti attuali.

⁴⁹⁹ Per API (*Application Programming Interface*) si intendono quel gruppo di procedure, protocolli e algoritmi che creano un ponte tra due software per lo scambio di dati. Una API permette, quindi, un più facile sviluppo per i programmatori in

servito a far interagire il codice Python con l'API QGIS creata tramite il linguaggio C++, il linguaggio di programmazione con cui è stato sviluppato il software QGIS®⁵⁰⁰. L'uso delle librerie PyQGIS consente agli sviluppatori di migliorare le funzionalità di QGIS®, creare plug-in e automatizzare le attività geospaziali utilizzando direttamente il linguaggio di programmazione Python. Queste API permettono di associare ai comandi scritti in linguaggio Python quelli relativi al linguaggio C++. Tale sistema è stato, quindi, di fondamentale importanza per la realizzazione della piattaforma, che è stata implementata, tramite il linguaggio Python e le librerie PyQGIS, senza doversi interfacciare direttamente con il linguaggio C++.

Nello stesso frangente si è iniziato lo sviluppo dell'interfaccia grafica del plug-in, per il quale Qt Creator® ha svolto un ruolo fondamentale. Qt Creator®, un ambiente di sviluppo integrato (IDE), nasce come software per semplificare lo sviluppo di applicazioni che utilizzano il *framework*⁵⁰¹ applicativo Qt. Un framework C++ multipiattaforma ampiamente diffuso e sviluppato da The Qt Company che consente agli sviluppatori di creare applicazioni con un aspetto e un comportamento coerenti su diverse piattaforme, tra cui Windows, macOS, Linux⁵⁰². Per integrare Qt con Python, è indispensabile la presenza di *bindings*⁵⁰³, che facilitano l'accesso alle funzionalità Qt dal codice Python. Tramite l'impiego di QT Creator®, come sopradetto, si è potuta sviluppare l'interfaccia grafica o GUI (*Graphical User Interface*) della piattaforma composta da una finestra principale che si caratterizza per la presenza di diversi pulsanti, i quali danno l'accesso alle varie funzioni del plug-in al fine di seguire un *workflow* completo di restauro virtuale bidimensionale o tridimensionale.

Infine, per realizzare il codice di base del plug-in è stato utilizzato QGIS Plugin Builder, un *tool* che, progettato appositamente per supportare gli sviluppatori, fornisce un template completamente funzionante che può essere utilizzato come codice di base per l'implementazione del proprio plugin su QGIS® e può, al contempo, essere modificato in base alle esigenze dello sviluppatore⁵⁰⁴.

quanto possono usare un linguaggio di programmazione per implementare nuovi applicativi in un software che è stato implementato in un altro linguaggio di programmazione e per il quale è l'API stessa che fa da interprete. Saba M., Che cose un'API? Perché ci sono utili?, <https://www.programmareinpython.it/blog/che-cose-unapi-perche-ci-sono-utili/>; API cosa sono?, 2023, <https://www.redhat.com/it/topics/api/what-are-application-programming-interfaces> (Ul. Cons. 06/02/24)

⁵⁰⁰ Mandolesi 2009, p. 211

⁵⁰¹ Un framework è un gruppo di strumenti e funzioni compilate, che possono essere richiamate all'occorrenza senza dover riscrivere il codice ogni volta da zero. Questa soluzione permette di allargare le funzionalità del linguaggio e di rendere più semplice e veloce le azioni richieste. *Framework: cosa sono e quali dominano le classifiche*, 2020, <https://reteinformaticalavoro.it/blog/framework-cosa-sono-e-quali-dominano-le-classifiche/> (Ul. Cons. 06/02/24)

⁵⁰² Mandolesi 2009, p. 212

⁵⁰³ Nel contesto di Python e Qt, il termine "bindings" indica l'interfaccia che collega il linguaggio di programmazione Python e il framework applicativo Qt. Qt, *Language Bindings*, 2023, https://wiki.qt.io/Language_Bindings (Ul. Cons. 06/02/24)

⁵⁰⁴ QGIS Plugin Builder 3.0.x documentation, <https://g-sherman.github.io/Qgis-Plugin-Builder/#>

In sintesi, la piattaforma è stata sviluppata a partire dal template fornito tramite il QGIS Plugin Builder per essere integrata nelle sue varie funzioni tramite le librerie PyQGIS e il linguaggio Python, mentre l'interfaccia è stata prodotta tramite l'impiego del software QT Creator®⁵⁰⁵.

Da ultimo, una volta creato il plug-in rimaneva la complessa questione del nome che avrebbe dovuto identificare la piattaforma. Si è così deciso, dopo varie ipotesi, di denominarla DRes, acronimo di *Digital Restoration*, in quanto risultava la definizione maggiormente esaustiva delle pratiche associate al restauro virtuale⁵⁰⁶.

5.2 I processi della piattaforma ed il *workflow* di lavoro

5.2.1 Processi e funzioni del plug-in DRes

Il plug-in può essere installato nel software QGIS® tramite l'interfaccia del menu “Gestisci ed Installa Plugin” alla voce “Installa da zip”⁵⁰⁷. Da questa nuova schermata, attraverso il pulsante di apertura di un file esterno raffigurante tre punti, si può caricare la cartella compressa, con estensione zip, contenente l'intero plug-in DRes e successivamente in automatico, cliccando sul pulsante “installa plugin”, si potrà installare il plug-in (Fig. 73)⁵⁰⁸.

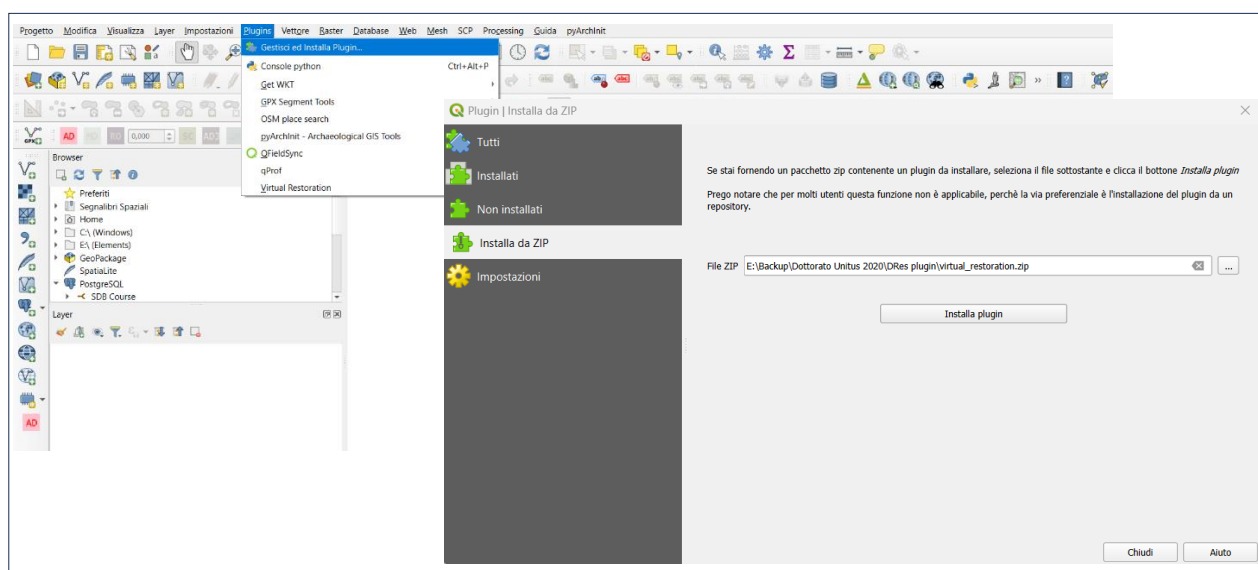


Figura 73 - Fasi di installazione del plug-in DRes tramite la schermata di gestione ed installazione dei plug-in su QGIS®.

⁵⁰⁵ Questo plug-in è stato implementato e testato in ambiente Windows 10 Pro e con la versione 3.16.1 di QGIS. Non è previsto che il plug-in funzioni correttamente su un sistema operativo diverso e su una versione di QGIS precedente alla 3.

⁵⁰⁶ Questo nome è sembrato quello maggiormente adatto a definire la piattaforma anche perché volendo utilizzare, ad esempio, un acronimo associato con il termine *Virtual Restoration* si sarebbe potuta creare confusione con il termine *Virtual Reality*.

⁵⁰⁷ La voce “gestisci ed installa plugin” si trova all'interno del menu a tendina “Plugins”.

⁵⁰⁸ Per rendere effettiva l'installazione dovremmo chiudere e riaprire il software QGIS, così da permettere al programma di ricaricare tutti i plug-in.

Una volta eseguito questo processo, all'interno del menu a tendina “Plugins”, ritroveremo la voce “Virtuale Restoration” da cui si potrà accedere all'icona di apertura del plug-in DRes (Fig. 74).

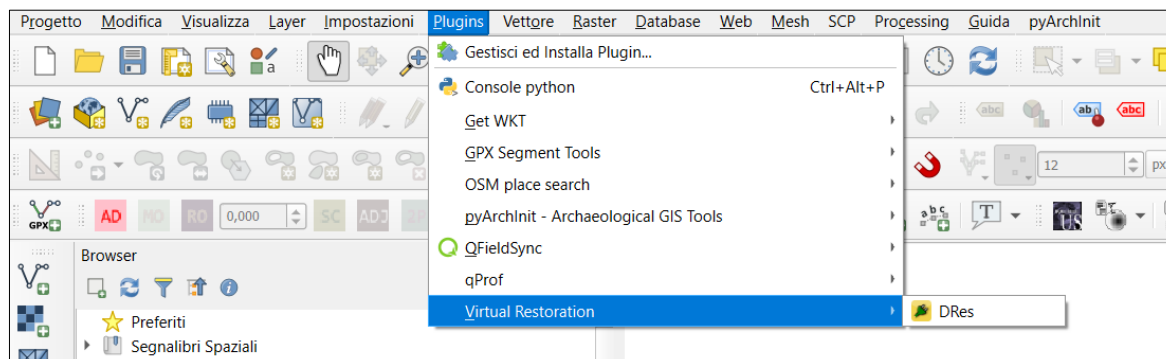


Figura 74 – Menu a tendina da cui accedere all'icona di apertura del plug-in DRes su QGIS®.

Una volta eseguito tale comando si aprirà una nuova finestra denominata “Virtual Restoration” che disporrà delle seguenti componenti (Fig. 75):

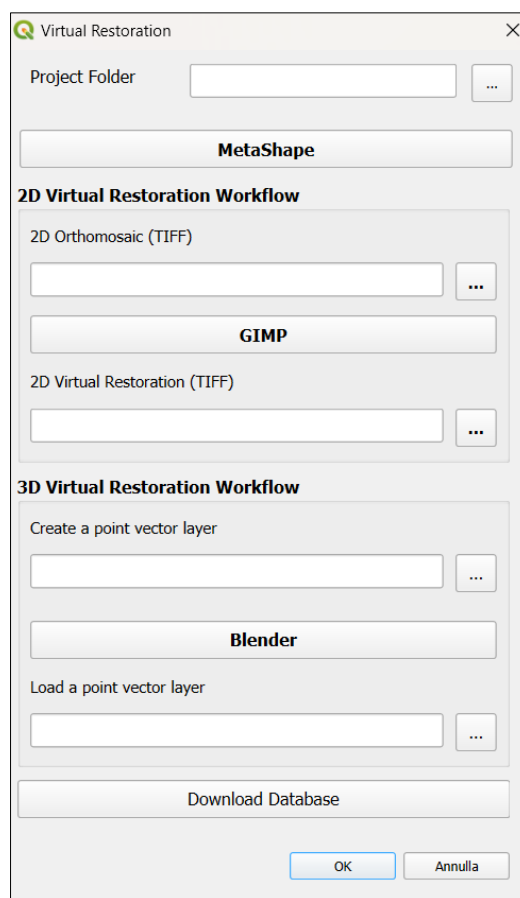


Figura 75 - L'interfaccia grafica del plug-in DRes da cui si può accedere alle varie funzioni.

- La prima parte dell'interfaccia ci fornirà un campo, denominato “Project Folder”, che ci permetterà di specificare il percorso di una cartella contenuta all'interno del computer dell'utente. Questa verrà considerata dal plug-in la cartella principale, in quanto sarà l'elemento dove si andranno a salvare i file risultanti dai processi di elaborazione e, al contempo, tutti quelli legati al database.

- Subito al di sotto troviamo il primo pulsante, denominato “MetaShape”, che ci permetterà di aprire il software fotogrammetrico Agisoft Metashape®. Questo elemento, quindi, mette in relazione il software con la piattaforma evitando che l'utente debba aprirlo manualmente. Inoltre, indirizza subito l'utente su quale sia il primo passaggio da effettuare per portare avanti l'intervento di restauro virtuale⁵⁰⁹.

- L'interfaccia del plug-in a questo punto si divide in due sottocategorie, la prima delle quali, denominata “2D Virtual Restoration Workflow”, contiene tutti gli strumenti associati con i processi del restauro virtuale 2D:

- Il primo campo che si presenta in questa sottocategoria, denominato “2D Orthomosaic (TIFF)”, ci permette di caricare l'ortomosaico derivante dai processi fotogrammetrici di Metashape®.

- Subito al di sotto vi è un pulsante, denominato “GIMP”, che ci permetterà di aprire il software di fotoritocco *opensource* GIMP®.

- Infine, il secondo campo, denominato “2D Virtual Restoration (TIFF)”, ci fornisce uno strumento per caricare l'ortomosaico finale derivante dai processi di restauro virtuale.

- La seconda sottocategoria, denominata “3D Virtual Restoration Workflow”, ci fornisce tutti gli strumenti collegati con i processi del restauro virtuale 3D:

- Il campo denominato “create a point vector layer” permette di creare uno o più *layer* vettoriali puntuali, formato *shapefile* o *geopackage*, necessari alla visualizzazione del modello 3D fotogrammetrico e di quello di restauro virtuale. Come vedremo in dettaglio più avanti nel testo, QGIS®, per poter caricare un modello tridimensionale, necessita di un *layer* vettoriale che possa richiamare tale oggetto come simbologia e permetterne, così, la visualizzazione nella mappa 3D.

- Il pulsante al di sotto, denominato “Blender”, permette di aprire il software di modellazione 3D *open source* Blender®.

- Infine, il secondo campo presente, che porta il nome di “load a point vector layer”, ci permette di caricare un *layer* vettoriale puntuale, che abbiamo precedentemente creato, e che vogliamo utilizzare per visualizzare i modelli 3D delle elaborazioni. Questa scelta è stata dettata da tutte quelle situazioni in cui, avendo già creato un altro oggetto e relativo database per un progetto di restauro virtuale, vogliamo caricare questo secondo elemento, perché, ad esempio, appartiene

⁵⁰⁹ Ovviamente, in questo caso come in quello degli altri software legati con DRes, il software deve essere già installato sul proprio personal computer per poter essere aperto tramite la piattaforma.

all'architettura dell'intervento che stiamo portando avanti, al fine di completare un restauro virtuale architettonico o ricostruire un contesto.

- Infine, l'ultimo pulsante presente nell'interfaccia, denominato "Download Database" ci permette di scaricare un file, con estensione .sql, che contiene tutta la struttura del database, le varie tabelle e le voci necessarie alla documentazione dei processi di restauro virtuale.

Questa struttura mostra tutte le potenzialità della piattaforma nel facilitare, indifferentemente dalla tipologia di opera, l'elaborazione di un intervento di restauro virtuale.

Per cui, a seconda del *workflow* che si vuole seguire, primariamente, una volta aperto il software QGIS®, si dovrà creare un nuovo progetto⁵¹⁰. Una volta effettuato questo passaggio si potrà aprire la piattaforma che, come sopradetto, si trova all'interno del menu "Plugins", alla voce "Virtual Restoration".

I primi processi da attuare tramite DRes risultano essere in comune per tutte le tipologie di opere su cui si effettua un intervento di restauro virtuale. Inizialmente, quindi, la piattaforma permette di specificare quale sarà la cartella, contenuta all'interno del sistema dell'utente, che permetterà di immagazzinare, alla fine dei processi, tutti i file riguardanti sia le elaborazioni effettuate sia le informazioni inserite nel database. Questa singola cartella alla base dell'intero progetto risulta fondamentale per permettere una corretta esecuzione dei vari scambi tra i software e per evitare una possibile perdita dei dati riguardanti l'intervento.

Successivamente il plug-in permette di aprire, tramite l'omonimo pulsante, il software Agisoft metashape®, così da poter eseguire tutte le elaborazioni fotogrammetriche atte alla creazione di un modello 3D metricamente accurato⁵¹¹. All'interno dell'ambiente di metashape®, infatti, si potranno caricare tutte le immagini prodotte appositamente per l'elaborazione fotogrammetrica. Eseguendo, in seguito, tutti i processi definiti dal software per arrivare, infine, a produrre un modello 3D metricamente corretto. Una volta effettuate tutte le elaborazioni fotogrammetriche, prodotto il modello tridimensionale e, se necessario, l'ortomosaico, sarà demandato direttamente all'utente il processo di esportazione e salvataggio di questi risultati, in formato OBJ per il modello

⁵¹⁰ Nelle istruzioni allegate con il plug-in si suggerisce di utilizzare un qualsiasi sistema di riferimento proiettato, così da evitare che il materiale caricato, come, ad esempio, gli ortomosaici, possa subire delle distorsioni dovute alla situazione che il sistema sia di tipo angolare e non metrico.

⁵¹¹ Questo processo, in comune ad entrambi i *workflow* bidimensionale e tridimensionale, è stato posto al di fuori di qualsiasi suddivisione perché si è ritenuto più opportuno evitare una distinzione che avrebbe potuto creare maggiore confusione nella schermata e, soprattutto, nelle varie successioni dei processi da effettuare.

tridimensionale e in formato TIFF o GeoTIFF per l'ortomosaico, all'interno della cartella del progetto⁵¹².

È solo a questo punto del processo che la piattaforma presenta, nella sua interfaccia grafica, una divisione netta tra il *workflow* di restauro bidimensionale e quello tridimensionale. Tale suddivisione d'altro canto, però, non risulta esclusiva del percorso scelto, infatti, l'interfaccia è volutamente omnicomprensiva per permettere un tipo di elaborazione che possa essere da una parte distinta nei processi e dall'altra consequenziale. Questa scelta è associabile con tutti quei casi, come i restauri delle architetture, che possono presentare delle elaborazioni che siano al contempo di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale.

Il *workflow* di restauro virtuale bidimensionale è strutturato per dare in primo luogo la possibilità di caricare, dalla cartella del progetto, l'ortomosaico risultante dall'elaborazione fotogrammetrica. Questo file, così richiamato, sarà subito visibile all'interno della schermata del progetto di QGIS® come nuovo *layer*. Successivamente, l'interfaccia permette di aprire il software di fotoritocco GIMP® tramite l'omonimo pulsante. All'interno di questo nuovo ambiente di fotoritocco, l'utente potrà caricare manualmente l'ortomosaico fotogrammetrico, richiamandolo dalla cartella del progetto, e potrà effettuare, su di esso, tutte le elaborazioni necessarie ad un corretto intervento di restauro virtuale bidimensionale. Infine, il risultato dovrà essere esportato e salvato nella cartella del progetto di DRes, di nuovo manualmente dall'utente, in formato TIFF o GeoTIFF. Ritornando, a questo punto, all'interno dell'ambiente QGIS®, si potrà, tramite l'interfaccia del plug-in e la specifica opzione, caricare l'ortomosaico derivante dai processi di restauro digitale. Il risultato, divenendo un nuovo *layer*, si andrà così a sovrapporre nella schermata di visualizzazione precisamente al di sopra dell'ortomosaico fotogrammetrico. Questa sovrapposizione permette di confrontare da subito gli interventi eseguiti con la situazione odierna e al contempo, mettendo in trasparenza uno degli ortomosaici, di effettuare tutte le mappature che, associate ai dati presenti all'interno del database relazionale, giustifichino le azioni di restauro virtuale compiute.

Come sopra definito, però, l'interfaccia della plug-in non si chiude con questi processi. Infatti, subito al di sotto troviamo il *workflow* di restauro virtuale tridimensionale che, pur presentando la

⁵¹² Il processo di esportazione dei risultati e salvataggio nella cartella da parte dell'utente, sia per Metashape® che per GIMP® e Blender®, è una scelta dovuta a due fattori: in primo luogo limiti tecnici dovuti principalmente ai software di tipo proprietario, come Metashape®, che non permettono di mettere in comunicazione diretta i vari software; in secondo luogo si è deciso volutamente di permettere all'utente di salvare in autonomia i file senza subire costrizioni da parametri già prescelti. Tutto ciò è riportato all'interno del manuale, che si può trovare nella cartella del plug-in che permetterà all'utente di conoscere tutte le caratteristiche di DRes e il suo *workflow* di utilizzo.

La scelta dei formati OBJ e TIFF è legata, invece, al loro ampio impiego in numerosi software come formati di interscambio *lossless*, quindi, senza perdita di dati dovuta a compressioni.

stessa struttura di quello precedente, si differenzia per la possibilità di creare uno o più vettori puntuali, in formato *shapefile* (SHP) o *geopackage* (GPKG). Questi elementi nascono con lo scopo da una parte di geolocalizzare, là dove necessario, sulla superficie terrestre gli oggetti restaurati, mentre dall'altra di permettere la visualizzazione, all'interno dell'ambiente GIS, dei modelli tridimensionali derivanti dai processi fotogrammetrici o da quelli di restauro virtuale. Infatti, per poter rappresentare correttamente un modello tridimensionale all'interno del software QGIS® si deve disporre di un vettore puntuale che possa essere caratterizzato con una simbologia tridimensionale che richiami, tramite un percorso esterno, il modello 3D texturizzato. Attraverso questo espediente QGIS® permette di caricare e visualizzare un oggetto tridimensionale nella finestra della “Mappa 3D”, che corrisponde al vettore puntuale presente nella schermata di visualizzazione bidimensionale⁵¹³. Ne consegue che ogni modifica subita dal vettore si andrà a ripercuotere sul modello 3D, mentre il caso contrario non avrà lo stesso effetto. Inoltre, nella situazione in cui vi sia l'esigenza di avere nello stesso progetto più modelli appartenenti allo stesso intervento si dovranno creare nuovi *layer* vettoriali distinti che possano essere caratterizzati simbolicamente con i vari oggetti 3D⁵¹⁴. Tale soluzione permette di sovrapporre o affiancare i modelli provenienti, ad esempio, dal rilievo fotogrammetrico e quelli derivanti dal restauro virtuale, permettendo così di comprendere l'entità delle operazioni eseguite e poter, al contempo, valutarne i risultati.

L'interfaccia di DRes, quindi, permette la creazione di questo vettore che risulta complementare al caricamento del modello tridimensionale fotogrammetrico. Infatti, una volta prodotto questo elemento, esso può essere caratterizzato nelle sue proprietà, alla voce “Vista 3D”, con il relativo modello tridimensionale salvato, in precedenza, in formato OBJ nella cartella del progetto. Aprendo a questo punto, attraverso il menu “Visualizza”, una nuova “mappa 3D”, si creerà una seconda finestra di visualizzazione, specifica per le mappe tridimensionali, che ci mostrerà il nostro modello tridimensionale nella stessa posizione del nostro vettore puntuale.

Successivamente, una volta conclusi questi processi di creazione e visualizzazione, l'interfaccia del plug-in DRes, ci permette di aprire, tramite l'omonimo pulsante, il software di modellazione 3D Blender®. All'interno dell'ambiente di Blender® sarà demandato all'utente, a partire dalla cartella del progetto, il caricamento del modello tridimensionale con lo scopo di

⁵¹³ Tale soluzione è legata ai limiti del software che non riesce a gestire nella stessa scena sia elementi bidimensionali che tridimensionali, dovendo quindi richiedere l'ausilio di due finestre distinte per le mappe 2D e 3D.

⁵¹⁴ Una seconda procedura, riconducibile maggiormente a quei casi in cui vi sia l'esigenza o la volontà di effettuare una ricontestualizzazione virtuale, può essere eseguita mantenendo un solo *layer* vettoriale, duplicandolo ed impostando delle regole in linguaggio SQL che permettano di visualizzare per ogni punto distinto, creato tramite tale *layer*, un modello differente.

effettuare tutte le elaborazioni necessarie all'intervento di restauro virtuale, per poi infine esportare il risultato, in formato OBJ, nuovamente all'interno della cartella del plug-in.

A questo punto l'utente, ritornando sulla schermata di DRes, può decidere se creare un altro vettore puntuale, in formato SHP o GPKG, a cui associare il modello 3D di restauro virtuale, oppure caricare tramite l'apposita finestra, un vettore puntuale in formato SHP, con relativo modello 3D associato, risultante da una precedente elaborazione. La scelta di inserire questa finestra di richiamo, come sopra definito, è legata a tutti quegli interventi in cui vi sia l'esigenza di disporre di più modelli tridimensionali di restauro virtuale. Questa occorrenza è perfettamente in linea sia con i processi di un restauro virtuale architettonico, i quali spesso possono richiedere la presenza di più modelli 3D nella scena, sia nei casi in cui si voglia effettuare una ricontestualizzazione del materiale appartenente allo stesso contesto.

Con questo ultimo passaggio si conclude il *workflow* di restauro virtuale tridimensionale, ma non le funzionalità di DRes. Infatti, vi è un ultimo pulsante che permette di salvare nella cartella del progetto un file, in formato SQL, contenente uno *script* che permette di ricreare, pronto per essere compilato, l'intera struttura del database relazionale per la documentazione degli interventi di restauro virtuale prodotto in questa ricerca.

5.2.2 Il workflow e la struttura del database

Il database relazionale prodotto per questa ricerca è nato con lo scopo di documentare, contenere e rendere disponibile tutta la mole di dati e informazioni relativi ad ogni intervento eseguito e, nello stesso momento, di permettere una valutazione completa e scientificamente corretta dell'elaborazione digitale finale.

Il database di tipo relazionale è stato costruito in linguaggio SQL tramite l'impiego del DBSM postgresQL e del software pgAdmin® 4⁵¹⁵. La sua struttura è stata da subito suddivisa in due schemi distinti, uno per il restauro virtuale bidimensionale e uno per quello tridimensionale. Questi schemi presentano uno scheletro simile e sono accomunati da una tabella principale, denominata "oggetto", che è del tutto identica⁵¹⁶.

⁵¹⁵ Il database è stato ampliato con l'estensione spaziale PostGIS che permette da un parte di trasformare un database relazionale creato con PostgreSQL in un geo-database e dall'altra di metterlo in comunicazione con QGIS. Manuale di PostGIS 3.5.0dev, *Introduction*, https://postgis.net/docs/manual-dev/it/postgis_introduction.html (Ul. Cons. 07/02/24)

⁵¹⁶ Questa decisione nasce dal fatto che, se si vuole successivamente riunire tutte le elaborazioni in un unico progetto e database, lo si potrà fare effettuando un semplice join delle due tabelle "oggetto" presenti nei rispettivi schemi. Tale processo si porterebbe così dietro a cascata tutte le altre tabelle e informazioni legate alla tabella oggetto tramite relazioni 1-n e n-n.

Infatti, il primo schema (Figg. 76-77) contenuto all'interno del database generale, associato con gli interventi di restauro virtuale bidimensionale, presenta come tabella principale proprio quella "oggetto". Questa scheda nasce allo scopo di contenere tutte le informazioni basilari e identificative dell'opera che è stata restaurata virtualmente.

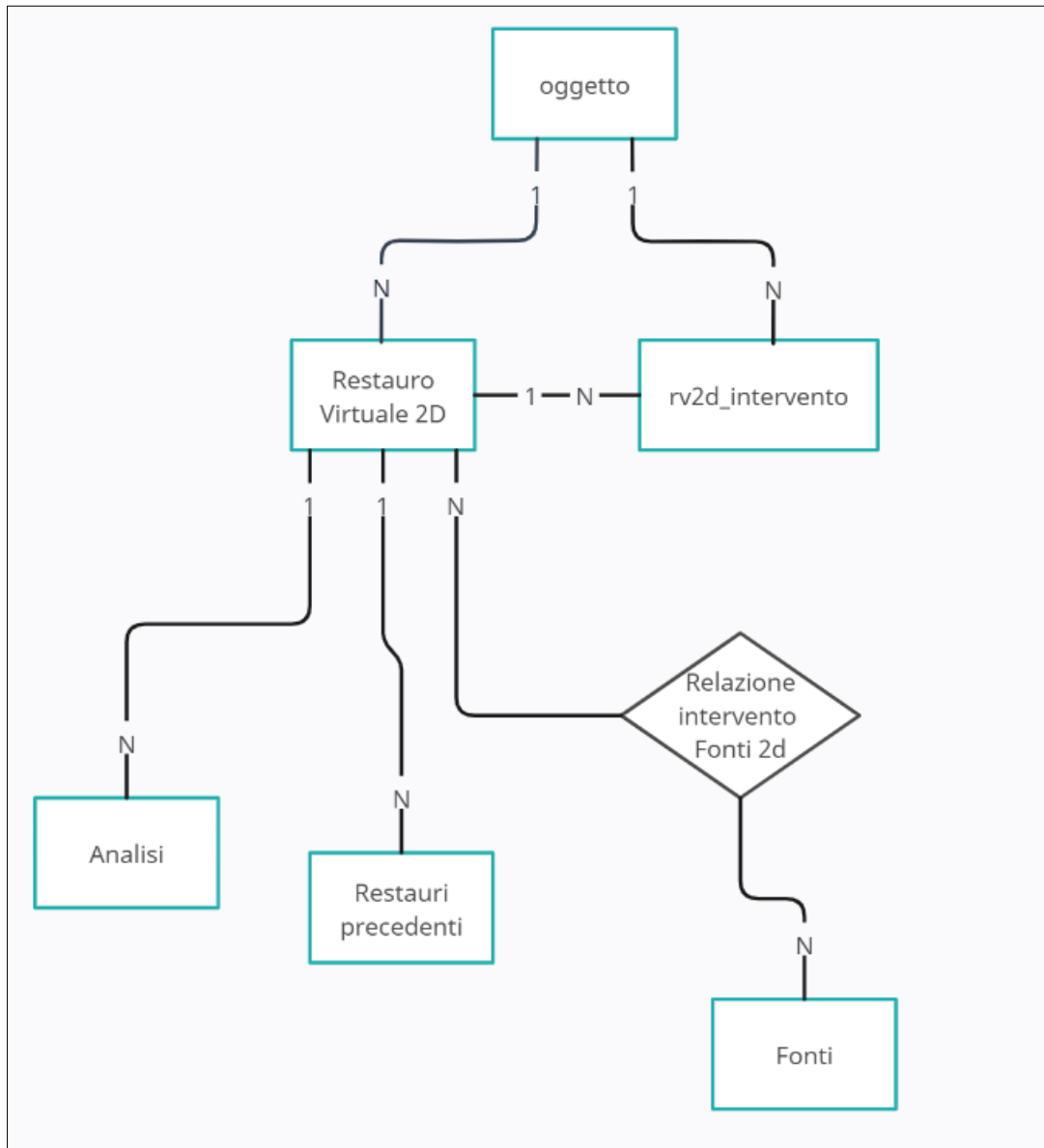


Figura 76 - Diagramma Entità-Relazioni (ER) del database/schema relativo al restauro virtuale bidimensionale.

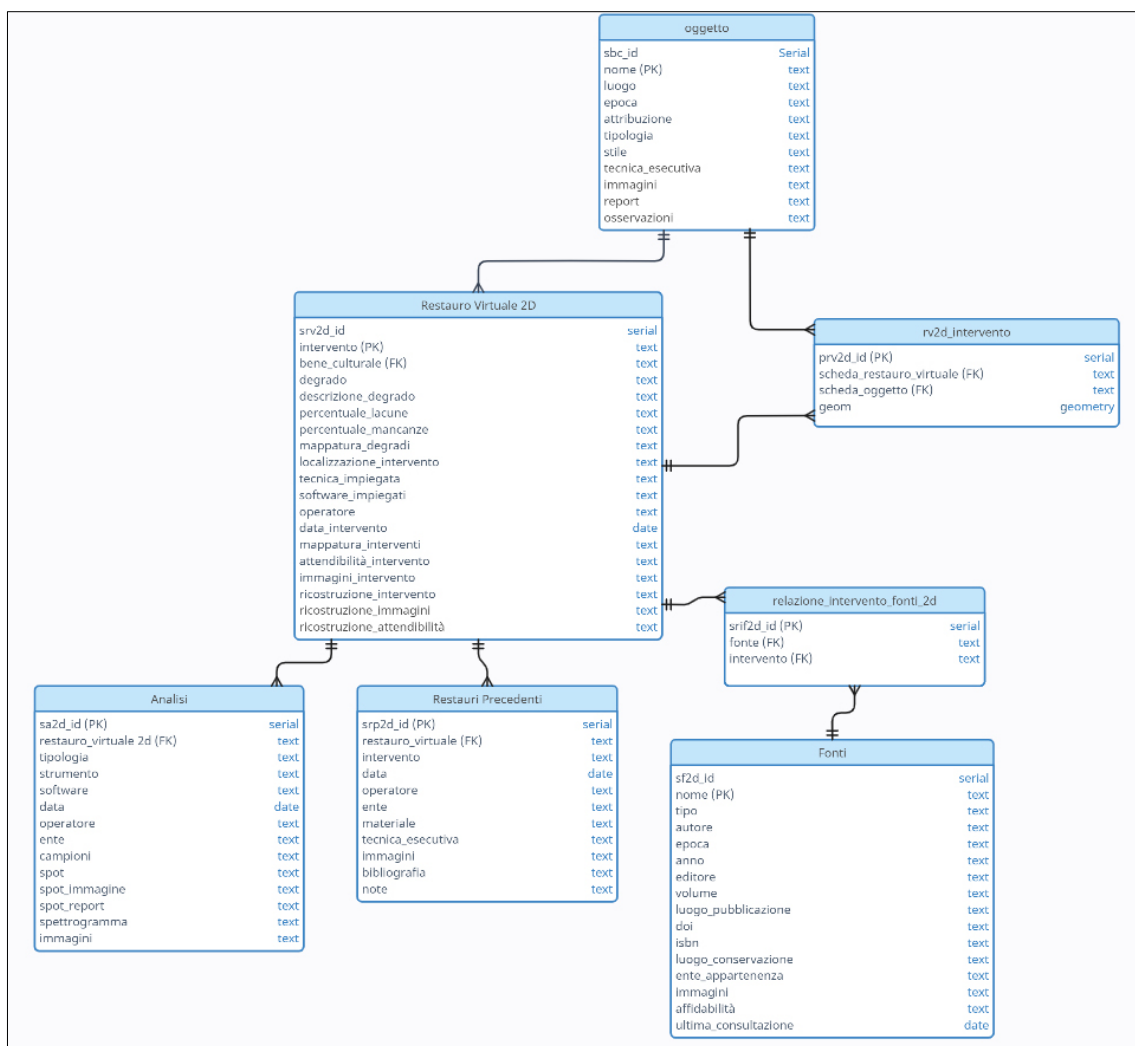


Figura 77 - Diagramma del database/schema di restauro virtuale bidimensionale con tutte le voci delle varie tabelle.

A questo fine, la scheda “oggetto” è suddivisa nelle seguenti colonne:

- Sbc_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella;
- Nome, di tipo *text*, identifica l’opera tramite una sua denominazione ed è la *primari key* per le tabelle “restauro_virtuale_2D” e “rv2d_intervento”;
- Luogo, di tipo *text*, riporta il luogo in cui è conservata l’opera o il sito di appartenenza;
- Epoca, di tipo *text*, identifica l’epoca a cui è datata l’opera o il periodo di attribuzione;
- Attribuzione, di tipo *text*, riporta l’eventuale autore dell’opera o l’attribuzione ad una determinata scuola;
- Tipologia, di tipo *text*, campo che contiene la tipologia dell’opera;
- Stile, di tipo *text*, riporta lo stile a cui appartiene l’opera;

- Tecnica_esecutiva, di tipo *text*, identifica la tecnica esecutiva con cui è stata prodotta l'opera;
- Immagini, di tipo *text*, contiene e permette di visualizzare ed aprire un'immagine esterna che mostra l'opera nella sua situazione odierna;
- Report, di tipo *text*, contiene e permette di aprire un file esterno, in formato Word o PDF, contenente un report che descrive la situazione odierna dell'opera;
- Osservazioni, di tipo *text*, in questo campo possono essere inserite eventuali note e osservazioni del compilatore.

Lo schema del database, a questo punto, evidenzia la presenza di due tabelle distinte, “restauro_virtuale_2D” e “rv2d_intervento”, che sono associate con la scheda “oggetto” da un rapporto 1:N. La tabella denominata “restauro_virtuale_2D” è la scheda più rilevante per il database e contiene tutte le informazioni associate all'intervento o agli interventi di restauro virtuale bidimensionale. Questi dati sono contenuti nella tabella tramite i seguenti campi:

- Srv2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella;
- Intervento, di tipo *text*, è il campo che contiene la denominazione del tipo di intervento eseguito. Inoltre, è la *primary key* per le tabelle “analisi”, “restauri_precedenti”, “relazione_intervento_fonti” e “rv2d_intervento”;
- Bene_culturale, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “oggetto”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella;
- Degrado, di tipo *text*, riporta le tipologie di degrado riscontrate sul manufatto in maniera schematica, facilitando così una possibile ricerca tramite *queries*;
- Descrizione_degrado, di tipo *text*, permette di descrivere in maniera più esaustiva i degradi presenti sull'opera;
- Percentuale_lacune, di tipo *text*, identifica, sotto forma di numero, la percentuale di lacune presenti sull'opera;
- Percentuale_mancanze, di tipo *text*, riporta, sotto forma di numero, la percentuale di mancanze presenti sull'opera;
- Mappatura_degradi, di tipo *text*, contiene e permette di visualizzare ed aprire un'immagine o un PDF esterno che mostra la mappatura dei degradi presenti;
- Localizzazione_intervento, di tipo *text*, serve a identificare l'area o le aree dove si è intervenuto tramite tecniche di restauro virtuale;

- Tecnica_impiegata, di tipo *text*, riporta tutte le tecniche e i *tools* impiegati per produrre il risultato finale di intervento digitale;
- Software_impiegati, di tipo *text*, identifica l'insieme dei software utilizzati nell'intero processo;
- Operatore, di tipo *text*, contiene i dati identificativi dell'operatore che ha effettuato l'intervento di restauro virtuale;
- Data_intervento, di tipo *date*, permette di inserire la data in cui si è concluso l'intervento di restauro virtuale;
- Mappatura_interventi, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che rappresenta la mappatura della specifica area, o aree, di intervento di restauro virtuale sull'opera;
- Attendibilità_intervento, di tipo *text*, permette di inserire una valutazione dell'attendibilità dell'intervento di restauro virtuale;
- Immagini_intervento, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che immortalata le fasi in corso d'opera dell'intervento eseguito;
- Ricostruzione_intervento, di tipo *text*, riporta l'eventuale localizzazione e breve descrizione dell'intervento di ipotesi ricostruttiva totale o parziale eseguito sull'opera;
- Ricostruzione_immagini, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostri l'ipotesi ricostruttiva nella sua interezza;
- Ricostruzione_attendibilità, di tipo *text*, permette di inserire una valutazione dell'attendibilità dell'ipotesi ricostruttiva.

Anche la tabella “rv2D_intervento” presenta, come precedentemente menzionato, un rapporto 1:N con la scheda “oggetto”. A questa scheda, a differenza delle altre, è associata una geometria vettoriale di tipo poligonale che ha la finalità di permettere la mappatura, direttamente in ambiente GIS, di tutti gli interventi di restauro virtuale effettuati. Lo scopo di questa mappatura è triplice: in primo luogo, serve a identificare e connettere la parte grafica con quella tabellare; in secondo luogo, tramite un semplice clic sul relativo poligono, permette l'accesso diretto tra ogni intervento eseguito e la tabella associata; infine, dà la possibilità di creare mappature tematiche in base alle *queries* tabellari che l'utente richiede al software.

La tabella rv2D_intervento è composta dai seguenti campi:

- Prv2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella. In questo caso corrisponde anche alla *primary key*;

- Scheda_restauro_virtuale, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “restauro_virtuale_2D”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella;
- Schedaoggetto, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “oggetto”.
- Geom, di tipo *geometry*, contiene tutti i dati relativi alle coordinate che creano i vertici, gli angoli e le facce dei poligoni.

Lo schema del database di restauro virtuale bidimensionale prevede, infine, subito sotto a queste ultime due schede, le tabelle di “analisi”, dei “restauri_precedenti” e delle “fonti”. Tutte queste schede presentano una relazione con la tabella “restauro_virtuale_2D”, ma mentre le schede “analisi” e “restauri_precedenti” sono associate ad essa con una relazione 1:N, la scheda “fonti”, invece, presenta una relazione N:N. Questa tipologia di relazione richiede, però, l’ausilio di una ulteriore tabella che possa fare da tramite tra la scheda “restauro_virtuale_2D” e la tabella “fonti”. Per questa motivazione si è inserita, all’interno dello schema, una nuova tabella di relazione denominata “relazione_intervento_fonti_2d”⁵¹⁷.

La tabella “analisi” contiene tutte le informazioni provenienti dalle eventuali analisi svolte prima di eseguire l’intervento di restauro virtuale ed è composta dai seguenti campi:

- Sa2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella. In questo caso corrisponde anche alla *primary key*.
- Restauro_virtuale_2d, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “restauro_virtuale_2D”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella.
- Tipologia, di tipo *text*, il campo che identifica la tipologia di analisi che è stata eseguita;
- Strumento, di tipo *text*, riporta i dati relativi allo strumento o agli strumenti impiegati per effettuare le analisi;
- Software, di tipo *text*, campo che contiene le informazioni relative ai software impiegati per le analisi;
- Data, di tipo *date*, indica la data in cui è stata effettuata l’analisi;
- Operatore, di tipo *text*, identifica l’operatore che ha effettuato fisicamente le analisi;
- Ente, di tipo *text*, riporta l’ente che ha effettuato le analisi;

⁵¹⁷ La scelta di creare questa relazione differente è nata dal fatto che, mentre le analisi e i restauri precedenti sono legati alle singole azioni di restauro virtuale eseguite, le stesse fonti possono essere state impiegate per produrre interventi differenti.

- Campioni, di tipo *text*, identifica, in maniera descrittiva l'area, le dimensioni e gli altri dati relativi ai campioni che sono stati utilizzati per le analisi;
- Spot, di tipo *text*, riporta in maniera sintetica le informazioni relative allo spot dove sono state effettuate le analisi;
- Spot_immagine, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che immortalano lo spot dove sono state eseguite le analisi;
- Spot_report, di tipo *text*, contiene e permette di aprire un PDF esterno contenente il report sui risultati delle analisi condotte;
- Spettrogramma, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che contiene lo spettrogramma derivante dalle analisi.

La tabella “restauri_precedenti” riporta tutti quei dati collegati alle attività di restauro precedente che hanno caratterizzato la storia dell'opera e, di conseguenza, le sue fattezze odierne. Essa è composta dai seguenti campi:

- Srp2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella. In questo caso corrisponde anche alla *primary key*;
- Restauro_virtuale, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “restauro_virtuale_2D”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella;
- Intervento, di tipo *text*, contiene tutte le informazioni che ci permettono di identificare l'intervento di restauro precedente;
- Data, di tipo *date*, è la data di fine lavori di restauro, se disponibile, o indicativa dell'anno di esecuzione dell'intervento;
- Operatore, di tipo *text*, riporta i dati identificativi dell'operatore che ha svolto l'intervento, se disponibili;
- Ente, di tipo *text*, contiene le informazioni relative all'ente che ha eseguito o voluto l'intervento;
- Materiale, di tipo *text*, riporta il materiale o i materiali impiegati nell'intervento;
- Tecnica_esecutiva, di tipo *text*, identifica la tecnica o le tecniche esecutive impiegate nell'intervento di restauro;
- Immagini, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno relativi all'intervento;
- Bibliografia, di tipo *text*, campo che riporta, se disponibile, la bibliografia legata all'intervento di restauro;

- Note, di tipo *text*, questa sezione è stata inserita per permettere l'aggiunta di eventuali note sull'intervento, o informazioni generiche, relative alla situazione attuale.

Da ultimo, abbiamo la tabella “fonti”, che, come indica la denominazione, riporta tutte le fonti impiegate per produrre l'intervento di restauro virtuale. La tabella “fonti” presenta i seguenti campi:

- Sf2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella;

- Nome, di tipo *text*, campo che identifica la fonte utilizzata e corrisponde alla *primary key* della tabella;

- Tipo, di tipo *text*, riporta il tipo di fonte utilizzata (libro, disegno, dipinto, ecc.);

- Tipologia, di tipo *text*, relativo alla tipologia di fonte utilizzata (Manoscritto, libro stampato, pianta, sezione, dipinto murario, dipinto su tavola, ecc.);

- Autore, di tipo *text*, contiene i dati relativi all'autore della fonte;

- Epoca, di tipo *text*, identifica l'epoca in cui è stata prodotta la fonte;

- Anno, di tipo *text*, riporta l'anno in cui è stata creata o pubblicata la fonte;

- Editore, di tipo *text*, contiene le informazioni relative all'editore, se si tratta di fonti librarie;

- Volume, di tipo *text*, riporta l'eventuale volume, solo per le fonti librarie;

- Luogo_pubblicazione, di tipo *text*, identifica l'eventuale luogo di pubblicazione della fonte;

- Doi, di tipo *text*, riporta il DOI nelle fonti librarie;

- Isbn, di tipo *text*, riporta l'ISBN nelle fonti librarie;

- Luogo_conservazione, di tipo *text*, contiene il luogo di conservazione della fonte;

- Ente_appartenenza, di tipo *text*, identifica l'ente a cui appartiene la fonte;

- Immagini, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostra la fonte utilizzata;

- Affidabilità, di tipo *text*, contiene una valutazione sintetica sull'affidabilità della fonte impiegata;

- Ultima_consultazione, di tipo *date*, riporta la data di ultima consultazione della fonte.

Come precedentemente anticipato, questa scheda è connessa alla tabella “restauro_virtuale_2D” tramite una relazione N:N per mezzo della scheda “relazioni_intervento_fonti_2d”, la quale è composta dai seguenti campi:

- Srif2d_id, di tipo *Serial*, si tratta di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni record della tabella. In questo caso corrisponde anche alla *primary key*;

- Fonte, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione N:N con la scheda “fonte”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella;
- Intervento, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione N:N con la scheda “restauro_virtuale_2D”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella.

All'interno del database generale per la documentazione degli interventi di restauro virtuale è presente, come menzionato precedentemente, un secondo schema associato con tutte quelle attività che possono essere ricondotte alle operazioni di restauro virtuale tridimensionale. Questo secondo schema pur presentando una struttura e delle tabelle simili allo schema di restauro virtuale bidimensionale si differenzia da esso per alcune caratteristiche (Figg. 78-79).

