POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale In Architettura Per Il
Restauro E La Valorizzazione Del Patrimonio
A.a. 2020/2021
Settembre 2021

VALORIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI ATTRAVERSO DIGITALIZZAZIONE E MANIFATTURA ADDITIVA:

LE GROTTE DI PALAZZO CAMPANA DI OSIMO

Relatori:

Prof. Paolo Minetola

Prof. Massimiliano Lo Turco

Candidato:

Mahsa Bahari

تقدیم به مادر و پدرم

AI MIEI GENITORI

TO MY PARENTS

INDICE

INDICE 3

INTRODUZIONE 6

CITTA DI OSIMO E LE GROTTE DI PALAZZO CAMPANA 7

Città di Osimo 7

Storia 10

Etimologia 15

Monumenti 17

Epoca Romana 17

Le Mura Urbiche 17

Le Porte Romane 19

La Fonte Magna 22

Epoca Medievale 24

Epoca Rinascimentale 25

Epoca Barocca 25

Grotte 26

Origine e Scoperta 27

Caratteristiche 28

Scopo 29

Grotte di Osimo 31

Le Grotte di Piazza Dante 31

Le Grotte Matteotti 31

Le Grotte del Cantinone 33

Le Grotte Riccioni 33

Le Grotte Simonetti 34

Le Grotte Campana 36

Inganno 42

DIGITALIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI E LA LORO FABBRICAZIONE ATTRAVERSO PRODUZIONE ADDITIVA 46

Digitalizzazione e Produzione Additiva del Patrimonio Culturale 46

Metodi di Digitalizzazione dei Beni Culturali 53

Fotogrammetria 53

Scansione 3d 54

Scansione Laser 3d 55

Scansione Laser 3d a Triangolazione 55
Scansione Laser 3d a Tempo di Volo 56
Scansione 3d a Luce Strutturata 57
Scansione 3d a Contatto 60
Passaggi Generali di Digitalizzazione 61
Acquisizione 61
Conversione 62
Allineamento 63
Semplificazione 63
Chiusura Buchi 63
Mesh a Solido Chiuso 64
Digitalizzazione della Figura dell'Inganno 65
Dispositivi e Software 65
Atos Core 65
GOM Scan e GOM Inspect 65
Acquisizione Dati 67
Conversione 69
Allineamento 69
Semplificazione 80
Chiusura Buchi 84
Mesh a Solido Chiuso 86
Stampa 3d 88
Tecnologie di Stampa 3d 88
Stampa 3d a Filamenti (FDM) 88
Polyjet 91
Stereolitografia 93
Sinterizzazione Selettiva con Laser 95
Stampa 3d della Figura dell'Inganno 97
Stampa 3d a Filamento 97
Parametri 99
Materiale 99
Densità di Riempimento 99
Altezza Slicing 101
Post Processing 106
Finitura 111
Polyjet 115

Materiale 115
Post Processing 115

ESPOSIZIONE DEI BASSORILIEVI E DELLE GROTTE DI PALAZZO CAMPANA 121
Esposizione del Modello Fisico 121
Riproduzione in Scala 1:1 121
Riproduzione della Maquette 128
Esposizione Virtuale 129
Una Collezione Online 129
Video Tour 130
Tour a 360 Gradi 131
Realtà Virtuale e Realtà Aumentata 132

CONCLUSIONE E FUTURE PROSPETTIVE DI RICERCA 138

BIBLIOGRAFIA 140

INTRODUZIONE

La digitalizzazione è un metodo efficace per conservare i beni culturali e per tramandare le loro caratteristiche strutturali ed artistiche alle future generazioni. Grazie allo sviluppo di tecnologie di scansione 3d e fotogrammetria, la digitalizzazione dei beni culturali è sempre più semplice, veloce ed economica. La digitalizzazione è particolarmente utile nel caso dei patrimoni che, per diversi motivi, non sono visitabili dal pubblico. Attraverso la digitalizzazione, la produzione delle repliche mediante manifattura additiva e con le soluzioni virtuali, è possibile accedere ai patrimoni culturali che altrimenti non sarebbero accessibili.

Le Grotte di Palazzo Campana situate ad Osimo, una città di 34,721 abitanti della provincia di Ancona, nelle Marche, sono delle gallerie sotterranee che ospitano dei bassorilievi misteriosi della data sconosciuta. Per mantenere le condizioni ambientali all'interno delle grotte, quali temperatura ed umidità e per minimizzare il deterioramento dei bassorilievi, l'accesso alle grotte è chiuso al pubblico.

Questa ricerca è frutto di uno studio approfondito della valorizzazione della figura dell'***Inganno***, uno dei bassorilievi delle Grotte Campana. Il progetto di valorizzazione prevede la riproduzione del modello tridimensionale dell'Inganno attraverso le tecnologie di stampa 3d a filamento e Polyjet e la valutazione di soluzioni virtuali come realtà virtuale e realtà aumentata per promuovere il patrimonio ipogeo di Osimo.

CITTA DI OSIMO E LE GROTTE DI PALAZZO CAMPANA

Città di Osimo

La città di Osimo, in comune di Osimo, provincia di Ancona, è situata nella parte centrale delle Marche e dista 15 km da Ancona. La città sorge su un colle che fa parte della catena delle colline plioceniche osimane ed è formato da arenaria scarsamente cementata con gli strati inferiori di argilla marnosa. Il colle, a sua volta, è costituito da due colline distinte affiancate: quella più alta, ad ovest, denominata Gòmero con un altezza di 265.2 metri, su cui sorge il Duomo (cattedrale di San Leopardo) e quella ad est, alta 259 metri, dell'odierna piazza Dante Alighieri e piazza Sant'Agostino. Un tempo, la valletta tra le due alture divideva il centro storico di Osimo in due parti ma oggi questa divisione non è più visibile poiché la valletta nel tempo è stata pianeggiata. Oggi la città è piana al lato sud e al lato ovest mentre al lato nord e al lato est è visibile una discesa molto ripida.

Figura 1. Posizione della città di Osimo all'interno delle Marche

Le due colline su cui si estende la città sono situate tra la valle del fiume Musone e la valletta dell'Aspio, il suo affluente. La presenza del fiume Musone, a soli 3 km da Osimo, garantisce la fertilità del terreno e di conseguenza la valorizzazione delle culture contadine. Attualmente 10.047 ettari dei 105,40 km2 del territorio comunale osimano, sono intensamente coltivati da olive, tabacco, vite, frutti e cereali[1].

Figura 2. La posizione elevata di Osimo: La città sorge su due colline distinte affiancate

Il fiume e le dolci colline verdi di sabbia e d'argilla non sono le uniche bellezze naturali di Osimo. Chi visita Osimo per la prima volta trova improvvisamente davanti agli occhi un panorama mozzafiato ed emozionante: il Mare Adriatico, i Monti Sibillini, il Monte Conero e il mare della Riviera del Conero a soli 15 chilometri di distanza dalla città. Per la sua posizione geografica dominante, nella storia Osimo ha sempre avuto un'importanza strategica nella parte centrale delle Marche e nel centro Italia.

[1] www.treccani.it/enciclopedia/osimo

Il colle di Osimo o Auximum, come fu chiamata dai romani, fu abitato già dall'epoca protostorica da diversi popoli: i Piceni, i Greco-Siculi, i Galli Senoni, i Romani e i Longobardi. Per la sua posizione isolata, elevata e dominante verso i territori che la circondavano e la sua inespugnabilità, Osimo ebbe un ruolo politico durante diversi conflitti e guerre tra cui le guerre civili del I secolo, le Guerre Greco-Gotica del VI secolo e la prima e la seconda Guerra Mondiale. Inoltre, essendo collocata in centro alle Marche, ebbe il controllo sulle arterie stradali che collegavano le diverse parti del Piceno. All'interno della città passavano delle importanti strade che si agganciavano alle due delle vie consolari romane; via Flaminia e via Salaria. La strada Ancona-Nuceria entrava in città dalla porta settentrionale e ne usciva attraverso Porta Musone, la porta meridionale, dopo di che si collegava con la via Flaminia che conduceva a Roma. La strada Ancona-Urbs Salvia si univa alla via Salaria e raggiungeva Asculum, l'attuale Ascoli Piceno.

Lo storico bizantino, Procopio di Cesarea nel VI secolo descrive Osimo come "Capitale del Piceno" e "Metropolis Piceni"[2] e Ancona come "Il Porto di Auximum" riferendosi all'importanza di Auximum e il declino di Ancona. Gli scritti di Procopio del 539 d.C. confermano anche che Auximum fosse la capitale della regione e tra le città più importanti del Piceno durante l'Alto Medioevo.

[2] www.avvocatogianlucamengoni.it/358/quando-auximum-era-la-metropolis-piceni

Storia

La prima civiltà a creare degli insediamenti sul colle di Osimo fu quella della preistoria. Durante gli scavi del 1944 e del 1958 ad Osimo, nella zona della Piazza San Giuseppe da Copertino, sono stati ritrovati dei materiali che risalgono a un periodo tra il IX ed il III secolo a.C[3]. Nella valle del fiume Musone e del Fiumicello, un suo affluente, sono stati scoperti vari oggetti cerimoniali e utensili di selce scheggiata insieme alle ossa e alle corna degli animali. Questi antichi ritrovamenti archeologici, databili a 40000-12000 anni fa, sono testimonianze di una lunga storia della civiltà, dal Paleolitico a oggi.

Tra il IX secolo a.C. e il III secolo a.C., sul colle di Osimo e su una delle sue alture, conosciuta come Monte San Pietro, si insediarono i Piceni. I Piceni furono un popolo Italico che ebbe origine da una primavera sacra e che secondo una teoria dell'etruscologo italiano, Giovanni Colonna, migrarono da Tiora Matiena, nel cuore della Sabina, verso Ascoli[4]. Il nome Piceni o Picenti, in latino Picentes, deriva da "picus", il picchio verde[5] che fu il loro oracolo e che guidò la loro migrazione verso Ascoli.

Il territorio del Picenum corrisponde alle attuali Marche e alla parte settentrionale dell'Abruzzo. Il confine occidentale del Picenum era marcato dall'Appennino e quello orientale dal mare Adriatico. Per quanto riguarda il confine settentrionale e quello meridionale, esistono varie ipotesi. Lo storico e archeologo livornese Giuseppe Micali (1768 – 1844), ritiene che il territorio Piceno fosse la terra tra i due fiumi: fiume Esino (Aesis in latino) al nord e il fiume Tronto (Truentum e Truentus in latino)[6] al sud. Mentre quest'ultimo è situato sempre nelle Marche, alcuni studiosi ritengono che il confine meridionale fosse in realtà nella regione Abruzzo, in corrispondenza con il fiume Aterno-Pescara (Aternus in latino). Alessandro Naso, archeologo

[3] Gino Vinicio Gentili, Auximum (Osimo): regio v: Picenum, Istituto di studi romani, Osimo, 1955
[4] https://sites.google.com/site/regiovpicenum
[5] Dal 4 novembre 1995 lo stemma della Marche è rappresentato con un picchio verde, sovrapposto sulla lettera "M", su uno sfondo bianco.
[6] Giuseppe Micali, Storia degli antichi popoli italiani, Tipografia all' insegna di Dante, Firenze, 1832

italiano, nelle sue pubblicazioni descrive il confine settentrionale del territorio in corrispondenza del fiume Foglia[7].

Durante le conquiste romane del III secolo a.C., i Piceni crearono un'alleanza con i Romani che durò per anni. I Piceni si appoggiavano alla forza militare dei Romani, i Romani usufruivano della posizione strategica di Auximum durante le battaglie. Il primo contatto tra i due popoli nel territorio del colle di Osimo risale al 299 a.C., quando i Romani e i Piceni si allearono contro i Galli e gli Etruschi che minacciavano il territorio romano espandendosi verso il Tevere. Nel 295 a.C. i Romani sconfissero i Sanniti nella battaglia di Sentino, famosa anche come la battaglia di Sassoferrato. Nel 290 a.C. riuscirono a conquistare il territorio dei Pretuzi al sud del Piceno e nel 283 a.C. vinsero la battaglia contro i Galli Senoni e occuparono la terra a nord del Piceno. I Piceni ritrovandosi circondati dai romani, cominciarono a ribellarsi contro lo stato romano per la mancanza di autonomia e fu così che nel 283 a.C. scoppiò la Guerra Picentina. Nel 268 a.C. la resistenza picena fu sconfitta e di conseguenza cominciò la romanizzazione del Piceno. Ancona e Ascoli mantennero la propria autonomia e furono dichiarate *civitas foederata*, cioè delle comunità alleate con Roma tramite un tratto formale o *foedus*. Auximum, invece, inizialmente fu *municipium sine suffragio*, cioè senza il diritto di voto per i suoi cittadini ma poi diventò *municipium optimo iure*, che per gli abitanti di Auximum significava avere la cittadinanza romana con tutti i diritti politici che la accompagnavano come il diritto di voto.

Nel 174 a.C. cominciò la costruzione delle strutture pubbliche all'interno del foro, delle fortificazioni e delle mura urbane che in parte sopravvivono ancora oggi. Secondo le testimonianze dello storico romano, Velleio Patercolo, nel 157 a.C. fu fondata la colonia romana di Auximum, la seconda colonia nel territorio piceno dopo Potentia (184 a.C.) e l'ultima delle colonie romane lungo la costa adriatica nel II secolo a.C[8]. Nel 27 a.C. il territorio abitato dai Piceni venne chiamato Regio V Picenum, cioè la quinta regione romana dell'Italia augustea e i cittadini di Auximum furono scritti nella tribù Velina.

[7] https://sites.google.com/site/regiovpicenum
[8] www.romanoimpero.com

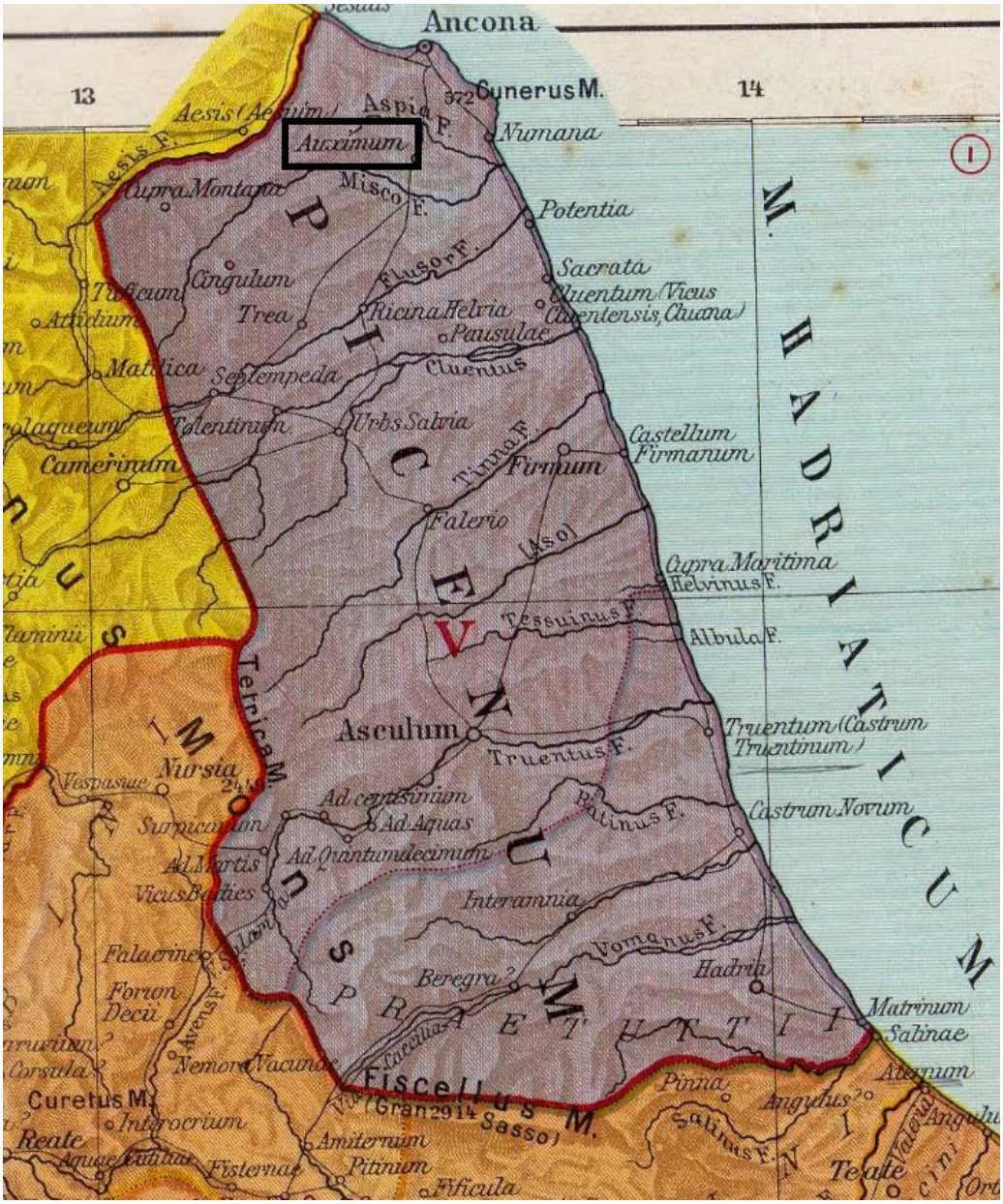

Figura 3. La posizione di Auximum all'interno del Regio V Picenum. Il Regio V Picenum corrisponde alle attuali Marche e alla parte settentrionale dell'Abruzzo

Sono varie le strutture e i monumenti di Auximum che ad oggi sopravvivono, però la Fonte Magna e la Cinta Muraria sono sicuramente tra le più importanti. Si conservano ancora anche vari oggetti dell'epoca romana tra cui oreficeria, monete, cippi funerari, statue di marmo e mosaici pavimentali.