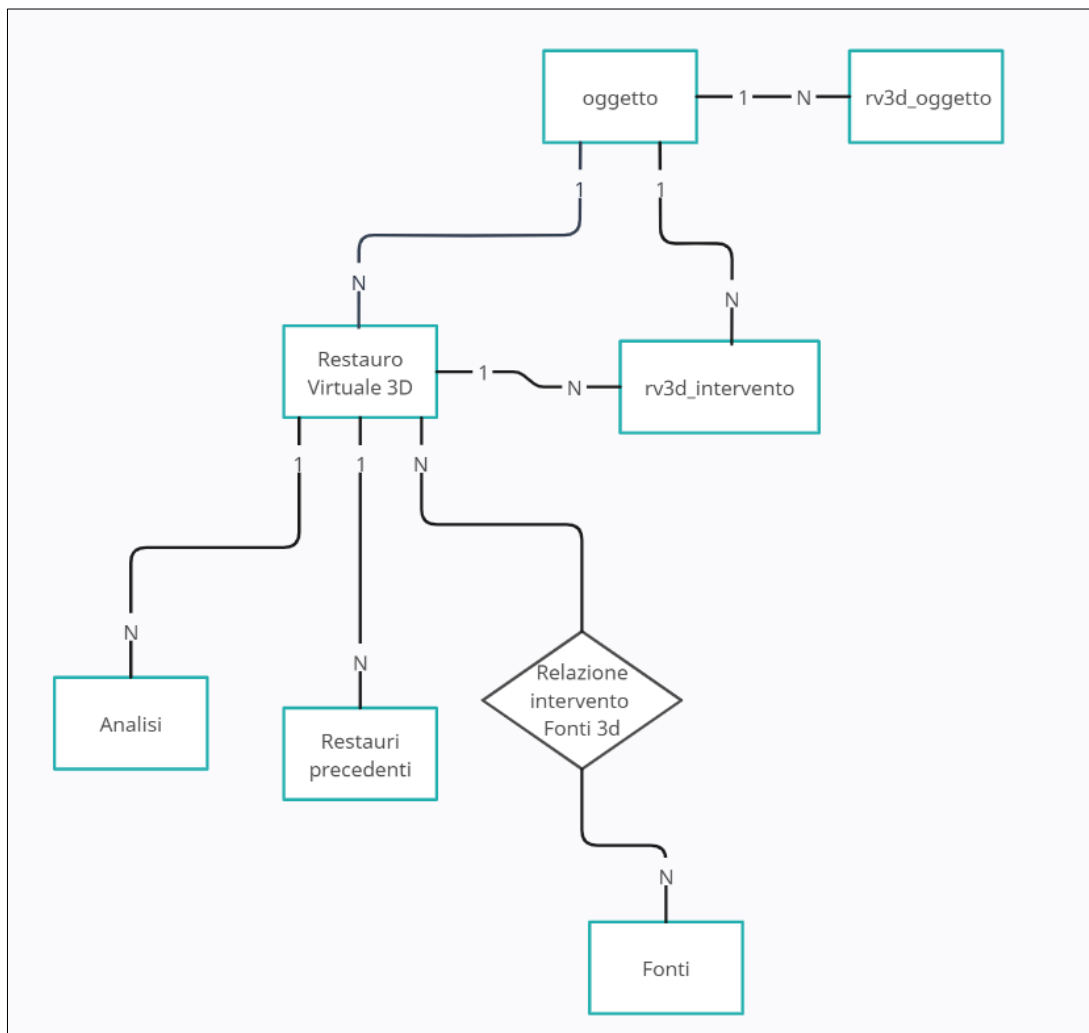


Figura 78 - Diagramma Entità-Relazioni (ER) del database/schema di restauro virtuale tridimensionale.

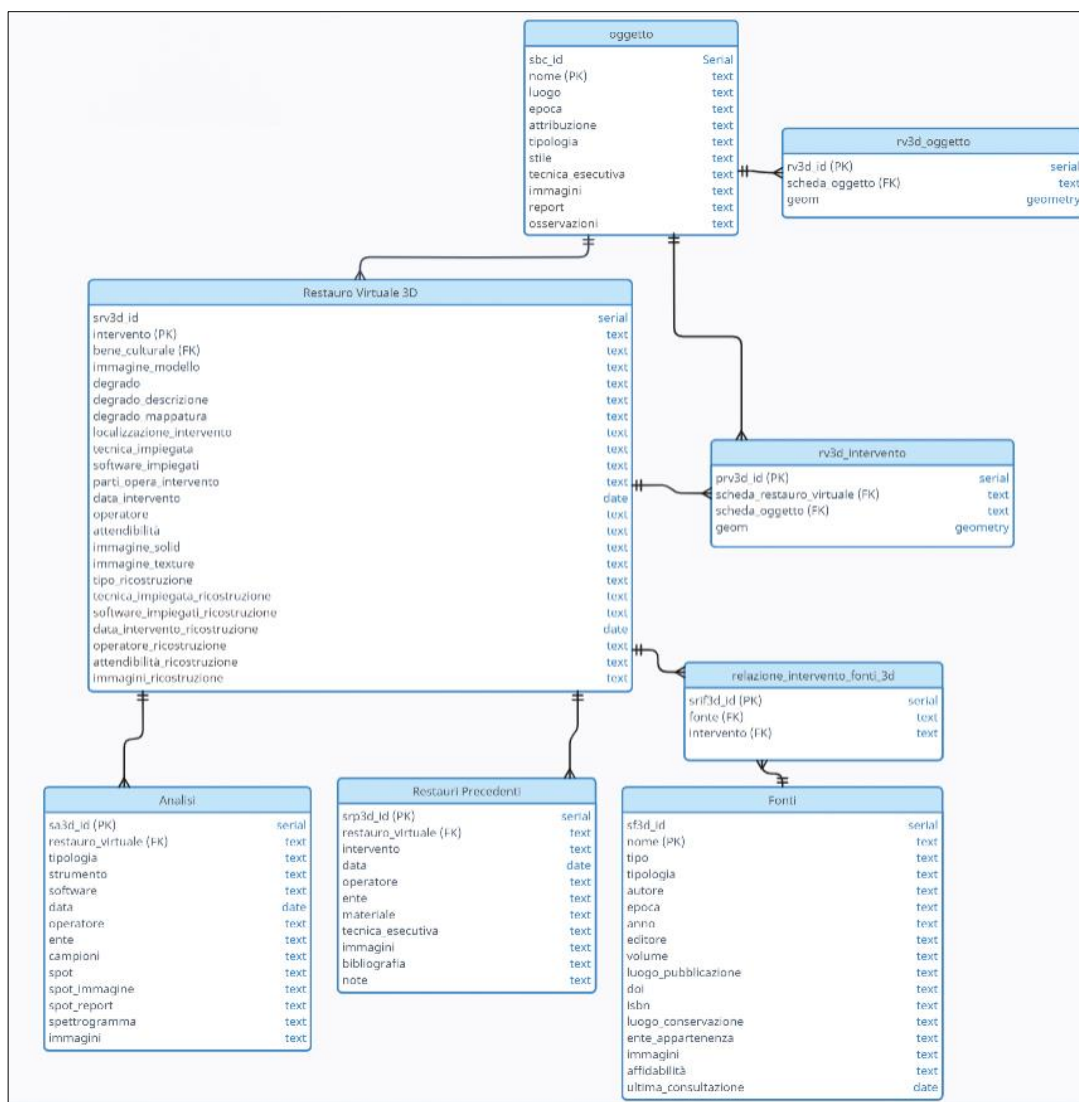


Figura 79 - Diagramma del database/schema di restauro virtuale tridimensionale con le voci dei vari campi delle tabelle.

Mentre la scheda “oggetto” è del tutto identica alla precedente, in questo schema, si è presentata l’esigenza di creare una nuova tabella, denominata “rv3d_oggetto” e collegata da una relazione 1:N con la scheda “oggetto”, per poter caricare, all’interno dell’ambiente GIS, il modello 3D derivante dai processi fotogrammetrici. Questa nuova tabella, quindi, è composta dai seguenti campi:

- rv3d_id, di tipo *Serial*, si tratta, come negli altri casi, di un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni *record* della tabella e che, in questa situazione, corrisponde alla *primary key*;

- `scheda_oggetto`, di tipo *text*, è la *foreign key*, la colonna della tabella che ci permette di avviare la relazione 1:N con la scheda “oggetto”, e che quindi riceve e contiene i dati definiti dalla *primary key* di tale tabella;
- `geom`, di tipo *geometry*, una geometria vettoriale di tipo puntuale che, associata a tale tabella, permette di visualizzare, impostandolo dalle sue proprietà come simbologia 3D, il modello tridimensionale in formato OBJ del rilievo fotogrammetrico.

Questa tabella, quindi, ha lo scopo di caricare correttamente il modello tridimensionale fotogrammetrico e di associarlo direttamente con la scheda “oggetto”. Questo oggetto 3D può essere così messo in relazione con gli interventi di restauro virtuale e a confronto con il relativo modello 3D di intervento digitale.

La seconda sostanziale differenza tra i due schemi è attinente alla tabella di “restauro_virtuale 3D” che differisce, rispetto alla tabella “restauro_virtuale_2D”, nei seguenti campi:

- `Srv3d_id`, di tipo *Serial*, un numero seriale progressivo necessario a identificare ogni *record* della tabella;
- `Immagine_modello`, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostra il modello fotogrammetrico;
- `Parti_opera_intervento`, di tipo *text*, riporta tutte le informazioni che identificano dettagliatamente o schematicamente le parti dell’opera che hanno subito un intervento di restauro virtuale;
- `Immagine_solid`, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostra il modello tridimensionale senza *texture*;
- `Immagine_texture`, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostra la *texture* bidimensionale UV;
- `Tipo_ricostruzione`, di tipo *text*, riporta la tipologia di ricostruzione 3D impiegata;
- `Tecnica_impiegata_ricostruzione`, di tipo *text*, identifica la tecnica o le tecniche di ricostruzione impiegate;
- `Software_impiegati_ricostruzione`, di tipo *text*, riporta tutti i software impiegati per l’elaborazione dell’intervento ricostruttivo;
- `Data_intervento_ricostruzione`, di tipo *date*, identifica la data in cui è stato completato l’intervento di ricostruzione;
- `Operatore_ricostruzione`, di tipo *text*, riporta i dati dell’operatore che ha compiuto l’ipotesi ricostruttiva;

- *Attendibilità_ricostruzione*, di tipo *text*, contiene in forma schematica una breve valutazione sull'attendibilità dell'ipotesi ricostruttiva;
- *Immagini_ricostruzione*, di tipo *text*, contiene e permette di aprire una immagine o un PDF esterno che mostra il *rendering* finale dell'ipotesi ricostruttiva.

Infine, l'ultima sostanziale discrepanza è imputabile alla tipologia di geometria vettoriale associata con la tabella “rv3d_intervento”, che, pur presentando gli stessi campi della controparte, la tabella “rv2d_intervento”, differisce da essa per il tipo di vettore impiegato che passa da una geometria poligonale a una puntuale. Questa scelta è dovuta all'impossibilità di richiamare, all'interno del software QGIS®, un modello 3D se non come simbologia tridimensionale di un vettore puntuale visualizzabile tramite la schermata di “Mappa 3D”. Ne risulta che, come la tabella “rv3doggetto”, anche la scheda “rv3d_intervento” permette di caricare il modello tridimensionale di restauro virtuale come simbologia del vettore creato. La creazione di questo secondo vettore dà all'utente finale la possibilità di visualizzare e, quindi valutare, entrambi i modelli tridimensionali nella stessa schermata, sia posti in sovrapposizione che affiancati. Inoltre, entrambi i modelli presentano un'associazione con le relative schede del database, quello fotogrammetrico solo alla scheda “oggetto” mentre quello di restauro anche alla tabella “restauro_virtuale_3D. Questa relazione permette l'accesso alla documentazione non solo aprendo direttamente la scheda tramite l'interfaccia del database, ma anche attraverso un clic, nella schermata di visualizzazione della mappa, sul punto associato con il modello 3D, oppure sull'oggetto tridimensionale stesso, nella finestra di “Mappa 3D”⁵¹⁸.

Come si può ben comprendere a questo punto, per poter utilizzare e compilare il database si deve seguire un *workflow* ben preciso che segue la gerarchia delle relazioni.

Il database di restauro virtuale bidimensionale prevede come primo elemento da compilare la scheda “oggetto”, per poter poi avere accesso correttamente a tutte le tabelle successive. Successivamente lo schema ci permette di poter inserire i dati nelle tabelle “restauro_virtuale_2D” e “rv2d_intervento”, in quanto presentano una relazione 1:N che le vincola alla tabella “oggetto”. Infine, mentre la scheda “rv2d_intervento” non ha nessun vincolo relazionale con altre schede, la tabella “restauro_virtuale_2D” dà accesso alla compilazione delle tabelle “analisi” e “restauri_precedenti”, le quali sono vincolate, ad essa da una relazione 1:N, e “fonti”, che presenta

⁵¹⁸ Questi due schemi, e il relativo database, non sono e non vogliono essere esaustivi per ogni casistica di restauro virtuale. Infatti, la volontà di permettere di scaricare lo script del database è associata alla decisione di permettere all'utente finale di aggiungere o togliere le voci secondarie delle tabelle in base alle esigenze dell'intervento da eseguire. Ciò che però deve rimanere inalterato, almeno nella nostra volontà, è lo schema di base nelle sue varie tabelle e relazioni, che risultano già esaustive e complete. Ovviamente, come tutti i plug-in si tratta di un lavoro in continuo aggiornamento e sviluppo, che sicuramente presenterà delle evoluzioni in futuro.

una relazione N:N per mezzo della scheda “relazioni_intervento_fonti_2d”. Tramite queste relazioni il database può essere interrogato o direttamente dalle singole schede del database, oppure tramite clic, su uno dei poligoni relativi agli interventi di restauro virtuale, sulla mappa. Questa seconda opzione ci aprirà la scheda “rv2d_intervento” che ci permetterà di aprire direttamente o la scheda “oggetto” o la tabella “restauro_virtuale_2D” e, tramite le varie relazioni, tutte le altre schede associate a quello specifico intervento eseguito. Inoltre, queste relazioni facilitano le *queries* sui dati del database permettendo, tramite linguaggio SQL, di interrogarlo più approfonditamente e di poter produrre nuove informazioni.

Il *workflow* del database associato con tutti i processi di restauro virtuale tridimensionale risulta nella sequenza quasi identico a quello del restauro virtuale bidimensionale, differenziandosi da esso solamente nella fase successiva alla compilazione della scheda “oggetto”. Infatti, in questo schema, ad essa, è associata anche la scheda “rv3d_oggetto” tramite la relazione 1:N. Questa tabella, nata per poter caricare il modello tridimensionale fotogrammetrico, di fatto, presenta una precedenza di compilazione, nei vari passaggi del *workflow*, rispetto alle schede di “restauro virtuale 3D” e “rv3d_intervento”.

6. I casi di studio

In parallelo allo studio e sviluppo del plug-in è avvenuta la ricerca dei casi studio su cui si sarebbero testate tutte le sue funzioni e processi. Dopo varie ipotesi e tentativi si è giunti alla selezione di tre contesti differenti legati ai due workflow di restauro virtuale: la pavimentazione in opus sectile a rombi listellati dell'ambiente A8 della villa dei Quintili a Roma, per il percorso di restauro virtuale bidimensionale; il corredo della tomba 643 dalla necropoli etrusca di Monte Abatone a Cerveteri, per i processi relativi al restauro virtuale tridimensionale; e le pitture a grottesche collocate nell'abside dell'ambiente E del cosiddetto “Bagno del Cardinale” della villa del Colle del Cardinale a Perugia, per analizzare entrambi i processi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale nello stesso intervento⁵¹⁹.

La scelta di tre contesti così differenti, sia per epoca che per funzione, riflette pienamente l'ambito interdisciplinare di questa piattaforma che, non limitata al singolo intervento, vuole essere uno strumento che permetta di effettuare una o più ipotesi di elaborazione di restauro virtuale, in cui ogni singola azione possa essere giustificata dalla documentazione connessa ad essa, permettendo così di verificarne la validità scientifica in ogni momento⁵²⁰.

6.1 Processi di restauro virtuale bidimensionale: La pavimentazione a rombi listellati dell'ambiente A8 della villa dei Quintili

Il monumentale complesso della villa dei Quintili si trova nel suburbio romano, più precisamente all'altezza del V miglio della via Appia⁵²¹. La villa, tra le più estese della zona, deve la sua denominazione ai suoi primi proprietari, i consoli del 151 d.C., Sesto Quintili Condiano e Sesto Quintilio Valerio Massimo⁵²². Successivamente la villa divenne proprietà e residenza imperiale sotto

⁵¹⁹ La decisione di prendere come casi studio questi tre contesti si deve principalmente alla fortuita disponibilità sia delle opere stesse, sia di tutta la documentazione attinente ai tre contesti, sia, infine, dei permessi necessari allo studio. Si ringraziano per questo: la prof.ssa Marina Micozzi per la concessione allo studio dei materiali della Tomba 643 di Monte Abatone; la prof.ssa, nonché mia tutor, Paola Pogliani per i permessi di accesso al contesto della villa dei Quintili e studio della pavimentazione dell'ambiente A8 e per il contesto del Bagno del Cardinale e della villa del Colle a Perugia; la Dott.ssa Cappelletto per aver gentilmente messo a disposizione la sua tesi di laurea e i relativi risultati legati all'intervento di restauro della pavimentazione dell'ambiente A8; il Dott. Michele Benucci per la documentazione storica sulla villa del Colle, il Bagno del Cardinale e sulle pitture; e la Dott.ssa Valeria Valentini per la documentazione relativa agli interventi preliminari di restauro delle pitture a grottesche dell'ambiente E del Bagno del Cardinale.

⁵²⁰ Ovviamente, si vuole in questa sede ribadire che i tre casi studio presi in considerazione non vogliono e non possono essere esaustivi di tutte le casistiche di intervento relative al restauro virtuale, ma sono stati, ai fini di questa ricerca, esemplificativi per i percorsi e differenti processi disponibili all'interno della piattaforma.

⁵²¹ Paris *et al.* 2019, p. 12

⁵²² Un dato che viene confermato archeologicamente dal ritrovamento di alcune fistule in piombo recanti i loro nomi. Paris *et al.* 2019, p. 12

Commodo⁵²³ subendo diverse ristrutturazioni ed ampliamenti. Attività che si perpetrarono durante l'epoca dei Severi e dei Gordiani (238-244 d.C.), per concludersi, infine, con piccole attestazioni sotto Teodorico (455-526 d.C.)⁵²⁴. Successivamente, la villa fu abbandonata divenendo preda di espoliazioni e saccheggi⁵²⁵.

Il complesso della villa si articola in differenti nuclei costruttivi, definiti architettonicamente “a padiglioni”. L'ingresso originario era probabilmente sulla via Appia e si collocava vicino al ninfeo commodiano (H). Subito dietro questa struttura monumentale si trova il complesso principale (A-B-R) al quale si poteva accedere tramite un giardino che presentava una forma simile ad un ippodromo. L'intera struttura disponeva internamente di un acquedotto (N) a cui facevano capo delle grandi cisterne (G-P-Q). Questo acquedotto era preposto per alimentare la struttura centrale e le cosiddette piccole terme (M). Infine, vi era un grande circo (S), la cui presenza è solamente attestata dalle fotografie aeree (Fig. 80)⁵²⁶.

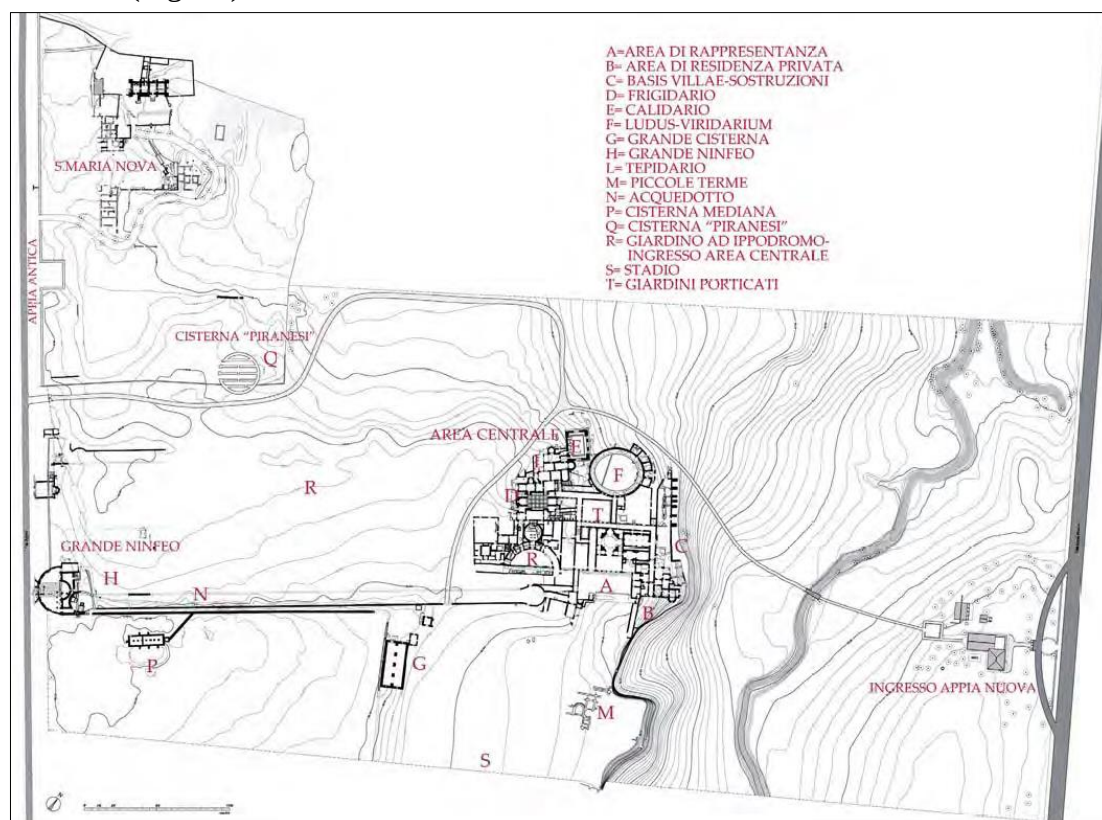


Figura 80 - Rilievo dell'intero complesso della villa dei Quintili con in evidenza le varie aree (da Rotondi 2012).

⁵²³ Commodo si appropriò di tutti i beni della famiglia Quintili nel 182-183 d.C. a seguito della condanna a morte dei due Quintili come cospiratori, anche se probabilmente erano estranei ai fatti, nella congiura di Lucilla. Paris *et al.* 2019 p. 12

⁵²⁴ Paris *et al.* 2019, pp. 22-24

⁵²⁵ Rotondi 2012 p. 7

⁵²⁶ Frontoni, Galli 2012, p. 9

La pavimentazione facente parte del caso studio preso in esame si trova nell'ambiente denominato A8 della villa. Questo era compreso in un settore che, appartenendo probabilmente all'area di rappresentanza, era composto da una serie di vani di piccole dimensioni su due livelli. A

nord, tramite tre gradini, si accedeva ai tre ambienti denominati A1, A7 e, appunto, A8 (Fig. 81).

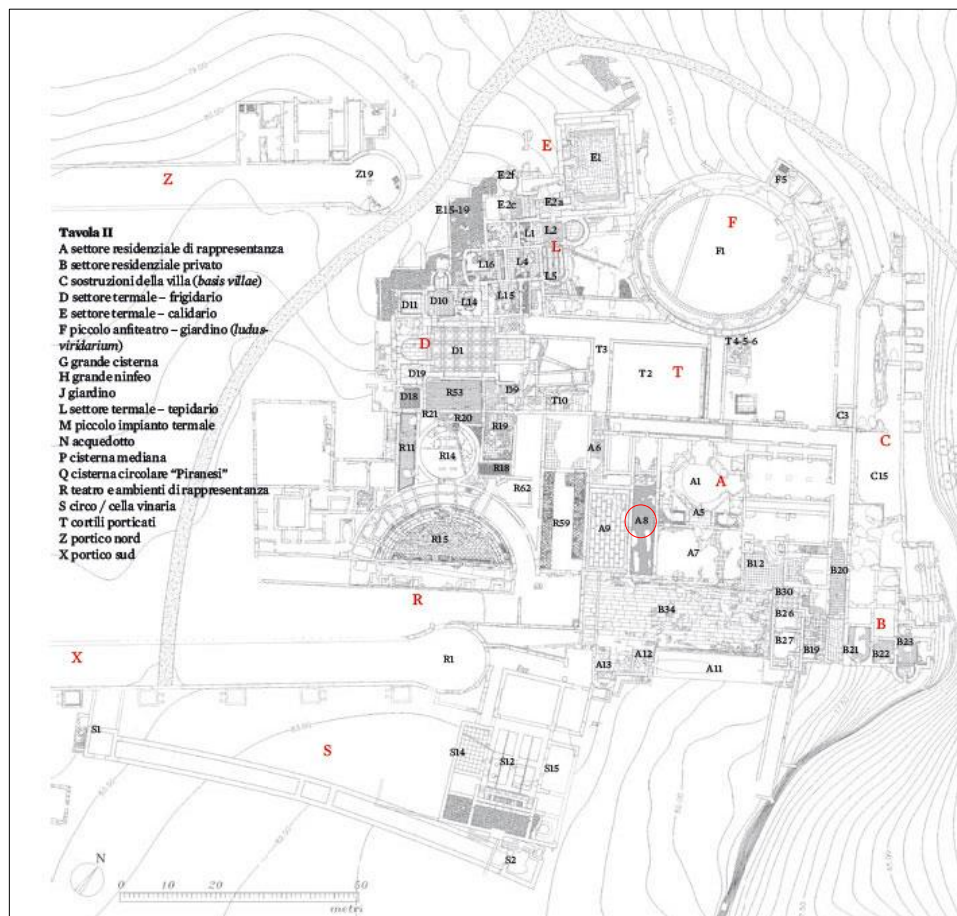


Figura 81 - Planimetria dell'area centrale della villa dei Quintili, con in evidenza, cerchio rosso, l'ambiente A8 (da Paris et al. 2019).

Questi, probabilmente durante la prima ristrutturazione, furono rialzati tramite suspensure, per creare un sistema di riscaldamento pavimentale che si protraeva, per mezzo di tubuli, anche nelle pareti⁵²⁷. Queste stanze erano riccamente decorate con rivestimenti marmorei, solo in parte, ancora conservati⁵²⁸. Si trattava di pavimentazioni in marmi policromi, provenienti dall'asia minore, dall'Africa e dalla Grecia, a formare elementi geometrici e floreali. Le pareti si presentavano decorate

⁵²⁷ Frontoni 2000, pp. 45-46

⁵²⁸ *Ibidem*.

con uno zoccolo marmoreo e rivestimento a lastre marmoree o intonaco dipinto, di cui purtroppo rimangono solo poche tracce⁵²⁹.

Di questi l'ambiente A8, quello interessato dalla presente ricerca, è una sala rettangolare (28,5x4,7 m) orientata sud-est nord ovest (Fig. 82)⁵³⁰.



Figura 82 - L'ambiente A8 con in evidenza le due porzioni di pavimentazione ancora conservate (da Cappelletto 2022)

Le murature in opera mista con pilastri in laterizio e cortine in leucite basaltica o blocchetti di tufo, erano rivestite in antico con marmi⁵³¹. La pavimentazione invece era posizionata, come precedentemente accennato, su suspensure, coperte da un motivo decorativo in opus sectile a rombi listellati⁵³². Di questa decorazione rimangono solamente alcune porzioni⁵³³, con la più grande posta a nord-ovest dell'ambiente⁵³⁴, mentre l'altra, scelta come caso studio principale dell'elaborazione, a sud-est⁵³⁵. Le crustae a forma romboidale sono costituite da marmo greco scritto mentre i listelli sono di marmo rosso antico (Fig. 83)⁵³⁶. Questa porzione di pavimentazione, in parte crollata per il cedimento delle suspensure in una fase successiva allo scavo del 1998⁵³⁷, è stata ricollocata nella

⁵²⁹ Paris et al. 2019, p. 31

⁵³⁰ Frontoni, Galli 2015, p. 150

⁵³¹ Paris et al. 2019, pp. 123-124

⁵³² La datazione della pavimentazione risulta ancora dibattuta, Guidobaldi propone una datazione tecnica-stilistica commodiana, mentre Galli e Frontoni la attribuiscono genericamente al II secolo d.C. infine, Angelelli non esclude un collegamento con il rifacimento di età severiana. Per maggiori informazioni si vedano: Guidobaldi 2003, p. 42; Frontoni, Galli 2015, p. 150; Angelelli 2016, p. 96. Inoltre, per ulteriori confronti tipologici si guardino: Grandi 1994; Angelelli 2006; Angelelli 2010.

⁵³³ Cappelletto 2022, pp. 26-29

⁵³⁴ *Ibidem*, p. 30

⁵³⁵ Questa porzione ha un'estensione di circa 4m²

⁵³⁶ Le crustae hanno diagonali di circa 37x19 cm con angoli interni maggiori che si aggirano intorno ai 126° circa e quelli minori di 54°. Le diagonali presentano un rapporto di 1:2 tra quella minore e quella maggiore. I listelli presentano una larghezza media di 2,6 cm. Cappelletto 2022, p. 29

⁵³⁷ L'ambiente A8 pur se individuato nel 1985 dalle indagini condotte dall'Università di Tor Vergata sotto la direzione della Dott.ssa Ricci, fu riportato completamente alla luce solo nel 1998 nelle campagne di scavo dirette da Riccardo Frontoni e Giuliana Galli. Cappelletto 2022, pp. 63-64

posizione originaria tramite l'inserimento di tre pannelli a nido d'ape in alluminio, tranne che per le cinque file di crustae e listelli posti a nord-ovest che furono reinseriti direttamente sugli strati di preparazione originali⁵³⁸. Successivamente la pavimentazione subì negli anni diversi restauri e interventi conservativi⁵³⁹ che ne modificarono in parte le fattezze originarie (Figg. 84-85)⁵⁴⁰.



Figura 83 - Le crustae in marmo greco scritto e i listelli in marmo rosso antico



Figura 84 - L'ambiente A8 con in evidenza la porzione di pavimentazione caso di studio in una fase successiva al cedimento delle suspensure (da Paris et al. 2019).

⁵³⁸ Cappelletto 2022, p. 31 e 47

⁵³⁹ Il primo restauro di cui si hanno informazioni avvenne tra il 2000 e il 2006 prima condotto dal Dott. Bruno Schifano e, dal 2003, dal Dott. Alessandro Lugari, il quale ricollocò la pavimentazione sopra i tre pannelli a nido d'ape di alluminio. Dalla documentazione presente negli archivi della Villa dei Quintili si riportano attività di tipo conservative e manutentive nel 2012, nel 2014 e nel 2015. Lugari 2007 pp. 555-564; Cappelletto 2022, pp. 70-102

⁵⁴⁰ L'ultimo intervento di restauro è stato condotto nel 2022 dalla Dott.ssa Cappelletto nell'ambito della sua tesi di laurea. Cappelletto 2022



Figura 85 - Sistema con cui è stata riposizionata ed ancorata la pavimentazione sui tre pannelli a nido d'ape (da Lugari 2007).

La pavimentazione prima dell'ultimo intervento di restauro, momento in cui è stata documentata per il progetto, evidenziava nella sua totalità una patina di polvere sabbiosa dovuta al contesto all'aperto in cui si trova l'opera⁵⁴¹. Inoltre, si presentava con: diverse lacune; distacchi di alcuni frammenti; frammentazione delle crustae e dei listelli; riaccostamento errato di frammenti provenienti da listelli o crustae diverse; deriva colorimetrica di alcune integrazioni effettuate⁵⁴². L'intervento di restauro virtuale, quindi, è stato eseguito a partire dalla situazione precedente all'ultimo intervento conservativo. La pavimentazione e tutto l'ambiente sono state documentate, a fini fotogrammetrici, con una macchina fotografica Mirrorless Sony Alpha 6000 con ottica zoom 18-55 mm, mantenendo una focale fissa a 35 mm (Fig. 86)⁵⁴³.

Tramite il plug-in DRes, una volta salvate le immagini per la fotogrammetria nella specifica cartella preposta e creato un nuovo progetto su QGIS con sistema di riferimento proiettato WGS84/pseudomercator (EPSG:3856), si è aperto il software fotogrammetrico Agisoft Metashape®. All'interno del programma fotogrammetrico si sono creati due livelli di lavoro o *chunk* differenti, uno per l'elaborazione del modello del frammento pavimentale e l'altro per l'intero ambiente⁵⁴⁴.

⁵⁴¹ La patina era stata già rimossa in parte, nell'angolo sud-est, dal lavoro della Dott.ssa Cappelletto. La ripulitura di tale area ha permesso di riportare in evidenza gli effettivi colori delle crustae e listelli da cui sono stati ricavati i valori colorimetrici per l'intero intervento di restauro virtuale.

⁵⁴² Cappelletto 2022, pp. 103-118

⁵⁴³ In totale sono stati effettuati 310 scatti per la pavimentazione e 491 per l'intero ambiente. Gli scatti sono stati eseguiti in manuale con diaframma abbastanza chiuso, ma non fisso, al fine di disporre di una profondità di campo sufficiente ad ottenere tutti i dettagli; con ISO (*International Standards Organisation*) impostati tra i 100 e i 200, al fine di evitare presenza di grana sulle immagini; e tempi di scatto variabili, ma mai inferiori a 1/30 di secondo per evitare possibili vibrazioni.

⁵⁴⁴ La scelta di suddividere il lavoro in questi due chunk è nata dall'esigenza di avere modelli distinti che, ovviamente a scale leggermente diverse, disponessero della massima qualità, in termini di dettaglio della *mesh* e dimensione dei *pixel* della *texture*, da cui poter produrre infine gli ortomosaici.



Figura 86 - Alcuni degli scatti utilizzati per produrre il rilievo fotogrammetrico tramite Metashape®.

All'interno dei rispettivi *chunks* è stato seguito il medesimo workflow fotogrammetrico disponibile nell'ambiente metashape®. Per prima cosa si è effettuato l'allineamento delle fotografie tramite il pannello “align photos”, impostando come qualità il livello “High”. Lo scopo finale è quello di produrre dalle immagini, tramite il riconoscimento dei punti omologhi e degli elementi geometrici principali, la nuvola di punti sparsa o *sparse cloude*. Dove necessario, per migliorare e rendere più precisi i risultati della nuvola di punti, si è effettuato un processo di mascheramento degli elementi che avrebbero potuto disturbare il riconoscimento dei punti omologhi nelle immagini (Fig. 87)⁵⁴⁵.

Successivamente, a partire dalla nuvola di punti sparsa si è prodotta la nuvola di punti densa. Per arrivare a questo risultato si è utilizzata la finestra di dialogo “Build Dense Cloud”. All'interno di questa nuova schermata si sono settati i parametri dell'accuratezza ad “High” e di “Depth filter”, un filtro che permette di eliminare tutti quei punti che non rientrino in un certo range di distanza⁵⁴⁶,

⁵⁴⁵ L'allineamento ha prodotto 884.928 punti per la pavimentazione e 364.853 punti per l'ambiente A8.

⁵⁴⁶ È legato alla *Depth maps* o mappa di disparità che assegna ad ogni *pixel* dell'immagine un valore di profondità. Il filtro calcola in automatico queste distanze e dove non vi sono abbastanza punti allineati (generalmente 100 punti) non considera quella porzione. Agisoft Metashape User Manual, Standard Edition, Version 1.5, https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.pdf (Ul. Cons. 15/02/24); Corradeghini 2018, *Fotogrammetria con*

“moderato”. Questo filtro risulta utile per rimuovere tutti quegli elementi di disturbo che potrebbero creare aberrazioni morfologiche nella fase successiva di interpolazione (Fig. 88)⁵⁴⁷.

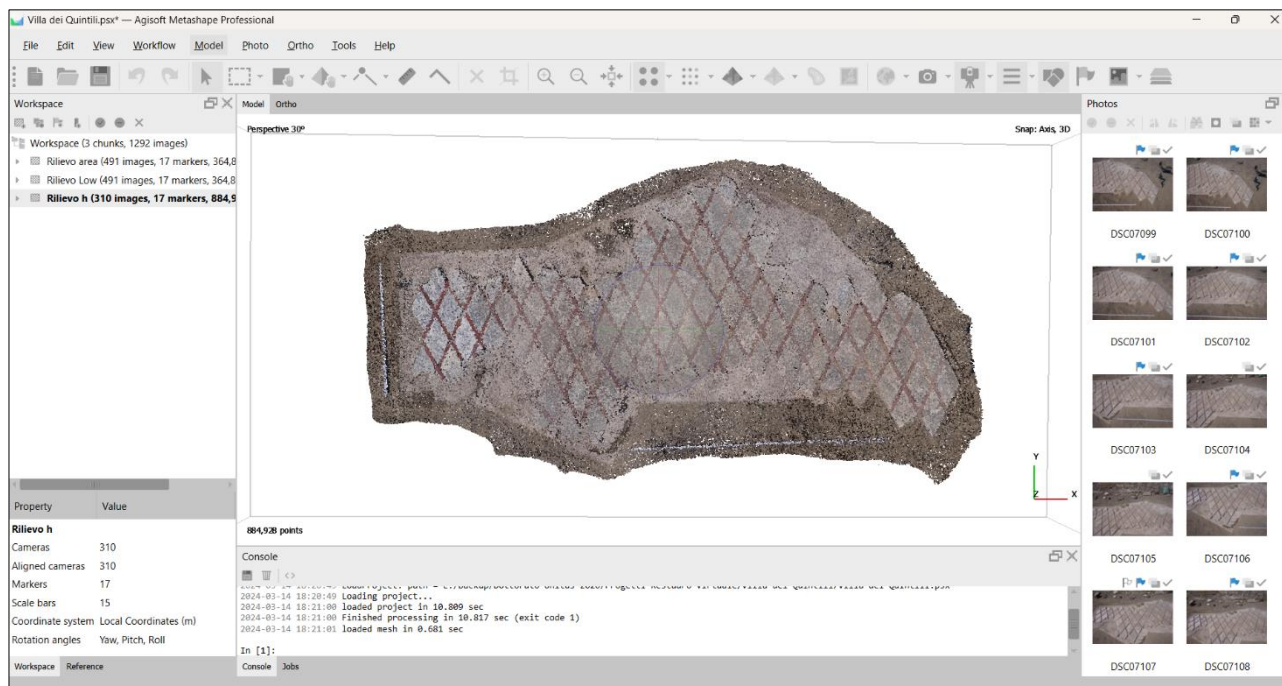


Figura 87 - La nuvola di punti sparsa della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.

Il risultato è stato, poi, raffinato manualmente per rimuovere tutti quei punti non necessari all’elaborazione successiva o che avrebbero potuto produrre dei risultati falsati della superficie. Questo processo è stato portato avanti attraverso lo strumento “lazo”, un *tool* che permette di selezionare liberamente un’area ed eliminarne i punti contenuti all’interno.

Il passaggio successivo è stata la creazione della *mesh*, tramite interpolazione triangolare dei punti a partire dalla *dense cloud*. Le impostazioni presenti nella finestra “mesh” sono state settate a livello “High” ed è stata attivata l’“interpolazione” (Fig. 89)⁵⁴⁸.

Photoscan parte 6 – creazione della nuvola di punti densa, <https://3dmetrica.it/photoscan-creazione-nuvola-densa/> (Ul. Cons. 15/02/24)

⁵⁴⁷ Le nuvole di punti dense sono state di 3.605.287 punti per la pavimentazione e 20.986.641 punti per l’ambiente A8.

⁵⁴⁸ Tramite questo algoritmo il software andrà ad interpolare tutti i punti che, a partire da ogni singolo punto, risultano compresi in un certo raggio, facilitando, così, i processi di unione delle facce e permettendo la chiusura di quelle aree, di modeste dimensioni, in cui i punti della nuvola risultano più radi. Agisoft Metashape User Manual, Professional edition, Version 2.1, https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf (Ul. Cons. 15/02/24)

Ne è risultata una mesh con 721.056 facce e 361.605 vertici per la pavimentazione e 3.776.212 facce e 1.893.702 vertici per l’ambiente A8.

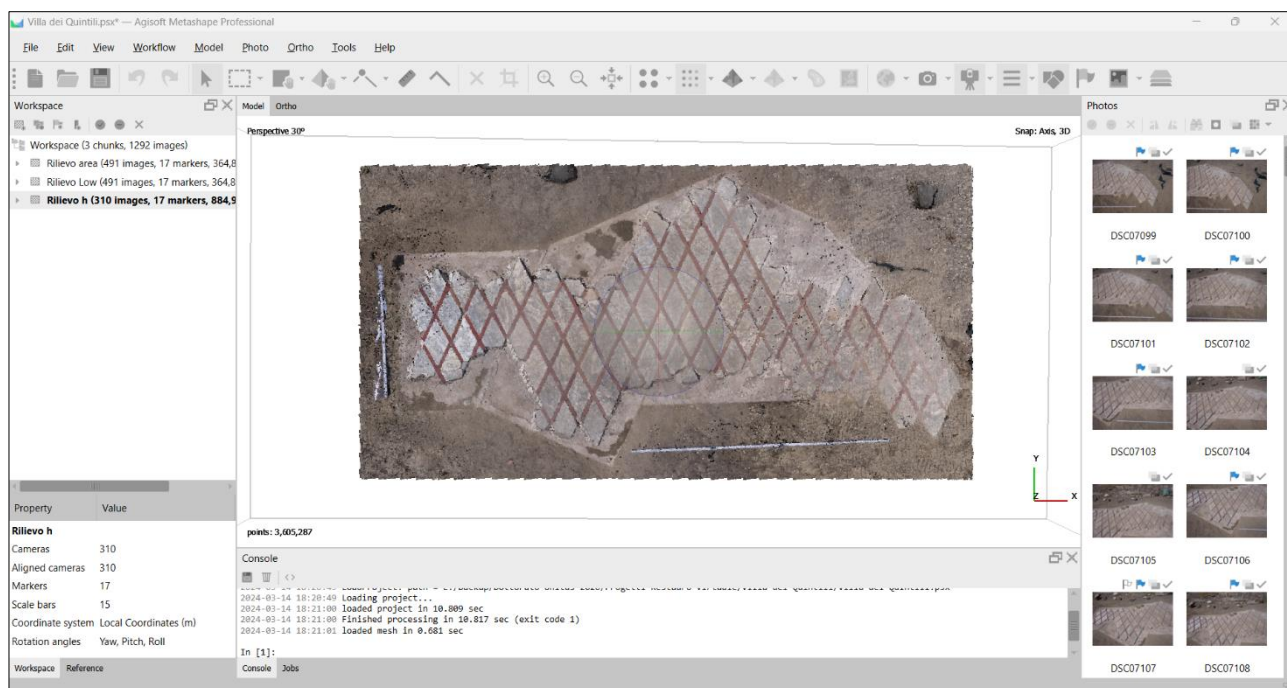


Figura 88 - La nuvola di punti densa della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.

Sulla *mesh* è stata, quindi, applicata la *texture* a qualità 8k (8192x8192 *pixel*) attraverso la creazione automatica della mappa UV e la mosaicatura delle varie immagini per ogni parte del modello (Fig. 90).

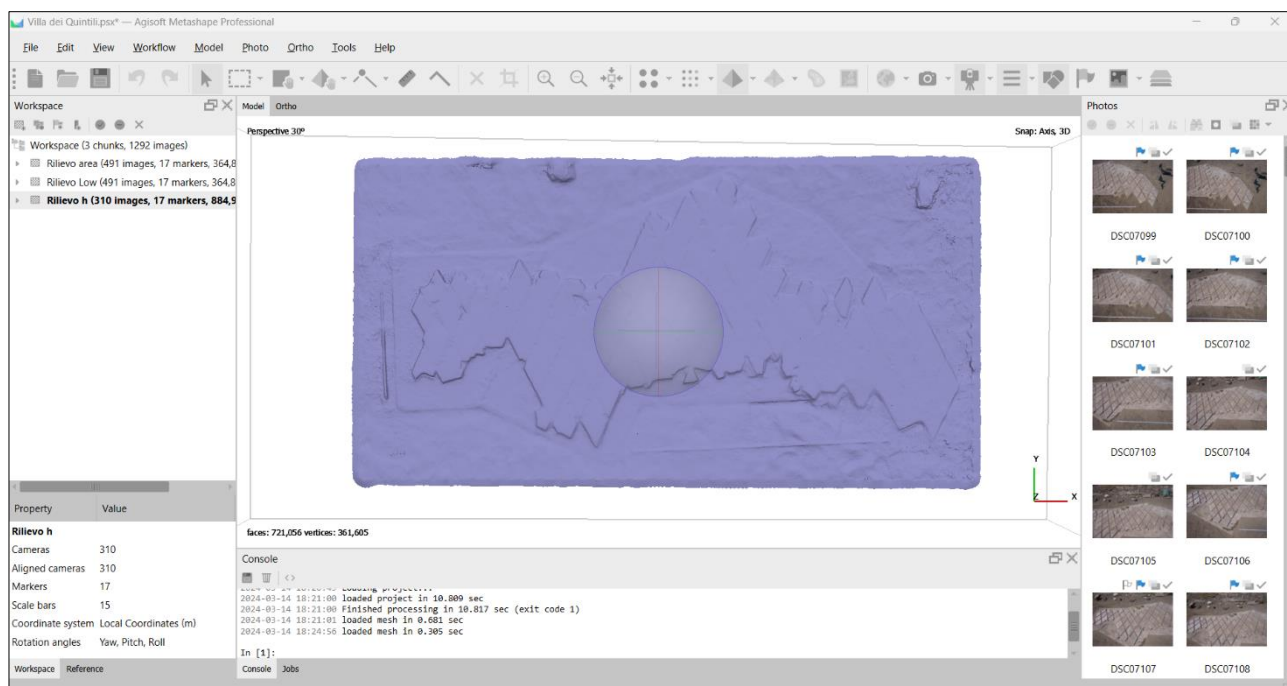


Figura 89 - La *mesh* della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.

Infine, le misure prese in loco sono state utilizzate per riportare in scala la pavimentazione e l'ambiente A8⁵⁴⁹.