Considerando l'importanza di Auximum, gli studiosi ipotizzano che un tempo esistessero un teatro e un anfiteatro. Si ipotizza che il teatro fosse collocato sul Gòmero, mentre l'anfiteatro doveva essere posizionato all'esterno delle mura urbane[9]. A causa della mancanza di testimonianze sulla loro esistenza, sia in forma scritta che come resti archeologici, questa teoria non è mai stata approvata.

L'impronta dei romani nel tessuto urbano della città di Osimo è ancora ben visibile. Nel centro storico della città, che nel tempo ha preso la forma di un piede con la punta verso il mare[10], è ancora riconoscibile la pianta ortogonale e lo schema del castro romano (castrum) con la via principalis (cardo massimo) lungo via del Sacramento e la via praetoria (decumano massimo) che corrisponde all'odierna Corso Giuseppe Mazzini. All'incrocio delle due strade e in corrispondenza con l'odierno Palazzo Comunale e la Piazza Buccolino, si trovava il forum.

Figura 4. Centro storico di Osimo

[9] Lorenzo Quilici, Stefania Quilici Gigli, Architettura e pianificazione urbana nell'Italia antica, L'Erma di Bretschneider, 1997

[10] www.osimoturismo.it

Dopo il regno dei romani e nell'epoca alto medievale, Auximum fu occupata dai Goti ed ebbe un importantissimo ruolo strategico durante le Guerre Greco-Gotica (535-553 d.C.). Con la vittoria dell'Impero bizantino Auximum fece parte del loro territorio finché tra il 727 e il 728 d.C. venne conquistata dai Longobardi e Auximum e Ancona diventarono due ducati.

Dal 774 fino all'Unificazione d'Italia nel 1860, lo stato politico di Osimo fu fortemente sotto l'influenza della Chiesa. Con l'ascesa dello Stato Pontificio tra il 751 e il 756 d.C., Osimo subì vari cambiamenti riguardo il proprio dominio e autorità. Fu nel 774 che Osimo entrò per la prima volta a far parte del territorio dello Stato della Chiesa quando Carlo Magno, il re dei Franchi, sconfiggendo il re dei Longobardi, donò Osimo al papa Adriano I. Dal 1240 cominciarono una serie di conflitti tra Osimo e lo Stato della Chiesa. Nel 1240 il papa Gregorio IX tolse la sede vescovile della città perché gli osimani seguivano il re Manfredi di Sicilia. Nel 1264 la città, ormai un libero comune, riebbe la sede vescovile per perderla di nuovo nel 1320 quando venne scomunicata dalla chiesa e le venne tolto il titolo di città[11]. Nel 1368 Osimo riebbe sia il titolo di città che la sede vescovile e dal 1487, l'anno in cui la città tornò definitivamente alla diretta dipendenza della chiesa, cominciò un periodo di pace.

Gli osimani combatterono per l'indipendenza d'Italia partecipando alla battaglia di Castelfidardo nel 1860 ed entrarono a far parte del Regno d'Italia.

[11] Dal 1316 al 1329 i fratelli Andrea e Lippaccio Guzzolini prendono il controllo di Osimo, motivo per cui il papa tolse sia la sede vescovile che il titolo di città, cosa che fu indebolire molto gli osimani. Eventualmente nel 1337 i Guzzolini furono cacciati dalla città quando Malatesta Guastafamiglia prende Osimo sotto il suo controllo.

Etimologia

Esistono due ipotesi sviluppate dagli storici riguardo le origini del nome "Osimo". Secondo la prima ipotesi sostenuta da alcuni storici del Seicento e del Settecento, tra cui Monsignor Don Carlo Grillantini, il significato di Osimo sarebbe "accrescimento". Il termine deriva dal verbo greco "*αὐξάνω"* (lat. augeo) e dal verbo latino *"augeo"* che significherebbero "accrescere"[12], un riferimento all'aumento di importanza e allo sviluppo sia urbanistico e architettonico che politico ed economico della città, grazie alla sua importante posizione geografica.

La seconda ipotesi ritiene che la parola *"Auximum"* o *"Oximum"* abbia un'origine Umbro-Sabina del popolo piceno o che sia legata ai Celti e che derivi dal termine celtico *"Uxama"* che significa "elevata" o "alta". Quindi Auximum dovrebbe significare "la città elevata" indicando nuovamente la sua posizione geografica sul colle. Lo storico tedesco Edgar Radtke e archeologo italiano Gino Vinicio Gentili sono tra gli studiosi che sostengono questa seconda ipotesi.

Esistono varie testimonianze su Auximum nei lavori eseguiti da diversi autori. Secondo il sito romanoimpero.com, le fonti sono tali:
Plinio (Naturalis Historia III, XIII. 112)
"...intus Auximates"
All'interno sono gli Auximati.

Strabone (Storia Universale 5, 4.2)
"Ἄξουμον πόλις μικρὸν ὑπερ τῆς θαλάττης"
La città di Osimo, un pò all'interno della linea di costa.

Lucano (Pharsalia, Bellum Civile II, 466-468)
"Varus, ut admotae pulsarunt Auximon alae, per diversa ruens neglecto moenia tergo qua silvae qua saxa, fugit..."

[12] Carlo Grillantini, Storia di Osimo, IV edizione, Tecnostampa, Loreto, Osimo, 2006

Varo, non appena gli squadroni di cavalleria si mossero ed attaccarono Osimo, attraversando sconsideratamente diverse città senza neanche curarsi di proteggersi le spalle, fugge per boschi e luoghi rocciosi[13].

[13] www.romanoimpero.com

Monumenti

Ad Osimo,oggi sopravvivono varie strutture, monumenti ed edifici storici, la maggior parte dell'epoca romana, tra cui le mura urbiche, le porte della città e l'antica Fonte Magna.

Epoca Romana

Le Mura Urbiche

Le mura urbiche, sopravvissute in parte, sono senza dubbio l'opera più importante dall'Impero romano. Secondo lo storico Tito Livio, furono i due censori romani Quintus Fulvius Flaccus e Aulus Postumius[14] ad avviare i lavori per la costruzione della cinta muraria nel 174 a.C. Le mura un tempo percorrevano per circa 2km la circonferenza del centro della città romana, circondando un'area di sedici ettari compreso i due colli sui quali sorgeva Auximum. Sono state costruite secondo la tecnica di *opus quadratum*, con la sovrapposizione dei blocchi rettangolari di 40-45 cm di tufo e arenaria, provenienti dalle colline accanto. Le mura avevano uno spessore di 2 metri ed erano alte tra 6 e 8 metri per garantire l'inespugnabilità della città, soprattutto durante gli assedi. Si ipotizza che dopo i lavori di rafforzamento effettuati verso la fine dell'Impero romano, le mura abbiano raggiunto un'altezza massima di 10 metri. Oggi si conserva ancora un tratto da 250 metri della cinta muraria lungo Via Fonte Magna che è considerato come uno dei tratti più estesi e meglio conservati delle mura antiche delle Marche.

[14] www.romanoimpero.com

Figura 5. Le mura urbiche costruite secondo la tecnica costruttiva opus quadratum o Opera Quadrata

Figura 6. Il tratto della mura urbiche ad Osimo, è considerato come uno dei tratti meglio conservati delle mura antiche delle Marche

Le Porte Romane

All'interno del castro romano e alle estremità della via principalis (cardo massimo) e la via praetoria (decumano massimo) esistono tre porte romane che una volta fungevano da ingresso della città. Le tre porte sono la porta Musone, la porta San Giacomo e la porta Vaccaro che sono posizionate, rispettivamente, lungo il tratto meridionale, settentrionale e orientale dell'antica cinta muraria. Da porta Musone e porta San Giacomo passavano delle vie che conducevano ad Ancona. Come le mura romane, anche le porte della città furono costruite con dei grandi blocchi di arenaria provenienti delle colline intorno.

Porta Musone si trova nel quartiere Borgo Guarnieri, una volta conosciuto come Filello. La parte portante della struttura, a sinistra, è l'unica parte della porta che sopravvive dell'epoca romana. Il resto della struttura odierna è frutto dei lavori di restauro e di conservazione effettuati nell'epoca medioevale. Sempre nell'epoca medioevale, la porta fu soprannominata "Porta Caldararia" perché nelle vicinanze si trovavano le botteghe degli artigiani, soprattutto calderai e stagnai[15].

Porta San Giacomo, chiamata anche "Porta Borgo", era incorporata nella rocca di difesa dell'epoca rinascimentale. Come la rocca, anche la porta fu commissionata da Papa Innocenzo VIII in una data tra 1487 e 1488. Si è conservato l'arco quattrocentesco con la scritta Vetus Auximum sui conci.

Porta Vaccaro è anche conosciuta come la "Porta dei Tre Archi" tra i cittadini. Inizialmente la porta fu costituita da solo un arco ma nel 1937 la struttura è stata ampliata con l'aggiunta di due altri archi più piccoli sui due lati. La porta viene chiamata Vaccaro perché si pensa che un tempo ci fosse il mercato di bovino a distanza di pochi metri.

[15] www.fondoambiente.it

Figura 7. Porta Musone, la porta meridionale della città

Figura 8. Porta San Giacomo, la porta settentrionale della città

Figura 9. Porta Vaccaro, la porta orientale della città

La Fonte Magna

La Fonte Magna è una fontana monumentale antica che fu costruita per l'uso pubblico. È posizionata nel centro di Osimo, sotto lo strapiombo della sezione settentrionale delle mura urbiche, in un giardino romantico immerso nel verde. Oggi la fonte è accessibile scendendo dalla via omonima attraverso delle scale in pietra ma una volta ci si raggiungeva dalla città attraverso la postierla.

Figura 10. Fonte Magna, la fontana monumentale antica di Osimo

Le origini della denominazione della fonte non sono ben conosciute però si ipotizza che la parola "magna" fosse un riferimento alla sua dimensione e al fatto che sia stata la risorsa idrica più grande e più importante della città per millenni. La prima testimonianza del nome attuale

della fonte è una pianta[16] di Osimo datata tra il 1571 e la seconda metà del XVII. In questo documento si riferisce al "la fonte romana" con il nome "Fonte Magna". Secondo il libro Campagna e paesaggio nell'Italia antica a cura di Lorenzo Quilici e Stefania Quilici Gigli, questa pianta è "la prima attestazione dell'attuale nome della fontana, evidentemente creato in epoca tardo rinascimentale, nel periodo di riscoperta delle antichità classiche: un nome che porta al suo interno un voluto latinismo, e, nello stesso tempo, richiama, più o meno volontariamente, la figura storica di Pompeo Magno, il quale, nonostante nulla possa provare il suo legame con la fonte, tuttavia passò gli anni della sua giovinezza nella città di Auximum." Pompeo Magno è stato associato alla fonte magna in diverse occasioni, sia in forma verbale che in forma scritta. Un esempio è il documento del 1807[17] nel quale Marcantonio Talleoni attribuisce la costruzione e la cura della fonte a Pompeo Magno, che Secondo la leggenda, durante le guerre civili fece abbeverare qui i suoi cavalli[18].

Ciò che ad oggi rimane in situ è un complesso delle strutture legate tra di loro: i resti della struttura originale della fonte antica in opera cementizia, alta 5.75m, una scala con una larghezza di 1.18m, composta da sei gradini realizzati con i blocchi di arenaria con la tecnica costruttiva opus quadratum, un pozzo circolare con una profondità di 3m sempre costruito da blocchi di arenaria in opera quadrata, un cunicolo e una vasca che veniva utilizzata per raccogliere l'acqua.

Secondo gli studiosi la struttura originale della fonte era un ninfeo con una forma semicircolare o semiellittica e un tempo era coperta da una volta che proteggeva la struttura sottostante e i cittadini che ne usufruivano. Basandosi sulla tecnica della costruzione e considerando il periodo della diffusione delle fontane ad esedra semicircolare, la data della costruzione della Fonte Magna è stata stimata tra I e II secolo d.C.

[16] Attualmente la pianta si trova all'archivio storico comunale di Osimo
[17] Lorenzo Quilici, Stefania Quilici Gigli, Campagna e paesaggio nell'Italia antica, L'Erma di Bretschneider, 2000
[18] www.rivieradelconero.info

Epoca Medievale

Il monumento più importante dell'epoca medievale, è la cattedrale di San Leopardo, il duomo della città di Osimo che è situato sul Gòmero. La cattedrale fu dedicata al primo vescovo della città, San Leopardo e fu fondata nel IV secolo da lui stesso, come prevedeva la tradizione[19]. Nel corso dei secoli l'edificio è stato sottoposto a diversi lavori di ricostruzione, ampliamento e restauro. Attualmente l'edificio presenta uno stile romantico-gotico: il carattere romantico della cattedrale è dovuto ai lavori eseguiti nella metà del XIII secolo mentre gli elementi gotici sono stati aggiunti nel fine del XIII secolo.

Figura 11. La cattedrale di San Leopardo, il duomo della città di Osimo

[19] www.iluoghidelsilenzio.it

Epoca Rinascimentale

Dall'epoca rinascimentale sopravvivono dei resti della Rocca e il Palazzo Vescovile tra l'attuale via Giulia, via Baccio Pontelli e via Antica Rocca. Nel 1489, dopo un periodo di rivolte e soprattutto dopo un assedio che durò due anni, dal 1485 al 1487[20], il Papa Innocenzo VIII, commissionò all'architetto Baccio Pontelli (1450-1492) la costruzione di una rocca di difesa. Nel 1495, dopo sei anni dalla sua costruzione, a causa di un elevato costo di mantenimento e mancanza di utilità, una volta tornata la pace ad Osimo, il successore di papa, Giulio II, ordinò la demolizione della rocca. L'ordine fu eseguito nel 1506 ma furono mantenuti sia la parte settentrionale della struttura che gli elementi portanti e i basamenti. Ad oggi, restano il Palazzo Vescovile che fu costruito sui resti dei basamenti della rocca e la torre d'avvistamento che serve da campanile.

Epoca Barocca

All'interno della città e in periferia, si trovano vari nobili palazzi e ville patrizie settecentesche del periodo barocco[21].

[20] Aa.Vv., Architettura del classicismo tra Quattrocento e Cinquecento - Marche, Ferruccio Canali, Francesco Quinterio, Roma, 2009
[21] www.treccani.it

Grotte

Nel sottosuolo della città di Osimo esiste un'affascinante città ipogea, parallela a quella sulla superficie. Un labirinto di grotte, cunicoli e pozzi interconnessi tra di loro, che si espandono sotto l'intera città e collegano le chiese, le piazze e i palazzi nobiliari più importanti di Osimo. Le grotte di Osimo danno origine a numerose leggende e sono conosciute come uno dei luoghi più misteriosi d'Italia.

Figura 12. Le Grotte di Osimo

Origine e Scoperta

Sia la nascita, che la rispettiva funzione di questo elaborato sistema di grotte e cunicoli ad oggi rimangono sconosciute. Gli storici tracciano le origini delle grotte di Osimo a circa 2500 anni fa, quando le antiche popolazioni cominciarono a scavare il tufo e a creare un complesso di cunicoli e grotte a misura d'uomo dentro la collina.

Nonostante la numerosità e complessità di queste grotte, vengono raramente citate nei documenti storici. La loro esistenza fu un segreto per secoli e furono menzionate soltanto verbalmente tra gli abitanti e coloro che ne usufruivano. Il motivo principale di questo silenzio, probabilmente riguarda la loro funzione come salvaguardia e vie di fuga per gli abitanti della città. Dimenticate per quasi decenni, le grotte di Osimo furono riscoperte durante la Seconda Guerra Mondiale quando gli abitanti di Osimo, alla ricerca di un rifugio sicuro antiaereo, scoprirono gli accessi che collegavano la loro proprietà con la città sotterranea.