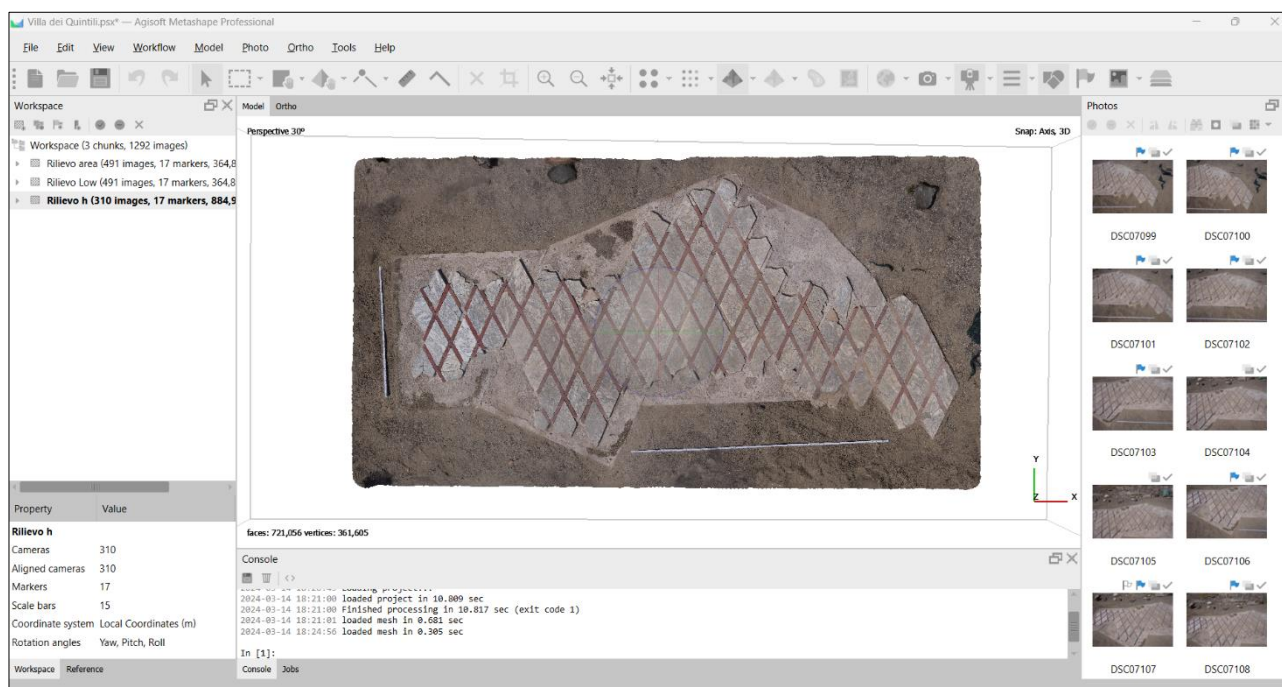


Figura 90 – Il modello texturizzato della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotto tramite metashape®.

Una volta prodotti questi modelli 3D in scala da essi si sono potuti produrre, tramite la finestra di dialogo “Build Orthomosac” gli ortomosaici bidimensionali che sono stati esportati e salvati, in formato TIFF, nella cartella prescelta per il plug-in (Fig. 91)⁵⁵⁰. Successivamente tramite l'apposito pulsante sono state importate all'interno del progetto GIS (Fig. 92).

A questo punto, disponendo nell'ambiente QGIS degli ortomosaici finali in scala 1:1 relativi alla pavimentazione e all'ambiente A8, si poteva passare finalmente, dopo uno studio accurato della documentazione scientifica attinente e la creazione delle mappature specifiche, effettuare

⁵⁴⁹ Sono stati utilizzati come riferimenti metrici due metri a stecca: uno di due metri, messo perpendicolare al pavimento e l'altro di un metro posizionato verticalmente. Inoltre, si sono prese delle misure di controllo e verifica su alcune crustae e listelli della pavimentazione per verificarne l'eventuale errore. Dai dati del rilievo e dal confronto con queste misure di controllo si è riscontrato un errore, sub centimetrico, di 0,001 cm per la pavimentazione e di 0,003 cm per l'intero ambiente A8.

⁵⁵⁰ L'ortomosaico della porzione di pavimentazione presenta una risoluzione di 20246x10690 pixel, con la dimensione del pixel equivalente a 0.0002 m, e quella dell'ambiente A8 una risoluzione di 48682x19177, con la dimensione del pixel di 0.0003 m.

l'elaborazione di restauro virtuale tramite il software GIMP®. Per questo si è aperto il programma tramite l'apposito pulsante e, nella schermata di nuovo progetto così creata, importato l'ortomosaico.



Figura 91 - L'ortomosaico che riproduce in scala 1:1 la porzione di pavimentazione dell'ambiente A8.

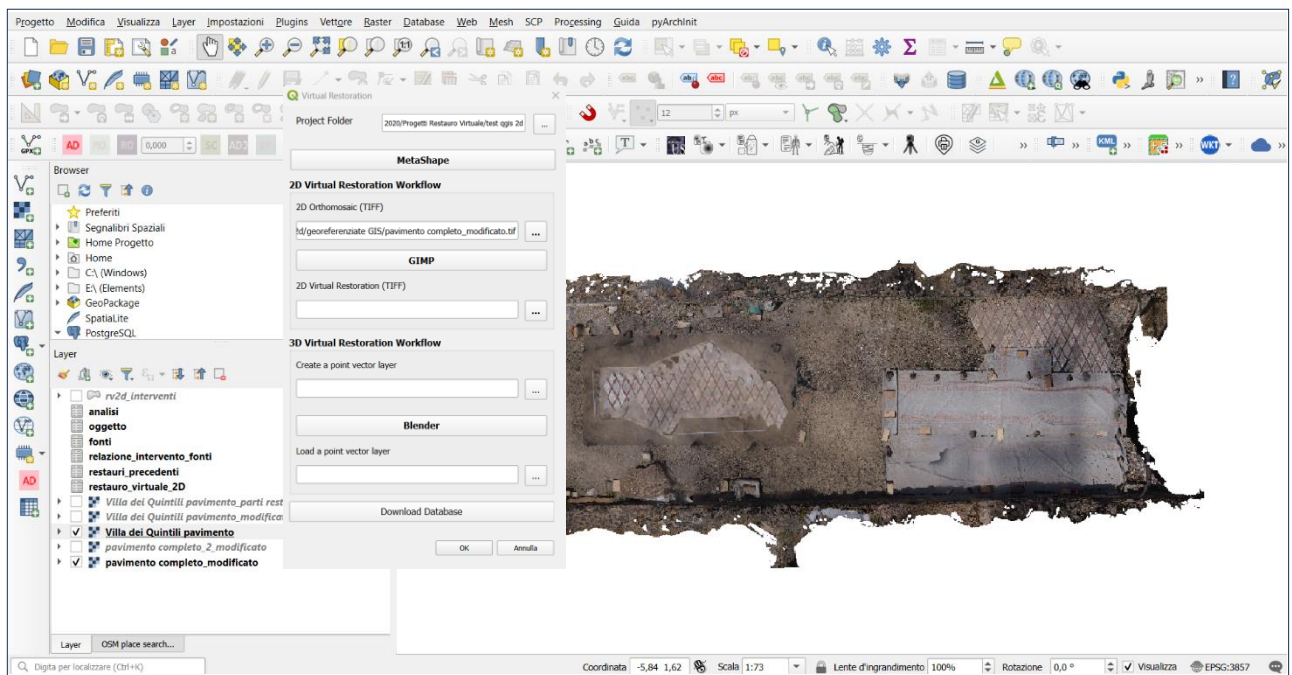


Figura 92 - Gli ortomosaici importati all'interno del progetto di QGIS® tramite la specifica casella del plug-in.

All'interno del programma di fotoritocco il primo passaggio effettuato è stato quello di lavorare, tramite gli specifici strumenti di regolazione, sui valori di esposizione, contrasto e colore per giungere ad una cromia e un'esposizione corrette (Fig. 93)⁵⁵¹.

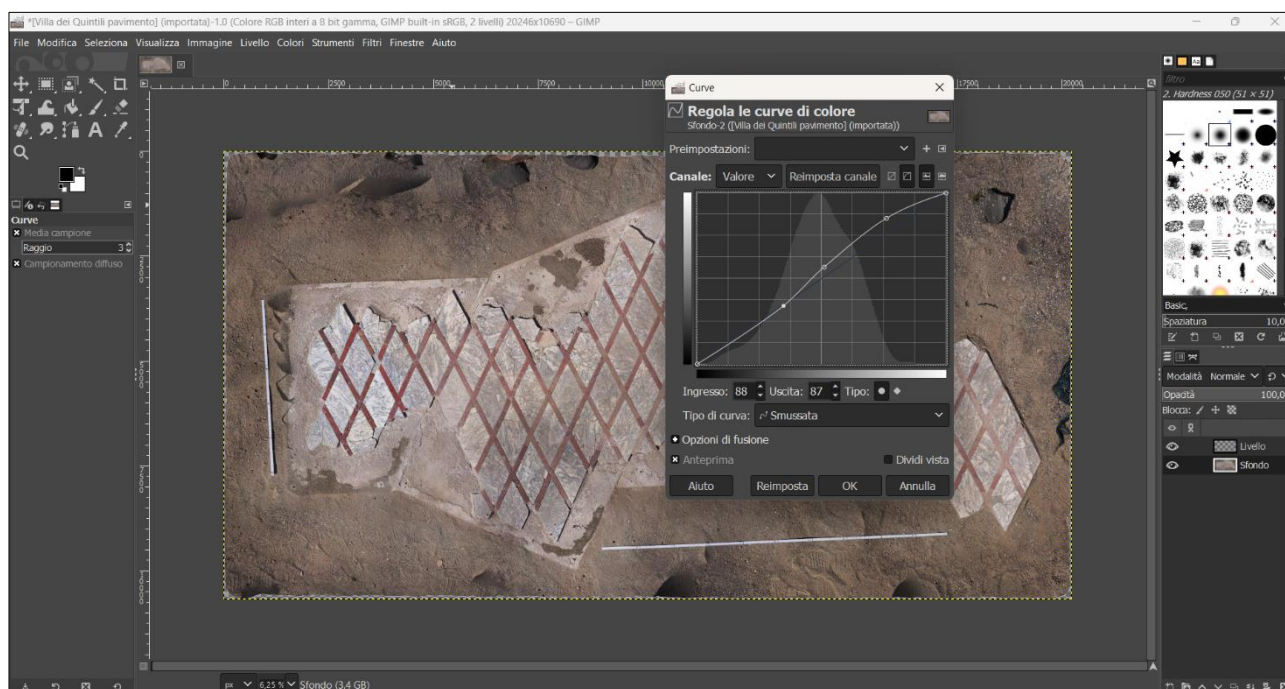


Figura 93 - Regolazione della gamma tonale dell'ortomosaico tramite lo strumento Curve su GIMP®.

Effettuate queste elaborazioni si è passati a creare tre nuovi *layer*: il primo associato con le attività di restauro virtuale delle fratture e delle lacune minori; il secondo per effettuare le reintegrazioni di lacune più estese tramite la copia di elementi simili; infine, l'ultimo legato con i processi di ricostruzione di tutta la pavimentazione.

L'elaborazione è stata eseguita tramite l'uso dei *tools* "clona", nelle aree dove l'integrazione richiedeva maggior intervento, e "cerotto"⁵⁵². L'intervento, quindi, è stato eseguito con l'intento di rimuovere le lacune e le fratture sia delle crustae che dei listelli, per favorire uniformità alla pavimentazione (Fig 94).

⁵⁵¹ A tale scopo durante le riprese è stato impiegato un color Checker, SpyderCheckr a 24 patch. Le curve di livello e i dati colorimetrici sono stati settati sulla parte di pavimentazione, quella a sud-est, già ripulita durante la fase di ripresa. L'intervento di ripulitura come già anticipato era stato eseguito dalla Dott.ssa Cappelletto, ed è stato utile per permettere di riconoscere la corretta colorimetria per l'intervento di restauro virtuale.

⁵⁵² Questi due strumenti permettono di copiare i dati colorimetrici dei *pixel* ed incollarli nell'area che viene definita dall'utente, ma mentre lo strumento "cerotto" considera anche i parametri di esposizione e colore dei pixel esterni alla zona da integrare, lo strumento "clona" non considera invece questi elementi. Ne risulta che per le aree di modeste dimensioni lo strumento "cerotto" è più efficace mentre per zone troppo estese potrebbe creare degli errori colorimetrici dovuti alla differenza di parametri tra pixel distanti, per cui risulta migliore l'utilizzo dello strumento "clona". GIMP 2.10 manuale, *Cerotto*, <https://docs.gimp.org/2.10/it/gimp-tool-heal.html> (Ul. Cons. 13/03/24)

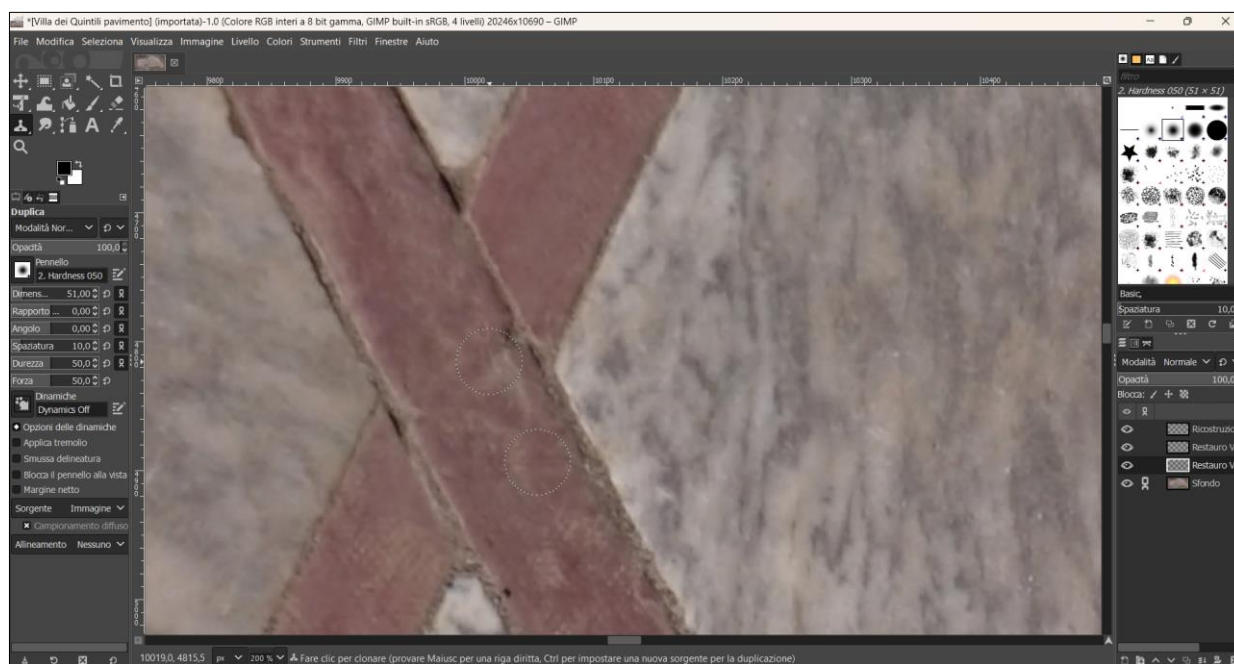


Figura 94 - Intervento di rimozione della frattura di un listello tramite lo strumento “clona” di GIMP®.

Nei casi più estesi si è deciso di utilizzare, per copiare e incollare interi elementi, lo strumento “selezione” e “copia”. Questa soluzione è stata impiegata anche nelle situazioni in cui vi erano interventi di restauro precedente che presentavano ormai alterazioni cromatiche o elementi che erano stati posizionati erroneamente. In un caso si è notato, infatti, che una crusta era stata posta in posizione non corretta rispetto all’allineamento del relativo listello, per questo si è deciso di rimuoverla e spostarla nella corretta posizione (Fig. 95).



Figura 95 – Il risultato finale delle elaborazioni di restauro virtuale prodotte tramite GIMP®.

Infine, completati questi processi si è, con l'ultimo livello creato, caricato l'ortomosaico dell'intero ambiente nello stesso progetto e lo si è utilizzato per definire i limiti della ricostruzione della pavimentazione. Il processo di ricostruzione è stato eseguito a partire dalle porzioni di pavimentazioni ancora presenti da cui si sono ricavate delle linee guida che riproducevano le intere diagonali a partire dalle crustae e dai listelli. Successivamente è stato copiato un modulo standard dalla pavimentazione restaurata e, seguendo le guide, lo si è copiato più volte a formare l'intera pavimentazione (Fig. 96)⁵⁵³.

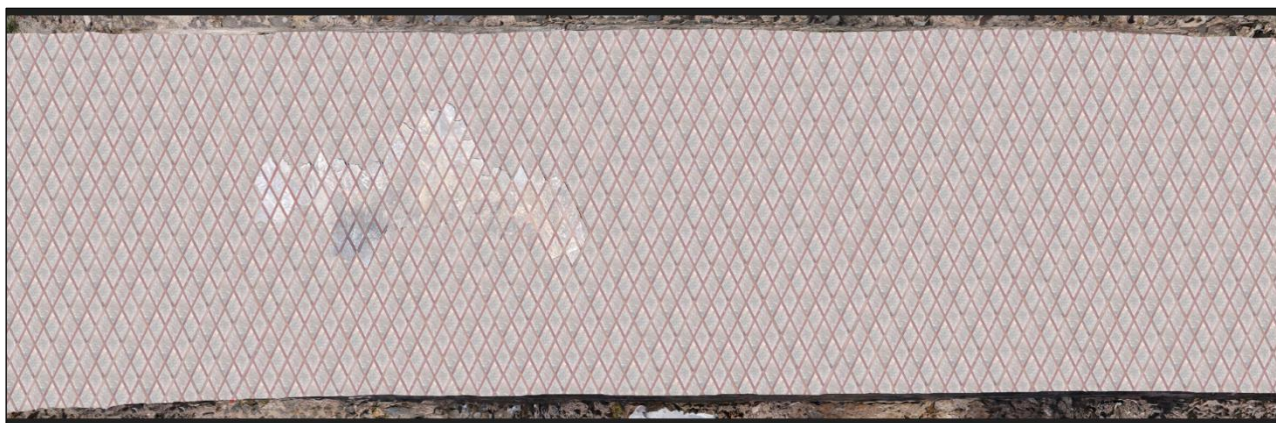


Figura 96 – Restauro e ricostruzione virtuale della pavimentazione dell'ambiente A8 con in evidenza il lacerto minore di opus sectile originario.

Successivamente completati i lavori di restauro virtuale sul software GIMP i due risultati sono stati esportati, sempre in formato TIFF, nella cartella del plug-in per poi essere importati all'interno del progetto GIS tramite l'interfaccia di DRes.

Importati quindi questi elementi sono stati associati con la documentazione contenuta all'interno del database, che è stato scaricato tramite la piattaforma all'interno della cartella del progetto. Tramite pgAdmin® 4, è stato creato, all'interno del server locale, un nuovo database chiamato "virtual_restoration_db". Attraverso il pannello *Query tool* è stato caricato il file .sql denominato "database_restauo_virtuale", che contiene lo script per poter produrre tutte le tabelle e la struttura della banca dati per la documentazione di restauro virtuale, ed è stato avviato il processo di creazione. Infine, una volta prodotto, il database è stato collegato tramite la creazione di una nuova connessione PostgreSQL, attraverso l'interfaccia Browser di QGIS® (Figg. 97-98).

⁵⁵³ A questo punto dell'intervento si è notato che c'era un certo grado di errore tra la pavimentazione ancora in situ e quella riposizionata sui pannelli, un dato che non è stato modificato nel restauro virtuale ma, invece, è stato corretto, seguendo le linee della lacerto maggiore ancora in situ, nella ricostruzione finale dell'opus sectile allo scopo di dare uniformità.

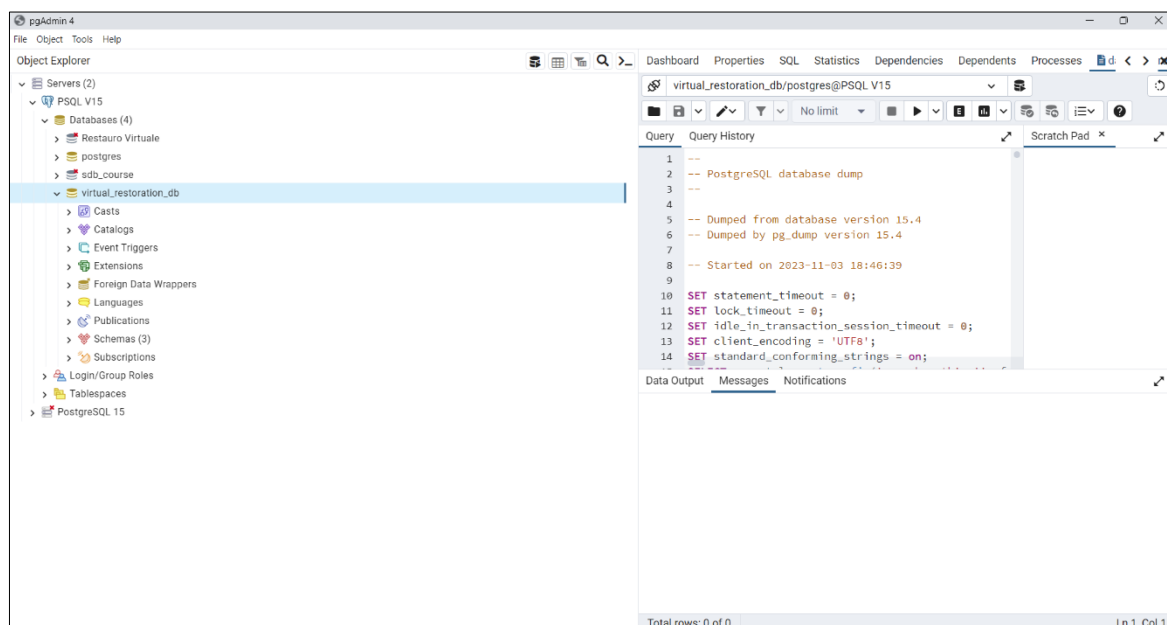


Figura 97 - pgAdmin 4 creazione del database virtual_restoration_db tramite il file SQL che contiene il codice.

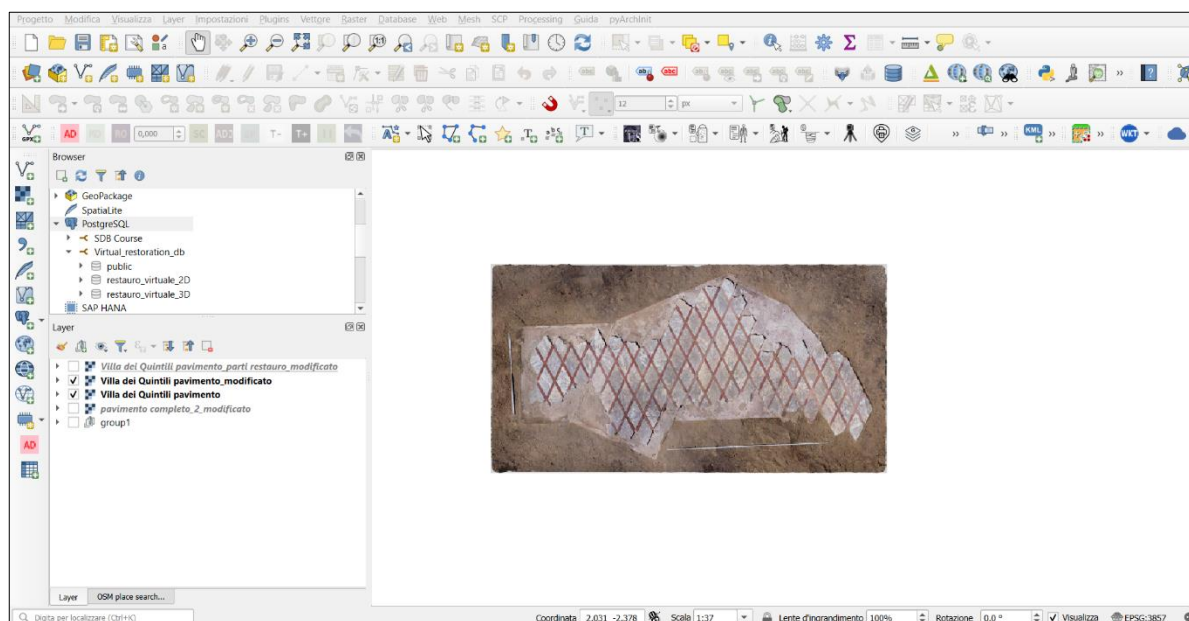


Figura 98 - Connessione del database Virtual_restoration_db tramite il Browser panel di QGIS.

Per prima cosa si è compilata la scheda “oggetto” con le varie informazioni generali relative alla pavimentazione. Successivamente si sono create, tramite la tabella “restauro_virtuale_2D”, due schede di restauro virtuale: una per indicare gli interventi di restauro virtuale, denominata appunto “restauro virtuale” e l’altra, definita “restauro virtuale ricostruttivo”, per indicare gli interventi che hanno riguardato una integrazione maggiormente ricostruttiva. Infine, si sono potute riempire le schede relative alle fonti utilizzate, agli interventi di restauro precedenti e alle analisi.

Tramite il layer poligonale “rv2D_interventi” si è prodotta la mappature specifiche di ogni intervento di restauro virtuale, mantenendo come elemento di base gli ortomosaici. Queste sono state associate rispettivamente alla scheda di “restauro virtuale” o a quella di “restauro virtuale ricostruttivo” in base al loro ambito di appartenenza.

Il risultato finale raggiunto è stato quello di disporre di tutta la documentazione relativa all’intervento di restauro virtuale all’interno del database relazionale. Tutta questa mole di dati può essere, così, interrogata sia direttamente a partire dalle schede del database sia tramite un clic su uno o più poligoni della mappatura. Inoltre, le relazioni presenti permettono di correlare la mappa al database, infatti, ogni interrogazione che avviene nel database avrà dei riscontri visivi sulla mappa e viceversa. Questo rapporto duale tra la parte grafica e le informazioni alfa numeriche dà l’accesso alla creazione di mappe tematiche in base ai criteri specifici richiesti dall’utente, favorendo un dialogo che permetta la valutazione scientifica dell’intervento stesso, nonché la possibilità di aprire l’intervento, là dove richiesto, ad integrazioni, confronti e aggiornamenti futuri delle elaborazioni (Figg. 99-100-101).

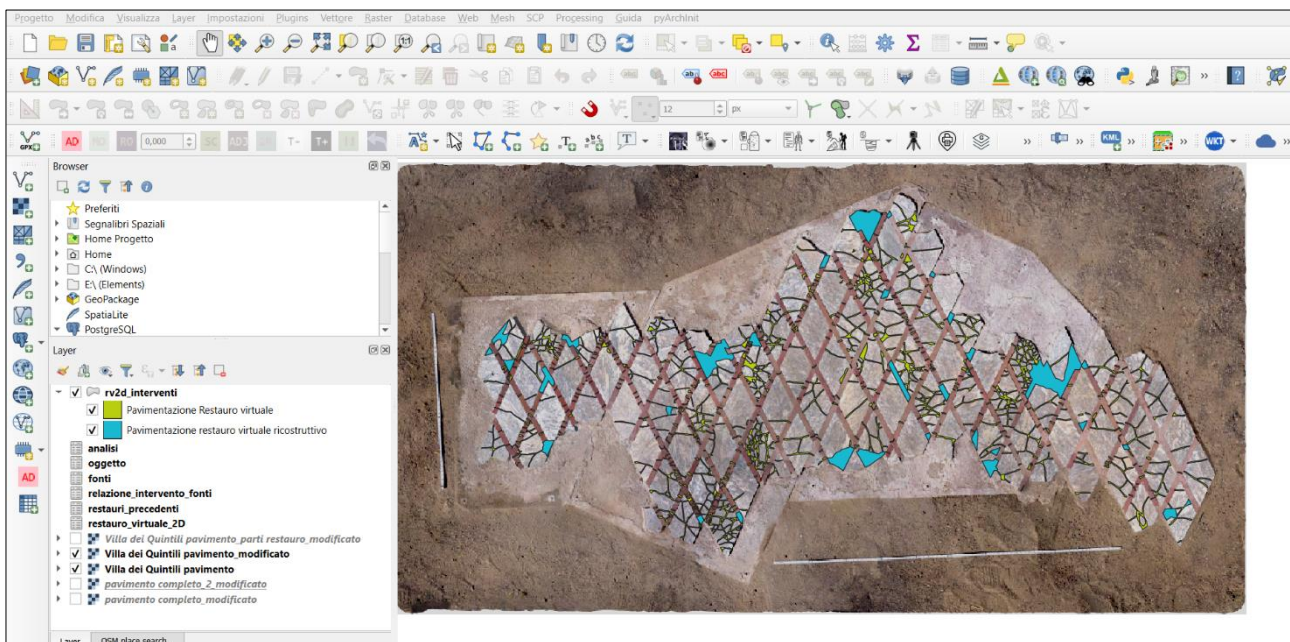


Figura 99 – Mappatura, tramite il livello “rv2d_Interventi” all’interno del progetto GIS, di tutti gli interventi di restauro virtuale eseguiti.

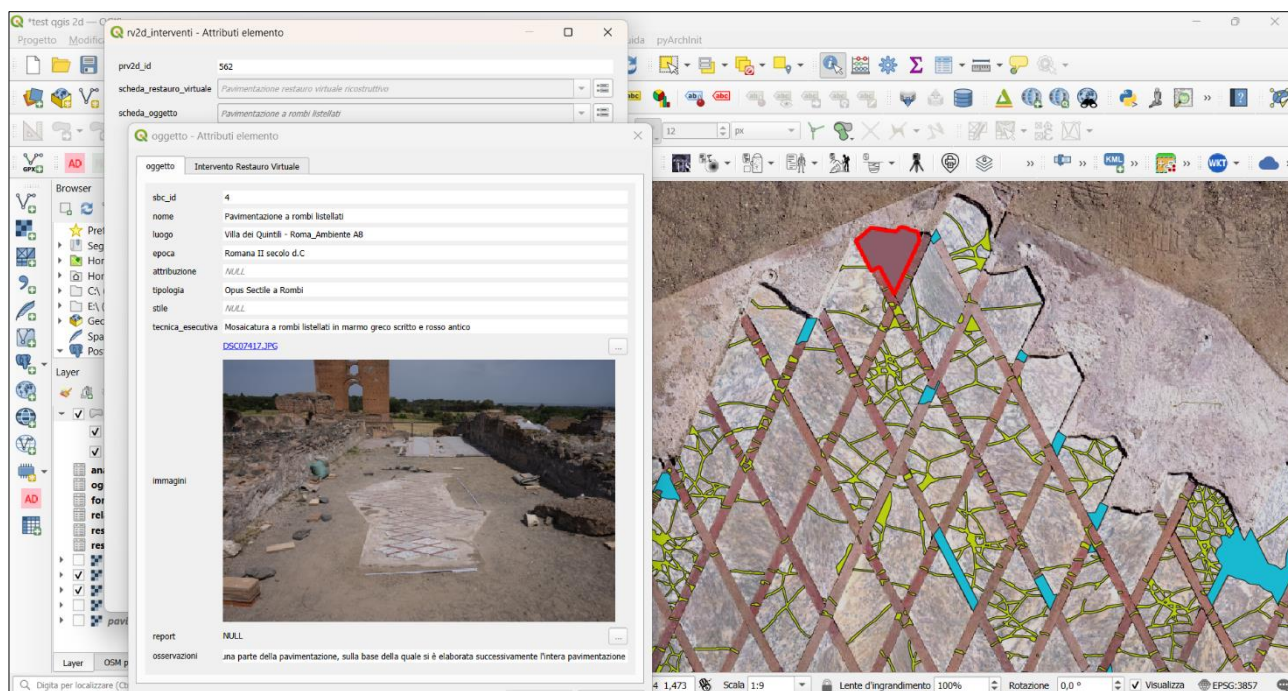


Figura 100 - La scheda “oggetto” può essere aperta ed interrogata tramite un clic su uno o più poligoni della mappatura, grazie alla relazione 1:N tra la scheda “oggetto” e quella di “rv2d_intervento”.

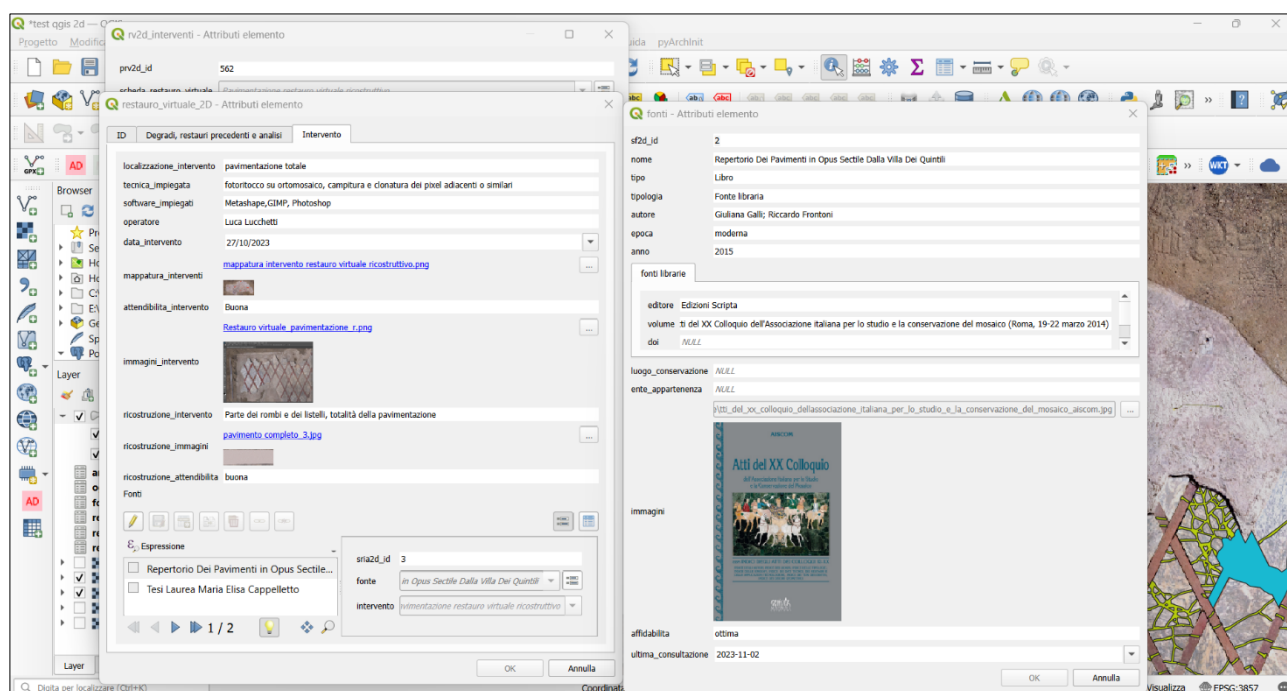


Figura 101 - La scheda “restauri precedenti e analisi”, aperta tramite clic su uno dei poligoni, permette di accedere grazie alle relazioni 1:N e N:N alle altre tabelle relative alle analisi, ai restauri precedenti e alle fonti utilizzate per effettuare l’intervento stesso.

6.2 Processi di restauro virtuale tridimensionale: Il corredo della Tomba 643 dalla necropoli di Monte Abatone

Lo sviluppo e test dei processi di restauro virtuale tridimensionale della piattaforma sono stati condotti sul corredo della Tomba 643 dalla necropoli etrusca di Monte Abatone a Cerveteri (RM).

La necropoli etrusca di Monte Abatone, collocata a Sud del pianoro relativo all'antica Cerveteri, è una delle maggiori e più importanti aree di sepoltura della città, con un range cronologico che va dall'VIII secolo a.C. fino al I secolo a.C. La necropoli presenta al suo interno varie e differenti tipologie sepolcrali, da quelle a pozzetto fino a quelle a dado, tutte prodotte tramite la rimozione del materiale tufaceo. Monte Abatone, però, si caratterizza principalmente per la forte prevalenza di sepolture a tumulo, tra le quali le maggiormente note e famose risultano essere il Tumulo Campana, riconducibile al periodo medio-orientalizzante e il Tumulo Torlonia, databile ad epoca proto-ellenistica (Fig. 102)⁵⁵⁴.



Figura 102 – Le necropoli di Cerveteri, a destra l'intera area della necropoli di Monte Abatone (da Beck *et al.* 2021)

La necropoli è stata luogo di grandi attività di scavo, sia lecite che illecite, a partire dall'800, ma la maggior parte delle tombe, precisamente 641, sono state individuate e indagate, tra il 1950 e i primi anni del 1960, dalla Fondazione Lerici. Successivamente, dopo un lungo periodo di inattività sul pianoro, se non per alcuni casi sporadici e spesso illeciti, dal 2018 si sono avviate nuove campagne

⁵⁵⁴ Gillotta *et al.* 2022, p. 135

di scavo da parte dell'Università della Tuscia, in collaborazione con l'Università della Campania L. Vanvitelli, l'Università di Urbino e l'Università di Bonn⁵⁵⁵. Queste attività hanno portato all'individuazione di nuove tombe, principalmente a tumulo con camera centrale, riconducibili ad un arco cronologico che si pone tra il VII e il VI secolo a.C. e alla comprensione del contesto topografico intorno al tumulo Campana (Fig. 103)⁵⁵⁶.

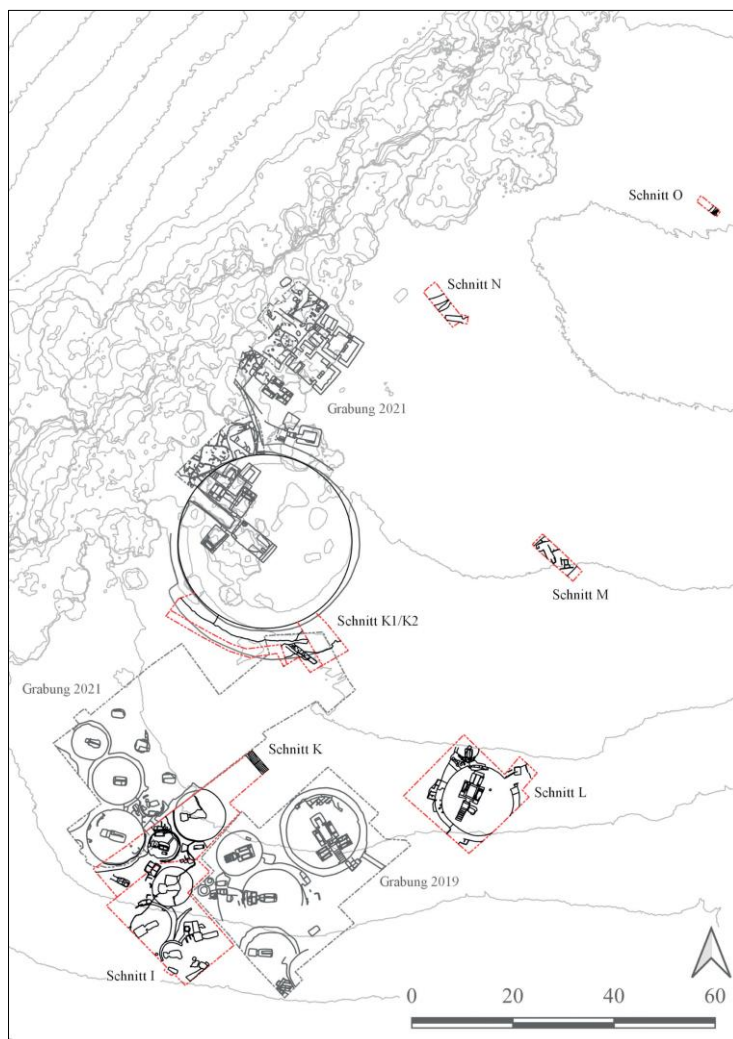


Figura 103 - Area di indagine delle campagne condotte tra il 2018 e il 2022 (da Becker et al. 2023)

La tomba 643 fu individuata nel settore denominato “C” durante la campagna di scavo 2019. Si tratta di una piccola fossa, ricavata al di sopra del tumulo della tomba 73, di 90x40 cm per soli 12 cm di profondità⁵⁵⁷. La sepoltura presenta, verso l'estremità orientale, un piccolo gradino (dimensioni

⁵⁵⁵ Lo scrivente ha partecipato alle campagne di scavo che si sono tenute tra il 2019 e il 2022 con il compito di gestire la documentazione grafica e tridimensionale e il GIS di scavo. Per maggiori informazioni si guardino: Gilotta *et al.* 2022; Micozzi 2021; Beck *et al.* 2021; Beck *et al.* 2023; Becker *et al.* 2023.

⁵⁵⁶ Gilotta *et al.*, pp. 135-138

⁵⁵⁷ Questa quasi rasatura della sepoltura è il risultato dei continui interventi di aratura che hanno quasi del tutto fatto scomparire la maggior parte dei tumuli individuati.

19x40x6,3 cm), molto presumibilmente un cuscino o una banchina per disporre il corredo. Le dimensioni modeste della tomba sono state il principale indicatore della probabile ipotesi di sepoltura di un infante, presumibilmente tra i 2 e i 3 anni⁵⁵⁸. Purtroppo, la stratigrafia della metà settentrionale della piccola fossa si presentava completamente disturbata dalle arature mentre, nella parte meridionale, fortunatamente erano ancora conservati parte dello strato ed alcuni elementi del corredo (Fig. 104)⁵⁵⁹.

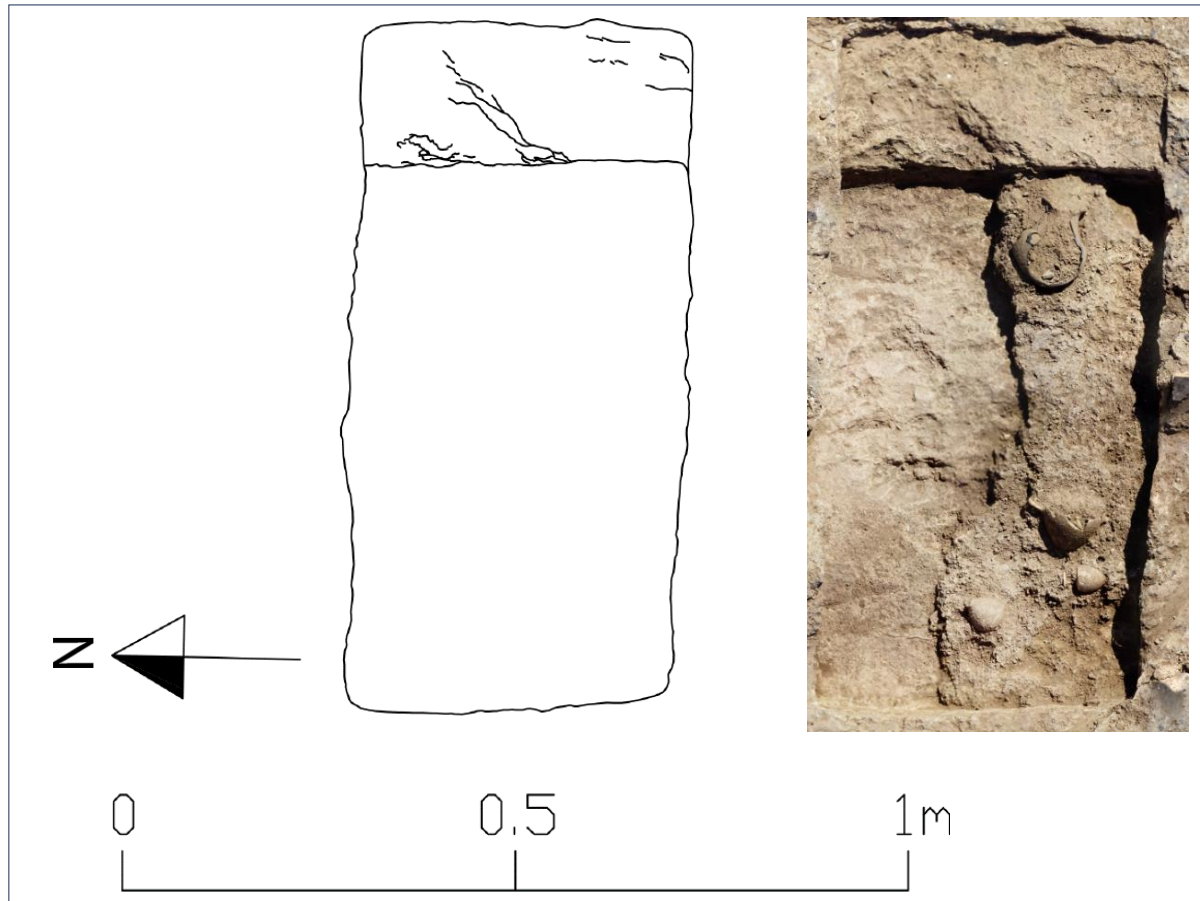


Figura 104 - Rilievo e ortomosaico fotogrammetrico della Tomba 643, nell'immagine di destra il corredo com'è stato individuato durante la campagna di scavo 2019 (da Micozzi 2021)

Vicino al cuscino, nella parte orientale della tomba, era posta un'anforetta di bucchero (alta 11 cm, diametro bocca 5,5 cm), tipo Rasmussen 1b⁵⁶⁰, decorata con ornato a doppie spirali con sotto quattro linee orizzontali a rotella e da incisioni a W alla fine delle anse. L'anforetta, databile a poco

⁵⁵⁸ Micozzi 2021, p. 396

⁵⁵⁹ Questo materiale si presentava quasi del tutto intatto o ricostruibile, tranne che per alcuni frammenti di impasto rosso. Micozzi 2021, pp. 397-399

⁵⁶⁰ Rasmussen 1979, p.70

dopo la metà del VII sec. a.C.⁵⁶¹, è stata ricomposta ed integrata, ma è mancante di una delle anse e di parte del ventre e del labbro superiore (Fig. 105).

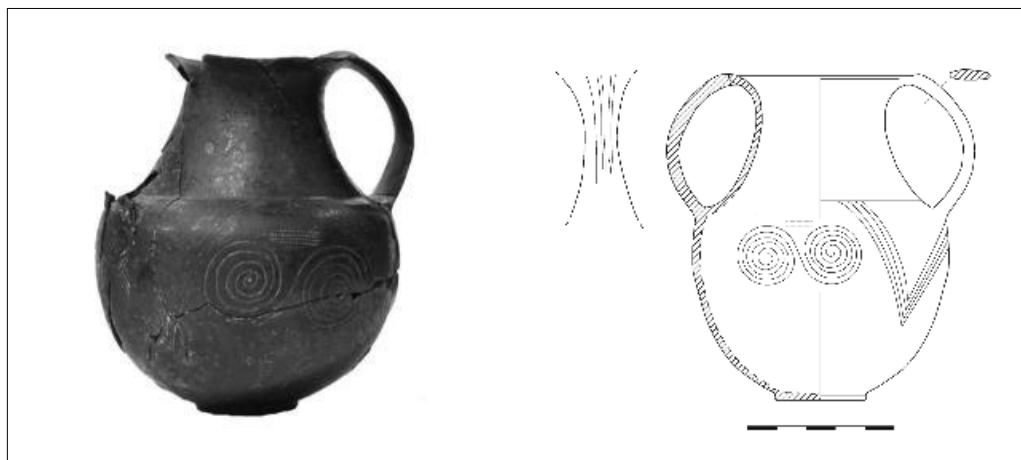


Figura 105 - Anforetta in bucchero proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021)

Al di sotto dell'anfora è stata rinvenuta una fibula miniaturistica di bronzo (0,8x1,2 cm, senza molla e ardiglione) del tipo a sanguisuga⁵⁶², questo dato è risultato importante per attribuire probabilmente l'infante al sesso femminile.

La maggior parte del corredo però è stato individuato nella parte meridionale della sepoltura. Una kotyle protocorinzia (altezza 6,1 cm, diametro della bocca e del piede rispettivamente 7,8 e 3,8 cm; Fig. 106) decorata sul piede con cuspidi radiali, mentre sul corpo presenta delle linee orizzontali e sul pannello, in mezzo a linee verticali del tutto svanite, una decorazione a sigma.

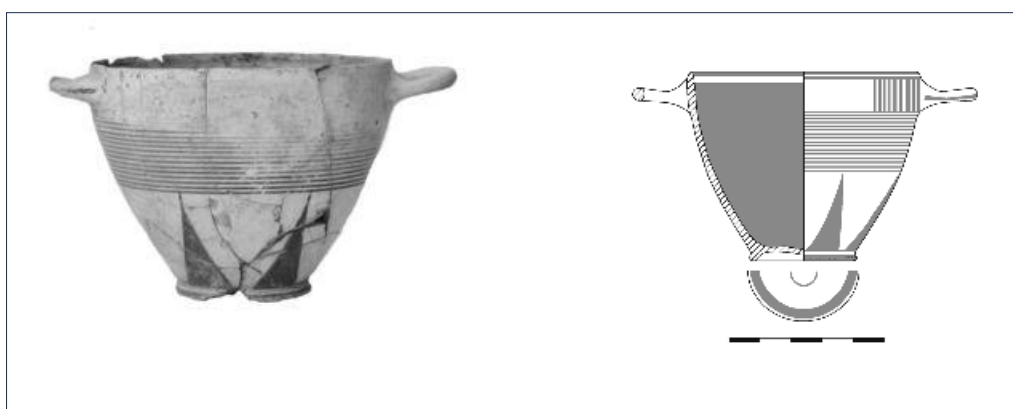


Figura 106 - Kotyle protocorinzia proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021).

⁵⁶¹ Questa Anforetta può trovare confronti in Hirschland Ramage 1970, p.21, fig. 16.3; Olivotto 1994, p. 35 fig. 39a-b; AAVV. 1980, p. 222, n.28;

⁵⁶² Questa fibula trova un confronto in Tabolli 2013, p.214, tipo 85c6, fig. 4.47

Presenta, inoltre, l'interno dipinto di bruno. La kotyle, databile di poco successiva alla metà del VII secolo a.C.⁵⁶³, è stata ricomposta ed integrata, ma è mancante di un'ansa e di parte del labbro e del piede.

Vicino alla kotyle sono stati individuati due aryballoi. Il primo protocorinzio (altezza 6,3 cm mentre il diametro del bocchello è di 2,6 cm) con forma ovoide, presenta un'ansa a nastro e un peduccio sagomato ed è “decorato da raggi sul piano del bocchello e raggi alternati a motivi a sigma sulla spalla. Sul corpo, delimitati da gruppi di linee orizzontali, si susseguono, dall'alto: un fregio figurato con tre cani correnti e, proprio sotto l'ansa, una figura umana in movimento verso sinistra, nell'atto di scagliare una lancia (?) attualmente non leggibile. Di fronte, una lepre in corsa, verso cui si dirige un'aquila in picchiata. Seguono un fregio di rosette a punti e, intorno al piede, raggi. Tre linee verticali sull'ansa.” (Micozzi 2021, p. 397). Questo aryballos è databile tra il 660 e il 640 a.C.⁵⁶⁴, si presenta quasi integro se non per una piccola mancanza nel bocchello vicino all'attacco con l'ansa (Fig. 107).

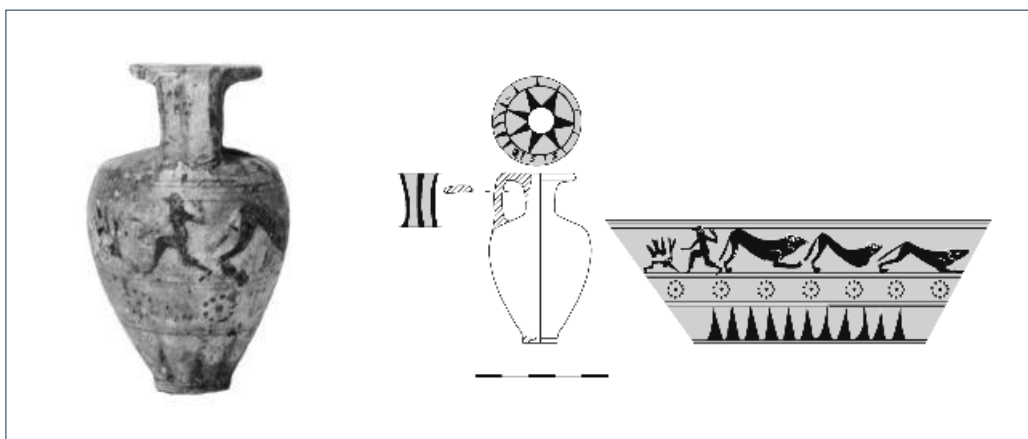


Figura 107 - Aryballos protocorinzio proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021)

Mentre, il secondo aryballos (Fig. 108) risulta probabilmente di produzione etrusca ad imitazione protocorinzia⁵⁶⁵ (Altezza 6,2 cm e diametro del bocchello 2,2 cm), ed è “decorato da cerchi concentrici sul bocchello, filettature orizzontali sulla spalla e fino al punto di massima espansione, due fascette orizzontali nella metà inferiore e intorno al piede, fascette orizzontali sull'ansa.” (Micozzi 2021, p.397).

⁵⁶³ Confronti diretti possono essere trovati in Rizzo 2016, pp.29, 89-94, I.62-I.76 e in Brokaw 1964, p. 54 che ci fornisce anche la datazione.

⁵⁶⁴ L'aryballos presenta similarità e confronti con aryballoi documentati da Neeft 1987, pp. 170-172 e p. 160, figg. 69-70.

⁵⁶⁵ Per la tipologia si possono individuare dei confronti in Neri 2010, pp. 25, 27, tipo 2a, tav 1,2 e in Benedettini, Cosentino 2017, p. 15, fig. 13.

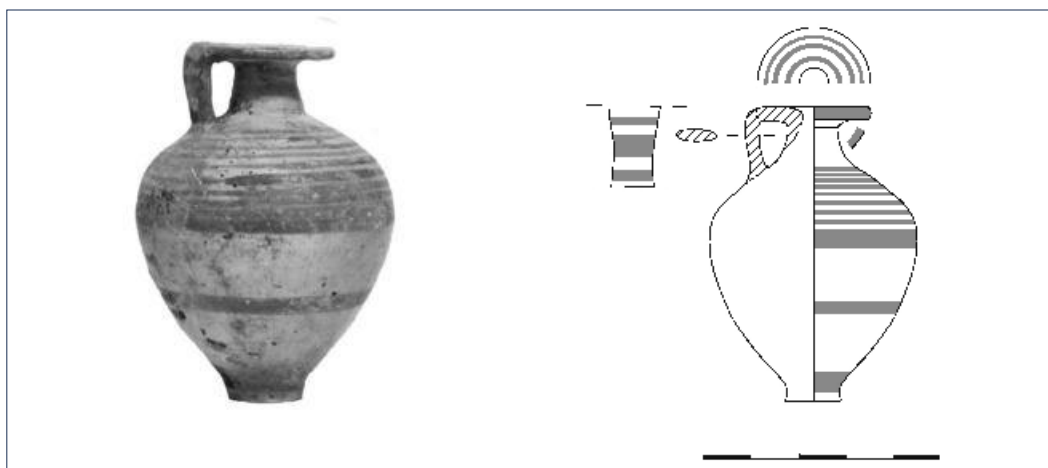


Figura 108 - Aryballos di imitazione protocorinzia proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021).

Tutti questi materiali permettono di datare verosimilmente la tomba tra il 650 e il 640 a.C., mentre la posizione in cui è stata ricavata la sepoltura ci permette, quasi sicuramente, di delineare una sua appartenenza o connessione allo stesso gruppo sociale della tomba 73, la quale è databile tra il II quarto e la metà del VII secolo a.C.⁵⁶⁶ Questa differenza cronologica ci consente, inoltre, di ipotizzare che la tomba 73 doveva essere ancora in uso quando fu scavata la tomba 643 al di sopra del suo tumulo⁵⁶⁷, mentre, la deposizione al di fuori della camera può essere ricollegata forse con una scelta deliberata associabile all'età infantile del defunto (Fig. 109)⁵⁶⁸.

Lo studio del contesto e della bibliografia di confronto di questi materiali ci ha permesso di decifrare e comprendere meglio quali sarebbero state le successive elaborazione di restauro virtuale da produrre e, al contempo, hanno giustificato la successiva decisione di effettuare un intervento virtuale ricostruttivo di ricollocazione dei materiali restaurati nella struttura della tomba.

⁵⁶⁶ La tomba 73 purtroppo è stata più volte saccheggiata dai clandestini, mentre, lo scavo Lerici di tale tomba non ha mostrato la presenza di elementi del corredo. Lo scavo del 2019 però ha individuato molto materiale residuale che, ancora in fase di studio, ha permesso di datare, insieme alla tipologia tombale ascrivibile alla b2 di Prayon, la tomba. Prayon 1975, pp. 17-20; Micozzi 2021, pp. 400-401

⁵⁶⁷ Inoltre, la presenza in entrambi i corredi di materiale di importazione corinzia rafforzano tale ipotesi. Micozzi 2021, p. 401

⁵⁶⁸ Micozzi 2021, p. 401; La tomba 643 con tali dati cronologici risulta, ad oggi, il più antico esempio di sepoltura infantile relazionata con un tumulo orientalizzante. Micozzi 2021, p. 412

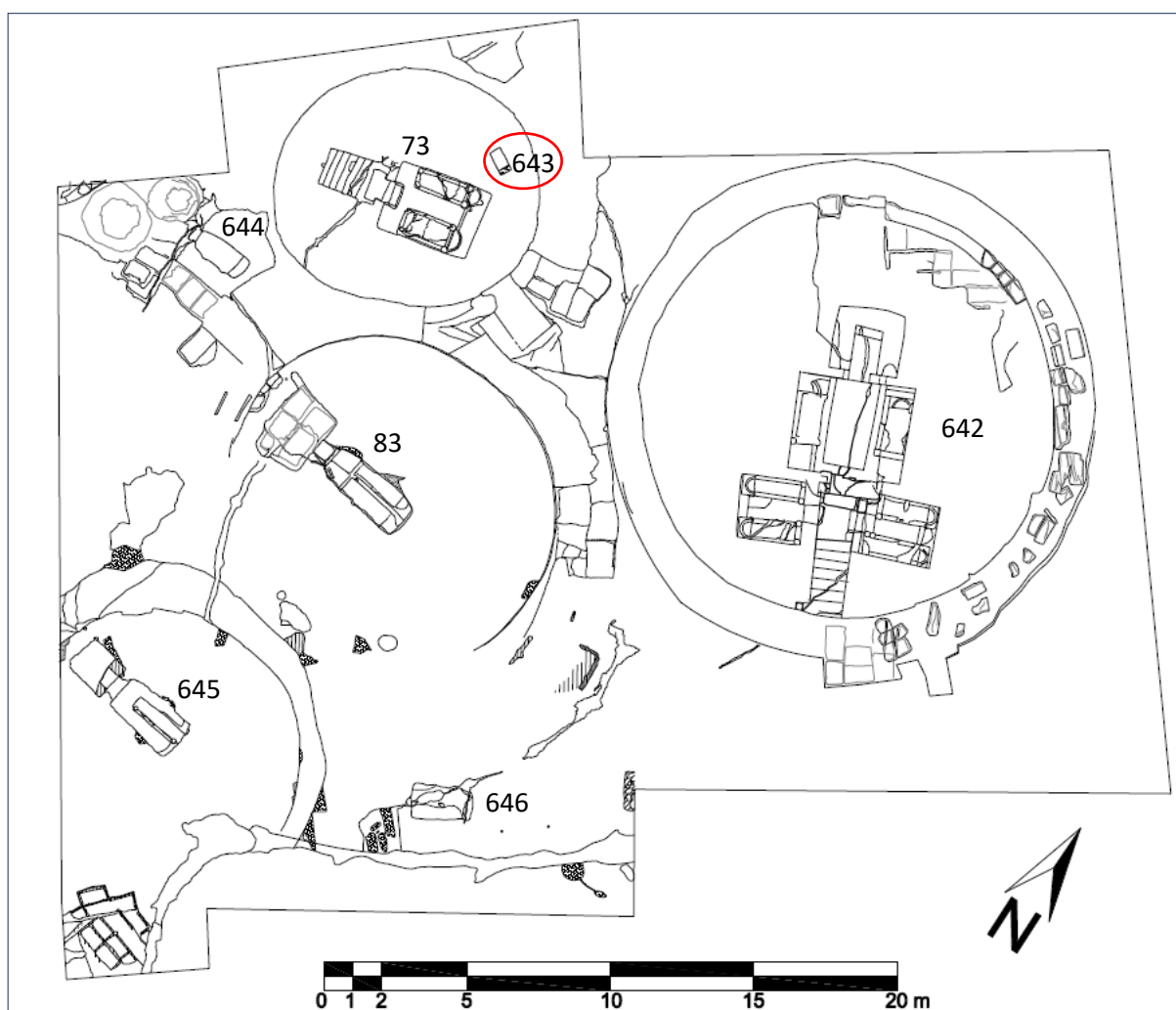


Figura 109 - Area di scavo 2019 con in evidenza, cerchio rosso, la tomba 643 (da Micozzi 2021).

Il processo di restauro virtuale, del corredo della tomba 643, è partito doverosamente dalla documentazione fotografica dei materiali ai fini della restituzione fotogrammetrica tridimensionale. Ogniuno degli oggetti ritrovati nella tomba è stato, quindi, ripreso tramite l'uso di una macchina fotografica mirrorless Sony Alpha 6000 con ottica zoom 16-55, impostando una focale fissa a 28 mm. Data, ovviamente, la tridimensionalità degli oggetti e l'eventuale presenza di elementi non visibili negli scatti associabile con il loro posizionamento su una superficie piana di appoggio, si è deciso di effettuare due gruppi di ripresa con lo scopo di poter documentare i manufatti nella loro interezza. Le fotografie, come accennato, sono state prodotte tramite una focale di 28 mm, impostando i parametri manualmente⁵⁶⁹.

⁵⁶⁹ Si è quindi impostata la macchina fotografica con: diaframma abbastanza chiuso, ma non fisso, al fine di disporre di una profondità di campo sufficiente ad ottenere tutti i dettagli; con ISO (International Standards Organisation) impostati tra i 100 e i 200, al fine di evitare presenza di grana sulle immagini; e tempi di scatto variabili. A tale scopo la fotocamera

I quattro oggetti documentati sono stati l'aryballos protocorinzio figurato, l'aryballos di produzione probabilmente locale, la kotyle protocorinzia e, infine, l'anforetta in bucchero⁵⁷⁰. Successivamente per ogni oggetto sono state prese diverse misure (altezza totale, larghezza piede e orlo) necessarie per la corretta riproposizione in scala 1:1 degli elementi (Fig. 110).

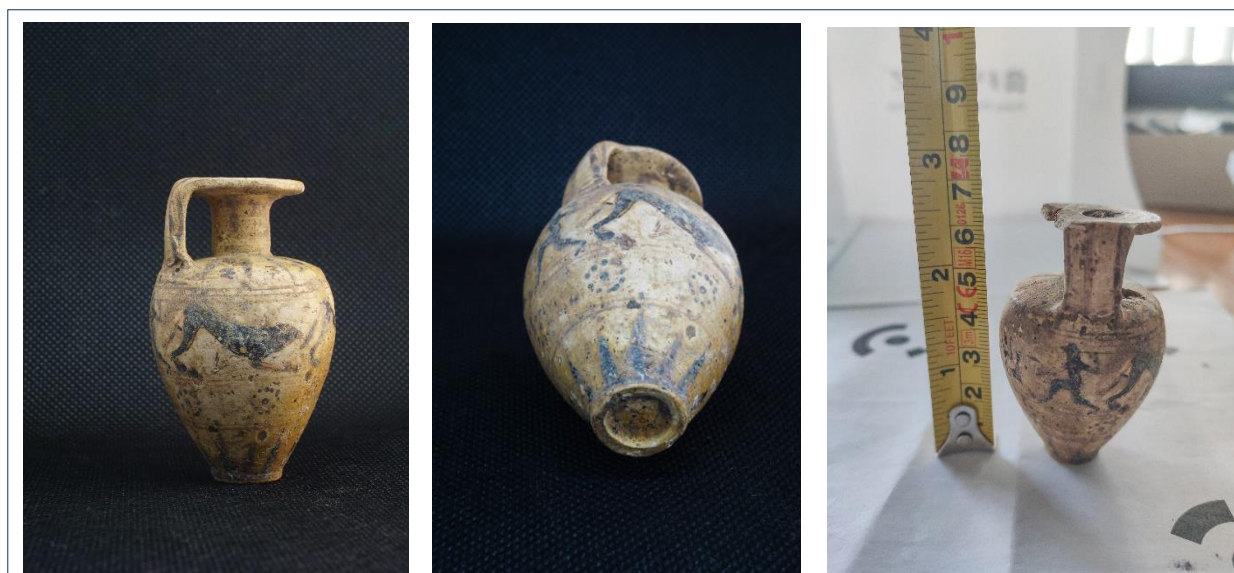


Figura 110 - Immagini dell'aryballos protocorinzio utilizzate per produrre il modello fotogrammetrico, a destra fase in cui si sono prese le misure per riportare in scala i modelli.

Successivamente le immagini sono state salvate all'interno della cartella del progetto di DRes, divise per oggetto e gruppo di ripresa ed importate in una serie di cartelle create ad hoc proprio per effettuare le elaborazioni della piattaforma.

Il primo processo, per ogni singolo materiale, è stato quello di creare un nuovo progetto all'interno dell'ambiente di lavoro di QGIS, anche in questo caso si è deciso di utilizzare il sistema di riferimento proiettato WGS84/pseudomercator (EPSG:3856). Avviata la piattaforma e definita la cartella del progetto tramite l'apposita funzione di DRes, si è per prima cosa aperta, tramite il relativo pulsante, la schermata di nuovo progetto del software fotogrammetrico Agisoft Metashape®.

è stata posta su un cavalletto impiegando un telecomando da remoto per effettuare gli scatti, così da evitare possibili vibrazioni dovute a tempi di scatto inferiori a 1/30 di secondo. Intorno ad ogni oggetto sono state poste delle mire di controllo facilmente riconoscibili dal software Metashape.

⁵⁷⁰ Le immagini catturate sono state per: l'aryballos protocorinzio figurato un totale di 106 scatti; l'aryballos di produzione probabilmente locale un totale di 101 immagini; la kotyle protocorinzia con 118 immagini; e infine l'anforetta in bucchero con 82 riprese. Inoltre, si è scelto da subito di evitare il restauro virtuale della fibula di bronzo perché le rimanenze risultavano troppo esigue per produrre un corretto restauro virtuale, inoltre, la ricontestualizzazione sarebbe stata impossibile proprio perché trovata in una situazione non confacente con la deposizione originale, portando al rischio di errori grossolani o alla creazione di falso storico.

I processi eseguiti all'interno dell'ambiente di Metashape® sono stati suddivisi in due finestre di lavoro autonome o *chunks*, entrambe però appartenenti al medesimo progetto. All'interno dei rispettivi *chunk* è stato seguito il medesimo workflow fotogrammetrico disponibile nell'ambiente metashape®, eseguendo gli stessi passaggi impiegati per la creazione del modello della pavimentazione della villa dei Quintili nei processi di restauro virtuale bidimensionale. Quindi, per prima cosa si è effettuato l'allineamento delle fotografie, tramite il pannello “align photos”, impostando il livello dei settaggi su “High”. Lo scopo finale è quello di produrre dalle immagini, tramite il riconoscimento dei punti omologhi e degli elementi geometrici principali, la nuvola di punti sparsa o *sparse cloude*. Dove necessario, per migliorare i risultati della nuvola di punti, si è effettuato un processo di mascheramento delle immagini al fine di rimuovere tutti quegli elementi che avrebbero potuto disturbare il riconoscimento dei punti omologhi (Fig. 111)⁵⁷¹.

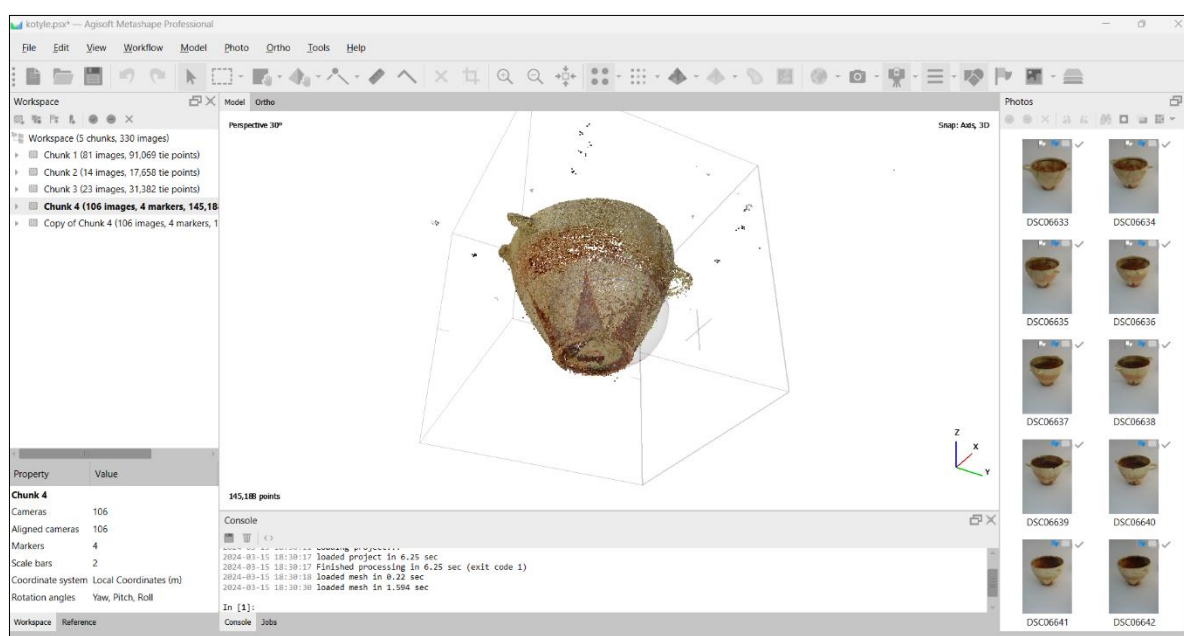


Figura 111 - *Sparse cloude* della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.

Successivamente a partire dalla nuvola di punti sparsa si è potuta produrre la nuvola di punti densa, attraverso la relativa finestra “Build Dense Cloud”. Si è impostata anche qui l'accuratezza ad “High” e il “Depth filter” su “moderato” (Fig. 112)⁵⁷².

⁵⁷¹ L'allineamento ha prodotto 165.391 punti per l'aryballos figurato, 88.522 punti per l'aryballos di produzione locale, 33.164 punti per l'anforetta e 145.188 punti per la kotyle.

⁵⁷² Le nuvole di punti dense sono state di: 8.128.394 punti per l'aryballos figurato, 3.014.744 per l'aryballos locale, 4.139.722 punti per l'anforetta e 9.985.756 punti per la kotyle.

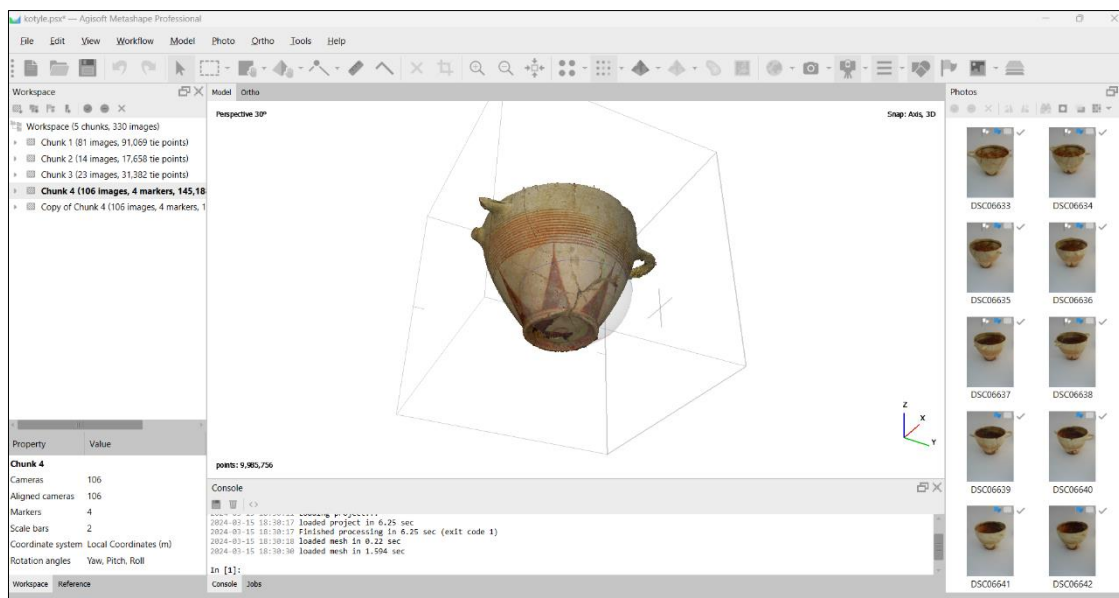


Figura 112 - *Dense cloude* della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.

Il risultato è stato successivamente raffinato manualmente, tramite lo strumento “lazo”, per rimuovere tutti i punti non necessari o di disturbo per la successiva creazione della mesh. Questa è stata prodotta tramite processi di interpolazione triangolare dei vari punti settando le impostazioni su “High” (Fig. 113)⁵⁷³.

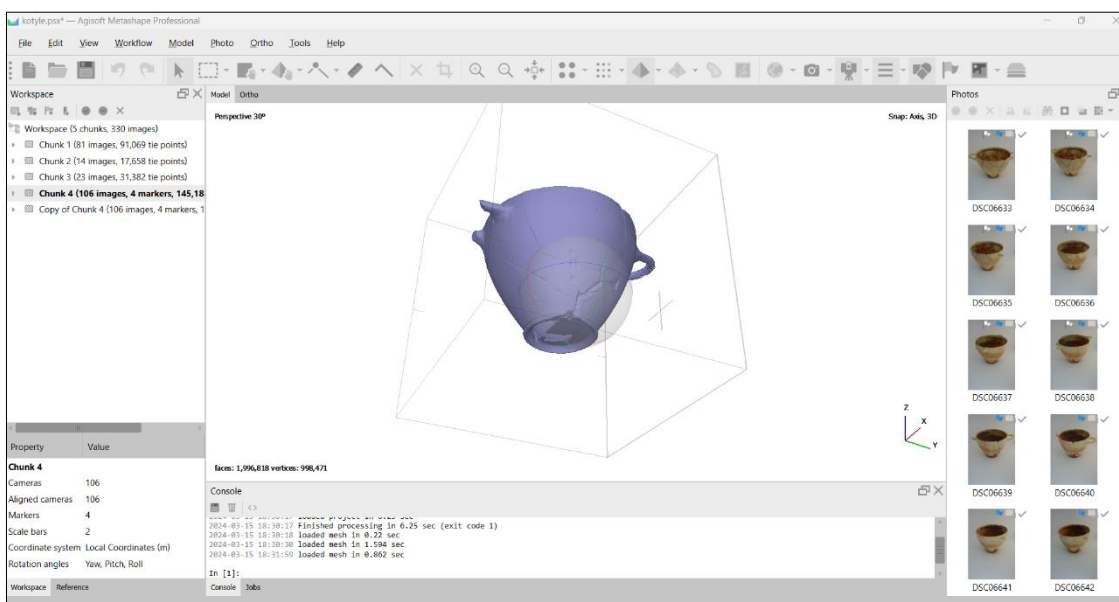


Figura 113 - *Mesh* della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.

⁵⁷³ Ne è risultata una mesh con 1.625.677 facce e 813.003 vertici per l'aryballos figurato, 602.954 facce e 301.485 vertici per l'aryballos locale, 827.941 facce e 414.575 vertici per l'anforetta e, infine, 1.996.818 facce e 998.471 vertici per la kotyle.

Sulla mesh è stata quindi applicata la texture in 4k (4096x4096 pixel), non prima di essere creata tramite processi di mosaicazione a partire dalle immagini utilizzate per il progetto ed essere associata al modello come mappa UV. Infine, le misure prese in loco sono state impiegate per riportare in scala gli oggetti (Fig. 114)⁵⁷⁴.

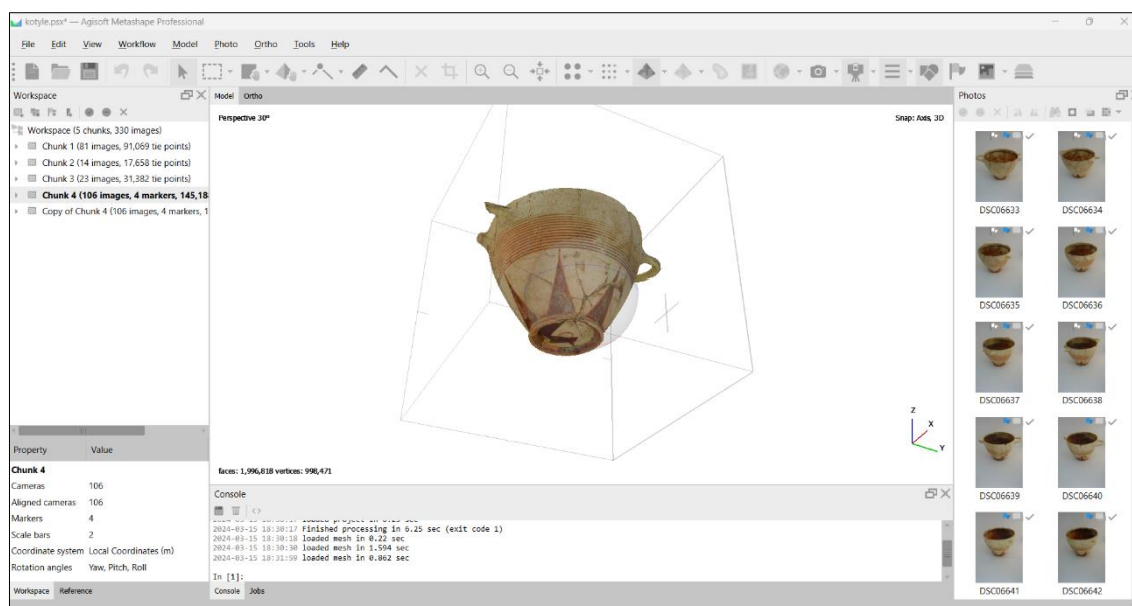


Figura 114 - *Texture* della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.

Da ultimo, i modelli sono stati riposizionati, nel sistema di assi cartesiani, disponendo la base degli oggetti sulla linea del piano formato dagli assi x e y, con il centro della base coincidente con lo 0, mentre l'altezza viene identificata dall'asse z. Questo processo risulta fondamentale per poter importare un modello che risulti posizionato correttamente nell'ambiente tridimensionale del GIS.

I modelli, quindi, sono stati esportati dal software Metashape®, in formato OBJ, all'interno della cartella di progetto della piattaforma. Questo passaggio risulta necessario per disporre di tutto il materiale all'interno della stessa cartella e per facilitare i processi della piattaforma. Il risultato è stato importato all'interno della piattaforma GIS come simbologia 3D di un nuovo *layer* shapefile puntuale creato in automatico tramite lo specifico pulsante di DRes.

⁵⁷⁴ Si sono inserite manualmente le misure di altezza massima e larghezza, per ogni oggetto, tramite due barre di scala prodotte all'interno di metashape. Le misure utilizzate per riportare in scala gli oggetti sono: Aryballos Figurato Altezza 6,5 cm, larghezza bocchello 2,3 cm; Aryballos locale Altezza 6,2 cm, larghezza bocchello 2,5 cm; Anforetta Altezza 10,5 cm, larghezza bocca 0,5 cm; Kotyle Altezza 6,1 cm, larghezza bocca 7 cm.

Aprendo la finestra di visualizzazione “Mappa 3D” si può visionare il modello tridimensionale del manufatto prodotto tramite ricostruzione fotogrammetrica (Fig. 115).

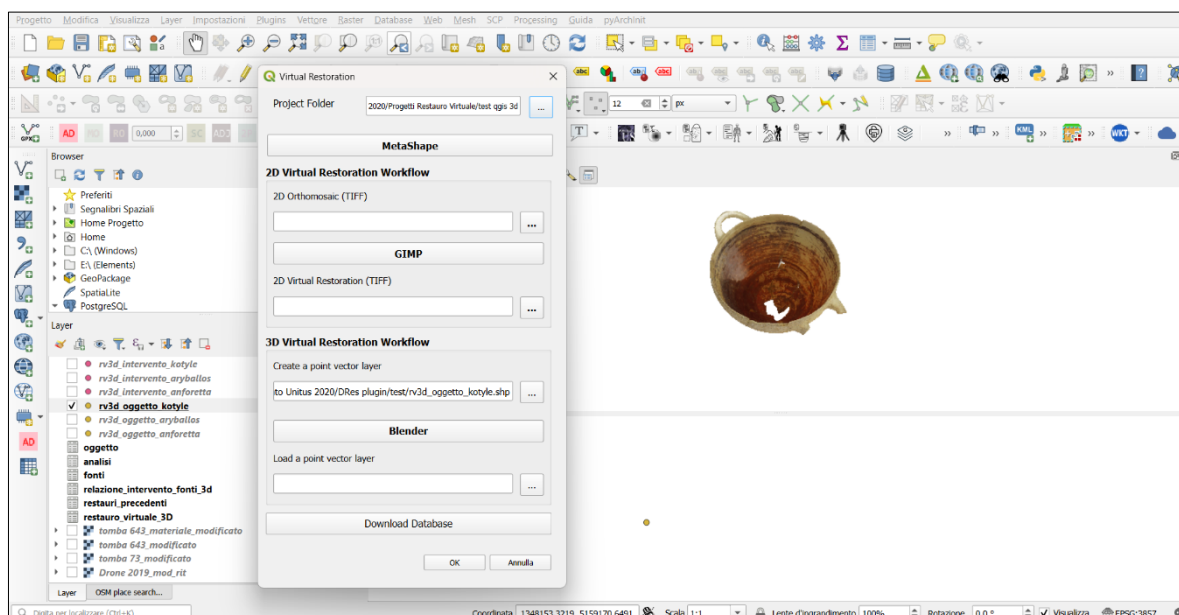


Figura 115 - Il modello 3D fotogrammetrico della Kotyle importato su QGIS® come simbologia tridimensionale del vettore creato tramite DRes.

Una volta terminata questa prima fase dei processi, il passaggio successivo è stato quello di effettuare il restauro virtuale dei materiali⁵⁷⁵. A tale scopo la piattaforma permette attraverso lo specifico pulsante di aprire il software *opensource* Blender®. Ovviamente a monte dell'elaborazione, a questo punto, vi deve essere il reperimento e lo studio di tutta la bibliografia e la documentazione disponibile considerando anche le eventuali attività di restauro avvenute precedentemente, nonché, nei casi necessari, l'esecuzione di analisi chimico-fisiche.

Per i casi studio presi in esame si è identificata primariamente tutta la bibliografia, per poi concentrarsi sui materiali di confronto allo scopo di ottenere informazioni ricostruttive verosimili delle forme e delle decorazioni. Al contempo però si è effettuato anche la raccolta della documentazione relativa alle attività di scavo per comprendere e ricostruire l'originaria posizione di deposizione del corredo⁵⁷⁶.

⁵⁷⁵ L'intervento di restauro virtuale non è stato eseguito sull'aryballos di produzione locale in quanto il pezzo risultava completamente integro al momento del ritrovamento e in un buono stato di conservazione.

⁵⁷⁶ Come già anticipato, alcuni dei materiali sono stati sottoposti ad un intervento di restauro per ricomporre ed incollare i vari frammenti. Di questo lavoro, purtroppo, non si dispone della documentazione.

I vari interventi di restauro virtuale tramite l'utilizzo del software Blender® hanno richiesto per prima cosa l'importazione distinta e manuale dei vari modelli fotogrammetrici, in formato OBJ, presenti nella cartella del progetto.

Questi oggetti tridimensionali risultavano, a questo punto, troppo pesanti, in termini di memoria, e poco gestibili per una modellazione ricostruttiva geometrica⁵⁷⁷. Per tali problematiche si è deciso, primariamente all'intervento di restauro virtuale vero e proprio, di procedere nella creazione di una copia dei modelli che potesse essere identica all'originale, sia per forma che per *texture*, ma che presentasse una topologia, e quindi una geometria maggiormente semplificata e corretta. La migliore metodologia da applicare è risultata essere quella di *retopology* manuale in quanto si voleva mantenere il controllo totale di tutte le fasi di modellazione. Seguendo questo metodo, i modelli fotogrammetrici, o *high poly*, sono divenuti gli elementi da cui derivare i nuovi oggetti tridimensionali, o *low poly*. Questi manufatti 3D prodotti tramite le tecniche di *retopology* sono stati creati, singolarmente, a partire da una superficie quadrangolare che, tramite i *tools* di estrusione, è stata estrusa più volte con l'obiettivo di riprodurre fedelmente tutta la superficie 3D del modello *high poly*. Questo risultato non poteva essere raggiunto senza l'impiego, associato alla superficie quadrangolare, del modificatore *shrinkwrap*⁵⁷⁸, coadiuvato dall'attivazione della calamita, o *snap*, per le superfici.

L'elaborazione dei modelli *low poly* è stata avviata ricreando, per prima cosa, tutte quelle parti degli oggetti *high poly* che ne definiscono la forma: l'attacco e la base del piede, l'attacco delle anse, la bocca del vaso, il punto di maggior espansione o mediano della pancia, l'attacco del collo e del bocchello, la parte sommitale del bocchello e/o dell'orlo e, infine, il fondo della vasca. Per produrre questi elementi principali è stata estrusa più volte, in maniera costante, la superficie quadrangolare fino a creare un anello, o *loop*, che circondasse l'intera zona della superficie. Successivamente, sono stati creati manualmente gli anelli secondari, cioè *loop* di raccordo tra i vari anelli principali che, una volta riuniti, formano una griglia di dimensione costante, la quale permette di chiudere la superficie e, quindi, produrre l'intera forma. Dove possibile, questi *loop* secondari sono stati creati tramite

⁵⁷⁷ Tale problematica era acuita dal fatto che questi modelli sono stati prodotti tramite un'interpolazione per triangoli, un tipo di modelli che pur, accettato e gestibile su Blender, risulta problematico per il software nel momento in cui si vogliano effettuare modifiche o elaborazioni sul modello di tipo geometrico. Infatti, il software Blender permette di esprimere la sua massima potenzialità nel momento in cui lavora su modelli di tipo quadrangolare. Questo aspetto ha portato alla decisione di produrre un modello quadrangolare tramite la *retopology*.

⁵⁷⁸ Il modificatore *shrinkwrap* è un tipo di algoritmo che deforma i vertici di una superficie seguendo la geometria di un modello che gli viene dato come obiettivo. Blender manual 2.79, *shrinkwrap* modifier, <https://docs.blender.org/manual/it/2.79/modeling/modifiers/deform/shrinkwrap.html> (Ul. Cons. 17/02/2024)

specifici comandi del software, come il “grid fill”⁵⁷⁹. Infine, sempre tramite estrusione manuale sono state completate tutte quelle parti del modello che richiedevano maggiori elaborazioni geometriche come le anse o le aree di frattura.

Questi processi sono risultati essenziali per produrre tre modelli *low poly*⁵⁸⁰, uno per ogni oggetto, che riproducono fedelmente la forma dei manufatti originali (Fig. 116).

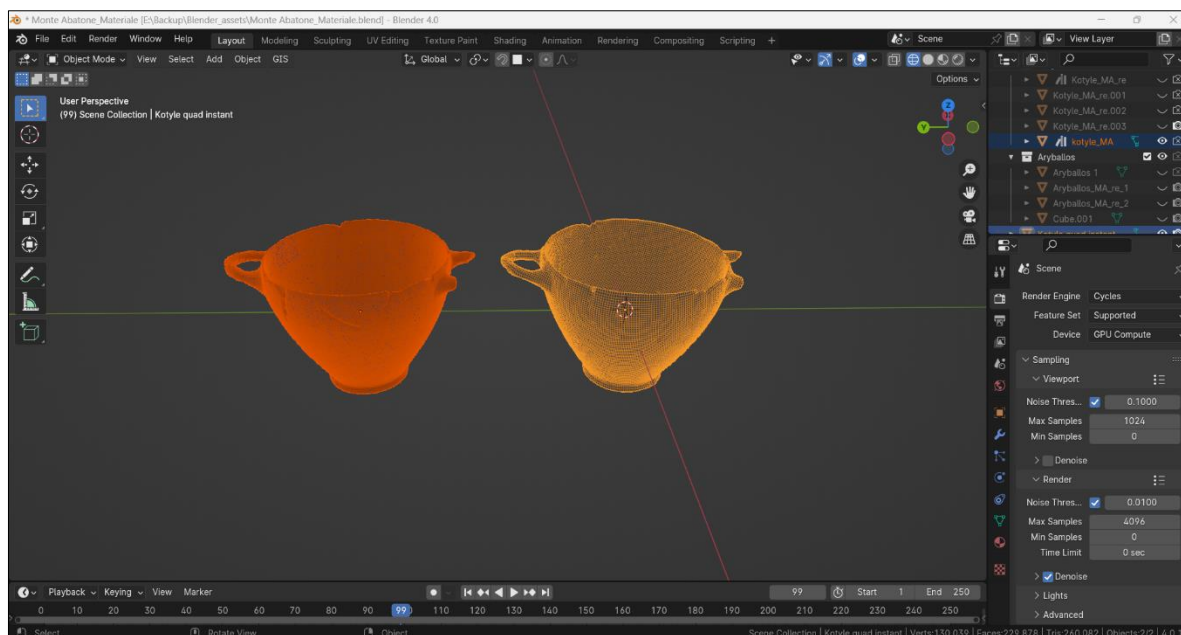


Figura 116 - Modelli *High poly* e *Low poly* della Kotyle a confronto in Blender®.

Un ulteriore elemento, successivo alla fase di *retopology* e fondamentale per la preparazione all'intervento di restauro virtuale, è stata la copia delle caratteristiche della *texture* tra il modello *high poly* e quello *low poly*. Questa attività deve per prima cosa essere eseguita a partire dall'*unwrapping* automatizzato del modello *low poly* su di una superficie bidimensionale UV di dimensioni 4k (4096x4096 pixel)⁵⁸¹, che è poi stata salvata come immagine in formato JPG. Questa nuova immagine è stata creata allo scopo di ricevere le caratteristiche colorimetriche e morfologiche, e quindi collegate allo *shader*, della texture del modello *high poly*, seguendo però la topologia, a partire dall'*unwrapping* bidimensionale, del modello *low poly*. Questo movimento avviene, attraverso il processo di *render baking* o *bake* delle texture, tramite i fasci luminosi prodotti da un motore di *rendering ray-tracing*,

⁵⁷⁹ Il tool *grid fill* dato un numero eguale di punti che circondano un'area da riempire crea una griglia di facce quadrangolari di egual misura a partire da questi vertici. Blender manual 4.0, *grid fill*, https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/meshes/editing/face/grid_fill.html (Ul. Cons. 08/01/2024)

⁵⁸⁰ I modelli *low poly* dei tre oggetti presentano rispettivamente: 1.686 facce e vertici per la kotyle; 2.450 facce e vertici per l'aryballos protocorinzio; 1.690 vertici e 1.677 facce per l'anforetta.

⁵⁸¹ Corrispondenti così alle dimensioni della texture del modello *high poly*

in questo caso “Cycles”⁵⁸², che partono dal modello *low poly* e giungono sul modello *high poly*. Il risultato del *rendering* di questi dati viene poi salvato sulla *texture* collegata con il modello *low poly*⁵⁸³. Associando questa nuova *texture* al modello *low poly* si ottiene, infine, un oggetto più leggero, in termini di memoria e gestibilità, ma che dispone di stessa forma e caratteristiche colorimetriche del modello *high poly*.

Tutti i processi sopradescritti sono stati necessari per giungere infine ad effettuare, in maniera ottimale, le operazioni di restauro virtuale. Gli interventi, quindi, sono partiti dalla ricostruzione geometrica di tutte le lacune presenti sui manufatti. A tale scopo è stata primariamente creata una copia del modello *low poly*, sulla quale sono state utilizzate le tecniche di modellazione 3D e i *tools* di Blender® per ricreare geometricamente tutte quelle parti lacunose che potevano essere ricostruite⁵⁸⁴.

Successivamente, tutti questi nuovi elementi ricostruiti sono stati texturizzati, ma seguendo due processi differenti. Il primo tentava di riprodurre l’effetto finale di un intervento di restauro reale, rendendo di fatto tutte queste geometrie ben riconoscibili. Per giungere a questa prima fase dei processi si sono impiegati gli strumenti associati con le pratiche di *texture painting* (Figg. 117-118)⁵⁸⁵.

⁵⁸² Il motore di rendering “Cycles” permette, tramite il pannello di “Bake” di impostare i parametri legati al tipo di *texture* e *shader* da copiare, nello specifico si è solamente copiato il dato proveniente dallo *shader* della *diffuse map*. Inoltre, permette di impostare ulteriori parametri a partire dal pannello “Selected to Active” che consente di selezionare il modello *high poly*, come elemento sorgente, e il modello *low poly* come oggetto ricevente. Questa impostazione può essere settata attraverso due parametri principali che, una volta modificati, creano una sorta di gabbia (*cage*) attorno all’oggetto e con le sue stesse fattezze, che definisce i limiti per i raggi di luce. Essi sono: “Max ray Distance” che specifica la distanza massima in cui i fasci di luce possono muoversi verso l’interno definendo, così, la grandezza massima per la gabbia; ed “Extrude”, che identifica la distanza da cui far partire il raggio dall’interno della gabbia. Blender manual 4.0, Render baking, <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/baking.html> (Ul. Cons. 08/01/2024)

⁵⁸³ Blender manual 4.0, Render baking, <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/baking.html>; Vectari 2023, The importance of texture baking, <https://www.vectary.com/3d-modeling-blog/texture-baking/> (Ul. Cons. 08/01/2024)

⁵⁸⁴ I processi di ricostruzione sono stati eseguiti a partire da una immagine, presa dai confronti identificati nella ricerca bibliografia, utilizzata come elemento di riferimento per ricostruire le parti mancanti. Queste sono state realizzate sia a partire dalla geometria di riferimento, ricostruendone manualmente andamento e forma, sia a partire da una copia degli elementi ancora presenti sulla parte rimanente del manufatto. Gli interventi eseguiti sono riscontrabili come elementi nuovi e distinti che: nella kotyle, riguardano, l’ansa mancante, le parti di labro e piede, nonché del fondo e delle pareti non più presenti; nell’anforetta l’ansa e la corrispettiva parte del collo e labbro, nonché le pareti mancanti; infine, nell’aryballos protocorinzio figurato la parte di bocchello mancante.