Figura 13. Le Grotte di Osimo

Caratteristiche

In una mappatura effettuata nel 1989, sono state censite 88 grotte e nicchie raccordate tra di loro, estese per un totale di 9 chilometri. Alcune grotte sono sviluppate su più livelli ed arrivano fino a 5 piani sotto il livello stradale, partendo da una profondità minima di 5 metri fino ad una profondità massima di 15 metri con una profondità media di 8-10 metri[22]. Tutte le gallerie hanno un'altezza media di 2,5 metri e una larghezza di 1,4 metri di apertura. Quasi tutte le grotte hanno una disposizione a "doppio pettine", cioè sono simmetriche rispetto alla nicchia corrispondente. Data la similitudine delle caratteristiche delle grotte di Osimo, si può concludere che le gallerie siano state costruite secondo un unico progetto.

Oltre alle grotte, cunicoli e le nicchie, sono stati registrati oltre cento pozzi. I pozzi erano dotati di pedarole e le parti scavate nella parete che servivano per salire e scendere sono ad oggi ben visibili e in molti casi praticabili. Data la segretezza di questi luoghi, si ipotizza che un tempo l'unico modo per accedere alle gallerie sotterrane fosse attraverso questi pozzi circolari, soprattutto nel caso di chiese o importanti palazzi nobiliari dove solitamente nel loro cortile o nella vicinanza si trovavano uno o due pozzi. Oltre a collegare le grotte con la superficie, i pozzi permettevano il ricambio di aria e l'ingresso della luce. I pozzi più profondi raggiungevano la falda freatica e servivano come cisterne fornendo acqua per l'intera città. La maggior parte dei pozzi hanno una forma circolare, in media hanno un diametro di 90 centimetri e oggi sono tutti prosciugati.

Durante ulteriori ricerche e indagini, sono state scoperte altre diramazioni portando il percorso sotterraneo a un totale di circa 12 chilometri.

[22] www.duepassinelmistero.com

Scopo

Ci sono diverse ipotesi riguardo lo scopo per il quale le grotte di Osimo sono state costruite. Le grotte sono state create in seguito all'estrazione di arenaria che veniva utilizzata dagli osimani per costruire i palazzi. I passaggi sotterranei e i camminamenti segreti servivano per la fuga al momento di pericolo mentre le grotte e le gallerie erano abitabili e furono utilizzate come rifugio in caso di attacco o semplicemente come cantine o frigoriferi naturali per conservare il cibo. I cunicoli, i pozzi e le cisterne che raggiungevano la falda freatica fornivano l'approvvigionamento idrico alla città.

Tuttavia, non si tratta solo di gallerie grezze e cunicoli idraulici, alcune di queste grotte sono riccamente decorate da simbologie religiose pagane e cristiane che risalgono a diversi periodi storici. L'intera città sotterranea è infatti ricca di sculture allegoriche, antiche simbologie alchemiche, bassorilievi, incisioni, stemmi araldici, croci templari, sirene, stelle e da un periodo più recente i graffiti lasciati durante la Seconda Guerra Mondiale. Tutto ciò è una testimonianza che le grotte di Osimo erano troppo complesse e misteriose per essere semplicemente delle cisterne e che avevano una funzione più specifica e sistematica. Alcuni di questi ambienti erano sicuramente dedicati agli incontri, riunioni e cerimonie segrete e allo svolgimento dei rituali di culto pagano e sacro. Alcuni incisioni e simboli dimostrano che le grotte fossero visitate e vissute dall'Ordine dei Templari e dai Cavalieri di Malta. Sono numerosi i bassorilievi ancora non decifrati e le grotte di Osimo nascondono ancora dei misteri dall'epoca romana alla Seconda Guerra Mondiale.

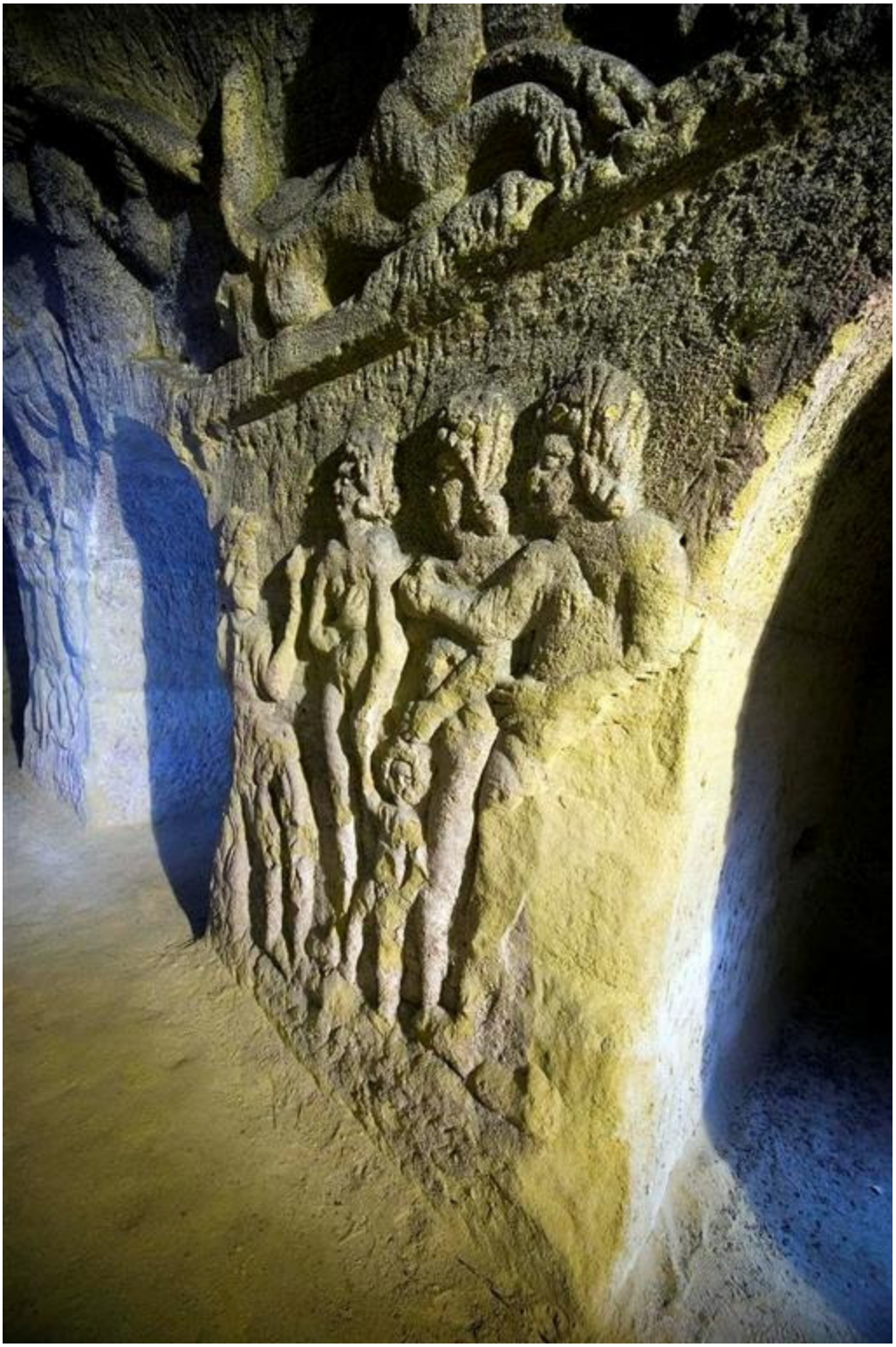

Figura 14. Alcune delle grotte di Osimo sono riccamente decorate: Bassorilievi delle Grotte Campana

Grotte di Osimo

Le grotte più importanti di Osimo si trovano sotto le piazze e i principali palazzi gentilizi della città, una tempo appartenenti alle famiglie più importanti di Osimo. Ogni palazzo, aveva la propria rete di cunicoli nel suo sottosuolo, che permetteva la comunicazione con gli edifici in prossimità. Ciò ad oggi non è più possibile poiché sono stati costruiti dei muretti di mattone per chiudere l'accesso da un palazzo all'altro.

Le principali grotte di Osimo sono: le Grotte di Piazza Dante, le Grotte Matteotti, le Grotte del Cantinone, le Grotte Riccioni, le Grotte Simonetti e le Grotte di Campana.

Le Grotte di Piazza Dante

Le grotte di Piazza Dante, prendono il loro nome dalla piazza sotto la quale sono collocate. L'ingresso alle grotte è nascosto all'interno delle cantine del Palazzo Fregonara-Gallo. Le grotte di Piazza Dante sono disposte su due livelli e raggiungono una profondità di 10 metri. Sono ricoperte di simboli esoterici ed enigmatici e furono utilizzate per le riunioni segrete tra le famiglie più importanti di Osimo tra questi i residenti dei palazzi sovrastanti. Oltre alle antiche simbologie, si notano anche i graffiti e le incisioni sulle pareti, lasciati da coloro che hanno trovato rifugio dentro queste grotte durante la Seconda Guerra Mondiale.

Le Grotte Matteotti

Nel sottosuolo di Largo Matteotti, è situata la grotta Matteotti, riconosciuta tra gli abitanti di Osimo anche come "Grotta proibita". Questa grotta raggiunge una profondità di 12 metri e le aperture hanno una larghezza di 2 metri e un'altezza di 3 metri. È possibile accedere alla grotta da due punti: dal sottopasso di corso Trieste e da via Garibaldi. Tra i suoi spazi più interessanti, vi è una sala circolare che richiama un mitreo, il luogo sacro dedicato all'antica divinità persiana, Mitra. All'interno di questo spazio circolare, si trova una sorta di sedile che percorre tutta la circonferenza della sala, cinque nicchie scavate sulla parete al di sopra del sedile e una colonna

al centro. Questa sala, che aveva una funzione mistica, rende la Grotta Matteotti, una delle grotte più misteriose di Osimo.

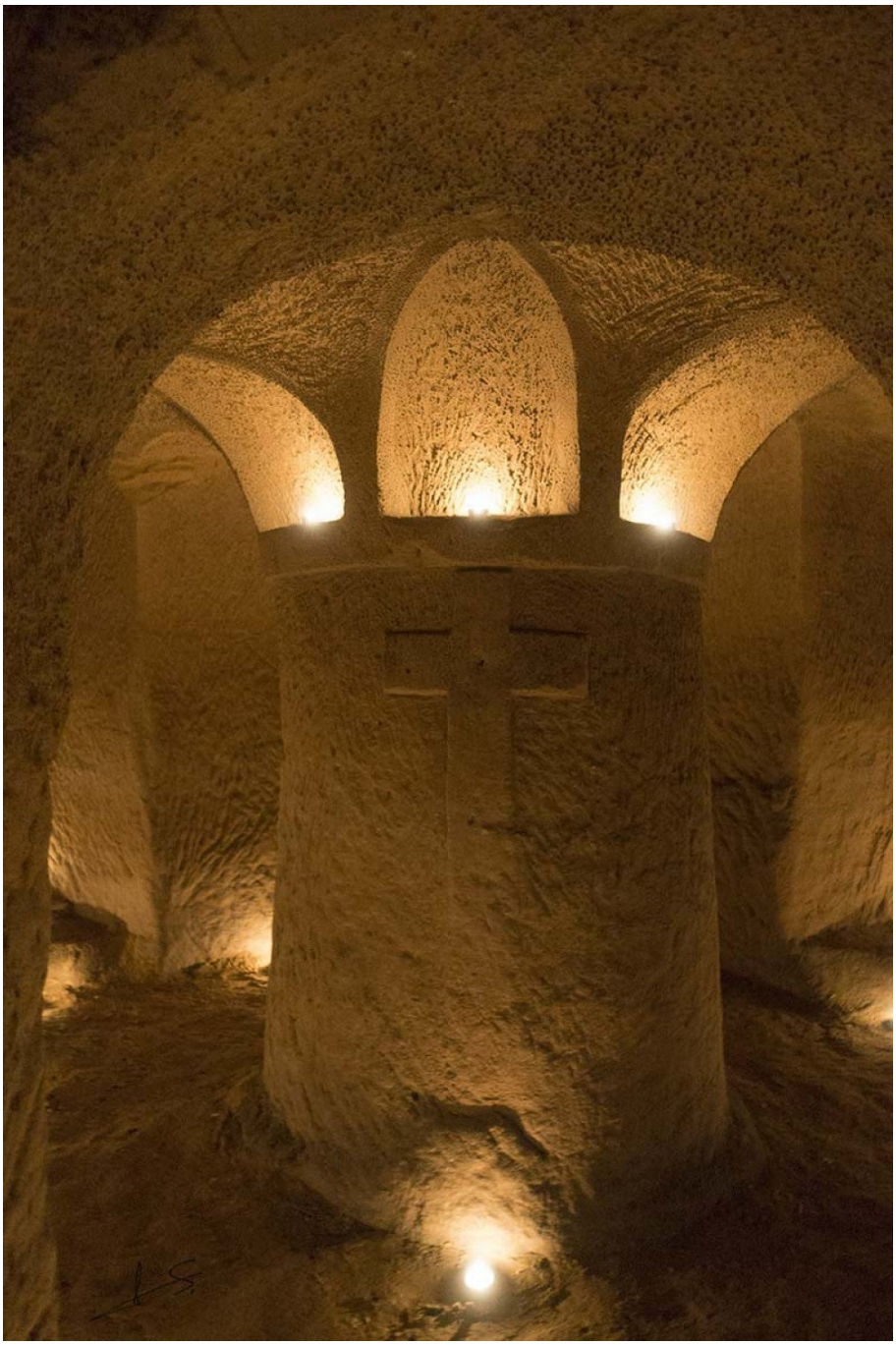

Figura 15. La colonna all'interno della sala circolare, le Grotte Matteotti

Le Grotte del Cantinone

Le Grotte del Cantinone fanno un percorso di 300 metri sotto il Santuario di San Giuseppe da Copertino e il Mercato Coperto di Osimo. Le pareti delle gallerie sono di arenaria e sono decorate da bassorilievi e simbologie di tipo religioso. Queste grotte furono usate come dei luoghi di culto dove si svolgevano i rituali e gli incontri di natura religiosa. Le Grotte del Cantinone sono raggiungibili attraverso gli antichi pozzi circolari muniti di pedarole.

Figura 16. Le gallerie delle Grotte del Cantinone

Le Grotte Riccioni

Le Grotte Riccioni sono di proprietà della famiglia Riccioni e sono le grotte meglio conservate della città. Rispetto alle altre grotte di Osimo, seguono un percorso molto più breve e hanno un'estensione limitata. Tali grotte possiedono una struttura molto particolare piena di

simbologie non decifrate. Tra queste simbologie è presente una croce ad otto braccia sulla volta d'ingresso che collega questo luogo all'Ordine dei Cavalieri Templari. Si ipotizza che la sala circolare, situata alla fine del percorso di queste grotte, fosse utilizzata dai Cavalieri per compiere rituali, cerimonie e riunioni. Questa sala circolare, che è unica nel suo genere, ha una pianta a forma di stella a cinque punte. Su ogni punta della stella è stata scolpita una panca su cui si sedevano gli iniziati, gli officianti e le figure importanti dell'Ordine, durante le riunioni e i rituali. La posizione della panca permetteva agli officianti di sentirsi tra di loro senza mai vedersi. È possibile accedere alle grotte Riccioni tramite una cantina collocata nel Palazzo Leopardi.

Le Grotte Simonetti

Le grotte Simonetti prendono nome dal Palazzo Simonetti, sotto il quale sono collocate. Nel XII secolo il palazzo apparteneva alla nobile famiglia Sinibaldi e più tardi venne abitato e ampliato dall'antica e nobile famiglia Simonetti, originaria della città di Jesi. Secondo gli storici, gli spazi all'interno delle grotte Simonetti, come nelle altre grotte della città, erano dedicati alle riunioni e rituali e furono frequentati dai Cavalieri Templari e l'Ordine dei Cavalieri di Malta, di cui facevano parte alcuni membri sia della famiglia Sinibaldi che Simonetti. Oltre alle innumerevoli croci Templari e di Malta, ciò che conferma l'ipotesi, è la presenza di una stella ad otto punte e il simbolo della Triplice Cinta, chiamato anche "labirinto", scavato su una parete di arenaria. La Triplice Cinta è tra i simboli più diffusi negli edifici templari e rappresenta i tre gradi di iniziazione e il percorso dell'iniziato verso il centro. Tra gli altri simboli molto importanti che si trovano all'interno delle grotte Simonetti, c'è la figura di una sirena con due code che rappresenta una divinità legata all'elemento dell'acqua.

Figura 17. La Triplice Cinta o "labirinto", uno dei simboli più diffusi negli edifici templari

Figura 18. La sala circolare, le Grotte Simonetti

Le Grotte Campana

Le Grotte Campana sono situate sotto l'omonimo palazzo. Il Palazzo Campana fu abitato dalla famiglia nobile dei Campana nel XVII secolo fino alla loro estinzione nel 1698. Nel 1715 il palazzo fu scelto come sede di un istituto educativo maschile, Nobil Collegio Convitto Campana. In seguito, nel 1776, venne commissionato all'architetto Andrea Vici il lavoro di ampliamento del palazzo per adattarlo alla sua nuova funzione. Vici aggiunse il corpo occidentale al palazzo principale, realizzato in tre piani: il teatrino al piano seminterrato, il refettorio al piano terra e la cappella al piano nobile. I lavori furono terminati nel 1788.