⁵⁸⁵ Nello specifico si è partiti, tramite lo strumento “contagocce”, nell’identificazione della colorazione più vicina possibile a quella delle superfici originali. Il risultato è stato portato in sottotono per poi essere steso sopra le nuove geometrie con lo strumento “pennello”.



Figura 117 - *Rendering* finale delle elaborazioni di restauro virtuale che rispetta il principio della riconoscibilità delle integrazioni.



Figura 118 - *Rendering* finale delle elaborazioni di restauro virtuale che rispetta il principio della riconoscibilità delle integrazioni, altra visuale.

Il secondo processo era legato alla possibilità di ricostruire interamente la trama del manufatto effettuando un'elaborazione che, tramite la *texture painting*, non fosse distinguibile dall'originale, ossia in mimetico (Fig. 119)⁵⁸⁶.



Figura 119 - *Rendering* finale dell'elaborazione di restauro e ricostruzione virtuale in mimetico.

Si sono, quindi, potuti ottenere due modelli, uno che imita un'ipotesi finale di restauro reale e l'altro, invece, che effettua una ricostruzione totale dell'opera (Fig. 120).

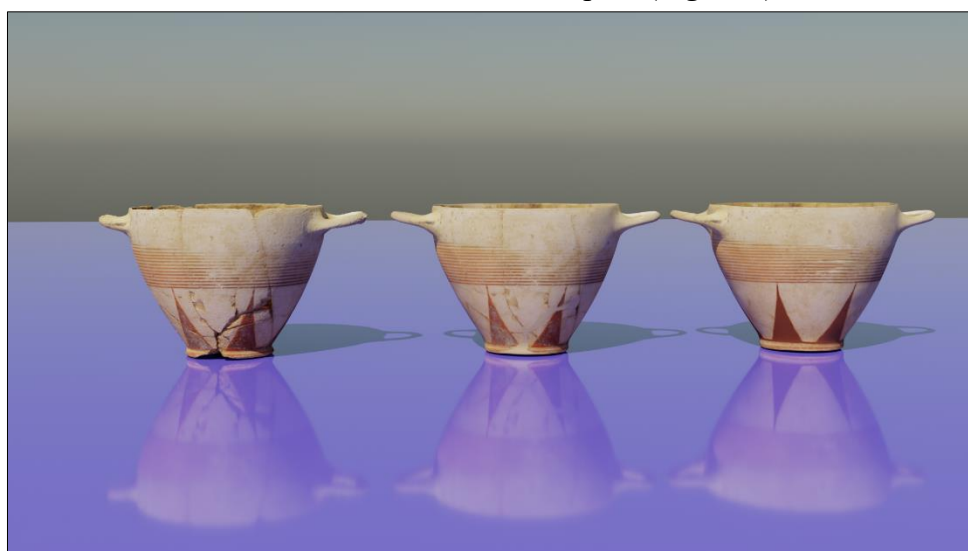


Figura 120 - *Rendering* delle due ipotesi di restauro virtuale messe a confronto con il modello dell'opera originale.

⁵⁸⁶ Partendo nuovamente dagli strumenti di *texture painting*, questa volta, ci si è avvalsi del tool “clone” per copiare i pixel colorimetricamente più simili agli elementi da ricostruire e inserirli come nuova texture sopra le parti di ricostruzione.

Questi oggetti sono nuovamente stati esportati nella cartella del plug-in, entrambi in formato OBJ, e grazie allo specifico bottone della piattaforma che crea un nuovo *layer* vettoriale puntuale in formato SHP, il quale consente l'associazione di modelli 3D esterni come simbologia tridimensionale, sono stati importati all'interno del progetto QGIS.

Questo nuovo *layer* è stato impiegato per produrre più punti, associati con i modelli di restauro, che disponessero delle stesse coordinate del vettore collegato alla ricostruzione fotogrammetrica. Tramite tale soluzione, questi oggetti tridimensionali, presentano una corrispondenza perfetta sia per posizione che dimensioni, facilitando il confronto e una valutazione dell'intervento stesso (Fig. 121).

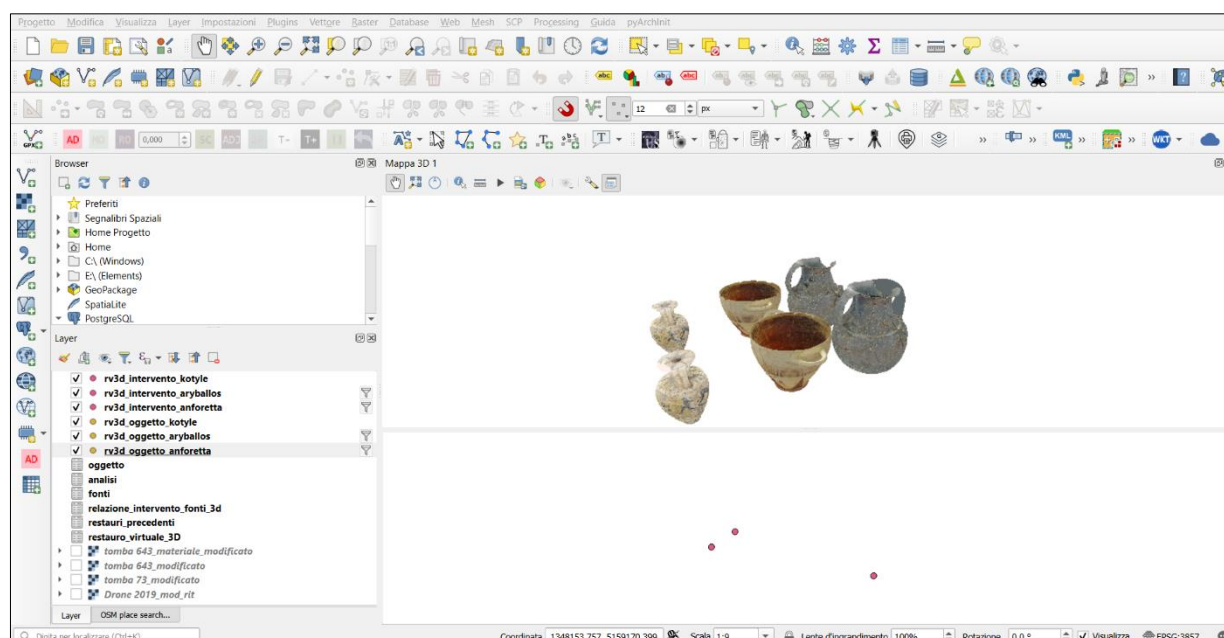


Figura 121 - I modelli tridimensionali fotogrammetrici e di restauro virtuale messi a confronto tramite l'interfaccia di QGIS®.

A questo punto il modello poteva essere associato con la documentazione che sarebbe stata contenuta all'interno del database di restauro virtuale tridimensionale⁵⁸⁷.

⁵⁸⁷ Questo database è scaricabile dalla piattaforma tramite lo specifico bottone presente che permette di avviare il download di un file .SQL che contiene il codice necessario alla creazione delle tabelle di base del database, le stesse viste nel capitolo precedente e che possono essere integrate con nuovi campi, ma non modificabili nella struttura, secondo le necessità. Anche in questo caso la creazione del database passerebbe tramite pgAdmin® 4, ma contenendo il codice nella piattaforma entrambi gli schemi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale, non è stato necessario ripetere il processo, disponendo da subito di entrambi gli schemi.

Proprio a tal fine, per prima cosa si sono create e compilate tre schede “oggetto” con le varie informazioni generali relative alla kotyle, all’aryballos e all’anforetta. Successivamente si sono create tre schede di “restauro_virtuale_3D” per indicare i vari interventi eseguiti per ogni materiale. Infine, si sono potute riempire le schede relative alle fonti utilizzate e agli interventi di restauro precedente.

Da ultimo, si sono collegate, attraverso il processo di *Join* tabellare⁵⁸⁸, le schede del database “rv3d_oggetto” e “rv3d_intervento” con i layer puntuali, creati tramite la piattaforma, associati ai rispettivi modelli tridimensionali. Questo processo apre le porte ad ulteriori possibilità di interrogazione e visualizzazione del database, le quali possono avvenire sia tramite l’apertura delle schede, direttamente dall’icona preposta di QGIS, sia tramite un clic su uno dei punti nella mappa bidimensionale o sul relativo modello 3D nella “Mappa 3D” (Figg. 122-123)⁵⁸⁹.

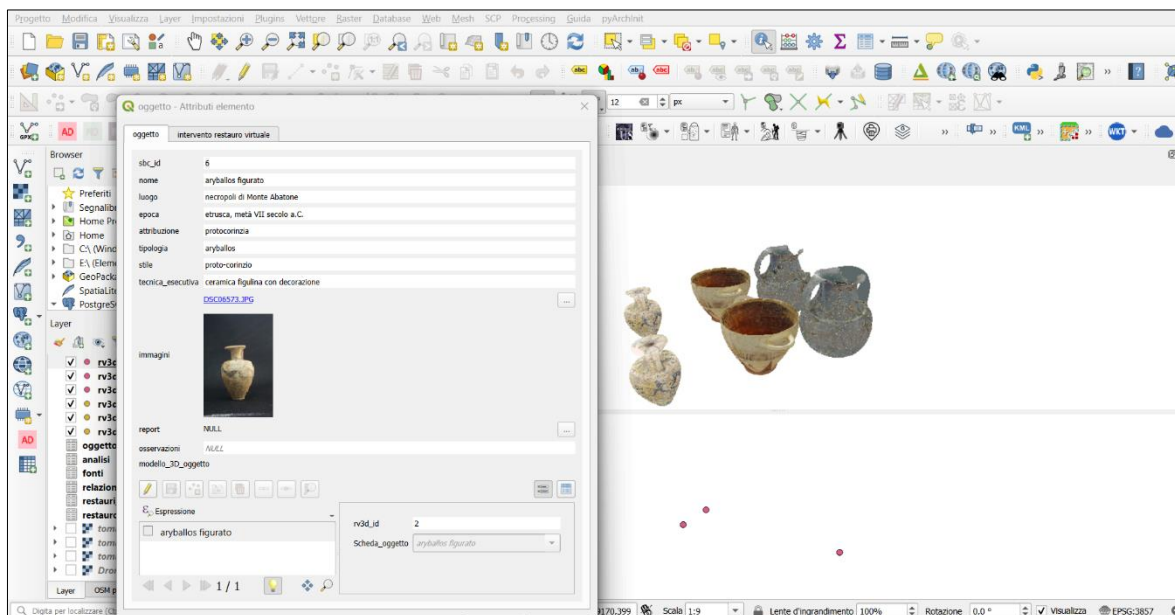


Figura 122 - Apertura della scheda “oggetto” dell’aryballos all’interno di QGIS® tramite clic sul relativo modello 3D.

A questo punto però tutti i materiali risultavano suddivisi in diversi singoli progetti. Tutti questi manufatti però appartenevano, come sopradescritto, allo stesso contesto, per cui, disponendo anche dei rilievi fotogrammetrici dell’intera area di scavo e della singola tomba, si è optato per creare un singolo progetto GIS che permettesse la ricontestualizzazione digitale dell’intero corredo all’interno della sepoltura.

⁵⁸⁸ Tramite tale processo si sono unite le informazioni dei due database a partire da un elemento identificativo comune, in questo caso la colonna contenente il campo che indica il nome del manufatto. In tale maniera si sono potute associare le ricostruzioni fotogrammetriche e gli oggetti 3D di restauro virtuale alle relative schede del database.

⁵⁸⁹ L’apertura delle tabelle tramite clic sul vettore o sul modello 3D può avvenire tramite la selezione degli strumenti “Informazioni elementi” e “informazioni elementi 3D” di QGIS nelle rispettive visuali. Inoltre, il richiamo delle varie tabelle e quindi la loro visualizzazione avviene grazie alle relazioni 1:N e N:N preimpostate del database.

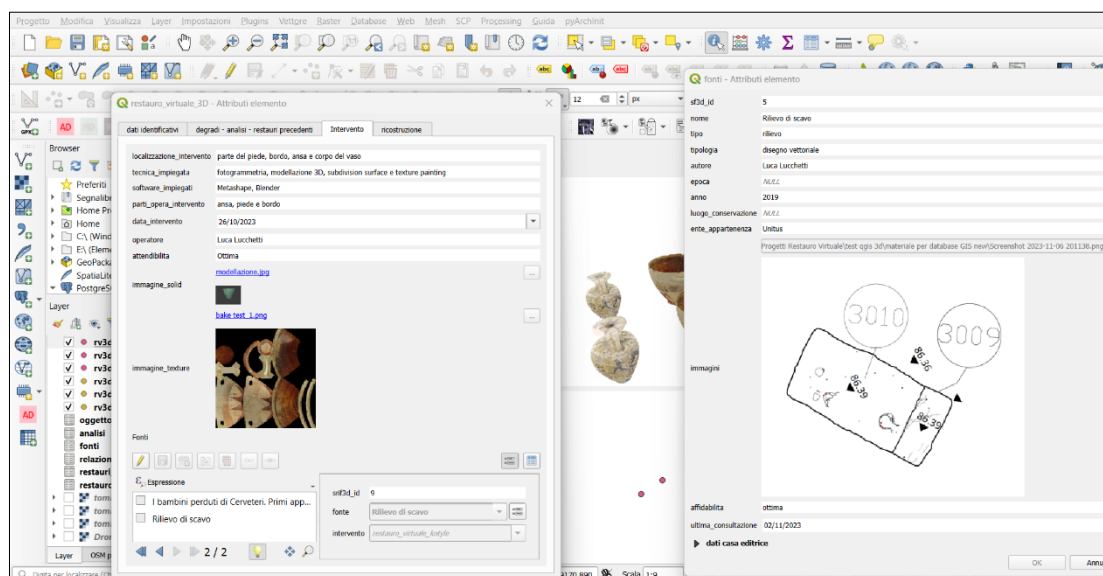


Figura 123 - Apertura delle scheda di “restauro virtuale 3D” tramite clic sul punto che identifica la kotyle. Grazie alle relazioni 1:N e N:N, questa tabella, ci permette di accedere alle schede relative ai restauri precedenti, alle analisi e alle fonti.

A tale fine si è partiti dalle foto di scavo e dai rilievi, nonché dai modelli fotogrammetrici della tomba e dello strato di ritrovamento, per studiare e riposizionare verosimilmente ogni elemento del corredo. Per cui, all’interno del software Blender® si sono caricati il modello fotogrammetrico della sepoltura e dell’intero tumulo, sulla base dei quali sono stati riposizionati, a partire dai dati sopramenzionati, i modelli tridimensionali fotogrammetrici e di restauro del corredo. Da questa prima progettazione si sono prodotti dei *rendering* tridimensionali fotorealistici allo scopo di confrontare le ipotesi di riposizionamento con la documentazione di scavo e mostrare i risultati finali dell’elaborazione (Figg. 124-125) ⁵⁹⁰.

La seconda fase ha visto la creazione di un nuovo progetto in ambiente QGIS®, con sistema di riferimento WGS84/Pseudomercator (EPSG:3857), in cui sono stati importati tutti i database creati per ogni singolo elemento, i quali sono divenuti un’unica banca dati tramite i processi di *Join* tabellare. Nello stesso frangere il progetto è stato arricchito con la mappa di base Google satellite® per poter visualizzare l’intero pianoro, mentre gli ortomosaici fotogrammetrici georeferenziati della

⁵⁹⁰ A tale scopo si è impiegato il motore di rendering “Cycles” e l’ambiente “Sky texture”, per simulare gli effetti di luce solare e rendere più realistici i rendering finali. Questo passaggio, inoltre, è stato fondamentale per posizionare i materiali alle corrette coordinate geografiche ricavate, in automatico da Blender, tramite il loro spostamento sopra al modello 3D fotogrammetrico della tomba 643, la quale risulta georeferenziata nel sistema di riferimento WGS84/UTM32N (EPSG: 32632)

tomba 643, dell'intero tumulo e, infine, di tutta l'area di scavo, sono stati impiegati per ricontestualizzare il corredo.



Figura 124 - *Rendering* finale di ricollocazione dei materiali del corredo della tomba 643, altra visuale.



Figura 125 - *Rendering* finale di ricollocazione e ricostruzione del corredo della tomba 643, tramite Blender®, altra visuale.

Ne risulta che ad ogni vettore delle tabelle “rv3d_oggetto” e “rv3d_intervento”, corrisponde così il relativo modello tridimensionale georeferenziato e ricontestualizzato, tramite la finestra di “Mappa 3D”, sulla base dell’ortomosaico fotogrammetrico della tomba 643. Tale connubio consente la visualizzazione di tutti gli oggetti di restauro o fotogrammetrici, all’interno del contesto originario, e, al contempo, di associare e poter interrogare tutte le informazioni degli interventi di restauro

virtuale contenute nel database. Ne scaturisce, quindi, che ogni modello tridimensionale può essere visualizzato come unico elemento o in rapporto agli altri oggetti del corredo, favorendo non solo una documentazione e un confronto scientifico con il singolo materiale, e relativo database, ma anche con l'intero contesto di appartenenza (Figg. 126-127).

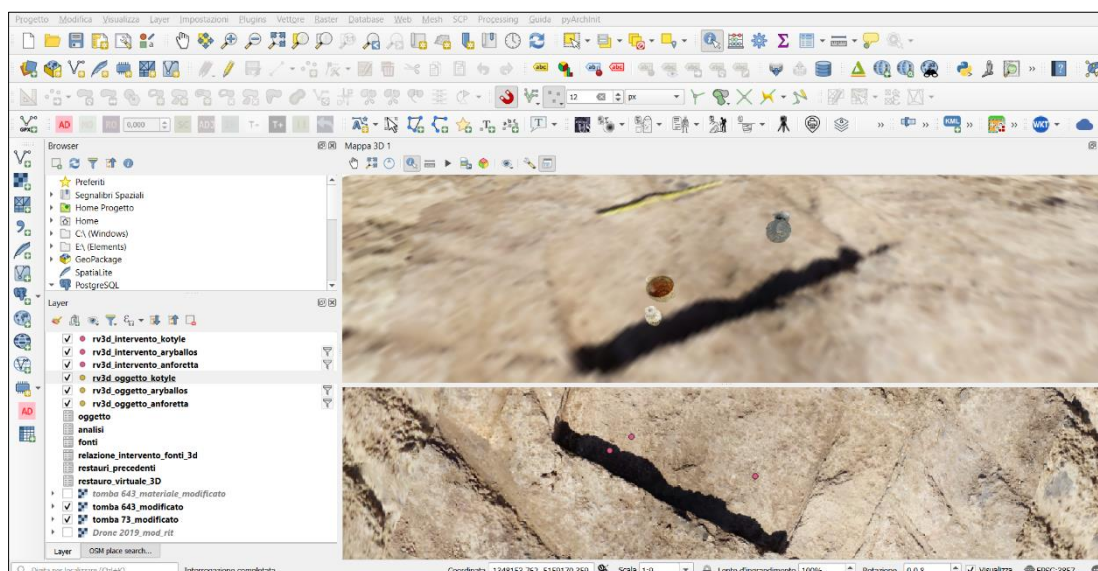


Figura 126 - Il progetto di QGIS® contenente tutti gli elementi del corredo che sono stati elaborati tramite tecniche di restauro virtuale, georeferenziati correttamente sopra l'ortomosaico della tomba 643.

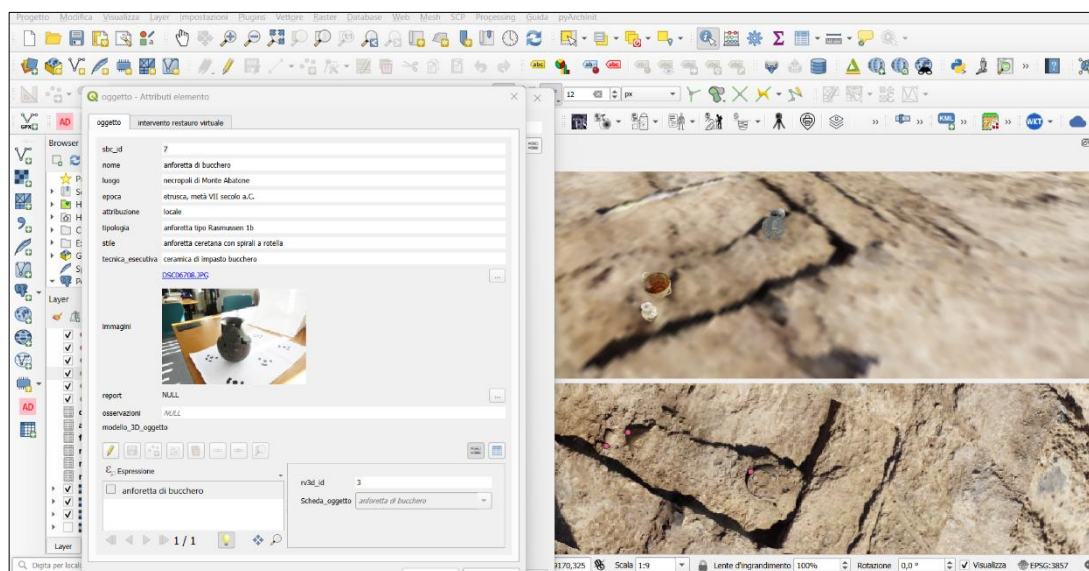


Figura 127 - Il database associato ad ogni singolo elemento può essere consultato ed interrogato per poter accedere in contemporanea a più informazioni legate agli interventi e permettere una verifica della scientificità dell'elaborazione stessa.

6.3 Processi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale: le pitture a grottesche dell'ambiente E del "Bagno del Cardinale" presso la Villa del Colle del Cardinale a Perugia

Come ultimo caso studio, integrativo sia del percorso di restauro virtuale bidimensionale che tridimensionale al fine di testare l'intero processo disponibile tramite la piattaforma DRes, è stata scelta una porzione delle pitture a grottesche presenti nell'ambiente denominato E del cosiddetto "Bagno del Cardinale" presso la villa del Colle del Cardinale a Perugia.

La villa del Colle del Cardinale, ubicata nella frazione Colle Umberto all'interno dell'area comunale di Perugia, venne edificata, su commissione del cardinale Fulvio Della Corgna, intorno al XVI secolo. Successivamente, dal 1645, la villa divenne proprietà della famiglia Oddi che dal 1782, tramite vincoli matrimoniali, si unì con quella Baglioni. Nel 1893 venne alienata all'imprenditore Ferdinando Cesaroni, per poi divenire di proprietà, dal 1926, dell'avvocato Luigi Parodi. Infine, l'immobile e tutte le proprietà vennero acquistate dal Ministero per i Beni Culturali nel 1997⁵⁹¹.

Sotto la famiglia Oddi Baglioni e, nello specifico, tra la seconda metà del Settecento e gli inizi dell'Ottocento l'edificio venne dotato di un sistema di giardini e vari nuovi complessi architettonici. Proprio a questo momento, verosimilmente, deve essere fatta risalire la costruzione del cosiddetto "Bagno del Cardinale"⁵⁹², un annesso composto da diverse strutture addossate al torrione a Sud-Ovest della villa. Il complesso, raggiungibile da gallerie presenti nel lato Nord-Ovest del terrazzamento che sostiene la villa, era in origine accessibile anche dal giardino posto sul lato Sud-Ovest. Il Bagno del Cardinale è composto da cinque stanze in sequenza comunicanti tra di loro: in primo luogo vi è un tunnel sotterraneo un tempo decorato, probabilmente, con una pittura sui toni dell'azzurro (Ambiente A); un vestibolo a forma ovale (Ambiente B) riccamente decorato da pitture policrome e raffigurazioni a grottesche; un bagno circolare con una vasca per le abluzioni (Ambiente C) completamente caratterizzato da elementi in stucco e pareti bianche; un vano quadrato (Ambiente D) in cui una tinteggiatura rosa copre le rimanenze, molto limitate, di intonaco dipinto; ed, infine, un ambiente a forma ottagonale (Ambiente E) decorato a grottesche, elementi pittorici di cui purtroppo rimangono quasi solamente alcune porzioni nell'abside che copre l'edificio (Fig. 128)⁵⁹³. Proprio quest'ultima stanza e parte delle sue pitture sono state scelte come caso studio. In particolare, si è deciso di effettuare le elaborazioni sull'angolo dell'abside posto a Sud, in quanto presentando una

⁵⁹¹ Batino 2019, p. 1; Viventi 2012, pp. 17-112

⁵⁹² Bianchi 2012, pp. 227-232; Batino 2019, p. 2

⁵⁹³ Batino 2019, p. 2

maggior completezza delle raffigurazioni a grottesche ha permesso l'esecuzione di tecniche diverse di restauro virtuale sia bidimensionale che tridimensionale.



Figura 128 – Modello 3D fotogrammetrico che evidenzia la sequenza e la denominazione dei cinque ambienti del “Bagno del Cardinale” della villa del Colle del Cardinale a Perugia.

Nonostante, però, la quasi integrità di tali decorazioni, come in tutto l'ambiente, sono presenti anche qui ampie lacune che lasciano a vista la muratura sottostante, mentre gli intonaci mostrano distacchi dal supporto, fessurazioni e deformazioni dovute ai dissesti. Inoltre, la presenza delle velinature, messe a protezione delle rimanenze pittoriche, ha aumentato le difficoltà di indagine e di intervento in ambito digitale. Nonostante queste problematiche la stessa raffigurazione si presenta, anche se in maniera maggiormente lacunosa, in due degli altri angoli dell'abside divenendo, così, essi stessi elementi imprescindibili come fonti per l'intervento di restauro virtuale e per la ricostruzione dell'intera decorazione pittorica della porzione prescelta (Fig. 129).

Come negli altri due casi di restauro virtuale sopra descritti, anche qui il primo passaggio è stato quello di rilevare, tramite tecnica fotogrammetrica, l'intero ambiente E e l'abside. A tal fine ci si è avvalsi dell'uso di una macchina fotografica mirrorless Sony Alpha 6000 con ottica zoom 16-55, impostando una focale fissa a 28 mm. Successivamente, sono state prese diverse misure (altezza,

larghezza e profondità delle porte e delle nicchie), tramite un misuratore metrico laser per la corretta riproposizione in scala 1:1 degli elementi⁵⁹⁴.

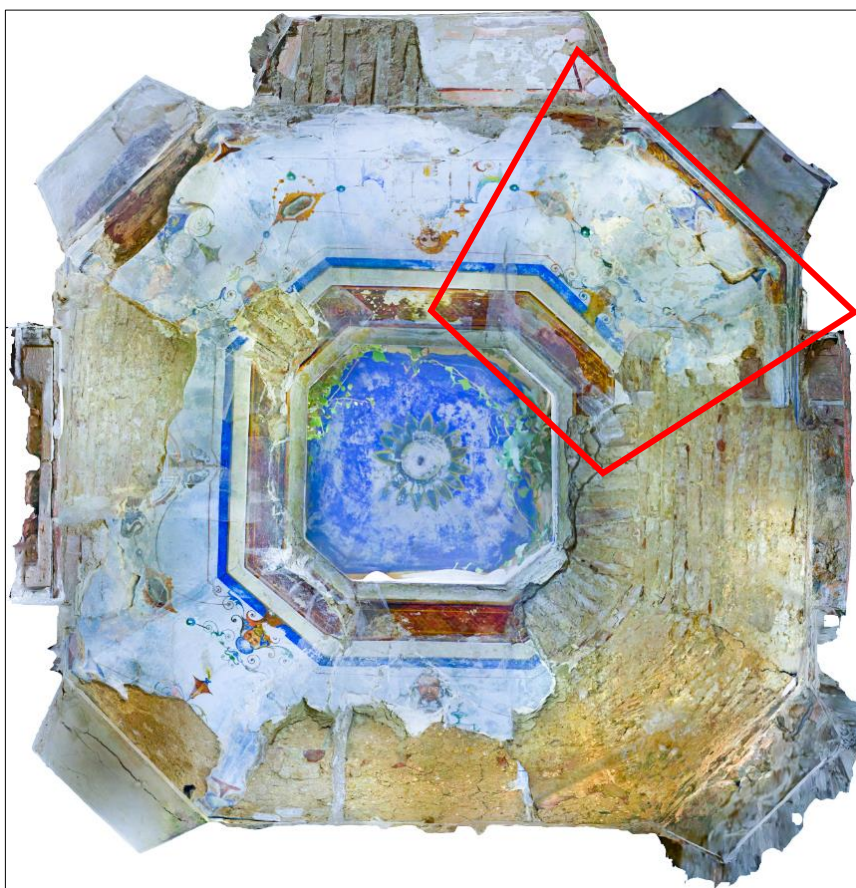


Figura 129 – Ortomosaico dell'intera cupola decorata a grottesche dell'ambiente E del “Bagno del cardinale”. In alto a destra, in rosso, l'area prescelta per l'intervento di restauro virtuale.

Successivamente le immagini sono state salvate all'interno della cartella del progetto di DRes, divise per oggetto e gruppo di ripresa ed importate in una serie di cartelle create ad hoc proprio per effettuare le elaborazioni della piattaforma.

Il primo processo, quindi, è stato quello di creare un nuovo progetto all'interno dell'ambiente di lavoro di QGIS®, anche in questo caso si è deciso di utilizzare il sistema di riferimento proiettato WGS84/pseudomercator (EPSG: 3856). Avviata la piattaforma e definita la cartella del progetto tramite l'apposita funzione di DRes, si è per prima cosa aperta, tramite il relativo pulsante, la schermata di nuovo progetto del software fotogrammetrico Agisoft Metashape®.

⁵⁹⁴ Per l'intera campagna di rilievo sono state prodotte per l'ambiente E e l'abside 646 immagini. Le misure prese per riportare in scala l'ambiente sono: larghezza porta 0,90 m ca, altezza 2,15 m ca.; nicchia sotto la porzione di abside prescelta per l'intervento: larghezza 0,73 m ca, altezza 1,27 m ca.

I processi eseguiti nell'ambiente di Metashape® sono stati suddivisi in due finestre di lavoro autonome o *chunks*, entrambe però appartenenti al medesimo progetto. All'interno dei rispettivi *chunk* è stato seguito lo stesso *workflow* fotogrammetrico, eseguendo gli identici passaggi impiegati per la creazione del modello della pavimentazione della villa dei Quintili, nei processi di restauro virtuale bidimensionale, e dei materiali della tomba 643 di Monte Abatone, per l'intervento di restauro virtuale tridimensionale. Quindi, per prima cosa si è effettuato l'allineamento delle fotografie, tramite il pannello “align photos”, impostando il livello dei settaggi su “High”. Lo scopo finale è quello di produrre dalle immagini, tramite il riconoscimento dei punti omologhi e degli elementi geometrici principali, la nuvola di punti sparsa o *sparse cloude*. Dove necessario, per migliorare i risultati della nuvola di punti, si è effettuato un processo di mascheramento delle immagini al fine di rimuovere tutti quegli elementi che avrebbero potuto disturbare il riconoscimento dei punti omologhi (Fig. 130)⁵⁹⁵.

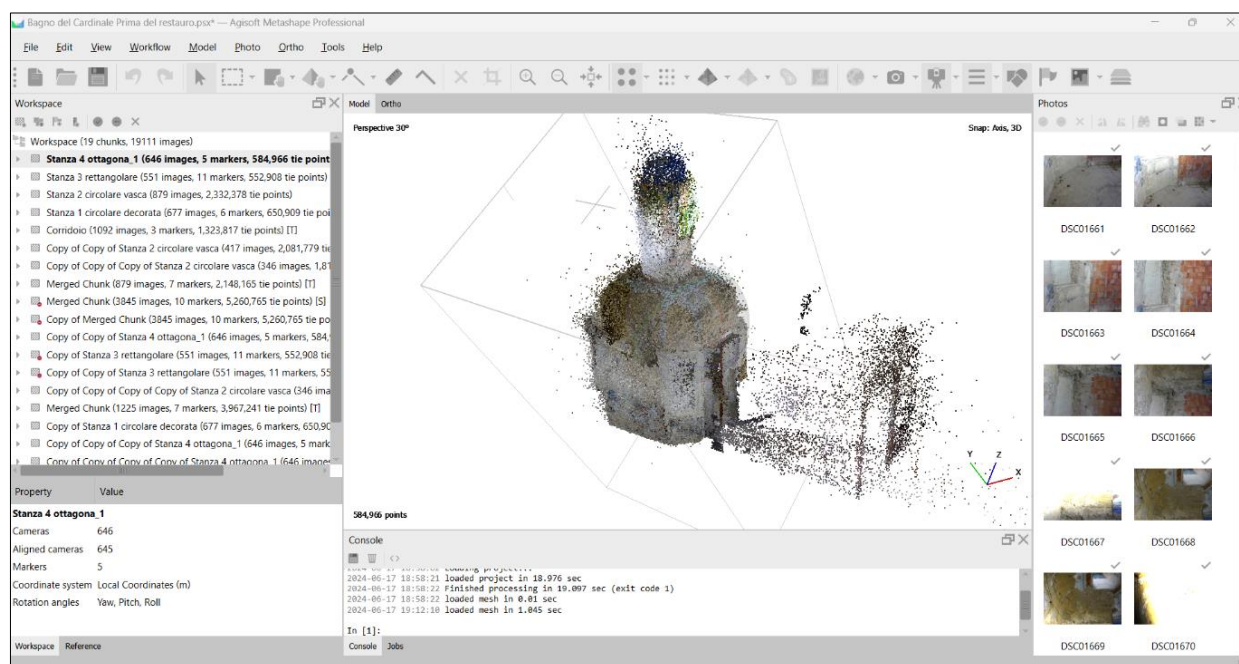


Figura 130 - *Sparse cloude* dell'ambiente E prodotta in Metashape®.

⁵⁹⁵ L'allineamento ha prodotto 584.996 punti per l'ambiente E e l'abside.

Successivamente a partire dalla nuvola di punti sparsa si è potuta produrre la nuvola di punti densa, attraverso la relativa finestra “Build Dense Cloud”. Si è impostata anche qui l’accuratezza ad “High” e il “Depth filter” su “moderato” (Fig. 131)⁵⁹⁶.

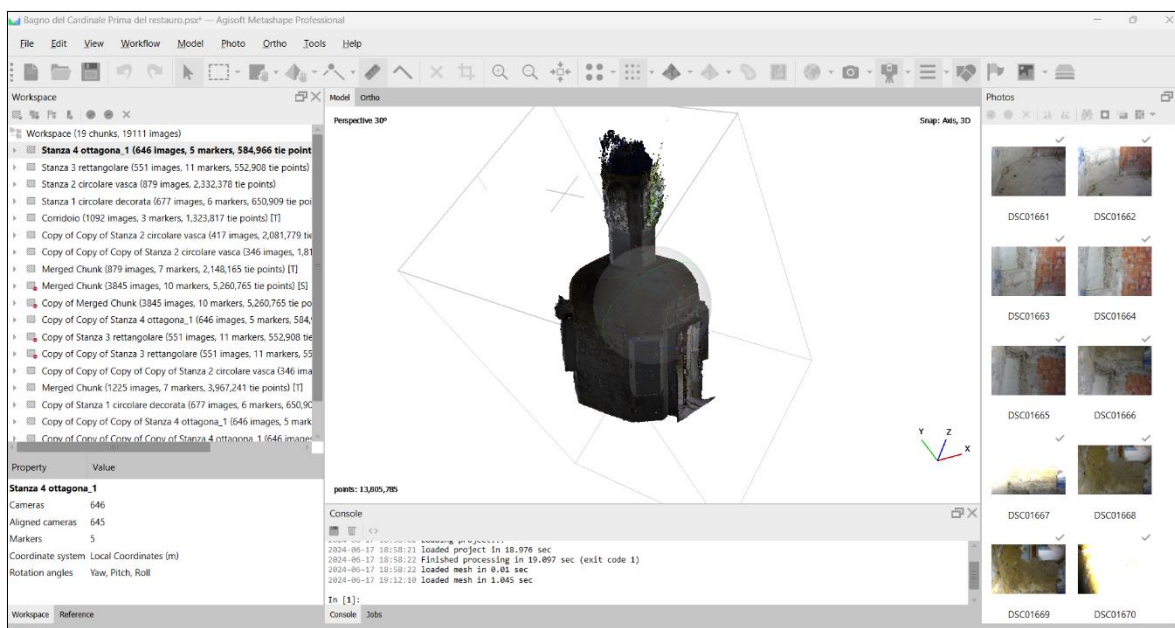


Figura 131 - *Dense cloude* dell’ambiente E prodotta in Metashape®.

Il risultato è stato successivamente raffinato manualmente, tramite lo strumento “lazo”, per rimuovere tutti i punti non necessari o di disturbo per la successiva creazione della *mesh*. Questa è stata prodotta tramite processi di interpolazione triangolare dei vari punti settando le impostazioni su “High” (Fig. 132)⁵⁹⁷.

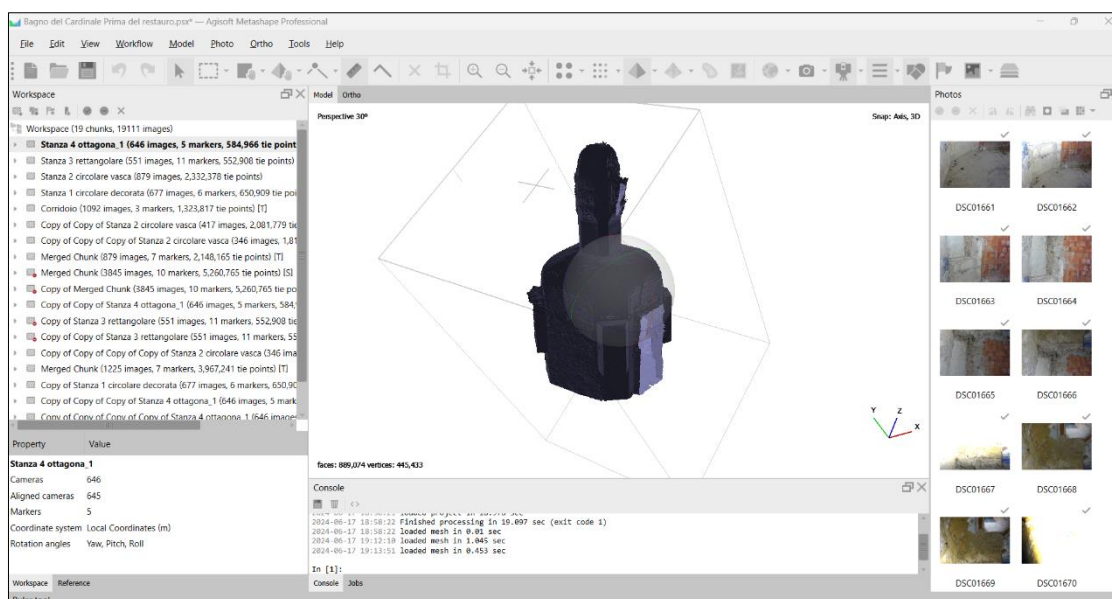


Figura 132 - *Mesh* dell’ambiente E prodotta in Metashape®.

⁵⁹⁶ La creazione della *dense cloude* ha prodotto una nuvola di punti sia per l’ambiente E che per l’abside.

⁵⁹⁷ La *mesh* prodotta tramite questi processi ha 889.074 facce e 445.433 vertici per l’ambiente E, mentre per l’abside ha 30.166 facce e 15.374 vertici.

Sulla *mesh* è stata quindi applicata la *texture* in 8k (8192x8192 pixel), non prima di essere creata tramite processi di mosaicazione, a partire dalle immagini utilizzate per il progetto, ed essere associata al modello come mappa UV. Infine, le misure prese in loco sono state impiegate per riportare in scala gli elementi (Fig. 133).

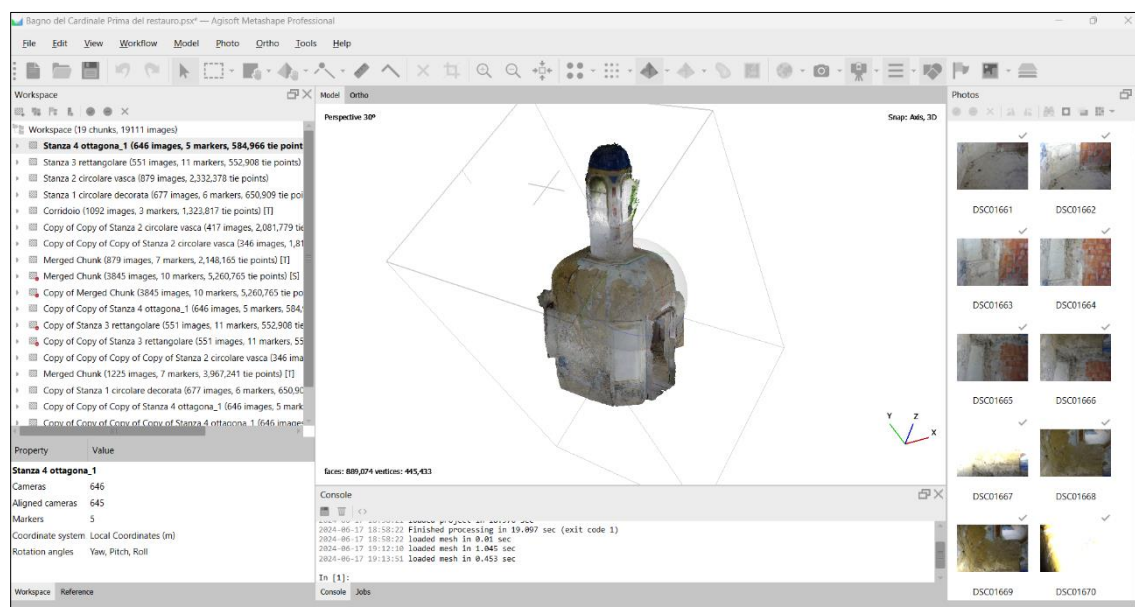


Figura 133 – Modello finale texturizzato dell’ambiente E prodotto in Metashape®.

Una volta concluse le operazioni, dal modello tridimensionale relativo alla porzione di abside su cui si sarebbe effettuato l’intervento di restauro virtuale si è prodotto, tramite la finestra di dialogo “Build Orthomosaic”, l’ortomosaico bidimensionale che è stato esportato e salvato, in formato TIFF, nella cartella prescelta per il plug-in⁵⁹⁸. In seguito, tramite l’apposito pulsante è stato importato all’interno del progetto GIS (Fig. 134).

I modelli tridimensionali sono stati esportati, in formato OBJ, e salvati anch’essi nella cartella del progetto di DRes. Prima di importare, però, questi risultati all’interno di QGIS, si è deciso di creare, a partire dal file .sql scaricabile dall’apposito pulsante di DRes direttamente nella cartella del progetto, il database relazionale, costruito tramite PostgreSQL® e PostGIS®, per documentare tutte le fasi dell’intervento di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale. Il file contenente la banca dati è stato importato e poi eseguito tramite l’interfaccia “Query tool” all’interno del software pgAdmin 4®, così da ricreare l’intero database pronto per essere compilato.

⁵⁹⁸ L’ortomosaico della porzione di abside presenta una risoluzione di 8192x8192 pixel, con la dimensione del pixel equivalente a 0.0014 m.

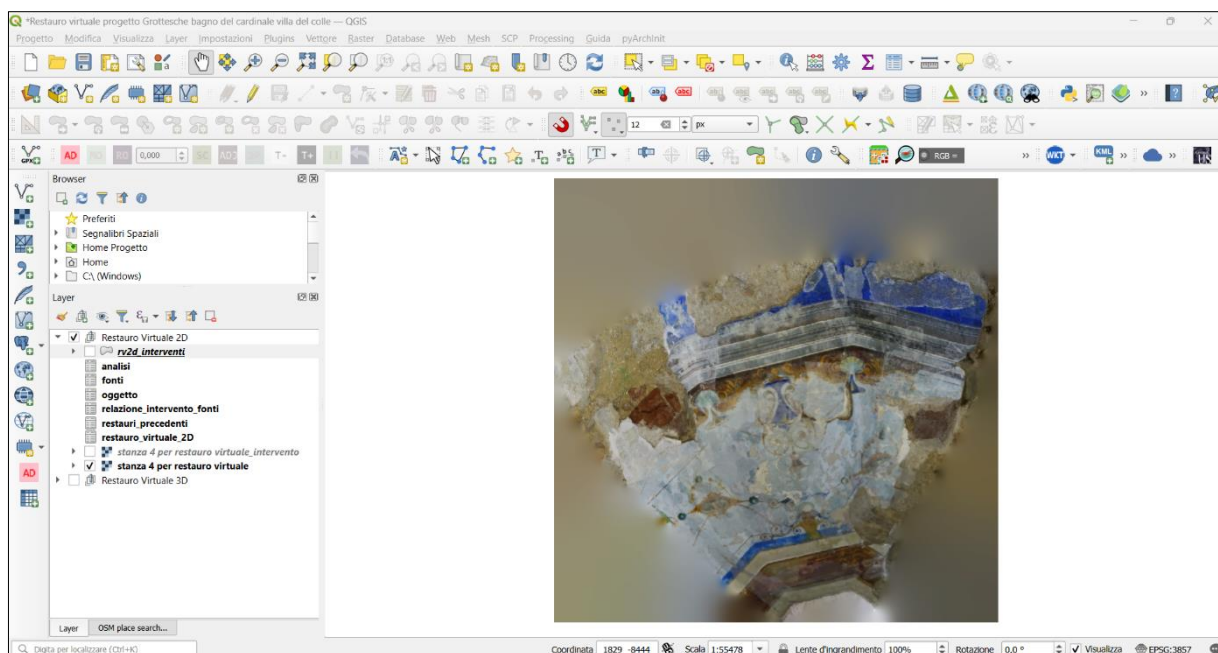


Figura 134 – Ortomosaico della porzione di intervento dell’abside dell’ambiente E importato tramite la piattaforma DRes in QGIS®.

In seguito, il database relazionale è stato connesso con il progetto GIS, permettendo così l’importazione di entrambi gli schemi e tabelle di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale (Fig. 135).

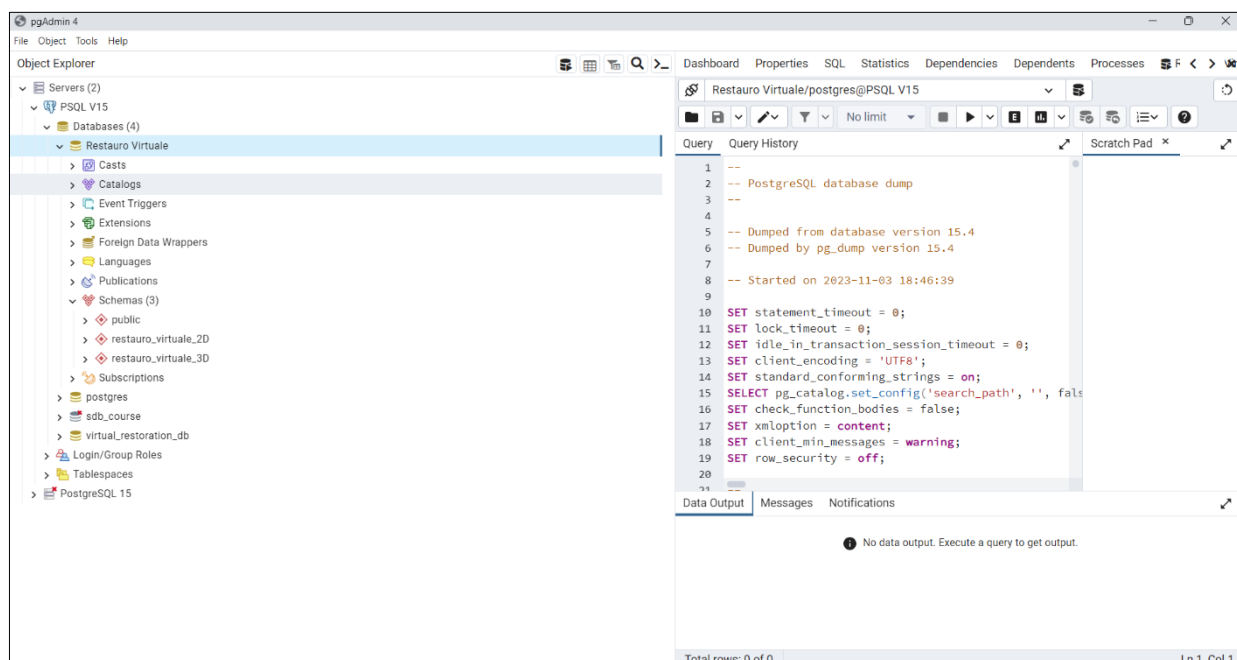


Figura 135 – Il database per documentare gli interventi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale ricostruito in pgAdmin 4® tramite “Query tool” e file .sql della piattaforma DRes.

A questo punto, si è per prima cosa creata la scheda “oggetto” riguardante la porzione a Sud dell’abside, quella su cui si sarebbe effettuato l’intervento di restauro virtuale, e ad essa è stato associato, tramite relazione 1:N, il relativo modello 3D importato come simbologia tridimensionale del *layer* puntuale “rv3d-oggetto”.

Il rilievo tridimensionale dell’intero ambiente E, invece, è stato importato come simbologia tridimensionale di un *layer* puntuale, in formato SHP, creato appositamente attraverso l’uso del pulsante “Create a point vector layer” della piattaforma DRes. Disponendo, quindi, di stesse coordinate entrambi i modelli risultano perfettamente sovrapposti e visualizzabili nonché manipolabili all’interno del progetto GIS tramite l’apertura di una “Mappa 3D” (Fig. 136).

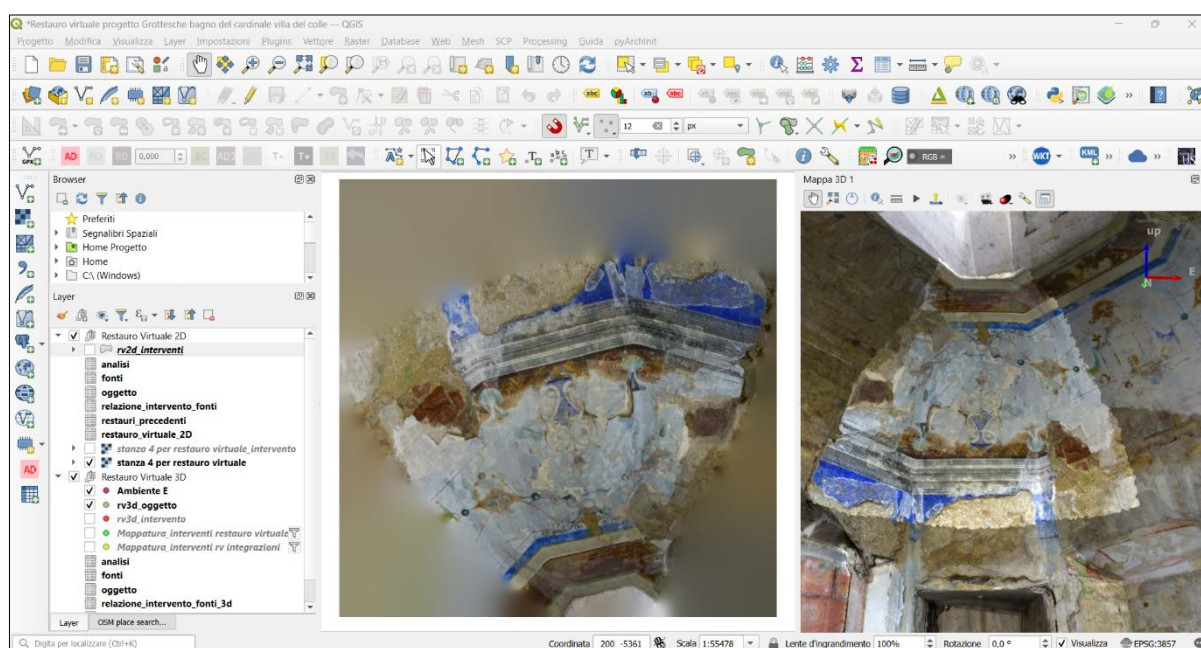


Figura 136 – Visualizzazione dei modelli tridimensionali della porzione di abside prescelta per l’intervento e dell’intero ambiente E tramite “Mappa 3D” su QGIS®.

A questo punto, dopo aver recuperato tutta la documentazione disponibile, si è potuto passare alla fase di esecuzione degli interventi di restauro virtuale decidendo di partire da quelli bidimensionali. Per eseguire tali processi ci si è, quindi, avvalsi del software open source GIMP® aprendolo attraverso il pulsante omonimo all’interno della piattaforma DRes. Il primo passaggio, all’interno del software di fotoritocco, è stato quello di caricare l’ortomosaico relativo alla porzione di abside su cui sarebbero stati condotti gli interventi. Sono stati creati poi due livelli distinti, uno denominato “restauro virtuale”, per contenere tutte le azioni riconducibili con le attività di restauro virtuale vero e proprio, mentre l’altro, definito “restauro virtuale ricostruttivo”, in cui inserire tutti gli interventi maggiormente ricostruttivi. Il passaggio successivo è stato quello di lavorare, tramite gli

specifici strumenti di regolazione, sui valori di esposizione, contrasto e colore per giungere ad una cromia e un'esposizione corrette dell'immagine. L'elaborazione vera e propria di restauro virtuale è stata eseguita tramite l'uso dei *tools* “clona”, nelle aree dove l'integrazione richiedeva maggior intervento, e “cerotto”. Questi sono stati impiegati per andare a rimuovere le fessurazioni presenti e le lacune, mentre, nella fase più ricostruttiva, per andare ad integrare le parti in cui l'intonaco non era più presente o dove le velinature avevano nascosto parte della cromia originale (Fig. 137).

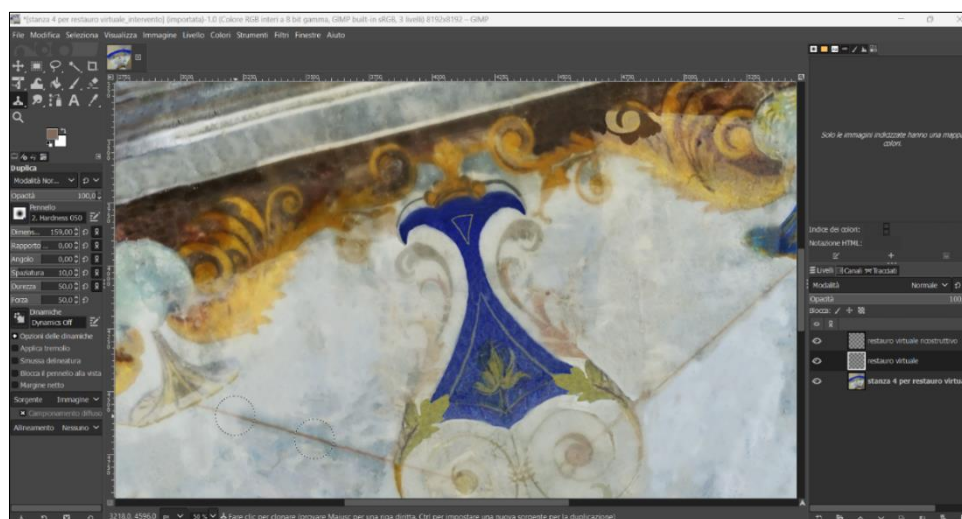


Figura 137 – Fase di intervento di restauro virtuale bidimensionale tramite lo strumento “clona” su GIMP®.

Nei casi più estesi si è deciso di utilizzare, per copiare e incollare interi elementi, lo strumento “selezione” e “copia”. Questo processo è stato impiegato soprattutto in quelle porzioni di raffigurazione dove gli elementi risultavano perfettamente speculari o per quelle parti che riproducevano elementi architettonici simili. In alcuni casi, inoltre, sempre tramite tali strumenti, per completare la ricostruzione di porzioni dell'immagine ormai quasi del tutto scomparse ci si è avvalsi di elementi perfettamente coincidenti e presenti in altre aree dell'abside (Fig. 138).

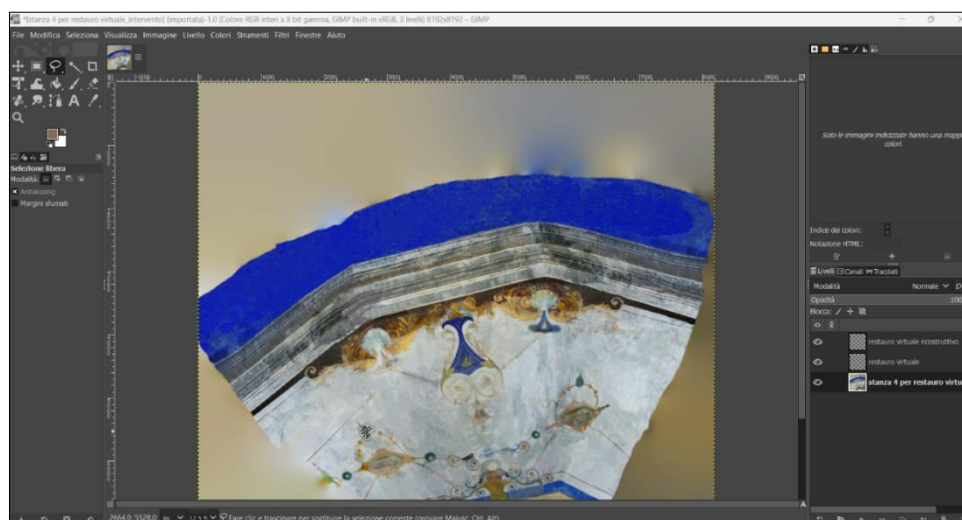


Figura 138 – Uso dello strumento “lazo” per la fase di intervento ricostruttivo su GIMP®

Una volta completati i lavori di restauro virtuale bidimensionale sul software GIMP®, il risultato è stato esportato, sempre in formato TIFF, nella cartella del plug-in per poi essere importato all'interno del progetto GIS tramite l'interfaccia di DRes (Fig. 139).

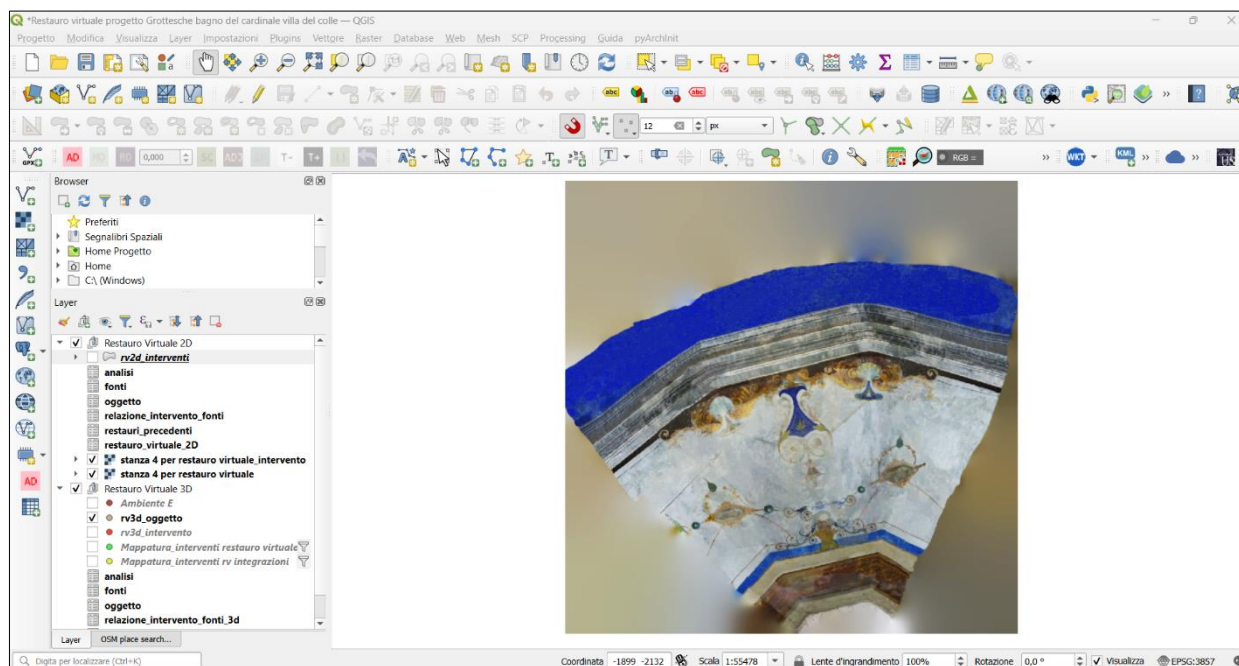


Figura 139 – Fase di importazione, tramite la piattaforma DRes, dell'ortomosaico finale di intervento di restauro virtuale bidimensionale su QGIS®.

Finita la parte di intervento di restauro virtuale che era prettamente a carattere bidimensionale, si è potuti passare a quella associata maggiormente con la struttura tridimensionale dell'abside. A tal fine, tramite il bottone della piattaforma DRes si è aperto il software di modellazione 3D Blender®. All'interno di questo ambiente tridimensionale per prima cosa si è importato, dalla cartella del progetto di DRes, il rilievo fotogrammetrico, in formato OBJ, della porzione a Sud dell'abside. Questo modello 3D, rappresentando la situazione attuale dell'opera, riproduce fedelmente anche tutte le lacune presenti e le aree in cui la caduta dell'intonaco ha messo in luce la superficie muraria sottostante. Per cui l'intervento si è primariamente concentrato sul creare una copia identica per fattezze e forma alla struttura originaria, ma con una geometria quadrangolare topologicamente corretta e con minore numero di poligoni. Il tutto per giungere allo scopo di semplificare le modifiche geometriche da apportare sulla superficie pur mantenendo un dettaglio finale alto. A tal fine, si è deciso nuovamente di impiegare, come nel caso studio del materiale proveniente dalla tomba 643 di Monte Abatone, tecniche di *retopology* e di *texture baking*. Si è quindi utilizzato il modello 3D fotogrammetrico come elemento base, *high poly*, da cui costruire il nuovo modello, *low poly*, a partire

da una geometria quadrangolare che, caratterizzata dal modificatore *Shrinkwrap* e agganciata alla superficie originaria tramite l'attivazione dello *snap*, è stata estrusa più volte (Fig. 140).

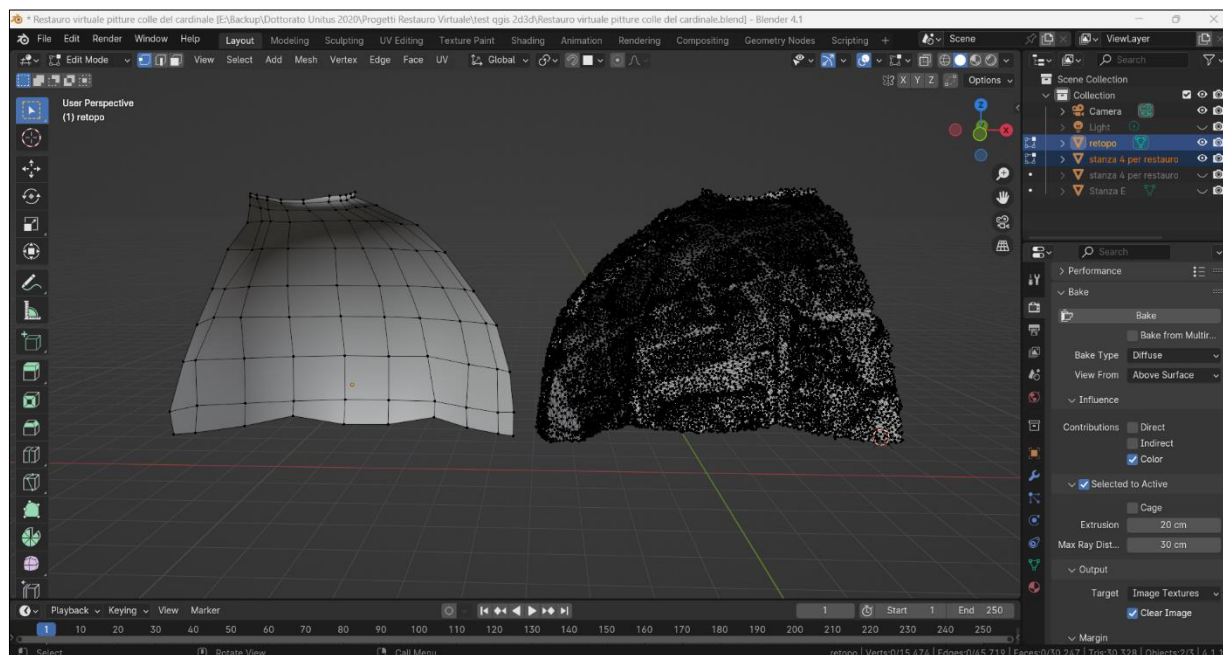


Figura 140 – Modelli *low poly*, a sinistra, e *high poly*, a destra, della porzione di abside su Blender®.

Solo a questo punto, riprodotta fedelmente la forma originaria del modello fotogrammetrico ma con una geometria maggiormente semplificata e topologicamente corretta, si è intervenuto geometricamente sul nuovo oggetto *low poly*, al fine di riempire le aree in cui la caduta dell'intonaco aveva messo in evidenza la muratura sottostante e ridare, successivamente, uniformità alla decorazione pittorica. Per giungere a tale risultato finale, però, per prima cosa si è dovuti passare per i processi di *texture baking*, con i quali si sono potuti trasferire tutti i parametri della *texture* originaria su quella del modello *low poly*, non prima di aver creato una nuova *texture* UV 8K (8192x8192 pixel) su cui è stato eseguito il processo di *unwrapping* automatico della superficie del modello *low poly*. Disponendo così di medesime coordinate UV nelle *texture* dei due modelli, si è potuto importare nel progetto in ambiente Blender® anche l'ortomosaico relativo all'intervento di restauro virtuale ed associarlo, così, con la superficie del modello *low poly* in qualità di *texture* UV, collegando in tale maniera i risultati di restauro virtuale bidimensionale con quelli tridimensionali (Fig. 141).

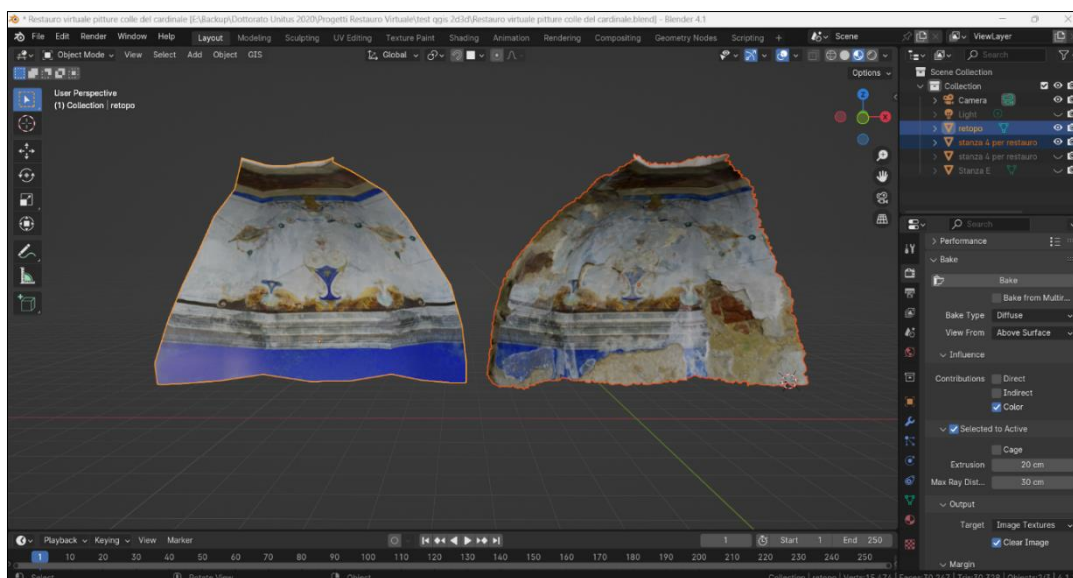


Figura 141 – Modelli *low poly*, a sinistra, texturizzato con il risultato finale dell’elaborazione di restauro virtuale bidimensionale e *high poly*, a destra, con la texture della situazione odierna della porzione di abside.

Il modello 3D risultato finale dell’intervento è stato esportato nella cartella del progetto di DRes in formato OBJ, per poi essere importato nel progetto GIS come simbologia 3D del vettore puntuale relativo alla tabella “rv3d_intervento”, non prima di aver creato e compilato la scheda “restauro virtuale 3D” con tutte le informazioni sull’intervento e quella delle “fonti” impiegate (Fig. 142)⁵⁹⁹.

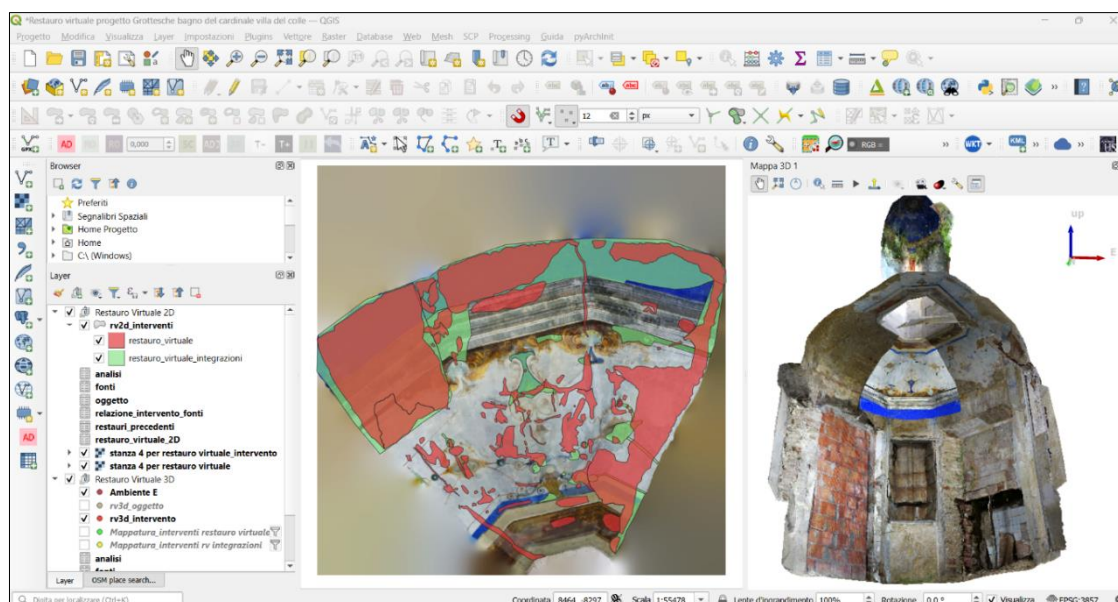


Figura 142 – Mappatura interrogabile degli interventi di restauro virtuale, in rosso, e di restauro virtuale integrativo in verde in ambiente QGIS®.

⁵⁹⁹ In questo specifico caso non è stato necessario compilare le schede di “analisi” e dei “restauro precedenti” in quanto non sono state, per ora eseguite delle analisi, mentre sui restauro precedenti non si avevano informazioni. Si tratta comunque di dati che potranno essere inseriti in un secondo momento andando a completare il quadro delle informazioni relative all’opera e all’intervento di restauro virtuale.

Una volta completata questa parte della documentazione su QGIS, risultava necessario inserire anche quella relativa all'intervento di restauro virtuale bidimensionale. Per prima cosa si sono create e compilate due schede di “restauro virtuale 2D”, una denominata “restauro_virtuale” relativa a tutti gli interventi di restauro virtuale, mentre l'altra “restauro_virtuale_integrazioni” che riporta tutte le azioni legate all'intervento ricostruttivo ed integrativo. Ad esse sono state associate due mappature distinte create tramite il *layer* poligonale “rv2D_interventi”.

Attraverso tale soluzione, quindi, tutte le informazioni contenute nei modelli 3D, nelle mappature e nelle varie schede di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale, sono interrogabili sia direttamente dalle schede stesse, essendo legate tra di loro dalle relazioni 1:N e N:N, sia dalla mappa bidimensionale e tridimensionale tramite un click sulla mappatura o sul modello 3D desiderato (Fig. 143).

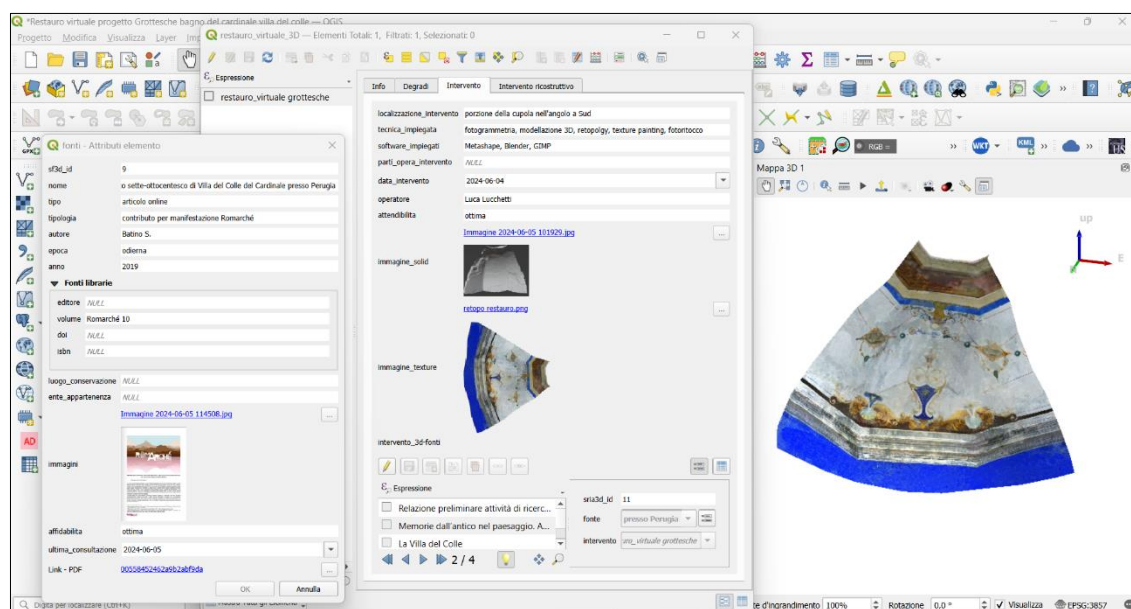


Figura 143 – Visualizzazione del modello 3D di restauro virtuale con la relativa scheda di intervento e tabella delle fonti impiegate, collegate tramite le relazione 1:N e N:N in ambiente GIS.

Infine, per poter visualizzare le mappature direttamente sul modello tridimensionale anche nella “Mappa 3D”, esse sono state esportate da QGIS® singolarmente come immagini in 8K rispettando perfettamente le proporzioni degli ortomosaici, ed importate sul software Blender® dove sono state associate in qualità di *texture* UV a due copie del modello 3D fotogrammetrico della porzione a Sud dell’abside. Questi modelli e relative *texture* sono stati esportati nella cartella del progetto di DRes, in formato OBJ, per essere importati all’interno del progetto GIS come simbologia 3D di due specifici *layer* puntuali denominati “Mappatura_interventi_restaurato_virtuale” e “Mappatura_interventi rv integrazioni”. Si dispone così di tutta la documentazione relativa agli

interventi, sia bidimensionali che tridimensionali, nello stesso progetto permettendo una verifica diretta di tutti i processi legati non solo alle azioni eseguite e ai risultati finali, ma anche a tutte le fonti impiegate e a tutti i processi cognitivi che sono risultati necessari ad arrivare a tali conclusioni (Figg. 144-145-146).

Un progetto che, quindi, mostra la forza di questa piattaforma per tutti gli ambiti del restauro virtuale da quelli puramente bidimensionali o tridimensionali a quelli che potremmo definire “ibridi”, in cui gli elementi delle due tecniche si uniscono per arrivare ad un unico risultato finale e di cui il caso preso in esame risulta un ottimo esempio che può di diritto rientrare non solo nell’ambito della pittura ma anche in quello del restauro virtuale architettonico.

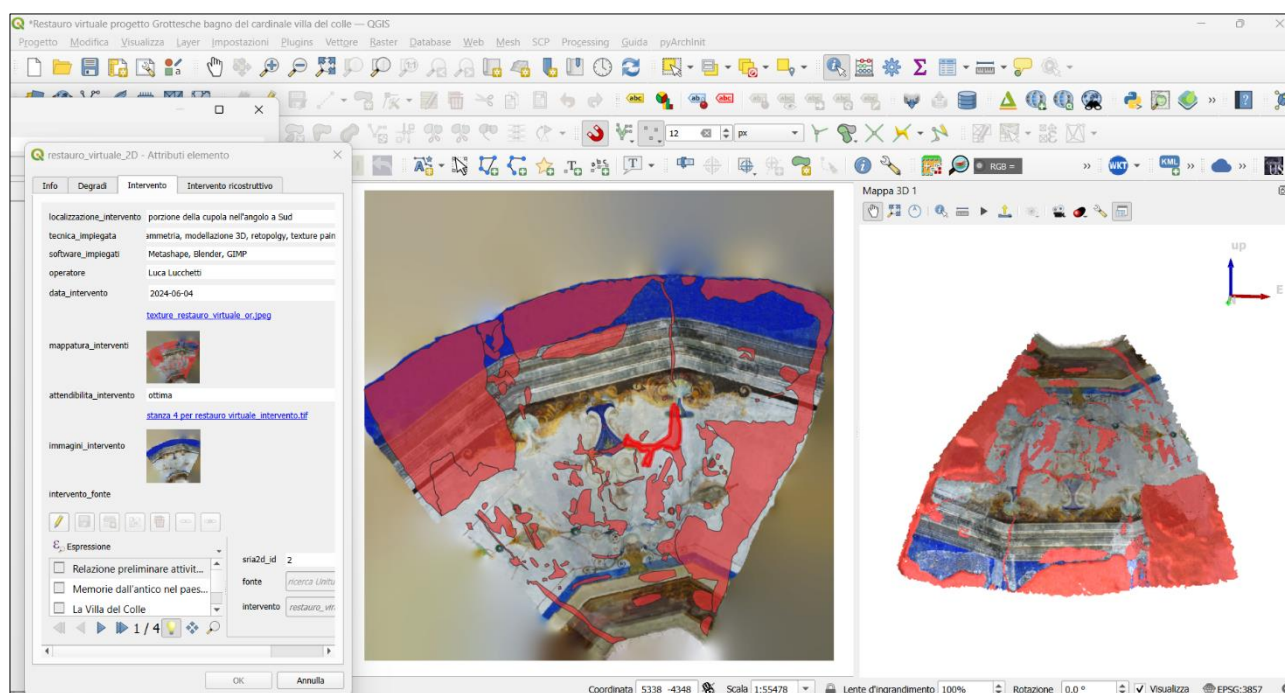


Figura 144 – Mappatura 2D e 3D degli interventi di restauro virtuale e relativa scheda di intervento, visualizzabili ed interrogabili in ambiente GIS.

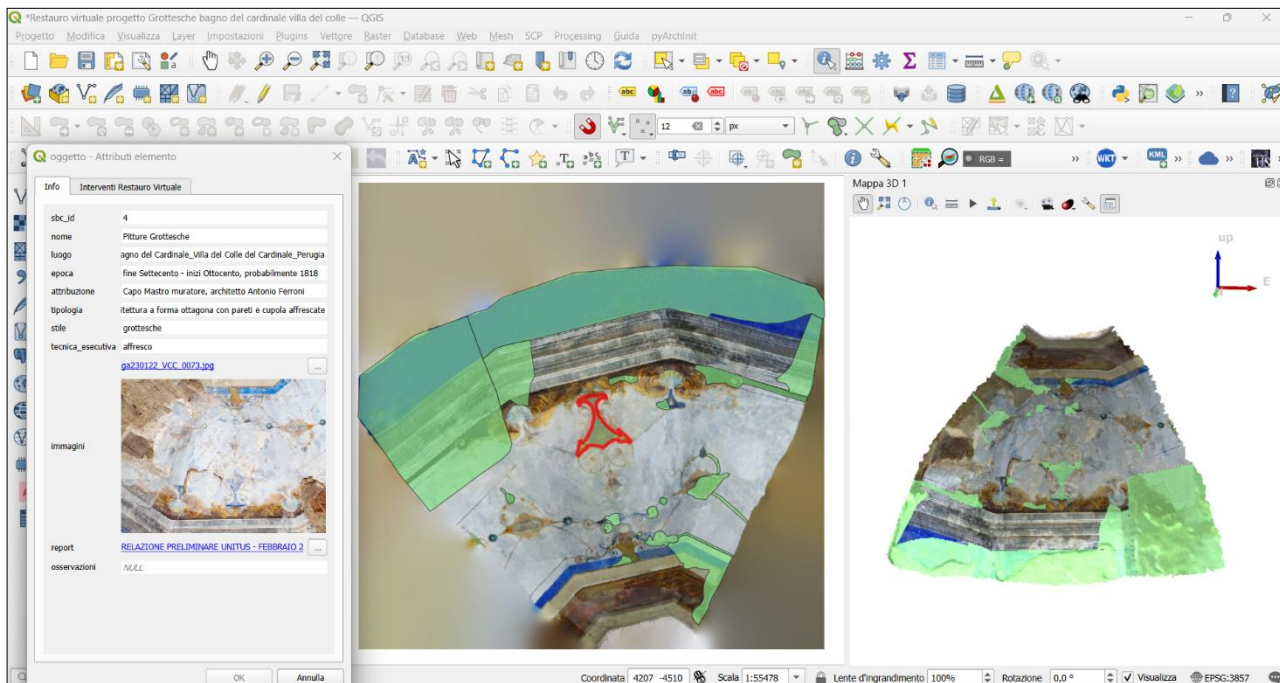


Figura 145 - Mappatura 2D e 3D degli interventi di restauro virtuale integrativi e relativa scheda di intervento, visualizzabili ed interrogabili in ambiente GIS.

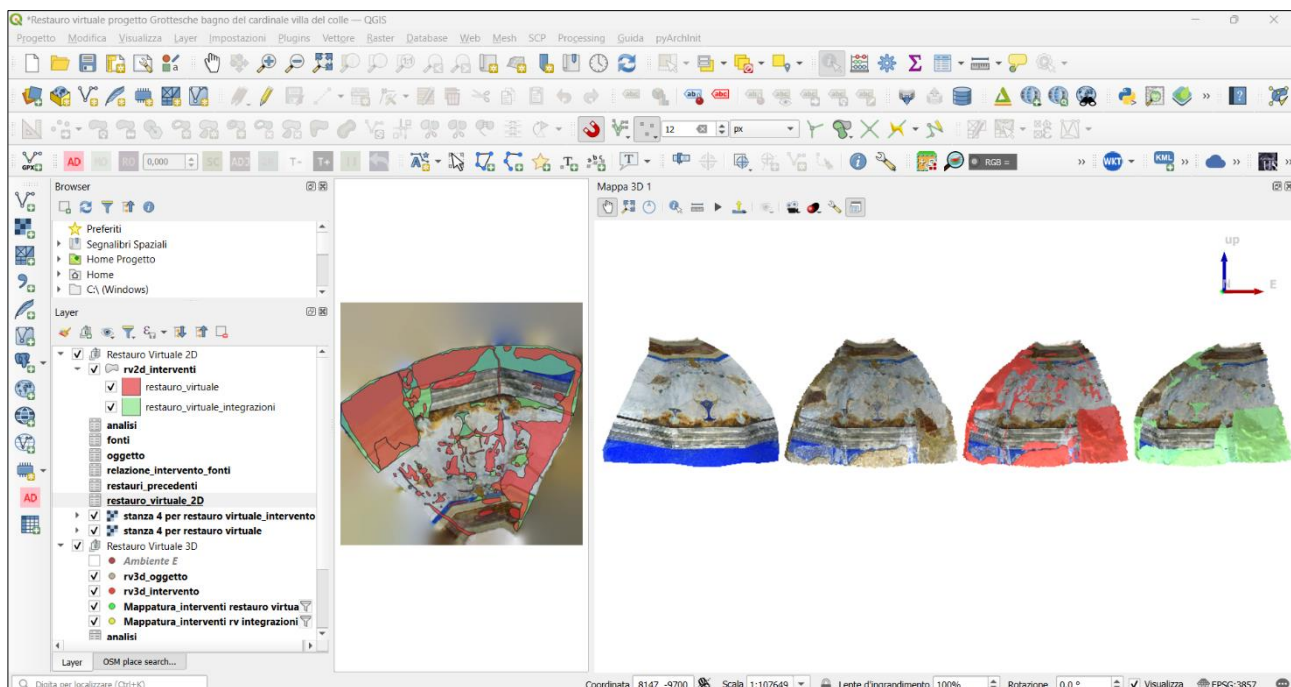


Figura 146 – Visualizzazione di tutti gli interventi e mappature eseguiti in 2D e 3D, mettendo in evidenza come questa piattaforma permetta di confrontare e valutare tutti i risultati ottenuti con i dati originali e con tutta la documentazione contenuta nel database relazionale associato ad ogni intervento.

Conclusioni

In conclusione, il contributo che si sta proponendo in questa tesi è partito dall'idea di voler progettare e sviluppare una piattaforma GIS 3D che, sfruttando ed integrando differenti software, permetta la gestione, in un ambiente unico, dei processi atti alla realizzazione di un restauro virtuale e che, al contempo, garantisca il duplice fine di contenere tutta la mole di informazioni relative all'intervento stesso e di consentire una valutazione critica di tutte le fasi esecutive.

Partendo da questi presupposti l'ideazione e lo sviluppo del plug-in DRes doveva doverosamente confrontarsi con tutte le teorie e pratiche di restauro virtuale precedenti al fine di individuare una linea pratica comune che potesse indirizzare l'implementazione e la veste grafica della piattaforma. A tale scopo, se da una parte i principi del restauro reale identificavano dei limiti teorici parzialmente imprescindibili per il restauro virtuale, dall'altra la suddivisione dei processi e delle tecniche in restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale risultava un elemento che doveva essere preso fortemente in considerazione nella caratterizzazione del *workflow* della piattaforma. Infatti, questo frazionamento delle operazioni in bidimensionale e tridimensionale è il risultato di una scelta metodologica che rispecchia gli obiettivi principali del restauro virtuale. In quanto, mentre per le pitture, i mosaici e i manoscritti l'intervento viene svolto su di un'immagine bidimensionale che riproduce l'apparato iconografico o decorativo al fine di migliorarne la leggibilità, per le architetture, le statue e i manufatti l'elaborazione viene proposta su di un modello tridimensionale che rappresenta fedelmente l'opera stessa e le sue caratteristiche volumetriche. Ovviamente anche le pitture, i mosaici o i manoscritti hanno una loro tridimensionalità associata principalmente al loro supporto, il quale però spesso non può essere virtualmente restaurato. Inoltre, anche nell'ipotesi in cui possa avvenire tale elaborazione, come potrebbe essere il caso delle pitture su tavola o dei mosaici, spesso si tratterebbe più di una ricostruzione tridimensionale semplificata a cui si andrebbero a riapplicare, come *texture*, le immagini bidimensionali relative all'apparato iconografico o decorativo. Ne risulta che, nell'ipotesi di un'elaborazione tridimensionale, si passerebbe comunque per una fase di intervento bidimensionale dell'immagine, un processo che può essere già riscontrato e che viene attuato nei processi di restauro virtuale delle architetture e a cui pitture e mosaici spesso afferiscono.

Questi aspetti, quindi, hanno avuto un forte condizionamento sulla fase di creazione delle funzioni del plug-in e sulla scelta delle varie voci da inserire nell'interfaccia finale, al fine di produrre una piattaforma che potesse essere il più funzionale possibile e nello stesso momento scientificamente accurata.

L'importanza della scientificità e della comprensione dell'idea alla base dell'intervento risultano concetti forti ed evidenti nella bibliografia e nelle pratiche di elaborazione presentate,

confermando l'importanza di produrre una prassi univoca che permetta di documentare i processi non solo con i vari modelli di corrispondenza, ma anche tramite il confronto con tutta la bibliografia e la documentazione prodotta per l'intervento. Da queste considerazioni si può comprendere come una piattaforma GIS 3D, che pone in risalto la possibilità di visualizzare e disporre della documentazione non solo dei risultati finali ma anche di tutte le fasi di elaborazione e, conseguentemente, che consenta di dedurre, dalle informazioni contenute all'interno del database associato, i processi cognitivi che hanno portato a quelle elaborazioni, possa essere uno strumento adatto agli scopi del restauro virtuale ed una risorsa per chiunque voglia approcciarsi a questa tipologia di intervento.

La scelta, inoltre, di optare proprio per un sistema GIS 3D nasce dalla consapevolezza che questi strumenti risultano essere sia facilmente integrabili e ampliabili tramite l'implementazione di nuovi plug-in, sia permettono la gestione di molte tipologie di dati e strumenti differenti. Infatti, all'interno di un singolo ambiente *open source*, quale è QGIS®, questo plug-in permette di gestire e connettere tra di loro i vari programmi, gli ortomosaici, i database e i modelli tridimensionali. Forse proprio gli oggetti 3D risultano essere l'unico vero elemento ancora poco interrogabile o manipolabile all'interno del software, il quale però, data la velocità di sviluppo con cui vengono rilasciate nuove versioni, sicuramente verrà potenziato in futuro permettendo una maggiore versatilità di utilizzo anche di questi elementi. Si possono notare, inoltre, prime conferme di tale ipotesi dal sempre maggior interesse nell'uso di oggetti 3D da parte dei software proprietari, come ArcGIS® di ESRI, che puntano verso l'implementazione di una visualizzazione, modifica ed interrogazione degli elementi che possa essere al contempo tridimensionale e bidimensionale nella stessa schermata. La scelta, quindi, di non utilizzare quest'ultimo programma è dovuta al fatto che la ricerca era maggiormente proiettata verso l'impiego, per quanto possibile, di software *open source*, i quali risultano meno ostici e maggiormente integrativi nelle fasi di sviluppo di nuovi plug-in attraverso l'uso di linguaggi di programmazione come Python.

Questo linguaggio, come descritto nello specifico capitolo, ha permesso di creare agilmente il plug-in, grazie soprattutto al supporto fornito dai programmatori di Alma Sistemi, integrando i vari software necessari alle elaborazioni a partire da QGIS® come ambiente di base per l'implementazione della piattaforma.

La veste grafica di DRes, infatti, rende accessibili tutte le sue funzioni in un'unica schermata che, oltre a permettere l'apertura diretta dei programmi integrati, consente di: fornire il percorso della cartella del progetto; di caricare, direttamente o tramite la creazione di *layer* vettoriali, i risultati delle varie elaborazioni; e, infine, di poter utilizzare un database relazionale strutturato che consente di inserire tutta la documentazione dell'intervento. Infatti, oltre alla visualizzazione e gestione degli

ortomosaici, dei software e dei modelli 3D, vi doveva essere anche la possibilità di scaricare una banca dati integrata che permettesse di contenere, modificare, inserire e interrogare tutta la documentazione prodotta nelle fasi di progettazione ed esecuzione dell'intervento, o degli interventi, di restauro virtuale. Questo aspetto è risultato di fondamentale importanza nella progettazione del plug-in per consentire la verifica diretta dei risultati ottenuti, permettendo così anche la comprensione delle fasi cognitive e operative legate con i processi. Se, però, la struttura finale del database può risultare ottimale per tutte le tipologie di intervento, le varie voci invece possono essere modificate ed integrate in base alle esigenze. Questa prerogativa nasce dal fatto che ogni elaborazione di restauro virtuale presenta delle problematiche, e relative soluzioni, che risultano a sé stanti e per le quali sarebbe stato impossibile produrre un database completo e con voci non ridondanti. Per cui si è preferito permettere all'utente di scaricare il file in formato .sql così da consentire un utilizzo e una modifica autonome, non nella struttura dello schema ma nelle voci interne ad ogni tabella, in base alle esigenze di cui necessita l'elaborazione.

DRes, quindi, dà accesso, all'interno dello stesso sistema, da una parte ad un *workflow* continuo e completo dei vari processi di restauro virtuale bidimensionale, tridimensionale, o un mix dei due strutturandoli secondo iter precisi e, al contempo, fornisce tutti gli elementi necessari ad integrare i risultati con la relativa documentazione prodotta.

Da ultimo, per poter verificare l'attendibilità scientifica del plug-in e testarne al contempo tutte le funzionalità, la ricerca si è mossa verso l'elaborazione di tre casi studio. La scelta di utilizzare tre differenti contesti, come la pavimentazione in opus sectile dell'ambiente A8 della villa dei Quintili, il corredo della tomba 643 di Monte Abatone e le pitture a grottesche dell'abside dell'ambiente E del "Bagno del Cardinale" nella villa del Colle del Cardinale a Perugia, ha posto differenti problematiche e soluzioni. Difatti, se nella fase iniziale tutte le situazioni sono state documentate tramite l'uso del rilievo fotogrammetrico digitale per arrivare a produrre diversi modelli tridimensionali e differenti ortomosaici, per le fasi successive, invece, i percorsi di elaborazione sono stati divisi tra quello di restauro virtuale bidimensionale e quello tridimensionale, per arrivare infine ad associare i risultati finali di intervento con la documentazione contenuta all'interno dei rispettivi database relazionali.