Il Collegio Campana è stato chiuso dopo 250 anni e nel 1984 il palazzo è diventato la sede dell'Istituto Campana per l'Istruzione Permanente che si occupa di formazione, istruzione ed attività culturali[23]. Oltre all'Istituto Campana, il Palazzo Campana ospita la Biblioteca Storica, il Museo Civico di Osimo, l'Archivio Storico e la Collezione d'Arte Contemporanea.

Figura 19. Il Palazzo Campana

[23] www.istitutocampana.it

Nel sottosuolo di Palazzo Campana, si estende un labirinto di grotte sviluppate su diversi piani e tutte connesse tra di loro. Oltre alle gallerie grezze, le scale e le nicchie sono presenti due gallerie che ospitano sulle loro pareti dei bassorilievi scolpiti nell'arenaria che simboleggiano i personaggi mitologici. Sia il significato che la data in cui le sculture sono state create sono sconosciuti. Si può accedere alla prima galleria scendendo 21 gradini. La galleria si snoda in direzione Ovest-Est e termina con un'ampia nicchia dove sono scolpiti due bassorilievi. Entrambi raffigurano Venere, dea della bellezza e sensualità, quella più piccola posizionata sulla destra e quella più grande di fronte. La seconda galleria si estende in direzione Sud-Nord, è più lunga e più alta e contiene bassorilievi su due livelli che in alcuni casi arrivano fino alla volta. La galleria termina in una sala circolare che veniva utilizzata per riunioni segrete tra le famiglie più importanti di Osimo. A testimoniare sono quattro stemmi araldici scolpiti sulla volta che rappresentano quattro famiglie nobiliari di Osimo[24] e circondano una stella a sette punte. Dopo la sala circolare, alla fine della seconda galleria, ci sono quattro gradini, di fronte è presente un muro di mattoni costruito recentemente per chiudere l'accesso e sulla sinistra vi è un pozzo circolare di 5,50 metri di profondità che probabilmente conduce al cortile interno del palazzo. L'accesso alle grotte Campana avviene sia dall'interno del palazzo che attraverso una porta in Via Campana.

[24] Gli stemmi sono appartenenti alle famiglie Fiorenzi, Guarnieri e Stella od Acqua. Il quarto stemma non è identificabile.

Figura 20. Le Grotte Campana, Foto di Giulia Lavagnoli, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

Figura 21. Le Grotte Campana, Foto di Giulia Lavagnoli, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

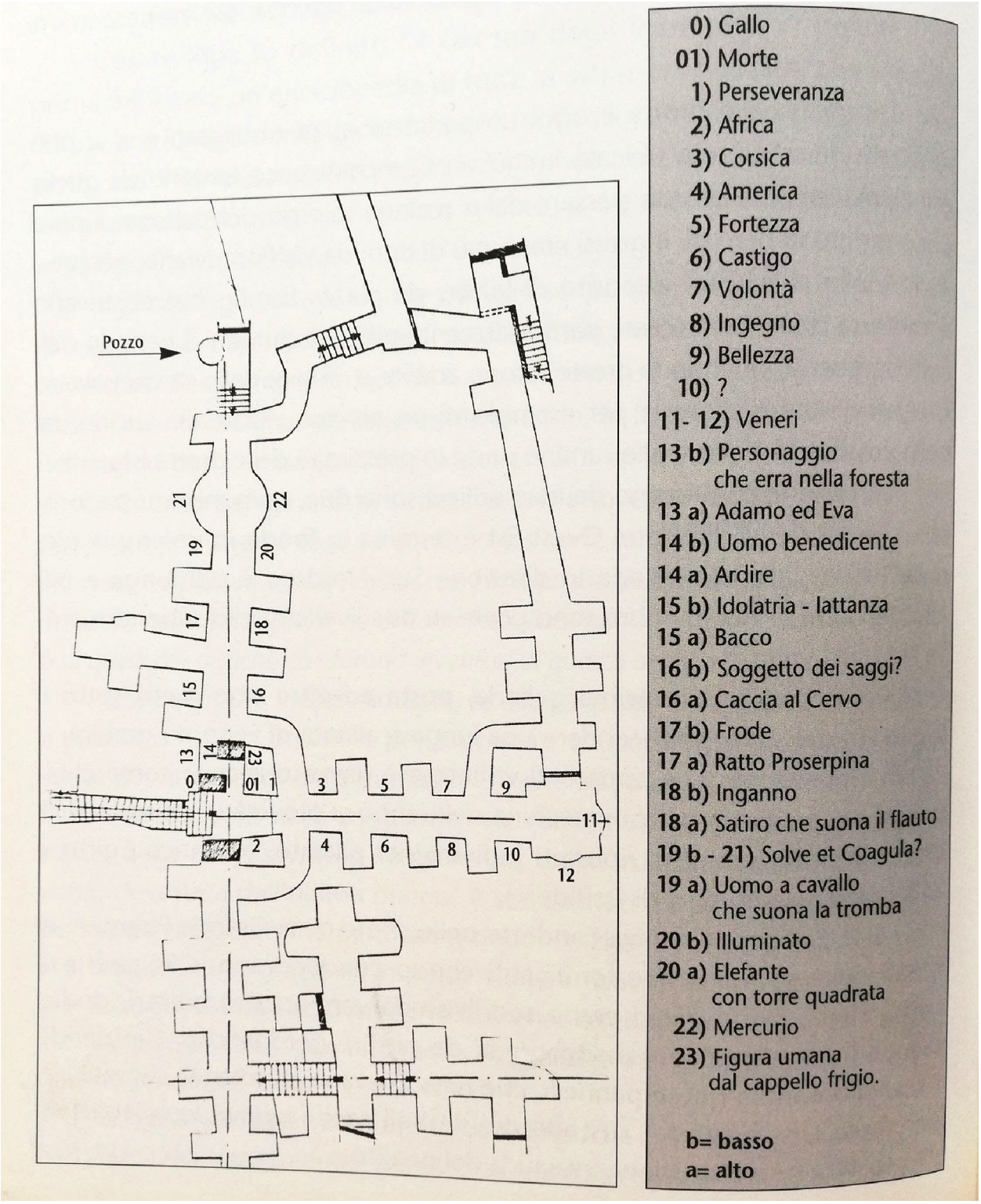

Figura 22. Le due gallerie delle Grotte Campana e la posizione dei bassorilievi, Foto dal libro "I tarocchi di pietra del Palazzo Campana di Osimo"

Le grotte Campana attualmente non sono usufruibili e sono chiuse al pubblico. Questa limitazione di accessibilità è stata posta principalmente per diminuire il flusso orario di visitatori sia per motivi legati alla sicurezza che per il mantenimento delle condizioni ambientali, tra cui il livello di umidità e la temperatura per conservare al meglio i bassorilievi e impedire un loro grave ed irreversibile deterioramento. La variazione delle condizioni ambientali, conseguenti a ripetuti ingressi di visitatori, può portare alla idratazione di componenti con diversi volumi specifici. Il passaggio da uno stato all'altro crea variazioni di volume, pressioni e fratture all'interno del materiale con una progressiva perdita di leggibilità delle figure fino alla loro distruzione.

Nel 2015 è nata una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione (DIGEP)del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Lo scopo della collaborazione consisteva nel valorizzare il patrimonio ipogeo di Palazzo Campana attraverso la produzione del modello tridimensionale digitale e fisico dei bassorilievi effettuando diverse prove per verificare la fattibilità di varie fasi della riproduzione.

Il progetto è stato elaborato secondo i seguenti passaggi:

- Una prima fase di sopralluogo durante la quale la figura da riprodurre è stata scelta (un toro) e la metodologia più adatta per la sua digitalizzazione è stata definita
- La prima fase di digitalizzazione che consiste nell'acquisizione delle informazioni geometriche tramite l'utilizzo di uno scanner 3d
- Analisi e valutazione delle criticità manifestate durante la prima fase di digitalizzazione
- Utilizzo di Reverse Engineering e riproduzione del modello matematico della figura attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti e la modellazione CAD
- Restauro digitale mediante l'utilizzo dei software di modellazione tridimensionale
- Riproduzione dei modelli o delle parti scelte mediante fabbricazione additiva (stampa 3d) e fresatura a controllo numerico (CNC)

- Trattamenti superficiali per una ricostruzione fedele della figura che possa garantire la verosimiglianza della replica all'originale

La produzione delle repliche della figura del toro ha verificato la fattibilità della riproduzione dei bassorilievi. Durante la fase di digitalizzazione, è stata esaminata la qualità della risposta della superficie eterogenea dell'arenaria ai sistemi di reverse engineering per l'acquisizione dei dati. Mentre durante la fase di riproduzione del modello fisico tramite la stampa 3d e la fresatura, è stata verificata la riproducibilità delle figure utilizzando le tecniche sopra citate. Infine, durante la fase finale, i test di fattibilità sui trattamenti superficiali hanno garantito la verosimiglianza del modello al materiale originale. I campioni prodotti hanno dimostrato che la riproduzione dei bassorilievi è fattibile e che tali riproduzioni possono essere rivestite di arenaria ed assumere lo stesso aspetto esteriore del materiale originale.

Inganno

All'interno della seconda galleria nelle grotte di Palazzo Campana, in basso a destra è collocata la figura dell'Inganno, descritta così da Cesare Ripa nella sua Iconologia :

"Homo vestito d'una pelle di capra, in modo che a pena gli si veda in viso, & dal mezzo in giù finiranno le sue gambe in due code di serpente, a canto egli haverà una Pantera, con la testa fra le gambe, nella mano destra tenga molti hami, & nella sinistra un mazzo di fiori, dal quale esca una serpe. Si dipinge con gli hami in mano, come quelli che coperti dall'esca pungono, e tirano pungendo la preda, come l'ingannatore, tirando gl'animi semplici doveai desidera. Il mazzo di fiori con la serpe in mezzo, significa l'odore finto della bontà, donde esce il veleno vero degli effetti nocivi. Le gambe in coda di serpente mostrano che l'ingannatore alletta I semplici per invilupparli poi nell'orditura delle proprie insidie, come la Pantera che occultando il capo, & mostrando il dorso, alletta con la bellezza delle pelle varie fiere, le quali poi con subito empito prende, & divora."

Dunque, si tratta di un uomo barbuto, coperto con una pelle di capra. Nella sua mano destra tiene tre ami da pesca con i quali tira gli animi semplici, come un gancio tira la preda. Nella mano sinistra ha una rete che contiene un mazzo di fiori e dalla quale fuoriesce un serpente che simboleggia l'odore finto di bontà, da dove esce il vero veleno degli effetti nocivi. Scendendo, le gambe dell'uomo sono sostituite da due code di serpente e lì, vicino alle code è raffigurata una pantera con la testa abbassata tra le gambe. Le code di serpente simboleggiano il modo in cui l'ingannatore alletta gli animi semplici, come la pantera che nasconde la testa e mostra le spalle per attirare gli animi semplici con la bellezza della pelle per poi divorarli.

Figura 23. L'Inganno secondo l'Iconologia di Cesare Ripa, Foto dal libro "I tarocchi di pietra del Palazzo Campana di Osimo"

Figura 24. La figura dell'Inganno, Le Grotte Campana, Foto di Giulia Lavagnoli, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

Il seguente è uno studio approfondito di varie procedure seguite per la digitalizzazione della figura dell'Inganno, creazione del suo modello digitale e produzione del suo modello tridimensionale fisico attraverso la stampa 3d.

DIGITALIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI E LA LORO FABBRICAZIONE ATTRAVERSO PRODUZIONE ADDITIVA

Digitalizzazione e Produzione Additiva del Patrimonio Culturale

Conservazione del patrimonio culturale è tutto ciò che porta alla protezione, preservazione e valorizzazione dei beni culturali tangibili e intangibili. L'obiettivo della conservazione dei beni culturali è quello di preservare la storia, tramandare il patrimonio da una generazione all'altra e dare la possibilità alle futuro generazioni di studiare il passato. La conservazione del patrimonio offre opportunità per ripristinare piuttosto che sostituire i resti del passato e portarli nel futuro.

Il futuro non è prevedibile e vari pericoli sia derivati da eventi naturali che legati alle azioni umani minacciano il patrimonio mondiale. Secondo UNESCO World Heritage Center, cambiamenti climatici ed eventi meteorologici,erosione, inquinamento, eventi ecologici o geologici come terremoto, eruzioni vulcaniche, tsunami e incendi, costruzione di abitazioni e infrastrutture di trasporto, impatti del turismo e distruzione deliberata del patrimonio come guerra, vandalismo, terrorismo, iconoclastia e incendio doloso sono tra i pericoli che minacciano il patrimonio mondiale. Questi eventi sono inarrestabili ma è possibile documentare le informazioni utili riguardo i beni culturali, utilizzando nuove tecnologie disponibili e produrre delle repliche di riserva del patrimonio a rischio.

Figura 25. Il Buddha di Bamiyan in Afghanistan prima (sinistra) e dopo (destra) della sua distruzione nel 2001 dai talebani

Figura 26. L'Incendio della cattedrale di Notre-Dame di Parigi, 2019

Produrre repliche degli artefatti storici, statue e architetture non è una novità e fino a poco tempo fa venivano fabbricate attraverso l'utilizzo dei metodi tradizionali come calchi e stampi, metodi che però in tanti casi danneggiavano gli oggetti delicati e i materiali degradanti. Grazie alle tecnologie di scansione 3d, specialmente scansione 3d a laser e alla luce strutturata, oggi è possibile digitalizzare e documentare gli oggetti di valore storico senza avere un contatto diretto con la loro superficie e senza causare un loro ulteriore deterioramento. I metodi di scansione 3d sono veloci, precisi, e accurati e oltre alle informazioni strutturali e dimensionali sono anche in grado di documentare altre caratteristiche come il colore e texture di un oggetto. Le tecnologie di scansione 3d sono facili da utilizzare. Un esempio è fotogrammetria dove tutto quello che serve per digitalizzare un oggetto è una fotocamera e un computer. Per quanto riguarda i metodi di scansione 3d a laser e alla luce strutturata, grazie a un calo nel loro prezzo negli ultimi anni e la disponibilità di una vasta gamma di tipologie, facili da operare, il loro utilizzo è diventato molto più diffuso.

Figura 27. Produrre repliche degli artefatti storici non è una novità, fino a poco tempo fa gli artefatti venivano fabbricate attraverso metodi tradizionali come calchi e stampi

Digitalizzazione è un ottimo strumento per dare accesso ai beni culturali che altrimenti non sarebbero accessibili. I modelli digitali possono essere inseriti nelle piattaforme online e formare un archivio digitale a disposizione degli studiosi, ricercatori, insegnanti e studenti, accessibile in tutto il mondo. I modelli possono essere utilizzati per analisi,ricerca, scopi scientifici e educativi in ambito accademico e ambito museale o come un'alternativa alle misurazioni dirette in-situ dei monumenti più fragili. I modelli tridimensionali digitali sono dei ottimi mezzi per registrare, preservare e trasferire i dati e possono servire come dei backup per progetti di conservazione, restauro, riqualificazione e ricostruzione.

I dati della scansione 3d possono essere utilizzati anche per produzione delle repliche attraverso produzione additiva. La tecnologia di stampa 3d è una soluzione rapida, precisa, relativamente economica e facile da utilizzare a disposizione di un pubblico ampio. Una volta l'utilizzo della stampa 3d era esclusiva al settore industriale e della produzione, settore meccanico, automotive, aerospaziale, nautico ed elettronico. Negli ultimi anni grazie ad una rapida evoluzione della tecnologia e un calo nei costi di riproduzione, l'utilizzo degli stampanti 3d è diventato più diffuso nel mercato globale e ad oggi include una vasta gamma di applicazione: settori di medicina, dentale, architettura, archeologia, arte, design, gioielleria, orafo, moda, giocattoli, turismo, alimentare e recentemente beni culturali.