La possibilità di richiamare ed aprire i differenti software, di caricare gli ortomosaici e di creare vettori per poter permettere la visualizzazione dei modelli tridimensionali ha facilitato la velocità di esecuzione dei processi, favorendo una maggior concentrazione verso quelle fasi dell'elaborazione più impegnative che richiedevano un più lungo tempo di esecuzione. Nel medesimo frangente, per consentire a qualsiasi utente di verificare la scientificità dell'intervento e, nello stesso

momento, di favorire future modifiche e rielaborazioni, risulta di fondamentale importanza la possibilità di poter associare tutta la mole di informazioni raccolta e prodotta durante l'intervento all'interno di un unico database che, collegato con i vari vettori ed elaborazioni di restauro virtuale, permetta non solo di visualizzare i dati e, nei casi necessari, di georeferirli, ma anche di interrogarli per arrivare a confrontarsi in maniera critica con tutti i processi eseguiti. Ne consegue che il GIS 3D non diviene solo un contenitore, ma uno strumento che connette in maniera integrativa tutte le fasi di un intervento di restauro virtuale bidimensionale o tridimensionale favorendo un confronto con i processi cognitivi scientifici dell'elaborazione e, al contempo, diviene un archivio della fase conservativa attuale dell'opera e di tutta la documentazione inerente ad essa. Se l'obiettivo finale del restauro virtuale, quindi, è quello di rendere maggiormente leggibile l'opera cercando di portarla ad una fase il più vicina possibile all'originale e al contempo però rispettare, per quanto possibile, i principi del restauro reale, DRes si pone come strumento centrale per il raggiungimento di tali obiettivi, favorendo da una parte la possibilità di produrre più ipotesi di restauro virtuale, a cui è associata la relativa documentazione sempre consultabile in qualsiasi momento, e dall'altra di rispettare i principi del restauro reale, consentendo di mettere in relazione le differenti elaborazioni digitali con l'opera originaria. Si tratta di un plug-in, quindi, che, pur se ancora ampliabile e modificabile, si pone già come un valido strumento scientifico per poter validare gli interventi eseguiti e quelli da eseguire, confermando, in ogni fase, l'attendibilità di una elaborazione che possa rientrare nel più ampio spettro del restauro virtuale.

Bibliografia

AA.VV., *Gli Etruschi e Cerveteri*, Catalogo della Mostra (Milano, 1980-1981), Electa, Milano 1980;

Aguzzi P., Mello E., Pianzola B., *L'uso del calcolatore negli studi scientifici sulle opere d'arte*, in Baldini U. (a cura di), catalogo della mostra *Metodo e scienza: operatività e ricerca del restauro* (Firenze, 23 giugno 1982 - 6 gennaio 1983), Firenze 1982, pp. 325-326

Albertario G., *Progettazione CAD*, in Suzzani R. (a cura di), *Manuale dello stampista. 2ª Edizione*, Tecniche Nuove, Milano 2002, pp. 283-330;

Aliaga D.G., Law A.J., Yeung Y.H., *A virtual restoration stage for real-world object*, in ACM Transaction on Graphics, 27, 5, 149, 2008, pp. 1-10;

Aletti E., *La tecnica della pittura greca e romana e l'encausto*, L'Airone per l'Arte tipografica, Roma 1951;

Almagro A., *Preserving the Architectural Heritage of al-Andalus. From Restoration to Virtual Reconstruction*, in Al-Masaq, Vol. 19, No. 2, September 2007, pp. 155-175;

Amato E., Ventrella G., *I Progimnasmi di Severo di Alessandria (Severo di Antiochia?)*, De Gruyter, Berlino 2009;

Amura A., Tonazzini A., Salerno E., Pagnotta S., Palleschi V., *Color segmentation algorithms to support automatism of graphic documentation in restoration*, in Bottoli A., Marchiafava V. (a cura di), *Colour and Colorimetry Multidisciplinary Contributions Vol XV B*, atti della 15th Conferenza del colore (Macerata, 5-7 settembre 2019), Milano 2019, pp. 25-32;

Angelelli C., *I pavimenti del complesso abitativo tardorepubblicano e protoimperiale sotto la chiesa di S. Pudenziana a Roma*, in Angelelli C. (a cura di), *Atti dell'XI Colloquio dell'AISCOM* (Ancona, 16-19 febbraio 2005), Tivoli 2006, pp. 287-300;

Angelelli C., *La Basilica Titolare di Santa Pudenziana. Nuove ricerche*, PIAC - Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana – Roma, Città del Vaticano 2010;

Angelelli C., *Le ville del suburbio di Roma tra età repubblicana e tarda antichità. Integrazioni e aggiornamenti attraverso l'analisi dei contesti pavimentali*, in *Amoenitas*, V, 2016, pp. 9-151;

Annoni A., *Scienza ed arte del restauro architettonico. Idee ed esempi*, Edizioni Artistiche Framar, Milano 1946;

Anzani M., Brunetto A., Rabbolini A., Sansonetti A., *Un restauro difficile. La scultura "adamo" di Stoldo Lorenzi conservata nel museo d'arte antica del castello sforzesco di Milano*, in Atti del XVI Congresso Nazionale IGIIC (Trento, 25-27 ottobre 2018), Nardini editore, Firenze, 2019, pp. 195-203;

Argan G. C., *Progettazione*, in *Enciclopedia Universale dell'Arte*, XI, Istituto Poligrafico di Stato, Roma 1958, p. 60;

Azéma A., Mille B., Exhegut P., De Sousa Meneses D., *An experimental study of the welding techniques used on large Greek and Roman bronze statues*, in *Historical Metallurgy*, 45, 2, 2011, pp. 71-80;

Baldini U., *Teoria del restauro e unità di metodologia*, Nardini, Firenze 1997;

Baldini I., Baldassarri P., *Il progetto Siria: una proposta di archiviazione, ricerca e presentazione dati per Gortina e Mitropolis*, in *Lanx*, 4, 2009, pp. 73-86;

Baldrighi L., *Luca Beltrami architetto: Milano tra Ottocento e Novecento*, Electa, Milano 1997;

Baracchini C., Cesana R., Lanari P., Scopigno R., Tecchia F., Vecchi A., *SICAR: A web-based 2D/3D GIS for the documentation of restoration analysis and intervention*, in Atti del workshop Intelligenza Artificiale per i Beni Culturali (Pisa, 23 settembre 2003), Pisa 2003, pp. 1-5;

Baracchini C., Lanari P., Ponticelli P., Parenti R., Vecchi A., *SICaR: Un sistema per la documentazione georeferenziata in rete*, in atti del Convegno di Studi sulle pitture murali. Riflessioni, Conoscenze, Interventi, (Bressanone 12-15 luglio 2005), Venezia 2005, pp. 735-747;

Baratin L., Bertozzi S., Checcucci G., Moretti E., Saccuman R., *Sistemi GIS applicati al restauro: Indagini sui dipinti su tavola*, in De Luca D. (a cura di), *I Giovani e il restauro Atti del convegno Arte nel tempo: significato, trasformazione e conservazione*, (24-26 febbraio 2016, Museo nazionale romano, Palazzo Massimo, Roma), Il prato, Roma 2016, pp. 123-134;

Baratin L., Cattaneo A., Moretti E., *Porta Valbona a Urbino: la sua rappresentazione tra storia e restauro*, in Navarro Palazón J., García-Pulido L.J. (a cura di), *Defensive Architecture of the Mediterranean*, Vol XII, atti del convegno FORTMED2020 - Defensive Architecture of the Mediterranean (Granada, 4-6 novembre 2020), 2020, pp. 1045-1052;

Baratti G., *Verso un approccio archeologico al rilevamento e alla modellazione tridimensionale*, in LANX 13, 2012, pp. 11 - 26;

Barbacci A., *Il Restauro dei monumenti in Italia*, Istituto Poligrafico di Stato, Roma 1956;

Barbier F., *Storia del libro dall'antichità al XX secolo*, Edizioni Dedalo, Bari 2004;

Barcelò J.A., *Virtual Reality for Archaeological Explanation. Beyond "Picturesque" Reconstruction*, in *Archeologia e Calcolatori*, 12, 2001, pp. 221-244;

Bartolomucci C., Bonzagni D., Trizio I., *Restauro e valorizzazione dei centri storici dopo il sisma del 2009: un GIS 3D per il progetto di reintegrazione delle lacune urbane*, in AA VV. Atti 16a Conferenza Nazionale ASITA, Vol. 1, (Fiera di Venezia, 6 – 9 novembre Milano, 2012, pp. 159-166;

Basile G., *Che cos'è il restauro*, Editori Riuniti, Roma 1989;

Basile G., *I colori di Giotto. La basilica di Assisi: restauro e restituzione virtuale*, Silvana, Cinisello Balsamo 2010;

Batino S., Memorie dall'antico nel paesaggio. Appunti sul parco sette-ottocentesco di Villa del Colle del Cardinale presso Perugia, in atti RomArché parla l'archeologia (Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia, 30 maggio – 2 giugno 2019), 2019, pp. 1-10;

Bea M., Angas J., *Geometric documentation and virtual restoration of the rock art removed in Aragón (Spain)*, in Journal of Archaeological Science: Reports, Vol.11, Febbraio 2017, pp. 159-168;

Beck D., Bentz M., Birkner F., Briesack C., Carafa V., Coen A., Galiffa F., Gilotta F., Lucchetti L., Micozzi M., Rizzo C., *Die Monte Abatone-Nekropole von Cerveteri. Vorbericht zur Grabungskampagne 2019*, in Kölner und Bonner Archaeologica 9/10, 2019/20, 2021, pp. 59-68;

Beck D., Bentz M., Birkner F., Briesack C., Carafa V., Coen A., Galiffa F., Gilotta F., Lucchetti L., Micozzi M., Morpugo G., Müller T., Rizzo C., *Die Monte Abatone-Nekropole von Cerveteri. Vorbericht zur Grabungskampagne 2021*, in Kölner und Bonner Archaeologica 11/12, 2021/22, 2023, pp. 77–93

Becker Y., Bentz M., Briesack C., Coen A., D'Anna T., De Gemmis A., Galiffa F., Gilotta F., Lucchetti L., Micozzi M., Morpugo G., Müller T., *Die Monte Abatone-Nekropole von Cerveteri. Vorbericht zur Grabungskampagne 2022*, in Kölner und Bonner Archaeologica 11/12, 2021/22, 2023, pp. 95–111

Beghelli M., *La scultura altomedievale. Ateliers, artigiani itineranti e tecniche di produzione*, in Beghelli M., De Marchi P.M. (a cura di), *L'alto medioevo. Artigiani e organizzazione manifatturiera*, BraDypUS, Bologna 2014, pp. 9-26;

Belingardi G., *Il metodo degli elementi finiti nella progettazione meccanica*, Collana di Progettazione e costruzione delle Macchine, Levrotto&Bella, Torino 1995;

Benedettini M.G., Cosentino R., *L'altipiano delle Onde Marine nella necropoli della Banditaccia (Cerveteri): il tumulo della "Protome Equina" e il suo insospettabile corredo*, in Mediterranea 14, 2017, pp. 7-38;

Bennardi D., Furferi R., *Restauro Virtuale, Tra ideologia e metodologia*, Edifir, Firenze 2007;

Bergquist B., Söderholm P., *Predictive Modeling for Estimation of Railway Track Degradation*, in Kumar U., Ahmadi A., Kumar Verma A., Varde P. (a cura di), *Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety. An Industry Perspective*, Springer International Publishing, Cham, pp. 331-348;

Bertozzi S., Baratin L., Moretti E., *Superfici Pittoriche e Supporti: GIS Analysis, Caratterizzazione e Monitoraggio*, In Atti della Conferenza ESRI Italia 2015, (Roma, 15-16 aprile 2015), Roma 2015, pp. 1-9;

Biagi Maino D., Maino G. (a cura di), *Principi ed applicazioni del restauro virtuale*, Edifir editore, Firenze 2017;

Bianchi A., *Cartografia storica della Tenuta: digitalizzazione e utilizzo*, in Bianchi A. (a cura di), *La Tenuta Colle del Cardinale. La storia, l'archivio, la cartografia*, Soprintendenza Archivistica per l'Umbria, Perugia 2012, pp. 225-336;

Bianchi G., *Trasmissione dei saperi tecnici e analisi dei procedimenti costruttivi di età medievale*, in *Archeologia dell'Architettura*, I, Insegna del Giglio, Firenze 1997, pp. 53-64.

Bianchini M., *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Aracne editrice, Roma 2008;

Bianco G., Bruno F., Tonazzini A., Salerno E., Savino P., Zitova B., Sroubek F., Console E., *A framework for virtual restoration of ancient documents by combination of multispectral and 3D imaging*, in Puppo E., Brogni A., De Floriani L. (a cura di), *Proceedings book of the 8th Eurographics Italian Chapter Conference* (Genova, 18-19 novembre 2010), 2010, pp. 33-40;

Bianco M., *Colore. Colorimetria. Sistema di colore Carlieri-Bianco*, Nardini Editore, Firenze, 2011;

Bigliardi G., *Il sistema informativo territoriale archeologico della città di Parma*, in *Archeologia e Calcolatori* 18, 2007, pp. 75-100;

Bigliardi G., *La fabbricazione digitale per i beni culturali*, in Colombo A., Perzola V. (a cura di), *Le tecnologie digitali al servizio della conservazione dall'integrazione scultorea al restauro virtuale*, Atti

del convegno le tecnologie digitali al servizio della conservazione. Dall'integrazione scultorea al restauro virtuale (Vicenza 19 marzo 2016), Il prato edizioni, Saonara 2017, pp. 57-90;

Bilis T., Kouimtoglou T., Magnisali M., Tokmakidis P., *The use of 3D scanning and photogrammetry techniques in the case study of the roman theatre of Nikopolis. Surveying, Virtual Reconstruction and restoration study*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, (1–3 March 2017, Nafplio, Greece), 2017, pp. 97-103;

Biswas S., Lovell B.C., *Bézier and Splines in Image Processing and Machine Vision*, Springer-Verlang, London 2008;

Bogdani J., *GIS in Archeologia*, in Giogi E. (a cura di), Groma 2. In profondità senza scavare. Metodologie di indagine non invasiva e diagnostica per l'archeologia, 2009, pp. 421 – 438.

Bollati M., Petoletti M., *Manoscritti miniati in Italia della Biblioteca Ambrosiana (fondo inferior). Il trecento*, Viella, Roma 2022;

Boninno A. e Costanzi Cobau A. (a cura di), *Le sculture di Monte Prama. Conservazione e Restauro*, Gangemi editore, Roma 2015;

Bordoni L., Ardissono L., Barceló J.A., Chella A., de Gemmis M., Gena C., Iaquina L., Lops P., Mele F., Musto C., Narducci F., Semeraro G., Sorgente A., *The contribution of AI to enhance understanding of Cultural Heritage*, in Intelligenza Artificiale, 7(2), 2013, pp. 101-112;

Borra D., *La modellazione virtuale per l'architettura antica. Un metodo verso l'isomorfismo percettivo*, in Archeologia e Calcolatori, 11, 2000, pp. 259-272;

Botticelli G., *Metodologia di restauro delle pitture murali*, Centro Di, Firenze 1992;

Bova S., *Il restauro tra storia e coscienza del tempo*, Trauben, Torino 2002;

Bovini G., Argan C., Portoghesi P., Fischer P., *Mosaici d'artisti contemporanei*, Longo editore, Ravenna 1986;

Bracher T., *La patina nel restauro delle opere d'arte*, Nardini, Firenze 1990;

Brandi C., *Teoria del restauro*, Einaudi editore, Torino 1977;

Brienza E., *Valle del Colosseo e pendici nord orientali del Palatino. La via tra Valle e Foro: dal dato stratigrafico alla narrazione virtuale (64 d.C. – 138 d.C.)*, Edizioni Quasar, Roma 2017;

Brogiolo G.P., *Archeologia dell'edilizia storica. Documenti e metodi*, New Press, Como 1988;

Brogiolo G.P., *Dall'Analisi Stratigrafica degli Elevati all'Archeologia dell'Architettura*, in Mannoni T. (a cura di), *Archeologia dell'Architettura. II, Insegna del Giglio*, Firenze 1997, pp. 181-184;

Brokaw C., *The Dating of the Protocorinthian Korymbos*, in *Essays in Memory of Karl Lehmann*, New York 1964, pp. 49-54;

Brusaporci S., Trizio I., *La "Carta di Londra" e il patrimonio architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione*, in *SCIRES-IT*, Vol. 3, 2 (2013), pp. 55-68;

Buzzanca G., *Si restaurano i byte? Dal restauro virtuale al restauro del virtuale, ovvero dagli 'smanettoni' all'applicazione della critica del restauro nella conservazione del digitale*, in *OPD Restauro*, 20, 2008, pp. 131-138;

Buzzanca G., *Si restaurano i Byte? Dal restauro virtuale al restauro del virtuale ovvero dagli "smanettoni" alla applicazione della critica del restauro nella conservazione del digitale*, in *OPD Restauro*, 21, 2009, pp. 183-192;

Buzzanca G., *Si restaurano i Byte? Dal restauro virtuale al restauro del virtuale ovvero dagli "smanettoni" all'applicazione della critica del restauro nella conservazione del digitale (terza parte)*, in *OPD Restauro*, 22, 2010, pp. 139-145;

Buzzanca G., *Who does what? Computer/arte/conservazione, restauro*, in *Kermes*, Anno XXXII, 114-115, Aprile-Settembre 2019, pp. 151-153;

Cagnana A., *Archeologia dei materiali da costruzione*, All'Insegna del Giglio, Firenze 2000;

Cagnini A., Fratini F., Galeotti M., Marchesi M., Martinelli C., Porcinai S., *Restauro, analisi e musealizzazione di una porzione di mosaico di età augustea da Bononia*, in Atti del XX colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (Roma, 19-22 marzo 2014), Roma 2015, pp. 329-335;

Calliada F., Farfarini F., Vercelli A., Travaini D., *Le parti che costituiscono un computer*, in Grassi R., Pinto G., Guglielmi G., Siani A. (a cura di), *Elementi di informatica diagnostica per immagini*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2010, pp. 19-79;

Camagni P., Nikolassy R., Della Puppa M., *SQL. Il Linguaggio per le basi di dati*, Hoepli, Milano 2005;

Campanaro D.M., Landeschi G., Dell'Unto N., Leander Touati A.M., *3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow*, in *Journal of Cultural Heritage* 18 (2016), pp. 321–332;

Canciani M., Zampilli M., Saccone M., *A 3D GIS method applied to cataloging and restoring: the case of aurelian walls at Rome*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2, XXIV International CIPA Symposium, (2 – 6 September 2013, Strasbourg, France), 2013, pp. 143-148;

Cappelletto M.E., *Tra manutenzione e "ri-restauro": il caso studio di un pavimento in opus sectile ricollocato in situ su pannelli a nido d'ape di alluminio*, Tesi di laurea non pubblicata, Università degli Studi della Tuscia, A.A. 2021/2022;

Cappellini V., *Il calcolatore e l'arte*, in *Civiltà delle macchine*, vol. 27, 1979, pp. 53-58.

Cappellini V., Benelli G., Conese C., Del Re E., *Il calcolatore per le opere d'arte*, in Baldini U. (a cura di), *catalogo della mostra Metodo e scienza: operatività e ricerca del restauro* (Firenze, 23 giugno 1982 - 6 gennaio 1983), Firenze 1982, pp. 327-332;

Carmassi C., *Approcci metodologici. Progetto di conservazione. Metodologie di conservazione nel restauro*, in Zevi L. (a cura di), *Il Manuale del Restauro Architettonico*, Mancosu Editore, Roma 2001, pp. H1-H60;

Carpinteri A., *Scienza delle costruzioni 1*, Società Editrice Esculapio, Bologna 2023;

Casagrande F., *L'evoluzione dal modello digitale alla stampa 3D*, in Biagi Maino D., Maino G. (a cura di), *Principi e applicazioni del restauro virtuale*, Edifir, Firenze 2017, pp. 45-54;

Casanova M., Acacia S., *Il contributo del GIS nel progetto di restauro. La copertura della Pieve di Novi*, in GEOmedia, supplemento, 2, 2014, pp. 1-6;

Casazza O., *Il restauro pittorico nell'unità di metodologia*, Nardini, Firenze 2007;

Cassata M.C., *Coniugare il Patrimonio archeologico del Meridione d'Italia con sicurezza, legalità e turismo culturale*, in AAVV., *La valorizzazione dei siti archeologici: obiettivi, strategie e soluzioni*, XI Borsa Mediterranea del turismo archeologico, (Paestum, 13 – 16 novembre 2008), 2008, pp. 11-14;

Castelli C., *Tecniche di costruzione dei supporti lignei dipinti*, in Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A. (a cura di), *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, Edifir, Firenze 2012, pp. 73-130;

Castelli C., Santacesaria A., *Il restauro dei supporti lignei*, in Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A. (a cura di), *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, Edifir, Firenze 2012, pp. 165-190;

Castleford J., *Archaeology, GIS, and the time dimension: An overview*, In Lock G., Moffett J. (A cura di), CAA91. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series s577, Tempus Reparatum, Oxford 1991, pp. 95-106;

Cerasuolo A., *Raimondo di Sangro e le sperimentazioni sull'encausto in Europa: la Madonna con Bambino di Giuseppe Pesce donata a Carlo di Borbone*, in Polygraphia, 1, 2019, pp. 85-106;

Ceraudo G., *Introduzione all'aerofotogrammetria applicata all'archeologia*, Il Grande Blu, Ponza 1999;

Ciatti M., *Dipinti su tavola: riflessioni sulla storia della produzione e della conservazione dei supporti*, in Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A. (a cura di), *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, Edifir, Firenze 2012, pp. 17-34;

Codd E.F., *A relational model of data for large shared data banks*, Communications of the ACM, 13(6), Giugno 1970, pp. 377–387;

Colombo A., Perzola V. (a cura di), *Le tecnologie digitali al servizio della conservazione dall'integrazione scultorea al restauro virtuale*, Atti del convegno le tecnologie digitali al servizio della conservazione. Dall'integrazione scultorea al restauro virtuale (Vicenza 19 marzo 2016), Il prato edizioni, Saonara 2017;

Concina E., *Materiali, tecniche, ricerche espressive del mosaico e dei rivestimenti lapidei tardoantichi e bizantini*, in Concina E., Flores David A., Guidetti M. (a cura di), *Luce dell'invisibile. Itinerari del mosaico intorno al Mediterraneo orientale*, Marcianum press, Venezia 2011, pp. 37-52;

Connolly J., Lake M., *Geographical Information Systems in Archaeology*, Cambridge University Press, Cambridge 2006;

Continenza R., Trizio I., Giannangeli A., Tata A., *HBIM per il progetto di restauro: l'esempio della chiesa di San Cipriano a Castelvechio Calvisio (L'Aquila)*, in *Disegnarecon*, volume 9(16), giugno 2016, pp. 315-323;

Conti A., *Manuale di restauro*, Einaudi, Torino 2002;

Copedé M., *La carta e il suo degrado*, Nardini editore, Firenze 2003;

Corallini A., Limoncelli M., *Pittura antica e restauro virtuale*, in Giulierini P., Corallini A., Sampaolo V. (a cura di), *Picta fragmenta La pittura vesuviana. Una rilettura*, atti del convegno Picta fragmenta. Rileggendo la pittura vesuviana, (Napoli, 13-15 settembre 2018), Cinisello Balsamo 2020, pp. 377-390;

Corradi M., *Questioni di meccanica delle murature e conservazione delle strutture storiche*, in Archeologia dell'Architettura, I, Insegna del Giglio, Firenze 1996, pp. 101-107;

Costanzi Cobau A., *Il restauro virtuale*, in Boninno A. e Costanzi Cobau A. (a cura di), *Le sculture di Monte Prama. Conservazione e Restauro*, Gangemi editore, Roma 2015, pp. 155-162;

Costato Costantini R., *La natura dei dipinti su tela*, in Costantini G.M., Costato Costantini R., Fiori C. (a cura di), *Il restauro dei dipinti 'olio su tela'*, Clueb, Bologna 2011, pp. 34-64;

Coward C., *A Beginner's guide to 3d modeling*, No starch press, San Francisco 2019;

Cremonesi P., *Patine e vernici antiche sui dipinti*, in Tiano P., Pardini C. (a cura di), *Le patine. Genesi, Significato, Conservazione*, Atti del Workshop Le patine. Genesi, Significato, Conservazione, (Firenze, 4-5 maggio 2004), Firenze 2011, pp. 45-54;

Crippa M. A., *L'architettura ragionata. Estratti dal dizionario*, Jaca Book, Milano 1982;

D'Andrea A., *Il GIS nella produzione delle carte dell'impatto archeologico: l'esempio di Pontecagnano*, in Archeologia e Calcolatori 10, 1999, pp. 227-237;

D'Andrea A., Niccolucci F., *L'informatica dell'archeologo: Alcune istruzioni per l'uso*, In Archeologia e Calcolatori, 12, 2001, pp. 199-220;

D'Apostoli R., *Manuale di topografia*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna, 2012;

D'Orazio M., Bernardini G., Di Giuseppe E., *Predict the priority of end-users' maintenance requests and the required technical staff through LSTM and Bi-LSTM recurrent neural networks*, in Facilities, 41, 2023, pp. 38-51;

de Cambray B., *Three-dimensional (3D) modelling in a geographical database*, In atti dell'11th International Symposium on Computer-Assisted Cartography, Auto-Carto '11, Minneapolis 1993, pp. 338-347;

De Grossi Mazzorin J., *Artigiani dell'osso, avorio e palco. Ornamenti, utensili e giochi dalla preistoria al medioevo*, uniSalentoPress, Lecce 2011;

De Nicolò Salmazo A., Spiazzi A.M., Toniolo D. (a cura di), *Andrea Mantegna e i maestri della Cappella Ovetari. La ricomposizione virtuale e il restauro*, Skira, Milano 2006;

De Palma A., Notturmi L., Torsello A., *Metodologie informatiche per la conoscenza e la conservazione delle superfici musive*, in Biscontin G., Driussi G. (a cura di), *I Mosaici. Cultura, Tecnologia, Conservazione, Atti del XVIII Convegno di Studi Scienza e beni culturali (Bressanone, 2-5 luglio 2002)*, Arcadia Ricerche, Marghera 2002, pp. 657-666;

De Rubertis A., *Progettazione*, in *Enciclopedia Italiana*, Istituto Poligrafico di Stato, Roma 2000, pp. 475-481;

De Vita M., *Verso il restauro. Temi, tesi, progetti, percorsi didattici per la conservazione*, Firenze University Press, Firenze 2012;

Del Vecchio U., Pani D., Piccini L., *Una nuova struttura per un database di gestione del catasto delle grotte*, in *Atti del XXII Congresso Nazionale di Speleologia "Condividere i dati" (Pertosa-Auletta, 30 maggio – 2 giugno 2015)*, 2015, pp. 77-81;

Dell'Unto N., Landeschi G., Leander Touati A.M., Dellepiane M., Callieri M., Ferdani D., *Experiencing Ancient Buildings from a 3D GIS Perspective: a Case Drawn from the Swedish Pompeii Project*, in *Journal of Archaeological Method and Theory*, 23, 2016, pp. 73-94;

Dell'Unto N., Landeschi G., *Archaeological 3D GIS*, Routledge, Oxon e New York 2022;

Della Calce R., *Maya 5*, Apogeo, Milano 2005;

Derudas P., Dell'Unto N., Callieri M., Apel J., *Sharing archaeological knowledge: The Interactive Reporting System*, in *Journal of Field Archaeology*, 46(5), 2021, pp. 303-315, <https://doi.org/10.1080/00934690.2021.1911132>;

Demetrescu E., *Virtual Reconstruction as a Scientific Tool: The Extended Matrix and Source-Based Modelling Approach*, in *Digital Research and Education in Architectural Heritage*, Springer, 2018, pp. 102–116;

Dezzi Bardeschi C., *Archeologia e conservazione. Teorie, metodologie e pratiche di cantiere*, Maggioli Editore, Segrate, 2007;

Dezzi Bardeschi M., *Restauro: Punto e da capo. Frammenti per una (impossibile) teoria*, Angeli, Milano 1991.

Di Giuseppantonio Di Franco P., Galeazzi F., Vassallo V. (a cura di), *Authenticity and cultural heritage in the age of 3D digital reproductions*, McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge 2018;

Di Paola F., *Metodologie di indagine applicate alla prospettiva solida nell'architettura in Sicilia. Un caso di studio: l'Oratorio di San Lorenzo a Palermo*, in Valenti G.M. (a cura di), *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio Volume 1*, Collana Studi e Ricerche, 26, Sapienza università editrice, Roma 2014, pp. 81-94;

Di Paola F., Milazzo G., *Computer Aided Restoration tools to assist the conservation of an ancient sculpture. The colossal statue of Zeus enthroned*, In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, 2017, pp. 177–184;

Dinur E., *The Complete Guide to Photorealism. For Visual Effects, Visualization and Games*, Routledge, New York 2022;

Dionisio G., Licari G., *Silvery-Like Ceramics in the National Archaeological Museum of Florence: Virtual Technologies in Analysis and Restoration*, in *Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013 (CHNT 18, 2013)*, Vienna 2014, pp. 1-12;

Doggett M.C., *Displacement Mapping and Volume Rendering Graphic Hardware*, Dissertation.com 2002;

Dunbabin K.M.D., *Mosaics of the Greek and Roman world*, Cambridge University Press, New York 1999;

Ebert D.S., Musgrave F.K., Peachey D., Perlin K., Worley S., *Texturing and modeling. A Procedural Approach*, AP Professional, Cambridge 1994;

Eismann K., Duggan S., Porto J., *Photoshop. Maschere & fotomontaggi*, Pearson Italia, Milano, 2013;

Esposito D., *Disegno, rilievo e restauro dei monumenti: alcuni esempi*, in *Disegnare con*, Numero Speciale, DoCo 2012 – Documentazione e Conservazione del Patrimonio Architettonico ed Urbano, pp. 27-32;

Fabiani F., Grilli R., Musetti V., *Verso nuove modalità di gestione e presentazione della documentazione di restauro: SICaR web la piattaforma in rete del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo*, in *Bollettino ingegneri*, 3, 2016, pp. 3-13;

Fancelli P., *Indagini preliminari e diagnostica. Rilievo storico-critico delle fasi costruttive*, in Zevi L. (a cura di), *Il manuale del Restauro Architettonico*, Mancosu Editore, Roma 2001, pp. E9-E22;

Farneti M., *Glossario tecnico-storico del mosaico*, Longo editore, Ravenna 1993;

Favretto A., Montagnari M., Vidulli M., Moser S., *Database relazionali e “NoSQL”. Alcuni spunti per un corretto inquadramento delle metodologie*, In atti della Conferenza Nazionale di Geomatica e Informazione Territoriale ASITA 2019 (Trieste, 12-14 Novembre 2019), 2019, pp. 425-432;

Fazio L., Lo Brutto M., Gonizzi Barsanti S., Malatesta S.G., *The Virtual Reconstruction of the Aesculapius and Hygeia Statues from the Sanctuary of Isis in Lilybaeum: Methods and Tools for Ancient Sculptures' Enhancement*, in *Applied Science*, 12(7), 2022, pp. 1-12;

Federici C., *Restauro tradizionale e restauro virtuale come "divergenze parallele"*, in *Gazette du livre médiéval*, 34, 1999, pp. 49-52;

Federici C., *Qualche chiosa al restauro cosiddetto "virtuale"*, in Kermes, 43, Nardini, Firenze 2001, pp. 9-10;

Ferdani D., Fanini B., Piccioli M.C., Carboni F., Vigliarolo P., *3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case of the Forum of Augustus in Rome*, in Journal of Cultural Heritage, 43, 2020, pp. 129-143;

Ferrarini E., Staltari E., *Scrittura ed immagini: un'ipotesi di restauro virtuale*, in Le Médiéviste et l'Ordinateur. Historie médiévale informatique et nouvelles technologies, 41, 2002, pp. 49-59.

Fiorentini A., *Fisiologia della visione a colori*, in Oleari C. (a cura di), *Misurare il colore. Spettrofotometria, fotometria e colorimetria. Fisiologia e percezione*, Hoepli, Milano, 1998, pp. 53-100;

Fiori C., *Lo stato di conservazione dei dipinti su tela*, in Costantini G.M., Costato Costantini R., Fiori C. (a cura di), *Il restauro dei dipinti 'olio su tela'*, Clueb, Bologna 2011, pp. 65-74;

Fiorini A., *Tablet PC, fotogrammetria e PDF 3D: strumenti per documentare l'archeologia*, in Archeologia e Calcolatori, 23, 2012, pp. 213-227;

Fiorini A. (a cura di), *Archeologia dell'Architettura, XXVIII.1, 2023 – Archeologia del cantiere edile: temi ed esempi dall'antichità al Medioevo*, Atti del convegno (Università di Bologna, 21 maggio 2021, per via telematica), Insegna del giglio, Firenze 2023;

Fischer P., *Mosaic, History and Technique*, McGraw-Hill Book Company, New York-Toronto 1971;

Flavell L., *Beginning Blender. Open Source 3D Modeling, Animation, and Game Design*, Apress, New York 2010;

Fodde M., *L'arte della fotoelaborazione digitale a colori*, Apogeo, Milano 2013;

Forte M. (a cura di), *La villa di Livia un percorso di ricerca di archeologia virtuale*, L'Erma di Bretschneider, Roma 2007;

Forte M., Beltrami R., *A proposito di virtual archaeology: Disordini, interazioni cognitive e virtualità*, in *Archeologia e Calcolatori* 11, 2000, pp. 273-300;

Fortunati M., Zopfi L.S., Bishop J., De Rosa A., Malaspina F., Zanni S., *Applicazioni di Structure From Motion (SFM): Tecniche open source di rilievo per interventi archeologici d'emergenza*, In *Archeomatica*, 4, Dicembre 2014, pp. 6-9;

Francovich R., Manacorda D., *Dizionario di Archeologia. Temi, concetti e metodi*, Laterza, Bari 2017;

Friedriche A., Schöner J., Nitschke R., *The Frauenkirche in Dresden. History and Rebuilding*, Sandstein, Dresden 2005;

Frischer B., *Introduction with Remarks on the Methodological Implications of the Digital Restoration of the Richmond Caligula*, in Fricher B., Schertz P. J. M. (a cura di), *New Studies on the Portrait of Caligula in the Virginia Museum of Fine Arts*, Brill, Leiden 2020, pp. 9-16;

Frontoni R., *Il cantiere antico a Villa dei Quintili*, in *Forma Urbis. Itinerari nascosti di Roma antica*, V, 7/8, 2000, pp. 42-47;

Frontoni R., Galli G., *Il complesso residenziale*, in *Forma Urbis. Itinerari nascosti di Roma antica*, XVII, 2, 2012, pp. 9-19;

Frontoni R., Galli G., *Repertorio dei pavimenti in opus sectile dalla Villa dei Quintili*, in *Atti del XX Colloquio dell'AISCOM* (Roma, 19-22 marzo 2014), Scripta Manent Edizioni, Tivoli 2015, pp. 149-160;

Gabbrielli M., Martini S., *Linguaggi di programmazione. Principi e paradigmi. Seconda edizione*, McGraw-Hill Education, Milano 2011;

Gabellone F., *Metodologie integrate per lo studio ricostruttivo e la conoscenza dello stato attuale dei Beni Culturali*, In D'Andria F., Malfitana D., Masini N., Scardozzi G. (A cura di), *Il dialogo dei Saperi, metodologie integrate per i Beni Culturali*, Edizioni Scientifiche, 2010, pp. 495-516;

Gabellone F., Ferrari I., Giuri I., *Digital restoration and virtual enjoyment of the works of Giovanni Todisco from Abriola in museum communication projects*, in proceedings of the 4th EARSeL Workshop on Cultural and Natural Heritag (Matera, 3-6 giugno 2013), 2013, pp. 6-7;

Gabellone F., *Archeologia virtuale. Teoria, tecniche e casi di studio*, Edizioni Grifo, Lecce 2022;

Gaber J. A., Youssef S.M., Fathalla K.M., *The Role of Artificial Intelligence and Machine Learning in preserving Cultural Heritage and Art Works via Virtuale Restoration*, in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume X-1/W1-2023, ISPRS Geospatial Week (Cairo, 2-7 settembre 2023), 2023, pp. 185-190;

Gaiani M., Gamberini E., Tonelli G., *VR as work tool for architectural & archaeological restoration: the "Ancient Appian Way 3D Web virtual GIS"*, In 7th VSMM proceedings, Los Alamitos, IEEE, 2001, pp. 86-95;

Galeazzi F., Richards-Rissetto H., *Editorial introduction: Web-based archaeology and collaborative research*, Journal of Field Archaeology, 43(sup1), 2018, pp. 1-8;

Gallippi A., *Dizionario di informatica, Tecniche nuove*, Milano 2006;

Garagnani S., Gaucci A., Gruška B., *From the archaeological record to archaeobim: The case study of the Etruscan temple of Uni in Marzabotto*, In Virtual Archaeology Review, 7(15), pp. 77-86;

Ghidara S., *Il soffitto dipinto della Cattedrale di Nicosia*, in Biagi Maino D., Maino G. (a cura di), *Principi ed applicazioni del restauro virtuale*, Edifir editore, Firenze 2017, pp. 105-108;

Giangrasso M., *Mosaici pavimentali di epoca romana. Studio, intervento conservativo e ricomposizione di lacerti musivi dall'area del gruppo episcopale di Asti*, Nardini editore, Firenze 2018;

Giannichedda E., *Antichi mestieri. Archeologia della Produzione*, SAGEP, Genova 1996;

Giannini C., Roani R., *Dizionario del restauro e della diagnostica*, Nardini editore, Firenze 2010;

Giardulo A., *La conservazione dei libri. Materiali, tecniche e impianti*, Editrice bibliografica, Milano 1999;

Gillings M., Wheatley D., *Spatial Technology and Archaeology: The Archaeological Applications of GIS*, Routledge, London and New York 2002;

Gilotta F., Carafa V., Morpurgo G., Rizzo C., Cirafici A., Avella A., Argenziano P., Patriziano T., Micozzi M., Galiffa F., Lucchetti L., Bentz M., Beck D., Birkner F., Briesack C., Kluge P., Lang M., Coen A., Zinni M., *Researches at Monte Abatone necropolis (Cerveteri)*, in *Archeologia e Calcolatori* 33.2, 2022, pp. 135-152;

Gioeni L., *Marco Dezzi Bardeschi: teoria e pratica della conservazione dell'architettura*, In Fiengo G., Guerriero L. (a cura di), *Monumenti e documenti. Restauratori del secondo Novecento*, Quaderni del dipartimento di restauro e costruzione dell'architettura e dell'ambiente, Seconda Università di Napoli, Arte Tipografica, Napoli 2011, pp. 327-347;

Giovannoni G., *Il restauro dei monumenti*, Cremonese, Roma 1946;

Giuffredi A., *Manuale delle tecniche di formatura e fonderia*, Aline editrice, Firenze 2006;

Giuliani C.F., *L'edilizia nell'Antichità*, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1989;

Goodchild M.F., *Geographic information systems*, In *Progress in Human Geography*, 15(2), 1991, pp. 194-200;

Goulekas K.E., *Visual Effects in a Digital World*, Morgan Kaufman, San Francisco 2001;

Gorden J., *Lightwave 3D cartoon character creation*, Wordware Publishing Inc., Plano 2005;

Grandi M., *Motivi in comune nei mosaici e nei sectilia più antichi: il problema delle priorità*, in Farioli Campanati R. (a cura di), *Atti del I Colloquio dell'AISCOM* (Ravenna, 29 aprile - 3 maggio 1993), Ravenna 1994, pp. 133-158;

Gregotti V., *Architettura, tecnica, finalità*, Laterza editore, Bari 2002;

Gruen A., Remondino F., Zhang L., *Image-based reconstruction and modeling of the Great Buddha statue in Bamiyan, Afghanistan*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part 5/W12, 2003, pp. 173-175;

Guidobaldi F., *Sectilia pavimenta e incrustationes. I rivestimenti policromi pavimentali e parietali in marmo o materiali litici e litoidi dell'antichità romana*, in Giusti A. (a cura di), *Eternità e nobiltà di materia. Itinerario artistico fra le pietre policrome*, Polistampa, Firenze, 2003, pp. 15-75;

Harrington R., *Video con la reflex: da Semplici Istantanee a Grandi Scatti*, Pearson Italia, Torino, 2012;

Harris T.M., Lock G.R., *Multi-dimensional GIS: Exploratory approaches to spatial and temporal relationships within archaeological stratigraphy*, In Kamermans H., Fennema K. (a cura di), *Interfacing the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology CAA95*. Vol. II (Analecta Praehistorica Leidensia 28), Leiden Institute of Prehistory, Leiden 1996, pp. 307-316;

Hermon S., Niccolucci F., *Digital Authenticity and the London Charter*, in Di Giuseppantonio Di Franco P., Galeazzi F., Vassallo V. (a cura di), *Authenticity and cultural heritage in the age of 3D digital reproductions*, McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge 2018, pp. 35-48;

Hermon, S., Iannone, G., Gheorgiou, R., Amico, N., *A Virtual Restoration of a Broken Pottery Vessel*, in Karagheorghis V, Kouka O. (a cura di) *On Cooking Pots, Drinking Cups, Loomweights and Ethnicity in Bronze Age Cyprus and Neighbouring Regions*, The A.G. Leventis Foundation, Nicosia 2011, pp. 97-100;

Higuchi R., Sugawara H., Gülyaz M.E., *Photogrammetry using virtual restoration of wall-paintings of the rock-hewn churches in the Göreme valley, Cappadocia and its value for the museum's contents*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

Sciences, Volume IV-2/W6, 27th CIPA International Symposium “Documenting the past for a better future”, (Avila, Spagna, 1–5 Settembre 2019), 2019, pp. 83-89;

Hirschland Ramage N., *Studies in Early Etruscan Bucchero*, in BSR 38, 1970, pp. 1-61;

Jensen P., *Semantically enhanced 3D: A web-based platform for spatial integration of excavation documentation at Alken Enge, Denmark*, In Journal of Field Archaeology, 43(sup1), 2018, pp. 31-44;

Jones C.B., *Data structures for three-dimensional spatial information systems in geology*, in International Journal of Geographical Information Systems, 3(1), 1989, pp. 15-31;

Klinkenberg V., *Are we there yet? 3D GIS in archaeological research, the case of Tell Sabi Abyad, Syria*, In Kamermans H., de Neef W., Piccoli C., Posluschny A., Scopigno, R. (a cura di), *The Three Dimensions of Archaeology*, Proceedings of the XVII UISPP World Congress no. 7, Archaeopress Publishing Ltd., Oxford 2016, pp. 39–48;

Kundert-Gibbs J., Lee P., *Maya 5, guida completa*, Apogeo, Milano 2004;

Lahiri S., Bandyopadhyay S. K., *A method for virtual restoration of artworks*, in Global Journal of Engineering Science and Researches, 2 (5), Maggio 2015, pp. 111-116;

Landeschi G., *Rethinking GIS, three-dimensionality and space perception in archaeology*, in World Archaeology, 51 (1), pp. 17–32;

Landsberger M., *La lezione di Auguste Choisy. Architettura moderna e razionalismo strutturale*, Franco Angeli, Milano 2015;

Lanitis A., Stylianou G., Voutounos C., *Virtual Restoration of Faces Appearing in Byzantine Icons*, in Journal of Cultural Heritage, Vol. 13(4), ottobre 2012, pp. 404–412;

Lerones P.M., Fernandez J. L., Bermejo J.G.G., Casanova E.Z., Oli J.C., *Using of 3D Digital Models for Polychromies Virtual Restoration on Interesting Cultural Sites*, in *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15 (2014), pp. 196-198;

Lerici C.M., *Campagna di prospezioni archeologiche nella necropoli etrusca di Monte Abatone*, Lerici, Milano 1957;

Lerici C.M., *Nuove testimonianze dell'arte e della civiltà etrusca*, Lerici, Milano 1960;

Li F., Gao Y., Candeias A.J.E.G, Wu Y., *Virtual Restoration System for 3D Digital Cultural Relics Based on a Fuzzy Logic Algorithm*, In *Systems*, 11 (7), 374, 2023, pp. 1-22;

Li Y., *AI restoration brings 'dying' masterpieces back to life, but tricks copyright?*, in *International Journal of Law and Information Technology*, Oxford University Press, 30(3), 2022, pp. 368–384;

Liao W., Liu H., Li T., *Subdivision Surface Modeling Technology*, Springer Nature Singapore, Singapore 2017;

Lieberwirth U., *Voxel-based 3D GIS: Modelling and analysis of archaeological stratigraphy*, In Frischer B., Dakouri-Hild A. (a cura di), *Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology*, Archaeopress, Oxford 2008, pp. 85-95;

Limoncelli M., *Applicazioni Digitali per l'Archeologia: il Restauro Virtuale*, in *DigItalia*, anno VI, 1, 2011, pp. 42-59;

Limoncelli M., *Il Restauro Virtuale in archeologia*, Carocci editore, Roma 2012;

Limoncelli M., Potenza M., *Virtual Restoration 2: The Frescoes of the Rock-Cut Church of Lama D'Antico at Fasano*, *Studia Archaeologica* 241, L'Erma di Bretschneider, Roma 2020;

Lingua A., Marenchino D., Nex F., *L'operatore SIFT per l'orientamento di immagini acquisite con prese non-normali*, In *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA*, L'Aquila 21 – 24 ottobre 2008, L'Aquila 2008, pp. 1339-1346;

Lock G., *Using Computers in Archaeology, towards Virtual Pasts*, Routledge, Oxon 2003;

Luebke D., Reddy M., Cohen J.D., Varshney A., Watson B., Huebner R., *Level of Detail for 3D Graphics*, Elsevier Science, San Francisco 2003;

Lugari A., *Interventi conservativi su alcuni sepolcra della soprintendenza archeologica di Roma*, in Angelelli C., Rinaldi F. (a cura di), *Atti del XIII Colloquio dell'AISCOM (Canosa di Puglia, 21-24 febbraio 2007)*, Tivoli 2008, pp. 555-564;

Lumia C., *A proposito del restauro e della conservazione. Colloquio con Amedeo Bellini, Salvatore Boscarino, Giovanni Carbonara e B. Paolo Torsello*, Gangemi editore, Roma 2016;

Malik D.S., *Programmazione in C++*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna 2015;

Maltese C., *I supporti nelle arti pittoriche: storia, tecnica, restauro*, parte I, Mursia, Milano 1990;
Mandolesi L., *PyAchinitt – Python, QGIS e PostgreSQL per la gestione dei dati di scavo*, in *Archeologia e Calcolatori*, Supplemento 2, 2009, pp. 209-222;

Maniaci M., *Archeologia del manoscritto. Metodi, problemi, bibliografia recente*, Viella, Roma 2002;

Manieri Elia G., *Metodo e tecniche del restauro architettonico*, Carocci, Roma 2010;

Mannoni T., *Qualsiasi degrado fa parte della storia di un edificio*, in G. Biscontin, G. Driussi (a cura di), *Dal sito archeologico all'archeologia del costruito. Conoscenza, progetto, conservazione*, Arcadia Ricerche, Padova 1996, pp. 97-106;

Mannoni T., Boato A., *Archeologia e storia del cantiere di costruzione*, in *Arqueología de la arquitectura*, 1, 2002, pp. 39-53;

Marchesini I., *GRASS GIS & Quantum GIS: caratteristiche e campi di applicazione*, in L. Casagrande, P. Cavallini, A. Frigeri, A. Furieri, I. Marchesini, M. Neteler (a cura di), *GIS open source*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2012, pp. 19-24;

Marino L., *Il restauro archeologico. Materiali per un atlante delle patologie presenti nelle aree archeologiche e negli edifici ridotti allo stato di rudere. Il rischio nelle aree archeologiche*, Altralinea edizioni, Firenze 2016;

Martinelli M., *Enti locali, media digitali e integrazione virtuale in archeologia*, Nardini editore, Firenze 2003;

Masino F.L.S., Sobrà G., Gabellone F., Limoncelli M., *Research on the theatre at Hierapolis in Phrygia: an integrated approach*, in Rheidt K., Heine K., Hence F., Riedel A. (a cura di), *Von Handaufmass bis High Tech 3 3D in der Historischen Bauforschung*, Philipp von Zabern editore, Mainz 2011, pp. 75-81;

McClelland D., *Photoshop 6 Look & Lear*, Apogeo, Milano 2001;

McQuilkin K., Powers A., *Cinema 4D: The Artist's Project Sourcebook. Third Edition*, Focal Press, Waltham 2011;

McQuilkin K., *Cinema 4D Apprentice. Real-World Skills for the Aspiring Motion Graphics Artist*, Focal Press, Burlington 2015;

Mele G., *Il rilievo e l'analisi geometrica del Palazzo Vernazza*, in Capanna A., Mele G. (a cura di), *Geometria e progetto Ipotesi di riuso per il palazzo Vernazza a Castri*, Collana Materiali e documenti, 47, Sapienza Università editrice, Roma 2019, pp. 21-24;

Merlo S., *Making Visible: Three-Dimensional GIS in Archaeological Excavation*, BAR international series 2801, Archeopress, Oxford 2016;

Micozzi M., *I bambini perduti di Cerveteri. Primi appunti per la ricostruzione della ritualità infantile nelle necropoli di Monte Abatone e della Banditaccia*, In Govi E. (a cura di), *Birth. Archeologia dell'infanzia nell'Italia preromana. Tomo I*, Bononia University Press, Bologna 2021, pp. 395-416;

Miele F., *La conservazione della memoria materiale. Sistemi informativi di catalogo e territoriali in Campania*, in *Archeologia e Calcolatori* 22, 2011, pp. 7-34;

Milella N., *Il restauro digitale dei beni culturali architettonici*, in Milella N. (a cura di), *La conservazione del patrimonio storico ed architettonico*, Mario Adda editore, Bari 2007, pp. 353-414;

Monti M. a, *Principi e tecniche del restauro virtuale*, in Biagi Maino D., Maino G. (a cura di), *Principi e applicazioni del restauro virtuale*, edifir, Firenze 2017, pp. 35-39.