Figura 28. Wearable Architecture di ZIMARTY, gioielli creati tramite la stampa 3d, Foto dal zimarty.com

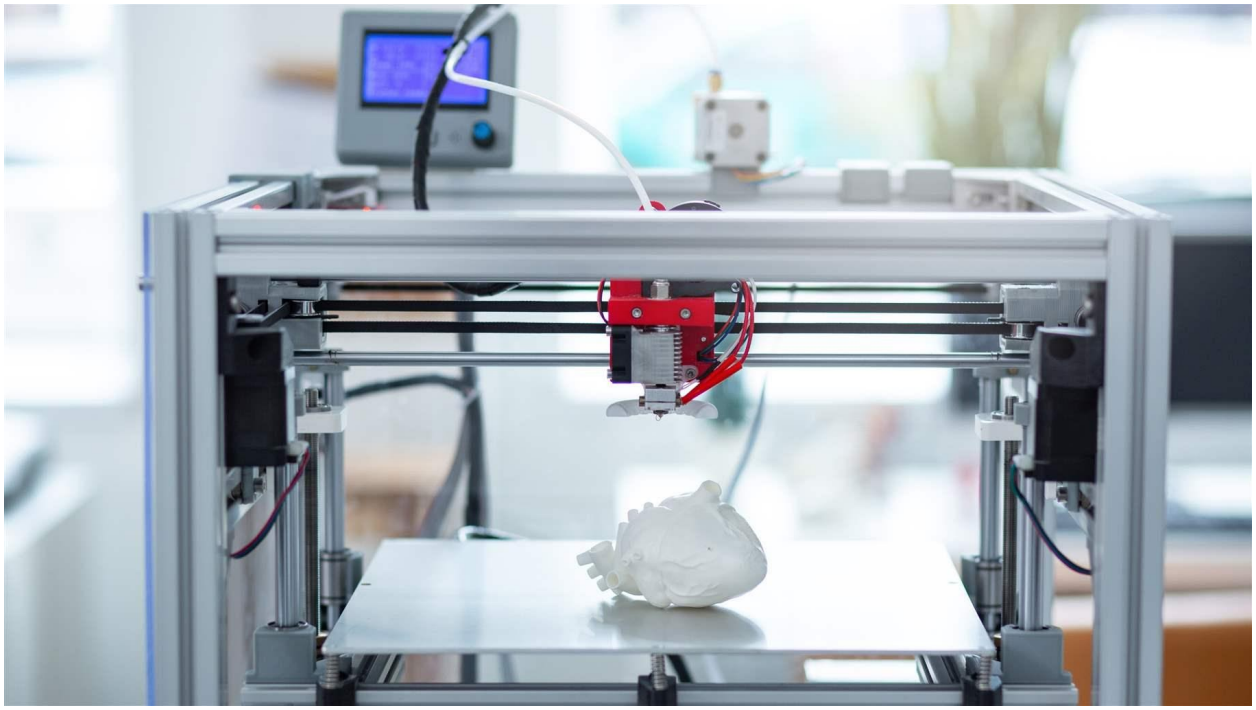

Figura 29. L'applicazione della stampa 3d al settore medicale

Figura 30. L'applicazione della stampa 3d al settore dentale

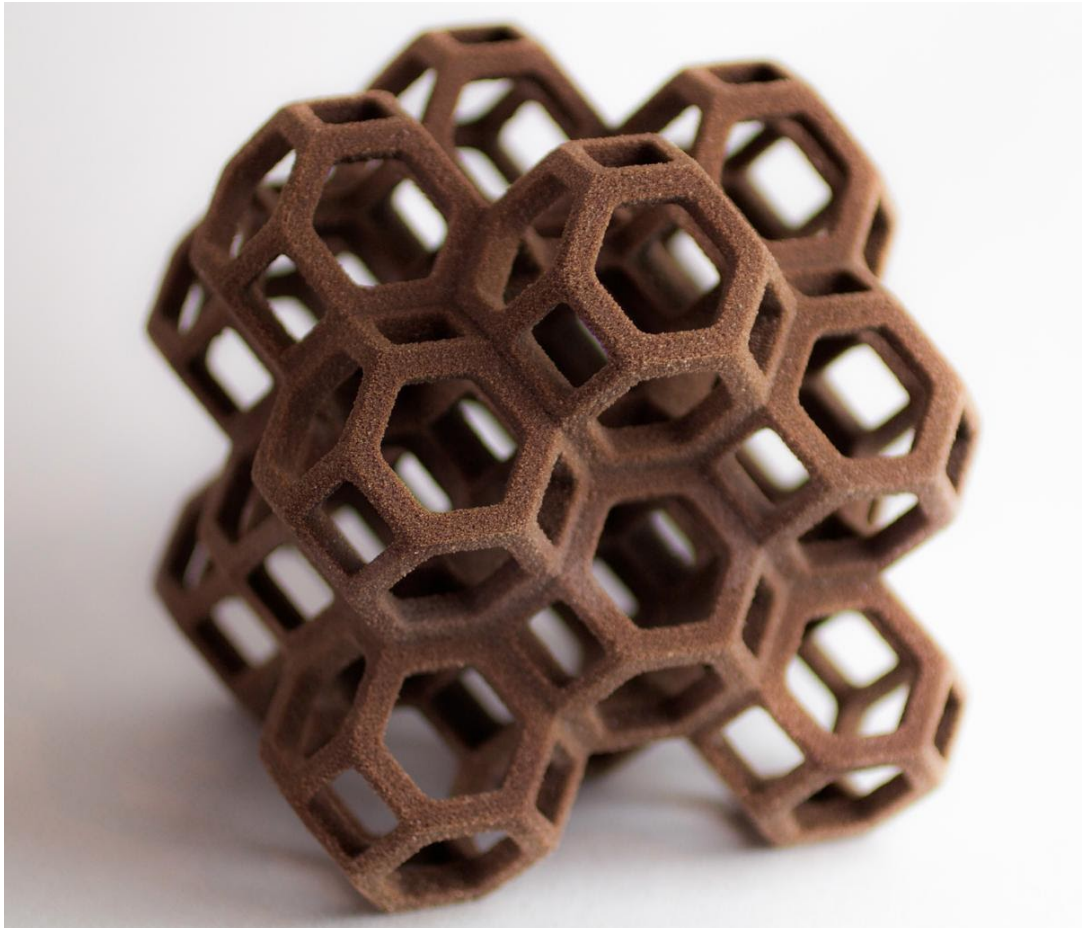

Figura 31. L'applicazione della stampa 3d al settore alimentare

Figura 32. L'utilizzo della stampa 3d per creare giocattoli

Il vantaggio delle repliche prodotte attraverso la stampa 3d rispetto ai metodi tradizionali è la loro estrema precisione, accuratezza ed elevato livello di dettagli. La gestione del patrimonio culturale è un lavoro molto delicato che richiede tanto attenzione e cura. In tanti casi, soprattutto nel caso dei patrimoni a rischio, non è possibile toccare o fisicamente alterare l'oggetto originale. Con la varietà di materiale e colorazione oggi disponibile per la stampa 3d, e con le finiture che possono simulare la consistenza e la texture dell'oggetto, è sempre più semplice produrre dei modelli estremamente fedeli all'originale che possono essere toccati, analizzati e studiati al posto degli oggetti originali spesso già deteriorati, senza danneggiare il loro stato conservativo o peggiorare la loro situazione.

I modelli tridimensionali fisici sono ottimi mezzi di comunicazione: una rappresentazione della realtà immediatamente comprensibile. Un modello 3d può subito comunicare l'aspetto geometrico di un oggetto e le sue caratteristiche fisiche: dimensioni, altezza, larghezza, lunghezza, proporzioni, forma, peso e il alcuni casi anche il rapporto con il contesto e l'ambiente circostante. Le repliche possono essere toccate e consentono alle persone di esplorare le forme, interagire con il patrimonio culturale attraverso esperienze multi sensoriali ed apprezzarli al meglio.

La stampa 3d ha anche trasformato il modo in cui le persone ipovedenti possono interagire con i beni culturali. Grazie ai modelli tridimensionali, le persone ipovedenti ora possono sperimentare e comprendere i beni culturali attraverso la sensibilità tattile e godere al meglio l'esperienza.

Metodi di Digitalizzazione dei Beni Culturali

Il primo passo per la digitalizzazione di un oggetto reale è acquisizione dei dati che riportano alla ricostruzione digitale dell'oggetto all'interno di un software. I metodi principali per acquisizione dei dati senza contatto fisico con la superficie dell'oggetto sono fotogrammetria, scansione 3d laser e scansione 3d a luce strutturata .

Fotogrammetria

La fotogrammetria o Scansione 3D da Fotografie è un metodo per raccogliere i dati della geometria di un oggetto per ricostruire il suo modello 3d attraverso delle fotografie. La fotogrammetria ricostruisce il modello 3d analizzando delle foto (2d), utilizzando la visione artificiale e gli algoritmi di geometria computazionale. Per utilizzare questa tecnologia è requisita una macchina fotografica digitale a scelta per catturare le foto del soggetto. Le foto devono essere catturate da diversi punti di vista e angolazioni per ottenere i dati dai tutti i punti della superficie e devono sovrapporsi leggermente per facilitare la procedura di allineamento.
Questo metodo richiede un numero elevato di fotografie, in media 100, e dunque richiede molto tempo, specialmente se durante la procedura si utilizza solo una fotocamera e si scatta una alla volta. Il risultato finale dipende dalla macchina fotografica, la calibrazione, l'angolazione e la risoluzione delle foto.

Oltre alla macchina fotografica, è richiesto un computer potente che possa calcolare gli algoritmi attraverso un software specializzato. Le posizioni esatte dei punti di superficie sono recuperati all'interno di software e formano la nuvola di punti.

La fotogrammetria è un metodo più economico rispetto a scansione laser o alla luce strutturata ed è facilmente accessibile per quanto i mezzi necessarie sono la fotocamera, il computer e il software giusto. Il suo vantaggio primario è l'abilità di riprodurre i colori e le texture grazie al realismo delle fotografie ma nel contempo il livello di accuratezza e precisione si abbassa con un soggetto con una superficie piatta, liscia o mono colore.

La fotogrammetria è spesso utilizzata per rilievi topografici, creare mappe interattive o per rilievi dei siti archeologici, dove il realismo è più importante di massima accuratezza.

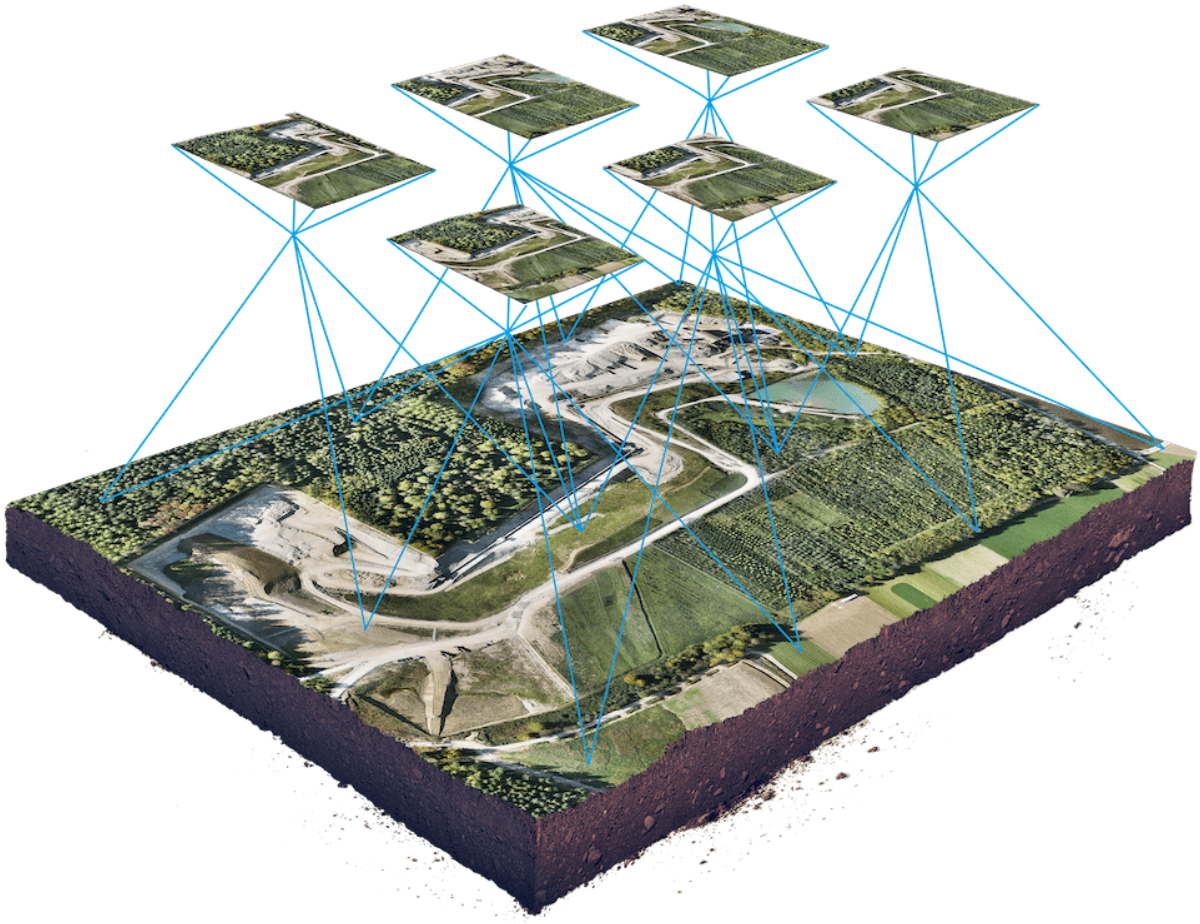

Figura 33. La Fotogrammetria è un metodo per raccogliere i dati della geometria di un oggetto per ricostruire il suo modello 3d attraverso delle fotografie

Scansione 3d

Gli scanner 3d senza contatto generalmente sono composti da un emettitore e un sensore o ricevitore. A base di ciò che gli scanner 3d emettono per misurare la distanza dai punti della superficie del soggetto, possono essere divisi in due tipologie: Scanner Laser 3d e Scanner 3d a Luce Strutturata.

Scansione Laser 3d

Lo scanner laser 3d è composto da un emettitore che proietta un punto o una linea di laser. Oltre all'emettitore, lo scanner è anche dotato di un ricevitore o un sensore che è posizionato con una certa angolazione. Il laser colpisce la superficie dell'oggetto, si riflette e viene ricevuto dal sensore. In questo modo, lo scanner calcola la distanza di ogni punto della superficie dell'oggetto e utilizza i dati, che sono le coordinate di ogni punto che è stato colpito dal laser, per costruire la nuvola di punti.

In base al metodo che lo scanner utilizza per calcolare la distanza di ogni punto della superficie dell'oggetto, gli scanner laser 3d possono essere suddivisi in due tipologie: Scanner a Triangolazione e Scanner a Tempo di Volo (Time of Flight).

Scansione Laser 3d a Triangolazione

Scansione Laser 3d a Triangolazione utilizza la triangolazione trigonometrica per calcolare la distanza dei punti della superficie dell'oggetto. L'emettitore e il sensore dello scanner sono i primi due vertici del triangolo e il punto dell'oggetto, colpito dal laser, è il terzo vertice che completa il triangolo. Dato che la distanza e l'angolo tra l'emettitore e il sensore sono dati conosciuti, attraverso la triangolazione trigonometrica lo scanner riesce a calcolare la distanza dal punto.

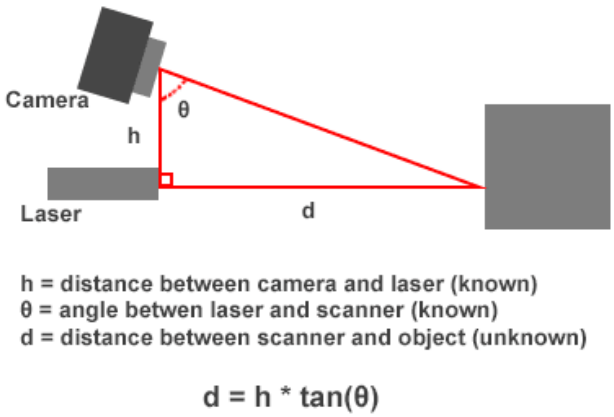

Figura 34. L'utilizzo della triangolazione trigonometrica per calcolare la distanza dall'oggetto

Gli scanner laser 3d a triangolazione hanno un'elevata accuratezza, risoluzione e velocità e sono facilmente portabili. Tuttavia, sono molto sensibili alle caratteristiche della superficie dell'oggetto e di conseguenza non sono adatti alla scansione degli oggetti con le superficie troppo scuri, trasparenti, lucidi e riflettenti. Lo scanner laser 3d a triangolazione ha una distanza focale inferiore a un metro e dunque è più adatto alle distanze brevi[25].

Scansione Laser 3d a Tempo di Volo

Scansione Laser 3d a Tempo di Volo (Time of Flight) o a luce pulsata emette un impulso laser e calcola il tempo che il laser impiega a colpire la superficie dell'oggetto e tornare al sensore. Visto che la velocità della luce è conosciuto, avendo il tempo di volo è possibile calcolare la distanza dal punto.

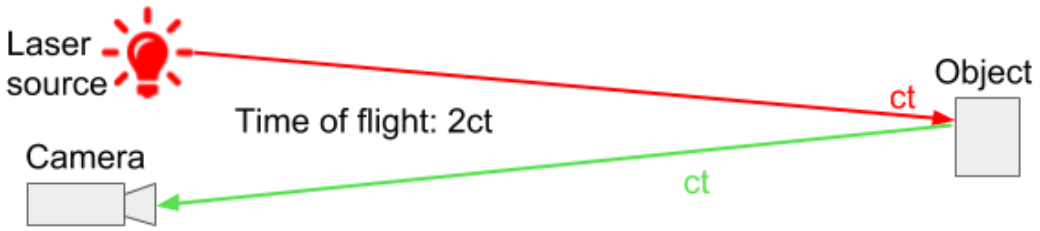

Figura 35. Lo scanner laser 3d a Tempo di Volo (Time of Flight) emette un impulso laser e calcola il tempo che il laser impiega a colpire la superficie dell'oggetto e tornare al sensore

A differenza degli scanner a triangolazione, gli scanner a tempo di volo sono in grado di misurare la distanza di un punto alla volta ma sono in grado di misurare decine di migliaia di punti per secondo.

Gli scanner a Tempo di volo sono più adatti a effettuare rilievi e scansionare oggetti di grandi dimensioni e gli ambienti dato che hanno una distanza focale superiore di 2 metri.

[25] https://stampiamoin3d.com

Scansione 3d a Luce Strutturata

Scansione 3d a Luce Strutturata è un metodo dove invece di laser, lo scanner proietta un pattern di luce. Il proiettore emette un pattern lineare di luce con strisce alterne chiaro scure che colpisce la porzione della superficie dell'oggetto nel campo visivo della telecamera. In base alla forma dell'oggetto, il pattern di luce subisce delle deformazioni che si catturano dal sensore dello scanner. Grazie alla distorsione catturata da più angolazioni e in base a dove e come la luce è stata deformata, lo scanner calcola la distanza dai punti specifici sulla superficie dell'oggetto attraverso la triangolazione trigonometrica, come gli scanner laser 3d a triangolazione. Lo scanner utilizza le coordinate dei punti per costruire il modello tridimensionale digitale dell'oggetto.

Figura 36. Uno scanner 3d a Luce Strutturata proietta un pattern lineare di luce con strisce alterne chiaro scure che colpisce la porzione della superficie dell'oggetto nel campo visivo della telecamera

In confronto agli scanner 3d laser, gli scanner alla luce strutturata sono molto più veloci in quanto sono in grado di acquisire i dati della tutta la porzione della superficie colpita dal pattern di luce contemporaneamente anziché i singoli punti. La velocità, l'accuratezza e la risoluzione alta sono i vantaggi per i quali gli scanner a luce strutturata sono adatti a reverse engineering e produzione e in generale sono più diffusi e utilizzati rispetto alle altre tecnologie di scansione 3d. Per lo più, questa tecnologia riesce a creare la nuvola di punti in "real time" e quindi è

possibile vedere il risultato della scansione sul software in tempo reale ; ciò che è stato scansionato, ciò che manca e ciò che ha bisogno di essere scansionato per una seconda volta. Dato che gli scanner a luce strutturata utilizzano una fonte di luce per raccogliere i dati, l'interferenza della luce ambientale può creare dei risultati sfavorevoli. Troppa luce ambientale o la luce diretta del sole risulta in scansioni rumorosi e distorti. Proprio per questo motivo, gli scanner 3d a luce strutturata non sono adatti ad essere utilizzati all'aperto o per scansionare gli ambienti ed è consigliato utilizzarli in un luogo dove l'illuminazione può essere controllata. A seguito di questa sensibilità alle condizioni di illuminazione, lo scanner 3d alla luce strutturata risulta inefficace a scansionare le superficie lucidi, riflettenti, scuri e trasparenti. Un altro svantaggio di questa tipologia di scanner è il loro prezzo molto elevato.

Esistono due tipi di scanner 3d a luce strutturata: lo scanner che utilizza la luce bianca e lo scanner che utilizza la luce blu. Entrambe le tipologie usano la stessa tecnologia e lo stesso principio però lo scanner 3d a luce blu è stato creato come una versione migliorata rispetto a quella originale, cioè lo scanner 3d a luce bianca. La differenza principale tra le due tecnologie è il livello di accuratezza e precisione nel risultato finale. La luce bianca è costituita da tutte le diverse lunghezze d'onda della luce visibile e lo scanner a luce bianca comprende l'intero spettro visibile. Di conseguenza la luce bianca emessa dallo scanner, tende a distorcersi e disperdersi più facilmente. Invece, lo scanner 3d a luce blu utilizza la luce di solo un colore, blu, con una lunghezza d'onda corta, dunque, meno soggetta a riflessione e distorsione risultando in una scansione più accurata e meno rumorosa. Inoltre, lo scanner a luce blu utilizza i LED, quindi la fonte di luce funziona per una durata più lunga e lo scanner mantiene una temperatura più bassa rispetto allo scanner a luce bianca, durante la fase di riscaldamento iniziale. In fine, riguardo la sensibilità verso le condizioni di illuminazione, la luce bianca risulta più problematica per quanto per lo scanner è più difficile da distinguere dalla luce ambientale. Mentre nel caso della luce blu, lo scanner riesce a filtrare la luce ambientale più facilmente poiché è concentrato a leggere solamente la luce di colore blu.

Figura 37. Gli scanner alla luce strutturata sono veloci, precisi e producono degli scansioni di alta risoluzione

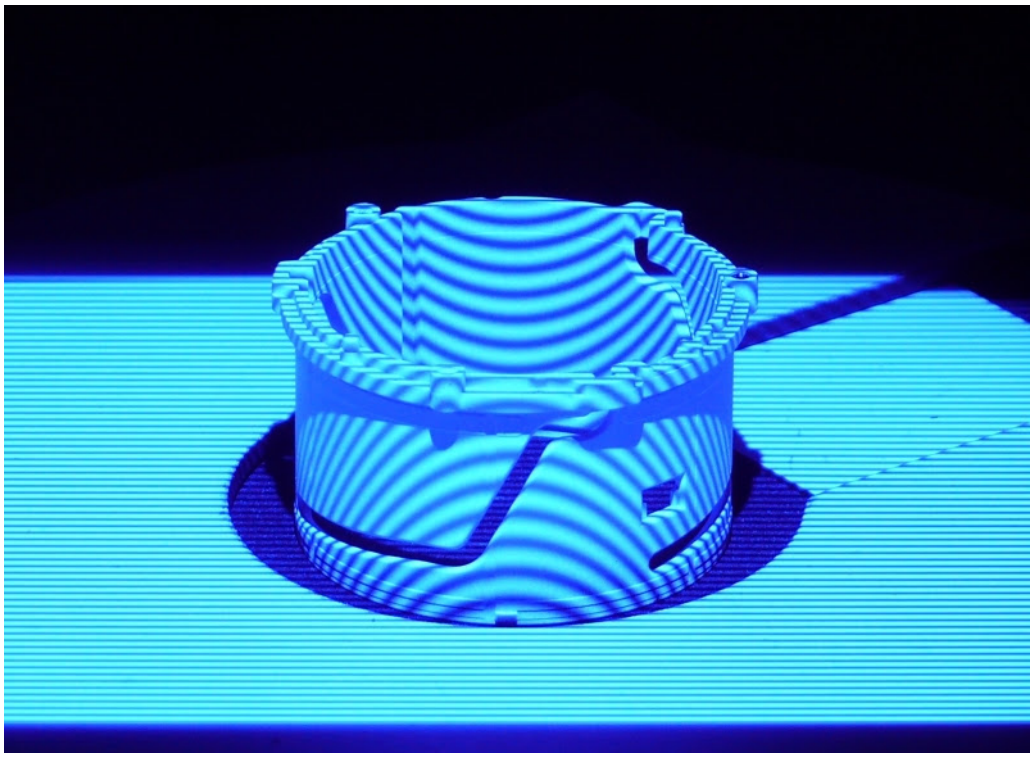

Figura 38. Lo scanner alla luce strutturata blu riesce a filtrare la luce ambientale più facilmente poiché è concentrato a leggere solamente la luce di colore blu

Scansione 3d a Contatto

La scansione 3d a contatto o digitizing consiste di un dispositivo dotato di una sonda che viene in contatto fisico con l'oggetto da acquisire mentre l'oggetto è fermo e fissato al suo posto. La sonda viene spostata sui vari punti della superficie dell'oggetto per raccogliere i dati e può essere utilizzata manualmente o essere collegata ad un braccio antropomorfo articolato per una maggiore precisione. Il vantaggio di scansione 3d a contatto è l'abilità di lavorare con le superficie trasparenti o riflettenti. Un esempio dei dispositivi a contatto è la macchina di misura a coordinate o CMM (Coordinated Measuring Machines).

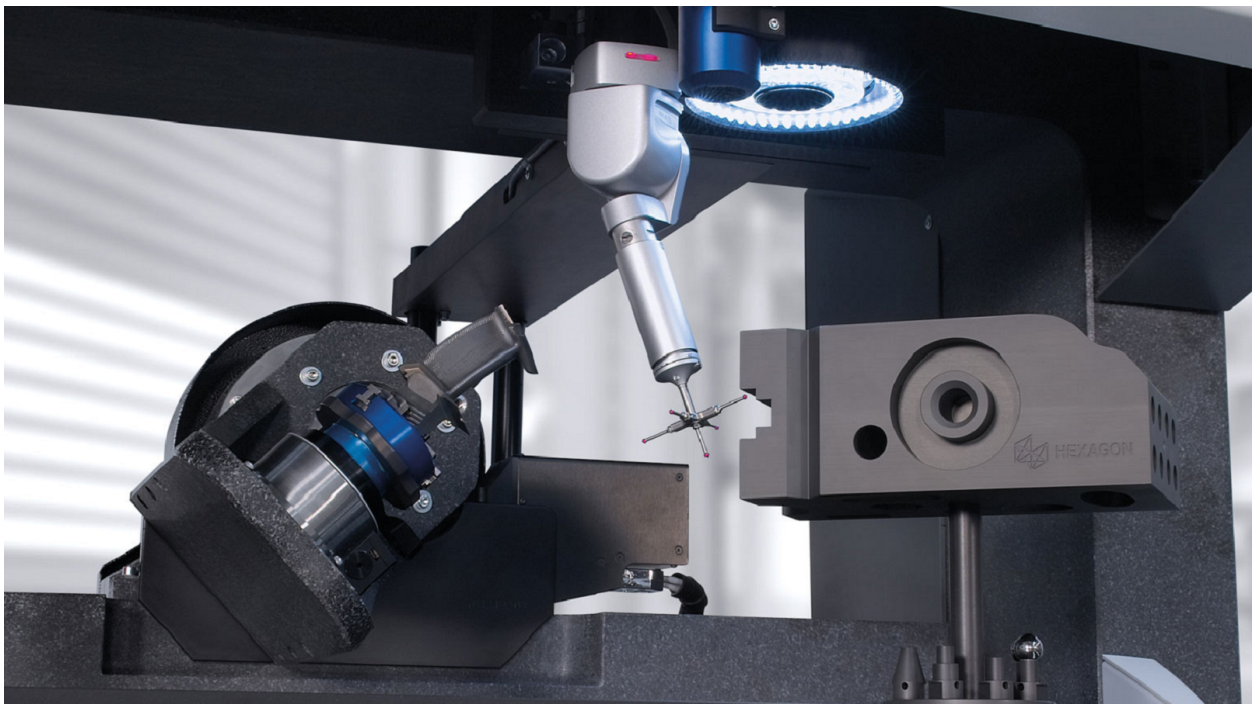

Figura 39. Un esempio della macchina di misura a coordinate o CMM (Coordinated Measuring Machines)

Ogni tecnologia di scansione 3d è applicata ad un campo diverso a base di propri costi, limiti e vantaggi.

Passaggi Generali di Digitalizzazione

La procedura per produrre un modello tridimensionale fisico di un oggetto, è la transizione da una rappresentazione tramite i punti (un modello numerico) ad una rappresentazione attraverso le linee o le superficie (un modello matematico) fino ad una rappresentazione fisica. Generalmente i passaggi eseguiti per la digitalizzazione di un oggetto, in maggior parte dei casi sono uguali o molto simili. Di seguito un'analisi più profonda della procedura di digitalizzazione che porta alla riproduzione di un modello tridimensionale, in sei passaggi principali.

Acquisizione

Il primo passo per digitalizzazione di un oggetto è acquisizione. Durante questa procedura l'immagine dell'oggetto in questione viene acquisita tramite l'utilizzo di uno scanner 3D. La porzione dell'oggetto che viene inquadrata dallo scanner, è colpita dai pattern di luce (nel caso di uno scanner 3D alla luce strutturata) o dal laser (nel caso di uno scanner 3D a laser) generati da un proiettore. In questo modo si acquistano le coordinate di ogni punto della superficie dell'oggetto che è stato scansionato. Le coordinate creano un insieme di punti o una nuvola di punti all'interno del software selezionato e creano una simulazione primaria del modello digitale dell'oggetto. La nuvola di punti viene elaborata all'interno del software ai fini di costruire il modello digitale.

Nel maggior parte dei casi una sola scansione non può essere sufficiente per costruire un modello completo. Solitamente è necessario effettuare più scansioni, a volte anche centinaia, da diversi direzioni e angolazioni per poter ottenere tutte le informazioni necessarie per una ricostruzione fedele del modello 3D. È ideale cominciare la scansione inquadrando una parte grossa ed estesa della superficie dell’oggetto per poter avere una ricostruzione sommaria della figura intera. Le parti più scuri, le parti coperte dalle ombre, i dettagli e i pezzi mancanti possono essere recuperati in un secondo momento. È da tenere in considerazione che durante la procedura di scansione è molto importante definire una certa sequenzialità da seguire con precisione durante l'intero processo, cioè, definire la direzione in cui lo scanner 3D viene

spostato per effettuare ogni acquisizione: da destra a sinistra, dall'alto in basso,ecc., e mantenere questo ritmo per tutta la durata della procedura. Ogni acquisizione deve avere una parte dell'area della superficie in comune con l'acquisizione precedente e quella prossima. In tale modo la sovrapposizione delle parti della superficie che coincidono tra di loro, facilitano la ricostruzione del modello intero nella fase di allineamento.

Nel caso di un oggetto di piccole dimensioni, occorre ruotarlo di circa 25 gradi, orizzontalmente, dopo ogni acquisizione, per poter ottenere una panoramica a 360 gradi mentre lo scanner continua a rimanere fisso nella sua posizione. Diversamente, per gli oggetti che non possono essere spostati per le loro dimensioni, fragilità, peso, posizione, ecc., è possibile semplicemente spostare lo scanner 3D, sempre rispettando lo stesso principio di sequenza continuativa.

Una volta terminata la procedura dell'acquisizione primaria, si può ricominciare ad effettuare un secondo giro delle scansioni per recuperare le parti mancanti nelle zone difficili da raggiungere o quelle che sono rimaste fuori inquadratura.

Conversione

In base allo scanner 3d utilizzato, le scansioni effettuati durante la fase di acquisizione possono essere di diversi formati alcuni poco comuni per i software di modellazione 3d. È importante convertire i file ottenuti ad un formato universale come .stl per poter elaborare i dati sui software di modellazione 3d e proseguire con la digitalizzazione dell'oggetto. Solitamente, ogni scanner 3d è accompagnato da un software sviluppato dall’azienda produttore dello scanner, per convertire i risultati della scansione al formato .stl .

Allineamento

Per procedere con la costruzione del modello digitale, le acquisizioni catturate in precedenza, devono essere riportate in un unica sistema di riferimento in una procedura chiamata Allineamento, Alignment o Registration.

Semplificazione

I dati metrici acquisiti durante la prima fase della digitalizzazione, sono solitamente molto rumorosi e spesso ridondanti in termini di quantità dei dati acquisiti e precisione e accuratezza rispetto allo scopo finale del modello. Dipendendo dallo scopo per il quale la ricostruzione digitale viene utilizzato, il modello può essere sottoposto alle procedure che semplificano e alleggeriscono il file prima della stampa 3d.

Semplificazione e alleggerimento dei dati portano all'ottimizzazione del modello per la stampa 3d cambiano anche la geometria del modello e possono portare alla perdita di aderenza della copia all'originale. Per un modello stampato per scopi scientifici, è molto importante aderenza della sua forma al modello originale in termini di precisione e accuratezza. Mentre per un modello stampato per scopi informativi, sono fondamentali il realismo e la verosimiglianza all'oggetto originale, quindi il materiale utilizzato per la stampa 3d, il colore del modello finale, la texture, il peso e l'aspetto della replica devono essere coerenti all'originale. Una replica che deve sostituire un oggetto con valori storici e artistici, deve essere la copia perfetta dell'oggetto, in ogni singola parte. Dunque, la scelta delle tecniche e metodi per acquisizione ed elaborazione dei dati deve essere basata sull'utilizzo e qualità del modello finale.