Monti M. b, *Il restauro virtuale applicato ai cartoni del mosaico e ai mosaici di Ravenna*, in Biagi Maino D., Maino G. (a cura di), *Principi e applicazioni del restauro virtuale*, edifir, Firenze 2017, pp. 55-68

Monti M., Maino G., *Image processing and a virtual restoration hypothesis for mosaics and their cartoons*, In Maino G., Foresti G. (a cura di), *Proceedings of Image analysis and Processing - ICIAP (Ravenna 2011)*, Springer, Berlin 2011, pp. 486-495;

Moreno M., Prieto A.J., Ortiz R., Cagigas-Muñiz D., Beccera J., Garrido-Vizuite M.A., Segura D., Macías-Bernal J.M., Chávez M.J., Ortiz P., *Preventive conservation and restoration monitoring of heritage buildings based on fuzzy logic*, In *International Journal of Architectural Heritage*, 17(7), 2023, pp. 1153-1170.

Moro A., Vico L., Vassallo V., *Metodologia per la ricostruzione 3D del paesaggio archeologico*, in Clini P., Lancioni N., Quattrini R. (a cura di), *atti del convegno Sistemi informativi per l'architettura: EARCOM 2007 Ancona*, Alinea editore, Firenze 2007, pp. 1-6;

Moschin D., *Restauro virtuale, la tecnica per il recupero digitale delle informazioni nascoste*, in *Kermes*, 41, Gennaio-Marzo 2001, pp. 45-54;

Moschin D., *Daniele Broia, il fotografo del restauro virtuale*, in *Gazzetta di Parma*, 23 novembre 2013;

Muller W., Vogel G., *Atlante di Architettura*, Hoepli, Milano 2000;

Murray J.D., vanRyper W., *Encyclopedia of graphics file formats, Second edition*, O'Reilly & Associates, Inc., Sebastopol 1996;

Musso S.F., *Recupero e restauro degli edifici storico. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica. IV edizione*, EPC Editore, Roma 2016;

Nardi R., *Il Restauro del mosaico della trasfigurazione nel monastero di Santa Caterina nel Sinai*, in *Rendiconti della Pontificia Accademia Romana di Archeologia*, LXXXII 2009-2010, pp. 3-17;

Nardini A., *La piattaforma GIS dello scavo di Poggio Imperiale a Poggibonsi. Dalla creazione del modello dei dati alla loro lettura*, in *Archeologia e Calcolatori* 11, 2000, pp. 111-123;

Nasr E.A., Kamrani A., *Computer-Based Design and Manufacturing: An Information-Based Approach*, Springer Science+Business Media, New York 2007;

Neeft C.W., *Protocorinthian Subgeometric Aryballoi*, Allard Pierson Museum, Amsterdam 1987;

Neri S., *Il Tornio e il pennello. Ceramica depurata di tradizione geometrica di epoca orientalizzante in Etruria meridionale (Veio, Cerveteri, Tarquinia e Vulci)*, Officina edizioni, Roma 2010;

Nieves A., *LightWave v9 Texturing*, WordWare Publishing Inc., Plano 2007;

O'Brien C., Hutson J., Olsen T., Ratican J., *Limitations and possibilities of digital restoration techniques using generative AI tools: Reconstituting Antoine François Callet's Achilles dragging hector's body past the walls of troy*, In *Arts & Communication*, 1(2), 2023, pp. 1-8;

Olivotto V., *Caere, necropoli di Monte Abatone. Tombe 110, 112, 121, 154, 164, 166, 167, 191*, Comune di Milano, Milano 1994;

Oren M., Nayar S.K., *Generalization of Lambert's Reflectance Model*, in Proceeding Conference SIGGRAPH (Orlando, 24-29 luglio 1994), Acm Press, New York 1994, pp. 239-246;

Ormsby T., Alvi J., *Extending ArcView GIS: Teach Yourself to Use ArcView GIS Extensions*, Environmental Systems Research Institute Inc., Redlands 1999;

Oulton D., *Technology for colour management*, in Proceedings of the 1st International Conference on Digital Technologies for the Textile Industries (Manchester, UK, 5-6 Settembre), TexENG software, Manchester, 2013, pp.1-10;

Palazzani O., *Immagini digitali*, Apogeo, Milano 2007;

Panella C., Gabrielli R., Giorgi C., *Le "Terme di Elagabalo" sul Palatino: sperimentazione di un metodo fotogrammetrico 3D applicato allo scavo archeologico*, in Archeologia e Calcolatori, 22, 2011, pp. 243-260;

Parenti R., *Le tecniche di documentazione per una lettura stratigrafica degli elevati*, in Francovich R., Parenti R. (a cura di), Archeologie e Restauro dei monumenti. I Ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, All'insegna del Giglio, Firenze 1988, pp. 249-279;

Paris L., *Fotogrammetria 2.0*, in Disegnarecon, 8, 14, gennaio 2015, 17, pp. 1-9;

Paris R., Frontoni R., Galli G. (a cura di), *Via Appia. Villa dei Quintili. Santa Maria Nova*, Electa, Milano 2019;

Parkin A., *Computing colour image processing. Digital colour primer*, Springer International Publishing, London, 2018;

Pastena C.a, *Storia dei materiali scrittori e delle forme del libro: Un'introduzione. I supporti scrittori*, Regione siciliana, Assessorato dei beni culturali e dell'identità siciliana, Dipartimento dei beni culturali e dell'identità siciliana, Palermo 2019;

Pastena C.b, *Storia dei materiali scrittori e delle forme del libro: Un'introduzione. Gli strumenti scrittori e gli Inchiostri*, Regione siciliana, Assessorato dei beni culturali e dell'identità siciliana, Dipartimento dei beni culturali e dell'identità siciliana, Palermo 2019;

Pedemonte E., *La carta: storia, produzione, degrado, restauro*, Marsilio, Venezia 2008;

Peloso D., *Tecniche laser scanner per il rilievo dei Beni Culturali*, in *Archeologia e Calcolatori*, 16, 2005, pp. 199-224;

Peral R., Sagasti D., Silaurren S., *Virtual Restoration of Cultural Heritage Through Real-Time 3D Models Projection*, in Mudge M., Ryan N., Scopigno R. (a cura di), atti del 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (Pisa (Italia), 8-11 November 2005), 2005, pp. 1-7;

Perusini G., *Il restauro dei dipinti e delle sculture lignee, Storia, teorie e tecniche*, Del Bianco Editore, Udine 1989;

Pevsner N., Fleming J., Honour H., *Dizionario di architettura*, Einaudi, Torino 1996;

Pharr M., Humphreys G., *Physically based rendering. From Theory to Implementation. Second Edition*, Morgan Kaufmann, Burlington 2010;

Picchio F., *Metodologie di rilievo integrato per indagini diagnostiche non invasive: la documentazione della Moschea Bianca di Al-Jazzar a San Giovanni d'Acri, Israele*, In *Restauro Archeologico* 26 (2), 2017, pp. 90-105;

Pietroni E., Ferdani D., *Virtual Restoration and Virtual Reconstruction in Cultural Heritage: Terminology, Methodologies, Visual Representation Techniques and Cognitive Models*, in *Information*, 12(4), 2021, pp. 1-30;

Pigot S., *Topological models for 3D spatial information systems*, In *ACSMASPRS Annual Convention, Auto-Carto*, 10, 6, Baltimore 1991, pp. 368-392;

Pigot S., *A topological model for 3D spatial information system*, In Bresnahan P., Corwin E., Cowen D. (a cura di), *Spatial Data Handling '92*, IGU commission of GIS, Charleston 1992, pp. 344-360;

Piva G., *Manuale pratico di tecnica pittorica. Enciclopedia - ricettario per tutti gli artisti - pittori dilettanti – allievi delle accademie e scuole di belle arti*, Hoepli editore, Milano 1984;

Piva G., *Acquerello e tempera. tecnica pittorica*, Hoepli, Milano 1988;

Pižurica A., Platiša L., Ružić T., Cornelis B., Doms A., Martens M.P.J., De Mey M., Daubechies I., *Virtual restoration and mathematical analysis of pearls in the “Ghent Altarpiece”*, in Praet D., Martens M.P.J. (a cura di), *The Ghent altarpiece – Van Eyck: art, history, science and religion*, Cannibal Pub, Veurne 2019, pp. 182-201;

Pogliani P., *Tessere dorate: Informazioni tecniche a confronto*, in Pogliani P., Seccaroni C. (a cura di), *Il mosaico parietale. Trattatistica e ricette dall'Alto Medioevo al Settecento*, Nardini editore, Firenze 2010, pp. 43-56;

Poldi G., Villa G.C.F., *Dalla conservazione alla storia dell'arte. Riflettografia e analisi non invasive per lo studio dei dipinti*, Edizioni della Normale, Pisa 2006;

Prayon F.W., *Frühetruskische Grab- und Hausarchitektur*, Kerle, Heidelberg 1975;

Raco F., Balzani M., Planu F., Tasselli N., *Modellazione semantica HBIM per la rappresentazione digitale dell'intervento sul patrimonio esistente*, In Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Congresso della Unione Italiana per il Disegno (Genova, 15-17 settembre 2022), Franco Angeli, Milano 2022, pp. 2789-2804;

Ranaldi L., Zanzotto F.M., *Discover AI Knowledge to Preserve Cultural Heritage*, Preprints 2021, pp. 1-9;

Ray C., Vos J., Retèl P. (a cura di), *Etruscaning Digital Encounters with the Regolini-Galassi Tomb*, Allard pierson museum, Amsterdam 2013;

Raper J. *Three Dimensional Applications in GIS*, CRC Press, Boca Raton 1989;

Rasmussen T.B., *Bucchero Pottery from Southern Etruria*, Cambridge University Press, Cambridge 1979;

Remondino F., El-hakim S., *Image-based 3D modelling: a review*, in *The Photogrammetric Record*, 21(115), Settembre 2006, pp. 269–291;

Remondino F., *Photogrammetry: Theory*, in Remondino F., Campana S. (a cura di), *3D recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR International Series 2598, Oxford 2014, pp. 65-73;

Reynoso C., Castro D., *VB-GIS 3D-A GIS specifically designed for archaeology*, in *Method in the Mountains*, Sydney University Archaeological Methods Series, 2(2), 1994, pp. 135-142;

Riddell D., Robinson M., Stein N., *Maya 7 Quick Start per windows e macintosh*, traduzione di Postinghel P., Maselli G., Tecniche Nuove, Milano 2006;

Rinaldi S., *Storia tecnica dell'arte. Materiali e metodi della pittura e della scultura (secc. V-XIX)*, Carocci editore, Roma 2011;

Rizzo E., *La modellazione 3D applicata ai beni culturali: la Pieve di San Giovanni Battista a Cavriglia*, in *Archeomatica*, 4(3), 2013, pp. 16-20;

Rizzo M.A., *Principi etruschi. Le tombe orientalizzanti di San Paolo a Cerveteri*, L'Erma di Bretschneider, Roma 2016;

Rockwell P., *The art of stoneworking: a reference guide*, Cambridge University Press, Cambridge 1993;

Rogers D.F., *An Introduction to NURBS With Historical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco 2001;

Rotondi A., *La Villa dei Quintili e i suoi antichi proprietari*, in *Forma Urbis. Itinerari nascosti di Roma antica*, XVII, 2, 2012, pp. 6-8;

Ruskin J., *The Seven Lamps of Architecture*, Wiley & Sons, Hoboken 1849 (trad. it. *Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano 1982, pp. 226-227);

Russo M., Remondino F., Guidi G., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in *Archeologia e Calcolatori*, 22, 2011, pp. 169-198;

Salvemini M., Berardi L., Di Donato P., Mattiozzi G., *La rappresentazione cartografica. La certificazione ECDL-GIS Modulo 1*, Apogeo, Milano 2013;

Samonà G., *Teoria della progettazione architettonica*, Laterza, Bari 1968;

Santacesaria A., *I fattori di degrado dei supporti lignei*, in Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A. (a cura di), *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, Edifir, Firenze 2012, pp. 131-164;

Seccaroni C., *Disegno, giornate e malte di allettamento*, in Pogliani P., Seccaroni C. (a cura di), *Il mosaico parietale. Trattatistica e ricette dall'Alto Medioevo al Settecento*, Nardini editore, Firenze 2010, pp. 24-28;

Serena Vinci M., *Photographic Rectification and Photogrammetric Methodology Applied to the Study of Construction Process of Provincial Forum of Tarraco*, in Earl G., Sly T., Chrysanthi A., Murrieta-Flores P., Papadopoulos C., Romanowska I., Wheatley D. (a cura di), in *Archaeology in the Digital Era Volume II e-Papers from the 40th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, (Southampton, 26-30 March 2012), Amsterdam University press, Amsterdam 2013, pp. 316-323;

Serlorenzi M., Lamonaca F., Picciola S., Cordone C., *Il sistema informativo territoriale archeologico di Roma: SITAR*, in *Archeologia e Calcolatori* 23, 2012, pp. 31-50;

Scopigno R., *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*, in Campana S., Francovich R. (a cura di), *Laser scanner e GPS Paesaggi archeologici e tecnologie digitali 1*, 1 workshop (Grosseto, 4 marzo 2005), All'insegna del Giglio, Firenze 2006, pp. 41-68;

Sfacteria M., *Fotomodellazione 3D e rilievo speditivo di scavo: L'esperienza del Philosophiana Project*, in *Archeologia e Calcolatori* 27, 2016, pp. 271-289;

Siotto E., Baracchini C., Santamaria U., Scopigno R., *Sperimentazione del sistema ministeriale SICaR w/b per la gestione e la consultazione informatizzata dei dati sulla policromia*, in *Archeologia e Calcolatori*, 27, 2016, pp. 131-151;

Sizyakin R., Voronin V., Pižurica A., *Virtual Restoration of Paintings Based on Deep Learning*, In *Proceedings Volume 12084, Fourteenth International Conference on Machine Vision*, (Roma, 8-12 novembre 2021), 2022, pp. 301-311;

Smith I.M., Griffiths D.V., Margetts L., *Programming the Finite Element Method. Fifth Edition*, Wiley, Chichester 2014;

Stampouloulou M., Toska O., Kontogianni G., Skamantzari M., Georgopoulos A., *3D Documentation and virtual aecheological restoration of macedonian tombs*, in atti del 2nd International Conference of Geomatics and Restoration – GEORES 2019, (Milano 8–10 Maggio 2019), Milano 2019, pp. 1073-1080;

Strepparola A. (a cura di), *Il Manuzio. Dizionario del Libro*, Sylvestre bonnard, Milano 2005;

Tabolli J., *Narce tra la prima età del Ferro e l'Orientalizzante Antico; l'abitato, i Tufi e la Petrina*, Pisa 2013;

Tavola M., *Dizionario dell'Arte*, Alpha Test, Milano 2010;

Tesconi C., *L'arte della programmazione Python. Un percorso completo per combinare la teoria con l'applicazione pratica e diventare un esperto, partendo da zero*, E-book ed., Amazon, 2023, Kindle;

Tolazzi M.A., *L'arte Svelata. Volume Secondo. Arte Bizantina, Islamica, Romanica, Gotico Internazionale*, Robertson Edizioni, Tarcento 2015;

Torsello B. P., *Che cos'è il restauro? Nove studiosi a confronto*, Marsilio, Venezia 2005;

Tsiafaki D., Koutsoudios A., Arnaoutoglou F., Michailidou N., *Virtual reassembly and completion of a fragmentary drinking vessel*, In *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 2016, pp. 67-76;

Uzielli L., Fioravanti M., *Il comportamento fisico-meccanico del legno nei dipinti su tavola*, in Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A. (a cura di), *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, Edifir, Firenze 2012, pp. 53-72;

Vaccari M.G., *La scultura in terracotta. Tecniche e conservazione*, Centro Di, Firenze 1996;

Valenti M., Nardini A., *Modello dei dati e trattamento del dato sul GIS di scavo*, in *Archeologia e Calcolatori* 15, 2004, pp. 341 – 358;

Van Leusen M., Van Gessel S., *Towards 3D GIS. Notes from the 2012 CAA-NL/DE chapter session 'from 2.5 to 3 spatial dimensions'*, In Kamermans H., de Neef W., Piccoli C., Posluschny A., Scopigno R. (a cura di), *The Three Dimensions of Archaeology*, Proceedings of the XVII UISPP World Congress no. 7, Archaeopress Publishing Ltd., Oxford 2016, pp. 33–37;

Volpe G., *Manuale di Legislazione dei Beni Culturali: storia e attualità*, CEDAM, Milano 2006;

von Koenigsmarck A., *Maxon Cinema 4D 7. A Workshop for 2D/3D Graphics Pros*, Peachpit Press, Berkeley 2002;

von Koenigsmarck A., *CINEMA 4D 10 Workshop*, Focal Press, Burlington 2007;

Vico Lopez L., *Authenticity and realism: virtual vs physical restoration*, in Di Giuseppantonio Di Franco P., Galeazzi F., Vassallo V. (a cura di), *Authenticity and cultural heritage in the age of 3D digital reproductions*, McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge 2018, pp. 25-34;

Viventi D., *La Tenuta Colle del Cardinale. Storia patrimoniale (1893-1972)*, in Bianchi A. (a cura di), *La Tenuta Colle del Cardinale. La storia, l'archivio, la cartografia*, Soprintendenza Archivistica per l'Umbria, Perugia 2012, pp. 17-112;

Vlad Borrelli L., *Musivaria. Mosaico e opus sectile in età antica: storia, tecniche, conservazione*, Viella, Roma 2016;

Yang J., Wang X.R., Zhao Y., *Leaf color attributes of urban colored-leaf plants*, in *Open Geosciences*, 14, 2022, pp. 1591-1605

Waas M., Zell D., *Practical 3D photogrammetry for the conservation and documentation of Cultural Heritage*, in *Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013 (CHNT 18, 2013)*, Vienna 2014, pp. 1-17.

Sitografia

Agisoft metashape, *about*,

<https://www.agisoft.com/about/>

Agisoft Metashape User Manual, Standard Edition, Version 1.5,

https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.pdf

Agisoft Metashape User Manual, Professional edition, Version 2.1,

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf

Barillaro, 2023, *Differenza tra RAM e ROM*,

<https://www.informaticapertutti.com/differenza-tra-ram-e-rom/>

Bella E., Pescetti A., 2021, *GNU in poche parole*,

<https://www.gnu.org/gnu/about-gnu.html>

Bezzi A., Bezzi L., Francisci D., Gietl R., 2006, *L'Utilizzo di Voxel in Campo archeologico*, In Geomatic workbooks 6,

https://www.geolab.polimi.it/wp-content/uploads/2020/10/voxel_archeologia_it.pdf

Blender, *about*,

<https://www.blender.org/about/>

Blender, *History*,

<https://www.blender.org/about/history/>

Blender GIS,

<https://github.com/domlysz/BlenderGIS>

Blender manual 2.79, *shrinkwrap modifier*,

<https://docs.blender.org/manual/it/2.79/modeling/modifiers/deform/shrinkwrap.html>

Blender manual 4.0, *Cycles*,

<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/introduction.html>

Blender manual 4.0, *Eevee*,

<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/eevee/introduction.html>

Blender manual 4.0, *grid fill*,

https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/meshes/editing/face/grid_fill.html

Blender manual 4.0, *Render baking*,

<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/baking.html>

CORDIS, *Reconstructing the Past: Artificial Intelligence and Robotics Meet Cultural Heritage*,
<https://cordis.europa.eu/project/id/964854>

Corradeghini 2018, *Fotogrammetria con Photoscan parte 6 – creazione della nuvola di punti densa*,

<https://3dmetrica.it/photoscan-creazione-nuvola-densa/>

De Mattia, 2016, *Cos'è un plugin?*,

<https://blog.persaper.it/cos-e-un-plugin/>

De Palma 2002, *La Ceramica e il Vetro*, Treccani Il mondo dell'archeologia,

https://www.treccani.it/enciclopedia/la-conservazione-e-il-restauro-dei-manufatti-archeologici_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/

Edilizia, Treccani Vocabolario online,

<https://www.treccani.it/vocabolario/edilizia/>

ESRI, Azienda,

<https://www.esri.com/it-it/about/about-esri/company>

ESRI Italia,

<https://www.esriitalia.it/esriitalia/l-azienda>

Framework: cosa sono e quali dominano le classifiche, 2020,

<https://reteinformaticalavoro.it/blog/framework-cosa-sono-e-quali-dominano-le-classifiche/>

Function Callback, 2020,

<https://www.codingcreativo.it/function-callback/#:~:text=Le%20function%20callback%20sono%20utilizzate,della%20pagina%20html%2C%20ecc>

Geopackage,

<https://www.geopackage.org/>

GIMP, *A Brief (and Ancient) History of GIMP*, https://www.gimp.org/about/ancient_history.html

GIMP, *About GIMP*,

<https://www.gimp.org/about/introduction.html>

GIMP 2.10 manuale, Cerotto,

<https://docs.gimp.org/2.10/it/gimp-tool-heal.html>

Guida Adobe Photoshop, *selezionare con gli strumenti lazo*,

<https://helpx.adobe.com/it/photoshop/using/selecting-lasso-tools.html>

Manuale di PostGIS 3.5.0dev, *Introduction*,

https://postgis.net/docs/manual-dev/it/postgis_introduction.html

Menegazzi 2002, *I materiali organici*, Treccani Il mondo dell'archeologia,

https://www.treccani.it/enciclopedia/la-conservazione-e-il-restauro-dei-manufatti-archeologici_%28Il-Mondo-dell%27Archeologia%29/

Mezzorilievo, Treccani Vocabolario on line,

<https://www.treccani.it/vocabolario/mezzorilievo/>

Mosaico, Treccani Enciclopedia on line,

<https://www.treccani.it/enciclopedia/mosaico/>

Nadia Scardeoni, BTA - Bollettino Telematico dell'Arte, 28 Ottobre 2005, n. 41 ISSN 1127-4883

<https://www.bta.it/col/a0/01/coll0112.html>

<http://www.edscuola.com/archivio/interlinea/sondan.html>

Prompt dei comandi: Cos'è e come utilizzarlo su un sistema Dell, 2023,

<https://www.dell.com/support/kbdoc/it-it/000130703/command-prompt-what-it-is-and-how-to-use-it-on-a-dell->

[system#:~:text=Nei%20sistemi%20operativi%20Windows%2C%20il,ed%20eseguire%20funzioni%20amministrative%20avanzate](https://www.dell.com/support/kbdoc/it-it/000130703/command-prompt-what-it-is-and-how-to-use-it-on-a-dell-system#:~:text=Nei%20sistemi%20operativi%20Windows%2C%20il,ed%20eseguire%20funzioni%20amministrative%20avanzate)

QGIS Plugin Builder 3.0.x documentation,

<https://g-sherman.github.io/Qgis-Plugin-Builder/#>

Qt, *Language Bindings*, 2023,

https://wiki.qt.io/Language_Bindings

Rocchini C., *Breve Introduzione a PostGIS*, Lulu, 2014,

https://www.researchgate.net/publication/278684291_Breve_introduzione_a_Postgis

RJ Pierce 2021, *Google Just Used Artificial Intelligence To Restore Old Paintings Burned During WW2*, Tech Times,

<https://www.techtimes.com/articles/266329/20211007/google-just-used-artificial-intelligence-to-restore-old-paintings-burned-during-ww2.htm>

Severance R. C., *Python per tutti. Esplorare dati con Python 3*, 2018,

https://do1.dr-chuck.com/pythonlearn/IT_it/pythonlearn.pdf

Sistema di Riferimento delle Coordinate, QGIS Documentation 3.28,

https://docs.qgis.org/3.28/it/docs/gentle_gis_introduction/coordinate_reference_systems.html

Treccani enciclopedia online, *Bit*,

<https://www.treccani.it/enciclopedia/bit/>

Vectari 2023, The importance of texture baking,

<https://www.vectary.com/3d-modeling-blog/texture-baking/>

Indice delle figure

Figura 1 - Esempio di scansione tramite laserscanner e allineamento della nuvola di punti (Da Bianchini 2008).....	22
Figura 2 - Il principio di collinearità utilizzato dai processi fotogrammetrici per ricavare i dati spaziali dalle fotografie che inquadrano il medesimo oggetto (da Remondino 2014).....	25
Figura 3 - La nuvola di punti creata tramite gli algoritmi SfM e le relative immagini allineate, elaborazione in ambiente Metashape®.	27
Figura 4 – Mesh, prodotta tramite processi di interpolazione in ambiente Metashape®, nelle differenti modalità di visualizzazione: Wireframe (a sinistra), Solid (al centro) e Shaded (a destra).	28
Figura 5 - Mesh fotogrammetrica su cui è stata applicata la texture fotorealistica in ambiente Metashape®.	29
Figura 6 - Spettro elettromagnetico con in evidenza lo spettro visibile (da Bianco 2011).....	35
Figura 7 - Rappresentazione tridimensionale e bidimensionale del sistema di classificazione Munsell (da Gabellone 2022).....	36
Figura 8 - Rappresentazione del sistema CIE xyz (da Gabellone 2022).	37
Figura 9 – Rappresentazione del modello di colore CIELAB (da Gabellone 2022).	38
Figura 10 - Rappresentazione del modello di colore HSB (da Yang et al. 2022).....	39
Figura 11 - Rappresentazione del Modello di colore RGB (da Limoncelli 2012).....	40
Figura 12 - Calibrazione della gamma cromatica del monitor tramite l'uso del colorimetro elettronico Spyder X della datacolor®.....	46
Figura 13 - La temperatura di colore misurata in gradi Kelvin (da Gabellone 2022).....	47
Figura 14 - L'istogramma dell'ortomosaico relativo ad uno dei casi studio visibile nello specifico pannello di GIMP®.....	49
Figura 15 - La stessa immagine sottoesposta (A), sovraesposta (B) e correttamente esposta (C), con visibili i pannelli dei "livelli" e delle "curve" su photoshop® (da Limoncelli 2012).	50
Figura 16 - I pannelli del "Bilanciamento colore" e dei "Livelli" in ambiente GIMP®.....	52
Figura 17 - Esempio di analisi quantitativa (A), mappatura dei degradi (B) e mappatura degli interventi di restauro virtuale (C) (da Limoncelli 2012).....	54
Figura 18 - Esempio delle varie fasi di elaborazione di un restauro virtuale e ipotesi di ricostruzione iconografica (da Limoncelli 2012).....	61
Figura 19 - Esempio di restauro virtuale bidimensionale di un dipinto su supporto ligneo proveniente dalla cattedrale di Nicosia (da Ghidara 2017).....	63

Figura 20 - Esempio di elaborazione di restauro virtuale su di un affresco proveniente dalla chiesa di Santa Marina a Muro Leccese (da Limoncelli 2011).....	64
Figura 21 - Esempio di restauro virtuale con tecnica in mimetico di affreschi romani a Pompei (da Corallini, Limoncelli 2020).....	65
Figura 22 - Esempi di restauro virtuale bidimensionale di mosaici provenienti da Ravenna (da Monti 2017b).....	67
Figura 23 - Esempio di restauro virtuale bidimensionale di un mosaico proveniente da una villa romana a Roggia Gravina (da Limoncelli 2012).	68
Figura 24 - Esempio di restauro virtuale di un manoscritto proveniente dalla Herzog August Bibliothek di Wolfenbüttel in Germania (da Bennardi, Furferi 2007).	70
Figura 25 - Esempio di restauro virtuale di un manoscritto miniato proveniente dalla Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (da Bennardi, Furferi 2007).....	71
Figura 26 - Spazio virtuale tridimensionale cartesiano con gli assi X (in rosso), Y (in verde), Z (in blu) di Blender®.	72
Figura 27 - Gli elementi di base per la modellazione dal vertice, a sinistra, al bordo, al centro, fino alla faccia, a destra.	74
Figura 28 - esempio di primitive geometriche presenti nel software Blender®.....	75
Figura 29 - Differenti tipologie di NURB (da Limoncelli 2012).....	76
Figura 30 - Le normali rappresentate tramite una linea che è perpendicolare alla faccia e giacente nel baricentro.....	77
Figura 31 - Esempio di un modello tridimensionale raffigurante una brocca che presenta una topologia quad corretta.....	79
Figura 32 - Modello tridimensionale a bassa poligonazione, a sinistra, a cui è stata applicato un modificatore subdivison surface, a destra.	80
Figura 33 - A sinistra due metaballs troppo distanti tra loro per risentire del campo di influenza dell'altra, a destra invece risentono del campo di influenza reciproco producendo una forma più complessa ed organica.	80
Figura 34 - Displacement mapping utilizzata per la modellazione con valori di deformazione differenti (da Limoncelli 2012).....	81
Figura 35 - Esempio di modellazione tramite tecniche di sculpting 3D in ambiente Blender ®.	82
Figura 36 - Stili di Visualizzazione in Blender®: Wireframe, in alto a sinistra; Solid, in alto a destra; Material preview, in basso a sinistra; Rendering, in basso a destra.	84
Figura 37 - Mappa UV e processo di Unwrapping di un modello 3D di un Aryballos proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone.....	86

Figura 38 - Esempio di texture PBR, con in alto il risultato finale in fase di rendering dell'unione delle varie mappe (A), (B) la diffuse map, (C) la roughness map, (D) la normal map, (E) l'ambient occlusion map, (F) la displacement map (da Dinur 2022).	89
Figura 39 – A sinistra lo shader principle BSDF, che raggruppa diversi canali di regolazione, e, a destra, i vari shader che compongono un singolo materiale PBR.	90
Figura 40 - Rendering del medesimo soggetto, in ambiente Blender®, con algoritmi rasterized rendering (motore di rendering Eevee), sopra, e raytracing (motore di rendering Cycles), sotto...	93
Figura 41 - Esempio di simulazione in fase di rendering della depth of field per mettere in risalto i pedoni nella scacchiera.	94
Figura 42 - Le quattro fonti di emissione: in alto a sinistra la point light o omnidirezionale, in alto a destra la sun light, in basso a sinistra l'area e in basso a destra la spot light.	97
Figura 43 - Gli elementi che compongono un edificio e la loro gerarchia a partire dal complesso architettonico fino alla unità stratigrafica muraria (da Brogiolo 1988).	103
Figura 44 - I modelli di anastilosi (A), reintegrazione (B), verifica (C) ed edizione (D) di una Stoa da Hierapolis di Frigia (da Limoncelli 2012).	110
Figura 45 - Modelli tridimensionali che mostrano le due fasi costruttive, del XIII secolo sopra e ottocentesca sotto, dell'abbazia di Santa Maria di Cerrate a Squinzano (da Gabellone 2022).	111
Figura 46 - Ricostruzione del tempio di Marte Ultore nel Foro di Augusto, l'immagine al di sotto mostra l'attendibilità della ricostruzione a partire dagli elementi ancora presenti, in rosso, fino a quelli, in verde, che derivano da fonti e comparazioni (da Ferdani et al. 2020).	112
Figura 47 - Ricostruzione virtuale delle statue di Esculapio e Igea dal santuario di Iside a Lilybaeum con riportate tutte le fonti e i confronti utilizzati per eseguire l'intervento ricostruttivo (da Fazio et al. 2022).	117
Figura 48 - Le tre fasi dell'intervento di restauro virtuale eseguite su di un'antefissa fittile da Pompei. A sinistra, rilievo digitale dell'opera, al centro, modellazione tridimensionale degli elementi e a destra, applicazione dei colori sulle superfici basata sui confronti e sulle tracce ancora presenti (da Gabellone 2022).	118
Figura 49 - Riasssemblaggio e restauro virtuale di una vaso frammentario (da Hermon et al. 2011).	121
Figura 50 - Restauro virtuale di un kantaros da Karabournaki, grecia, in cui le parti restaurate rispettano il principio della riconoscibilità (da Tsiafaki et al. 2016).	122
Figura 51 - Ricostruzione della tomba Regolini Galassi e restauro virtuale, nonché ricontestualizzazione, di alcuni elementi del corredo per il progetto Etruscanning (Pietroni, Ferdani 2021).	123

Figura 52 - Esempificazione di una struttura di un'immagine raster composta da una griglia di regolare di pixel, ciascuno con un'informazione sul colore (da Bogdani 2009).	125
Figura 53 - Confronto tra una superficie 3D (A) e una superficie 2,5D (B). Come si può notare, nella superficie 2,5D disponendo di un solo valore di altitudine per ogni pixel non si ottiene una corretta rappresentazione tridimensionale dell'oggetto in ogni sua parte (da Dell'Unto, Landeschi 2022).	126
Figura 54 - Tre modi di rappresentare la superficie del terreno: a sinistra un raster DEM, al centro una sua elaborazione vettoriale a curve di livello, a destra un'ulteriore rielaborazione a triangoli (da Bogdani 2009).	128
Figura 55 - WebGIS del Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma (da Serlorenzi et al. 2012).	131
Figura 56 - Un GIS 3D, prodotto tramite ArcGIS pro®, associato con la documentazione proveniente da uno studio della percezione, in realtà virtuale, degli ambienti e decorazioni di una domus pompeiana (da Dell'Unto, Landeschi 2022).	133
Figura 57 - Il BIM del tempio di Uni a Marzabotto (da Garagnani et al. 2016).	134
Figura 58 - Studio dello stato di conservazione delle mura di una domus a Pompei, elaborato in ArcScene® (da Campanaro et al. 2016).	137
Figura 59 - Modello tridimensionale di una anforetta proveniente dal corredo della Tomba 643 di Monte Abatone visualizzato in QGIS®.	138
Figura 60 - L'Interactive Reporting Sistem (IRS) svedese, un esempio di WebGIS 3D (da Derudas et al. 2021).	138
Figura 61 - Esempio di linguaggio SQL, prodotto tramite pgAdmin® 4 e PostgreSQL, per creare una tabella al fine di documentare le attività di restauro virtuale bidimensionale.	142
Figura 62 - Struttura logica del GIS di Pontecagnano: la relazione tra le informazioni cartografiche e il modello dati georelazionale (da D'Andrea 1999).	143
Figura 63 - Il Sistema Informativo Territoriale della regione Campania (da Miele 2011).	146
Figura 64 - Esempio di mappatura dei degradi, della facciata de I Quattro Canti a Palermo, tramite il SICaR (da Fabiani et al. 2016).	146
Figura 65 - GIS della copertura della pieve di Novi (da Casanova, Acacia 2014).	147
Figura 66 - Il GIS 3D della torre di Santo Stefano a Sessanio e dell'intero borgo (da Bartolomucci et al. 2012).	148
Figura 67 - Il GIS 3D della casa di Iocundus Metellus a Pompei, progetto legato allo Swedish Pompeii Project (da Dell'Unto et al. 2016).	150

Figura 68 - GIS 3D degli interventi di restauro della Porta Valbona ad Urbino (da Baratin et al. 2020).	150
Figura 69 - L'interfaccia del software QGIS®.....	162
Figura 70 - L'interfaccia del software fotogrammetrico Agisoft Metashape®.	164
Figura 71 - L'interfaccia del software di fotoritocco GIMP®.	164
Figura 72 - L'interfaccia del software di modellazione 3D Blender®.....	165
Figura 73 - Fasi di installazione del plug-in DRes tramite la schermata di gestione ed installazione dei plug-in su QGIS®.	167
Figura 74 – Menu a tendina da cui accedere all'icona di apertura del plug-in DRes su QGIS®.....	168
Figura 75 - L'interfaccia grafica del plug-in DRes da cui si può accedere alle varie funzioni.	168
Figura 76 - Diagramma Entità-Relazioni (ER) del database/schema relativo al restauro virtuale bidimensionale.	174
Figura 77 - Diagramma del database/schema di restauro virtuale bidimensionale con tutte le voci delle varie tabelle.	175
Figura 78 - Diagramma Entità-Relazioni (ER) del database/schema di restauro virtuale tridimensionale.....	181
Figura 79 - Diagramma del database/schema di restauro virtuale tridimensionale con le voci dei vari campi delle tabelle.	182
Figura 80 - Rilievo dell'intero complesso della villa dei Quintili con in evidenza le varie aree (da Rotondi 2012).	187
Figura 81 - Planimetria dell'area centrale della villa dei Quintili, con in evidenza, cerchio rosso, l'ambiente A8 (da Paris et al. 2019).	188
Figura 82 - L'ambiente A8 con in evidenza le due porzioni di pavimentazione ancora conservate (da Cappelletto 2022).....	189
Figura 83 - Le crustae in marmo greco scritto e i listelli in marmo rosso antico	190
Figura 84 - L'ambiente A8 con in evidenza la porzione di pavimentazione caso di studio in una fase successiva al cedimento delle suspensure (da Paris et al. 2019).....	190
Figura 85 - Sistema con cui è stata riposizionata ed ancorata la pavimentazione sui tre pannelli a nido d'ape (da Lugari 2007).	191
Figura 86 - Alcuni degli scatti utilizzati per produrre il rilievo fotogrammetrico tramite Metashape®.	192
Figura 87 - La nuvola di punti sparsa della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.	193

Figura 88 - La nuvola di punti densa della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.	194
Figura 89 - La mesh della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotta tramite metashape®.....	194
Figura 90 – Il modello texturizzato della porzione di pavimentazione dell'ambiente A8 prodotto tramite metashape®.	195
Figura 91 - L'ortomosaico che riproduce in scala 1:1 la porzione di pavimentazione dell'ambiente A8.....	196
Figura 92 - Gli ortomosaici importati all'interno del progetto di QGIS® tramite la specifica casella del plug-in.	196
Figura 93 - Regolazione della gamma tonale dell’ortomosaico tramite lo strumento Curve su GIMP®.....	197
Figura 94 - Intervento di rimozione della frattura di un listello tramite lo strumento “clona” di GIMP®.....	198
Figura 95 – Il risultato finale delle elaborazioni di restauro virtuale prodotte tramite GIMP®.	198
Figura 96 – Restauro e ricostruzione virtuale della pavimentazione dell'ambiente A8 con in evidenza il lacerto minore di opus sectile originario.	199
Figura 97 - pgAdmin 4 creazione del database virtual_restoration_db tramite il file SQL che contiene il codice.	200
Figura 98 - Connessione del database Virtual_restoration_db tramite il Browser panel di QGIS. .	200
Figura 99 – Mappatura, tramite il livello “rv2d_Interventi” all'interno del progetto GIS, di tutti gli interventi di restauro virtuale eseguiti.....	201
Figura 100 - La scheda “oggetto” può essere aperta ed interrogata tramite un clic su uno o più poligoni della mappatura, grazie alla relazione 1:N tra la scheda “oggetto” e quella di “rv2d_intervento”.....	202
Figura 101 - La scheda “restauro virtuale 2D”, aperta tramite clic su uno dei poligoni, permette di accedere grazie alle relazioni 1:N e N:N alle altre tabelle relative alle analisi, ai restauri precedenti e alle fonti utilizzate per effettuare l’intervento stesso.	202
Figura 102 – Le necropoli di Cerveteri, a destra l'intera area della necropoli di Monte Abatone (da Beck et al. 2021)	203
Figura 103 - Area di indagine delle campagne condotte tra il 2018 e il 2022 (da Becker et al. 2023)	204
Figura 104 - Rilievo e ortomosaico fotogrammetrico della Tomba 643, nell'immagine di destra il corredo com'è stato individuato durante la campagna di scavo 2019 (da Micozzi 2021)	205

Figura 105 - Anforetta in bucchero proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021)	206
Figura 106 - Kotyle protocorinzia proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021).	206
Figura 107 - Ariballos protocorinzio proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021)	207
Figura 108 - Aryballos di imitazione protocorinzia proveniente dal corredo della tomba 643 di Monte Abatone (da Micozzi 2021).	208
Figura 109 - Area di scavo 2019 con in evidenza, cerchio rosso, la tomba 643 (da Micozzi 2021).	209
Figura 110 - Immagini dell'aryballos protocorinzio utilizzate per produrre il modello fotogrammetrico, a destra fase in cui si sono prese le misure per riportare in scala i modelli.	210
Figura 111 - Sparse cloude della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.....	211
Figura 112 - Dense cloude della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.	212
Figura 113 - Mesh della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.	212
Figura 114 - Texture della kotyle protocorinzia prodotta in Metashape®.....	213
Figura 115 - Il modello 3D fotogrammetrico della Kotyle importato su QGIS® come simbologia tridimensionale del vettore creato tramite DRes.....	214
Figura 116 - Modelli High poly e Low poly della Kotyle a confronto in Blender®.....	216
Figura 117 - Rendering finale delle elaborazioni di restauro virtuale che rispetta il principio della riconoscibilità delle integrazioni.	218
Figura 118 - Rendering finale delle elaborazioni di restauro virtuale che rispetta il principio della riconoscibilità delle integrazioni, altra visuale.	218
Figura 119 - Rendering finale dell'elaborazione di restauro e ricostruzione virtuale in mimetico..	219
Figura 120 - Rendering delle due ipotesi di restauro virtuale messe a confronto con il modello dell'opera originale.....	219
Figura 121 - I modelli tridimensionali fotogrammetrici e di restauro virtuale messi a confronto tramite l'interfaccia di QGIS®.	220
Figura 122 - Apertura della scheda “oggetto” dell'aryballos all'interno di QGIS® tramite clic sul relativo modello 3D.	221
Figura 123 - Apertura delle scheda di “restauro virtuale 3D” tramite clic sul punto che identifica la kotyle. Grazie alle relazioni 1:N e N:N, questa tabella, ci permette di accedere alle schede relative ai restauri precedenti, alle analisi e alle fonti.....	222

Figura 124 - Rendering finale di ricollocazione dei materiali del corredo della tomba 643, altra visuale.	223
Figura 125 - Rendering finale di ricollocazione e ricostruzione del corredo della tomba 643, tramite Blender®, altra visuale.....	223
Figura 126 - Il progetto di QGIS® contenente tutti gli elementi del corredo che sono stati elaborati tramite tecniche di restauro virtuale, georeferenziati correttamente sopra l'ortomosaico della tomba 643.....	224
Figura 127 - Il database associato ad ogni singolo elemento può essere consultato ed interrogato per poter accedere in contemporanea a più informazioni legate agli interventi e permettere una verifica della scientificità dell'elaborazione stessa.....	224
Figura 128 – Modello 3D fotogrammetrico che evidenzia la sequenza e la denominazione dei cinque ambienti del “Bagno del Cardinale” della villa del Colle del Cardinale a Perugia.	226
Figura 129 – Ortomosaico dell’intera cupola decorata a grottesche dell’ambiente E del “Bagno del cardinale”. In alto a destra, in rosso, l’area prescelta per l’intervento di restauro virtuale.....	227
Figura 130 - Sparse cloude dell’ambiente E prodotta in Metashape®.	228
Figura 131 - Dense cloude dell’ambiente E prodotta in Metashape®.	229
Figura 132 - Mesh dell’ambiente E prodotta in Metashape®.....	229
Figura 133 – Modello finale texturizzato dell’ambiente E prodotto in Metashape®.	230
Figura 134 – Ortomosaico della porzione di intervento dell’abside dell’ambiente E importato tramite la piattaforma DRes in QGIS®.....	231
Figura 135 – Il database per documentare gli interventi di restauro virtuale bidimensionale e tridimensionale ricostruito in pgAdmin 4® tramite “Query tool” e file .sql della piattaforma DRes.	231
Figura 136 – Visualizzazione dei modelli tridimensionali della porzione di abside prescelta per l’intervento e dell’intero ambiente E tramite “Mappa 3D” su QGIS®.....	232
Figura 137 – Fase di intervento di restauro virtuale bidimensionale tramite lo strumento “clona” su GIMP®.....	233
Figura 138 – Uso dello strumento “lazo” per la fase di intervento ricostruttivo su GIMP®.....	233
Figura 139 – Fase di importazione, tramite la piattaforma DRes, dell’ortomosaico finale di intervento di restauro virtuale bidimensionale su QGIS®.....	234
Figura 140 – Modelli low poly, a sinistra, e high poly, a destra, della porzione di abside su Blender®.....	235

Figura 141 – Modelli low poly, a sinistra, texturizzato con il risultato finale dell’elaborazione di restauro virtuale bidimensionale e high poly, a destra, con la texture della situazione odierna della porzione di abside.	236
Figura 142 – Mappatura interrogabile degli interventi di restauro virtuale, in rosso, e di restauro virtuale integrativo in verde in ambiente QGIS®.	236
Figura 143 – Visualizzazione del modello 3D di restauro virtuale con la relativa scheda di intervento e tabella delle fonti impiegate, collegate tramite le relazione 1:N e N:N in ambiente GIS.	237
Figura 144 – Mappatura 2D e 3D degli interventi di restauro virtuale e relativa scheda di intervento, visualizzabili ed interrogabili in ambiente GIS.....	238
Figura 145 - Mappatura 2D e 3D degli interventi di restauro virtuale integrativi e relativa scheda di intervento, visualizzabili ed interrogabili in ambiente GIS.	239
Figura 146 – Visualizzazione di tutti gli interventi e mappature eseguiti in 2D e 3D, mettendo in evidenza come questa piattaforma permetta di confrontare e valutare tutti i risultati ottenuti con i dati originali e con tutta la documentazione contenuta nel database relazionale associato ad ogni intervento.	239