Chiusura Buchi

Il modello ricostruito in fine deve essere controllato per eliminazione di eventuali difetti come i buchi. È molto comune che alcune zone della superficie della Mesh rimangano aperte soprattutto nelle parti dell'oggetto difficili da raggiungere durante l'acquisizione, per esempio le

parti scuri. Attraverso i software e i comandi appositi è possibile individuare i buchi e chiuderli in modo automatico attraverso la generazione di una superficie di triangoli. Il modello privo di imperfezioni e perfettamente chiuso è pronto per la stampa 3d e può essere salvato nei formati compatibili con gli stampanti 3d come .stl , .obj , .ply e .off.

Mesh a Solido Chiuso

Una volta il modello Mesh è completo e privo di difetti, per effettuare la stampa 3d è necessario dare uno spessore alla superficie e trasformare il modello Mesh in un solido chiuso.

Digitalizzazione della Figura dell'Inganno

Dispositivi e Software

Il dispositivo utilizzato per la scansione 3d della figura dell'Inganno all'interno delle grotte di Palazzo Campana, è Atos Core, uno scanner ottico 3d di GOM, a ZEISS Company.

Atos Core

GOM è una società specializzata nella tecnologia di misurazione industriale di coordinate 3D, tomografia computerizzata 3D e testing 3D dal 1990 e definisce a livello internazionale gli standard per la metrologia ottica 3D. GOM offre i dispositivi di scansione 3d di tipologie manuale e automatizzata e i software di analisi[26].

Atos Core è uno scanner 3d a luce strutturata blu, composto da un sensore e due telecamere con un design compatto che permette l'accessibilità in spazi stretti. Dato la precisione e elevata qualità delle scansioni e i tempi di misura brevi, Atos Core è adatto alla prototipazione rapida e reverse engineering. Ulteriori funzioni di Atos Core includono la proiezione selettiva, la retroproiezione e il referenziamento dinamico per applicazioni con tracking, touch probe o adattatore[27].

GOM Scan e GOM Inspect

GOM Scan e GOM Inspect sono due software sviluppati da GOM che sono stati utilizzati durante la fase iniziale della digitalizzazione della figura dell'Inganno.

GOM Scan è un software per il controllo del sensore dello scanner 3d, attraverso il quale è possibile convertire i Mesh acquisiti durante la scansione, dal formato gscan.file al formato STL

[26] www.gom.com
[27] www.gom.com

(Stereo Lithography interface format, Standard Triangle Language o Standard Tessellation Language) che è più adeguato ai software di stereolitografia CAD e alla stampa tridimensionale.

GOM Inspect è un software per elaborazione dati, sviluppo di prodotto e controllo qualità. Le funzioni principali di GOM Inspect sono creazione Mesh poligonali da nuvole di punti, Meshing, importazione dei CAD, allineamenti, confronto nominale/effettivo, analisi del profilo alare, analisi basata sulle curve, analisi basata su punti, analisi dei movimenti e delle deformazioni, analisi dei difetti sulla superficie, analisi parametrica e reportistica[28].

Figura 40. Atos Core è uno scanner 3d a luce strutturata blu con un design compatto composto da un sensore e due telecamere

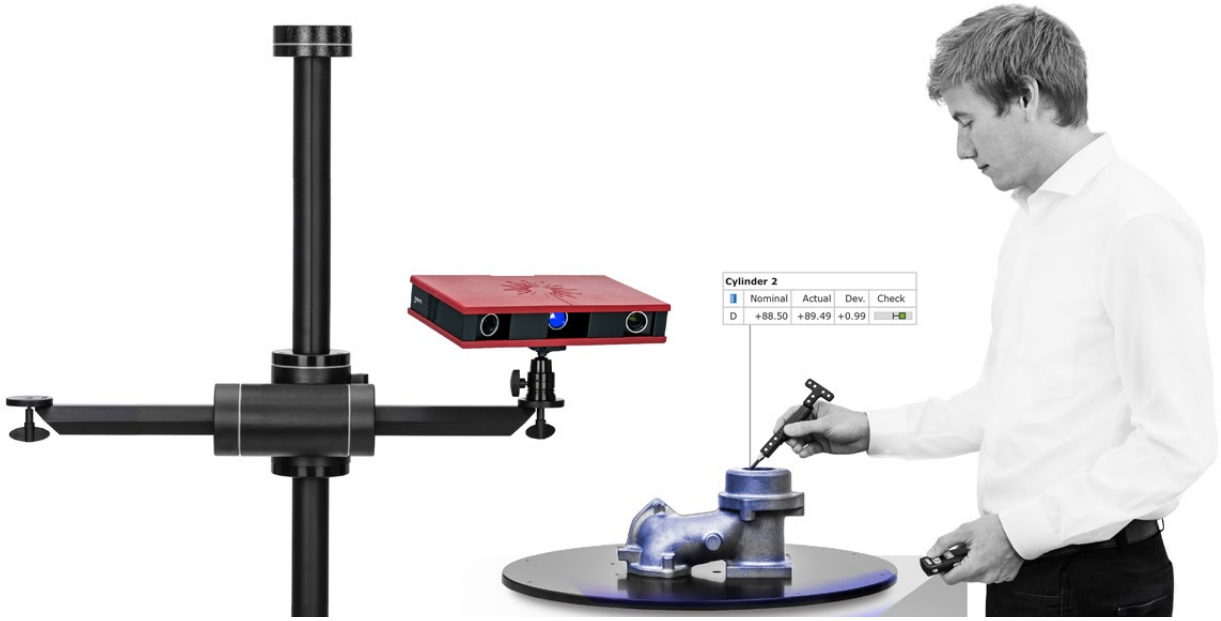

Figura 41. Atos Core è adatto alla prototipazione rapida e reverse engineering

[28] www.gom-inspect.com

Acquisizione Dati

Per iniziare, la figura dell'Inganno è stata divisa in quattro livelli: altissimo, alto, mediana e basso. Questa divisione è stata fatta ai fini di organizzare al meglio le numerose scansioni ottenute, per poter riconoscere con più facilità la parte della figura che ogni scansione rappresenta e infine per aumentare la velocità durante la fase di allineamento.

Acquisizione dati della superficie della figura dell'Inganno è stata effettuata in due fasi. Nella fase primaria Atos Core è stato posizionato con un'angolazione di 90 gradi rispetto alla superficie del bassorilievo, la parte superiore della figura nel lato sinistro è stata scelta come il punto di partenza e il percorso da seguire dallo scanner è stato definito: sinistro-destro-giù, destro-sinistro- giù e così via. Questo modello di spostamenti è stato seguito e ripetuto fino a raggiungimento all'ultimo punto nella parte inferiore della figura. Nella seconda fase, dopo aver ottenuto delle scansioni per definire il modello approssimativo, è stato necessario fare un secondo giro di scansioni cambiando l'angolazione dello scanner per poter ottenere le acquisizioni delle parti mancanti e ciò che era rimasto fuori inquadratura.

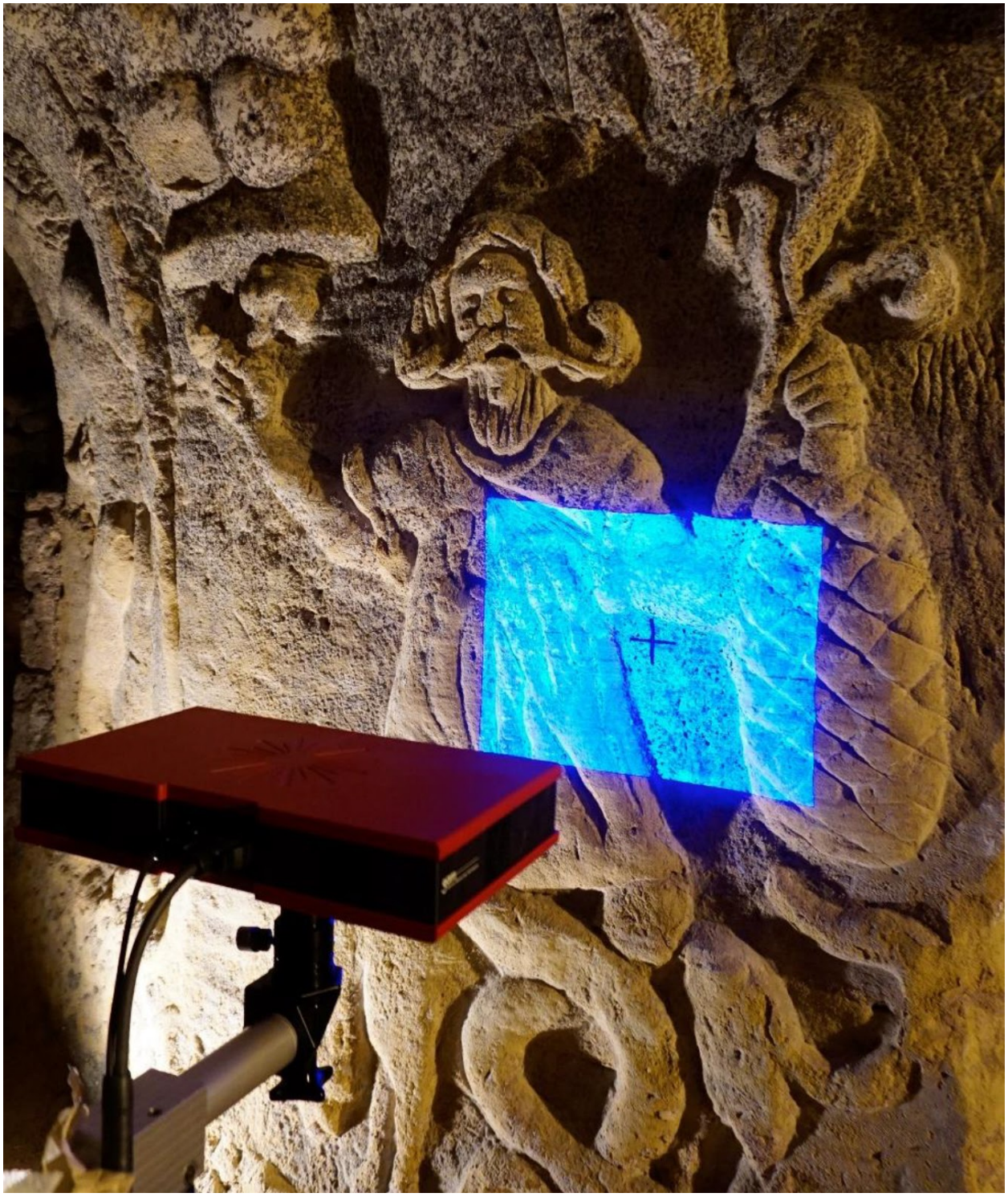

Figura 42. Durante la prima fase di acquisizione dati, Atos Core è stato posizionato con un'angolazione di 90 gradi verso la superficie del bassorilievo

Conversione

Le scansioni acquisite tramite Atos Core, sono in formato .gscan file. Attraverso l'utilizzo di software GOM Scan, è stato possibile convertire tutti i file al formato .stl, un formato più comune, utilizzabile dai vari tipi di software di modellazione tridimensionale e gli stampanti 3d.

Allineamento

Per elaborazione del modello, ogni scansione in formato .stl è stata importata sul software GOM Inspect. Il software include le funzioni standard di allineamento: RPS, allineamento gerarchico basato su elementi geometrici, allineamento in un sistema di coordinate locali, allineamento tramite punti di riferimento e i metodi best-fit globale e locale[29].

Su GOM Inspect è possibile lavorare con due gruppi di elementi: Elementi Mesh e Elementi CAD. Una Mesh o un modello poligonale è un modello 3d che è costituito interamente da migliaia o milioni di triangoli connessi tra di loro. Connettendo i punti di una nuvola di punti si creano i triangoli che insieme formano un modello completo. Questo tipo di modello non distingue le diverse caratteristiche come le facce o i buchi, il motivo per il quale è molto difficile la modifica parametrica di una Mesh rispetto ad un modello CAD. Un modello Mesh è principalmente utilizzato per reverse engineering e la stampa 3d. Un modello CAD (Computer-Aided Design) è un solido che distingue le superficie, le facce e i buchi e non essendo creato dai triangoli è liscio, senza rumore e facilmente modificabile. Un modello CAD è disegnato manualmente, da zero, attraverso la modellazione parametrica o la modellazione diretta ed è adatto a progettazione, modifiche alla progettazione e produzione. I file STL importati su GOM Inspect di default sono degli elementi Mesh. Per effettuare l'allineamento su GOM Inspect, è necessario avere un elemento CAD come un punto di riferimento iniziale, quindi il primo STL importato su software è stato convertito ad un elemento CAD con il seguente comando:
Operations -> CAD -> Actual Mesh to CAD

[29] www.gom-inspect.com

Il secondo file STL è stato importato su software e il seguente comando è stato utilizzato per allineare l'elemento Mesh (il secondo STL) con l'elemento CAD (il primo STL):
Operations -> Alignment -> Initial Alignment -> Prealignment

I parametri da definire per eseguire il comando sono:

- CAD : Selezione dell'elemento CAD o il gruppo degli elementi CAD
- Actual Mesh : Selezione dell'elemento Mesh o il gruppo degli elementi Mesh
- Search Time : Scelta tra tre tempi di ricerca; breve, normale e lungo
- Additional Help Point : Selezione di due punti corrispondenti tra i due file STL; Il primo punto, sull'elemento CAD(Nominal Point) e il secondo punto, sull'elemento Mesh(Actual Point)

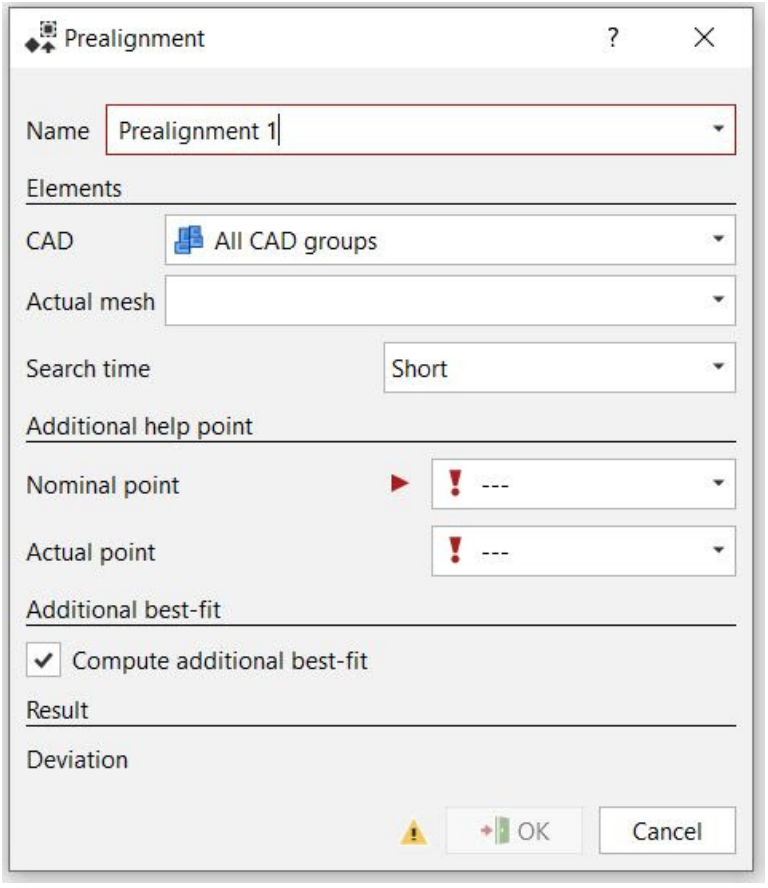

Figura 43. I parametri da definire per eseguire il comando "Prealignment" su Gom Inspect

I due file allineati devono essere uniti per formare un unico pezzo. Per unire i file entrambi devono essere degli elementi Mesh. Per trasformare l'elemento CAD ad un Mesh è stato utilizzato il seguente comando:
Operations -> CAD -> CAD to Actual Mesh

Avendo due elementi Mesh, è possibile unire le due acquisizioni :
Operations -> Mesh -> Other -> Combine -> Apply

Il pezzo unito viene trasformato in un elemento CAD e serve come il punto di riferimento per la terza acquisizione. Questa procedura è stata ripetuta fino all'allineamento dell'ultima acquisizione.

Nel caso di due acquisizioni molto simili o dove le forme non sono ben definite, per esempio sulla parete, il software fallisce ad individuare i due punti corrispondenti. Tuttavia, il seguente comando può risultare efficace per quanto utilizza sei punti, tre su ciascun elemento, invece di solo due punti:
Operations -> Alignment -> Initial Alignment -> 3-Point Alignment

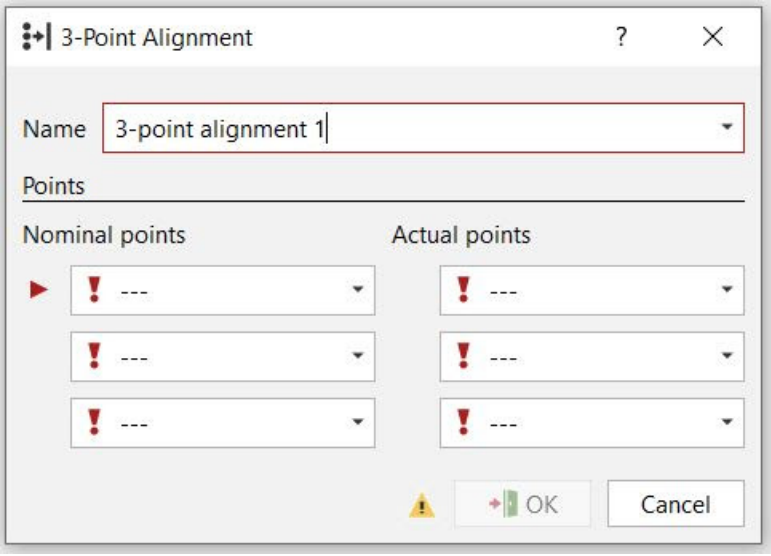

Figura 44. Il comando "3-Point Alignment" facilita la procedura di allineamento attraverso l'individuazione di 6 punti sul modello

Il comando Local Best-Fit è l'ultimo passaggio della procedura di allineamento ed è utile per eliminare qualsiasi discrepanza:
Operations -> Alignment -> Main Alignment -> Local Best-Fit

Aggiungendo ogni acquisizione, il file del modello si appesantisce e di conseguenza rallenta il software. Per lavorare con un file più leggero, velocizzare l'esecuzione dei comandi e ridurre i tempi di elaborazione su software la figura dell'Inganno è stato diviso in quattro fasce: altissimo, alto, mediana e basso. Dopo l'allineamento delle acquisizioni in ogni fascia, le quattro parti sono stati uniti tra di loro per creare il modello completo.

Figura 45. Il file .stl iniziale importato su GOM Inspect è un elemento Mesh

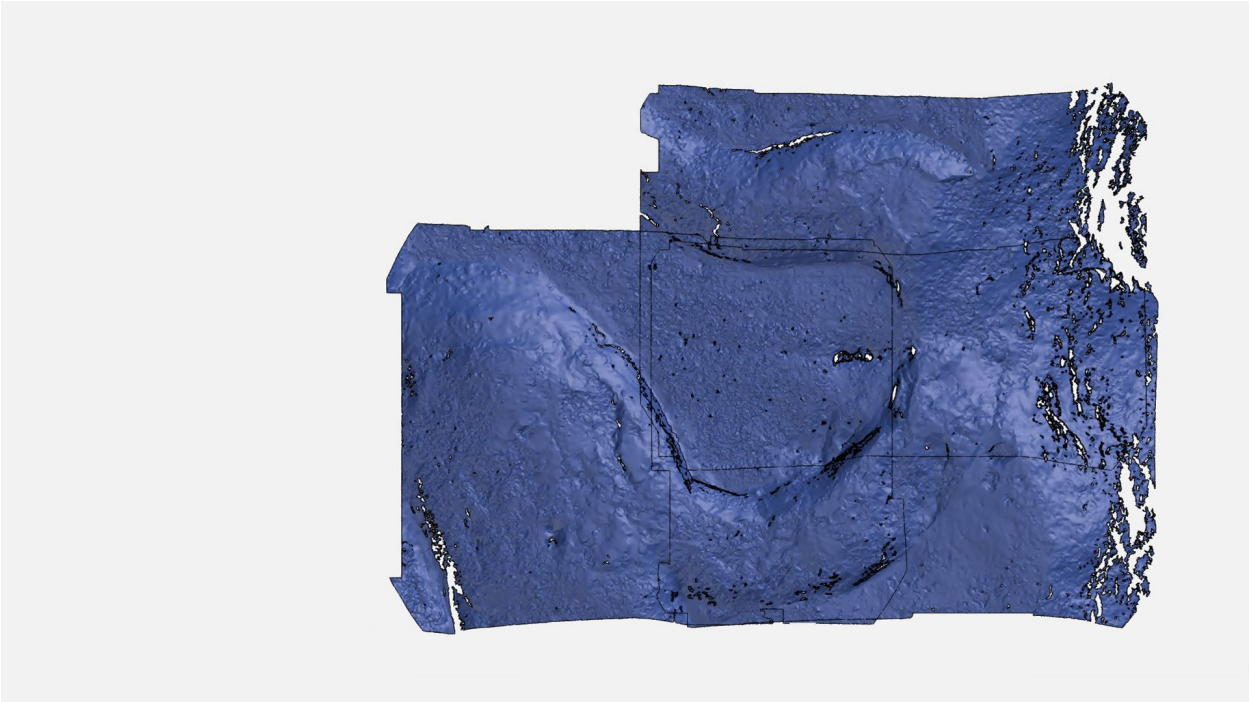

Figura 46. Attraverso il comando "Actual Mesh to CAD", l'elemento Mesh si converte ad un elemento CAD che viene utilizzato come il punto di riferimento per i prossimi .stl

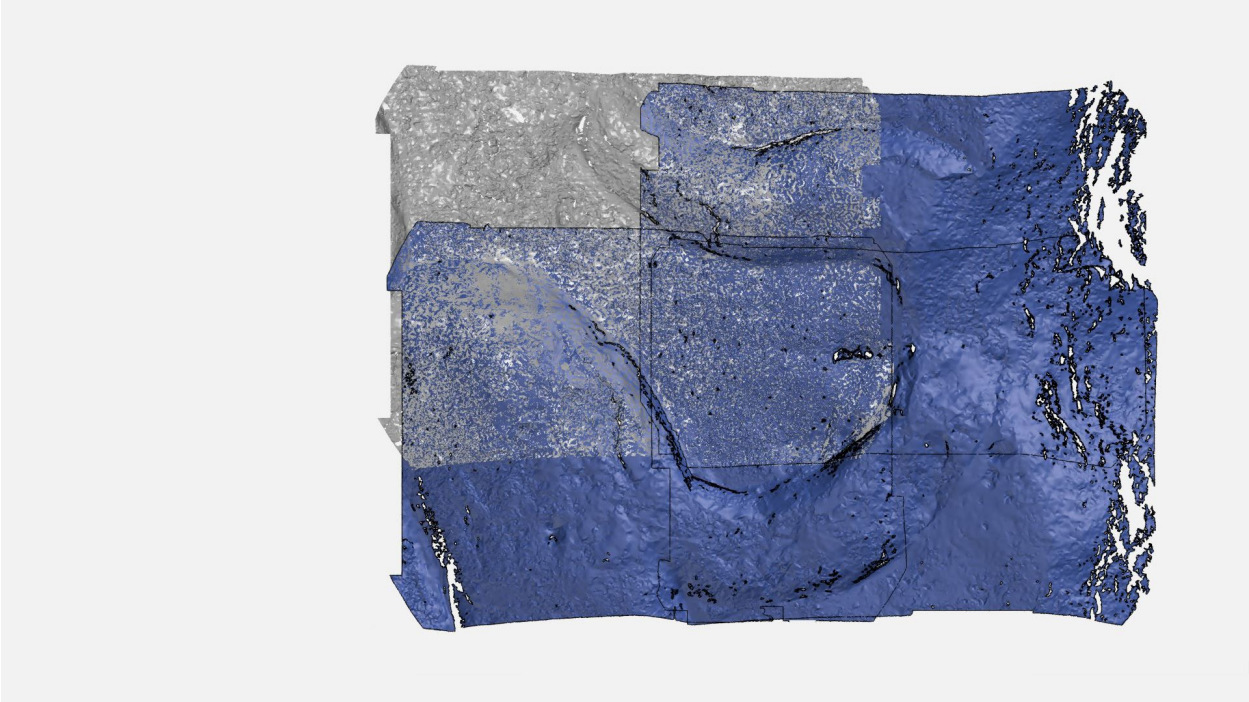

Figura 47. Il prossimo file .stl viene importato su GOM Inspect, l'elemento Mesh (grigio) e l'elemento CAD iniziale (blu) sono allineati attraverso il comando "Prealignment"

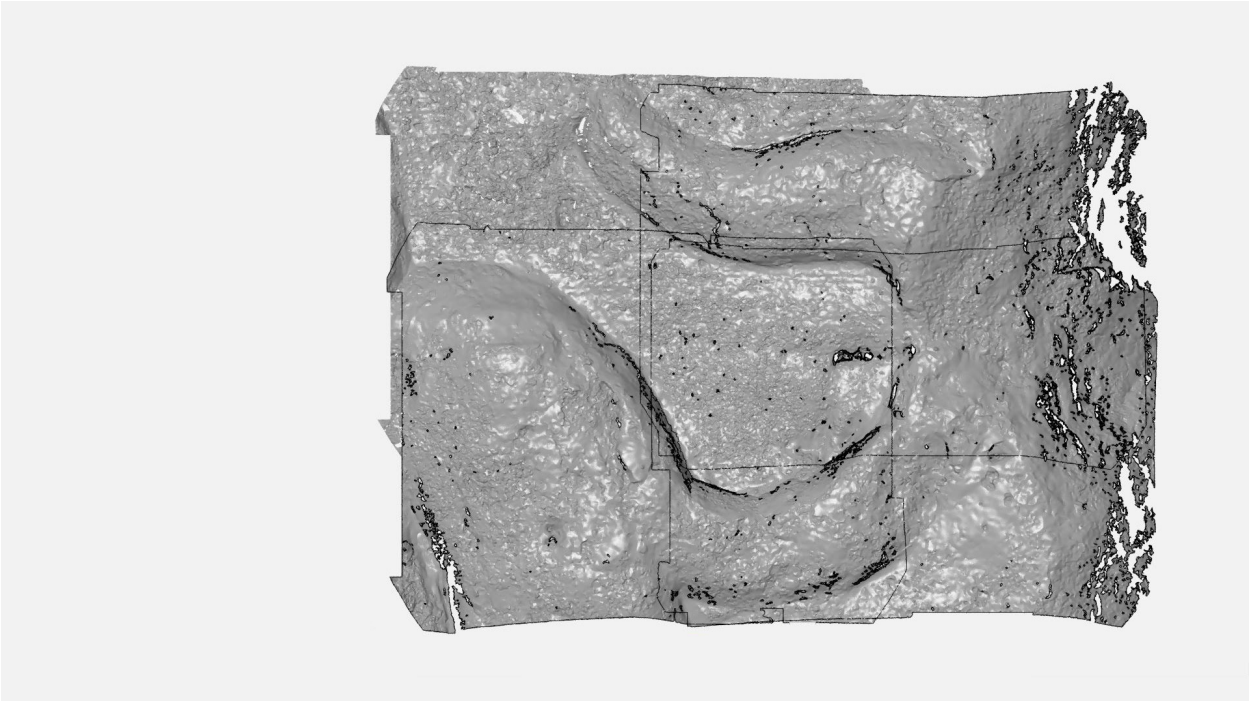

Figura 48. L'elemento CAD è convertito ad un elemento Mesh attraverso il comando "CAD to Actual Mesh"

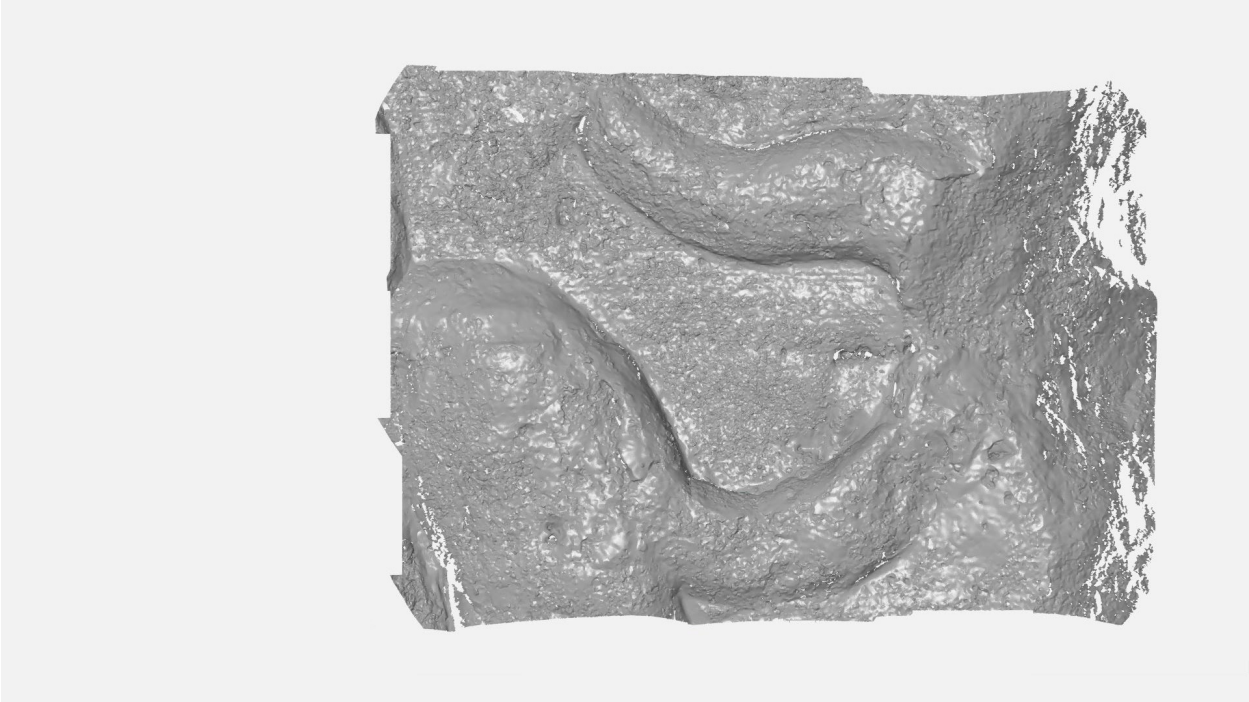

Figura 49. I due elementi Mesh sono uniti tra di loro con il comando "Combine"

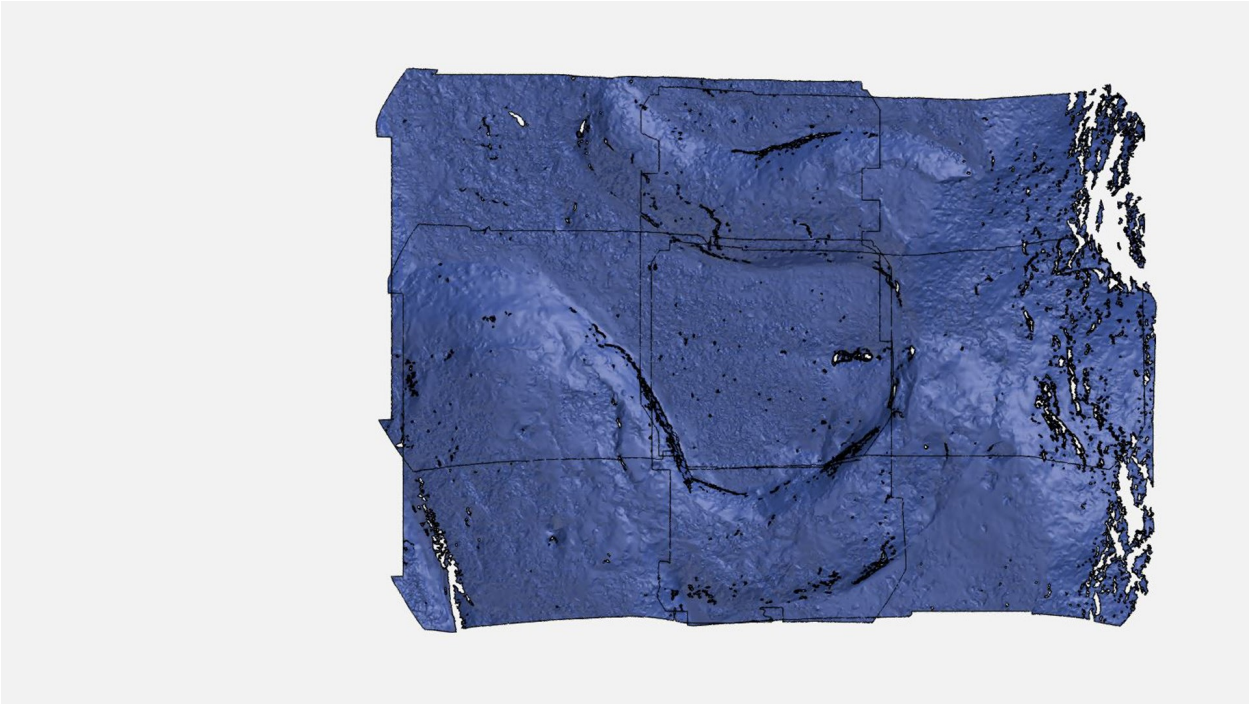

Figura 50. Il pezzo unito è convertito ad un elemento CAD e serve come il punto di riferimento per il prossimo file .stl

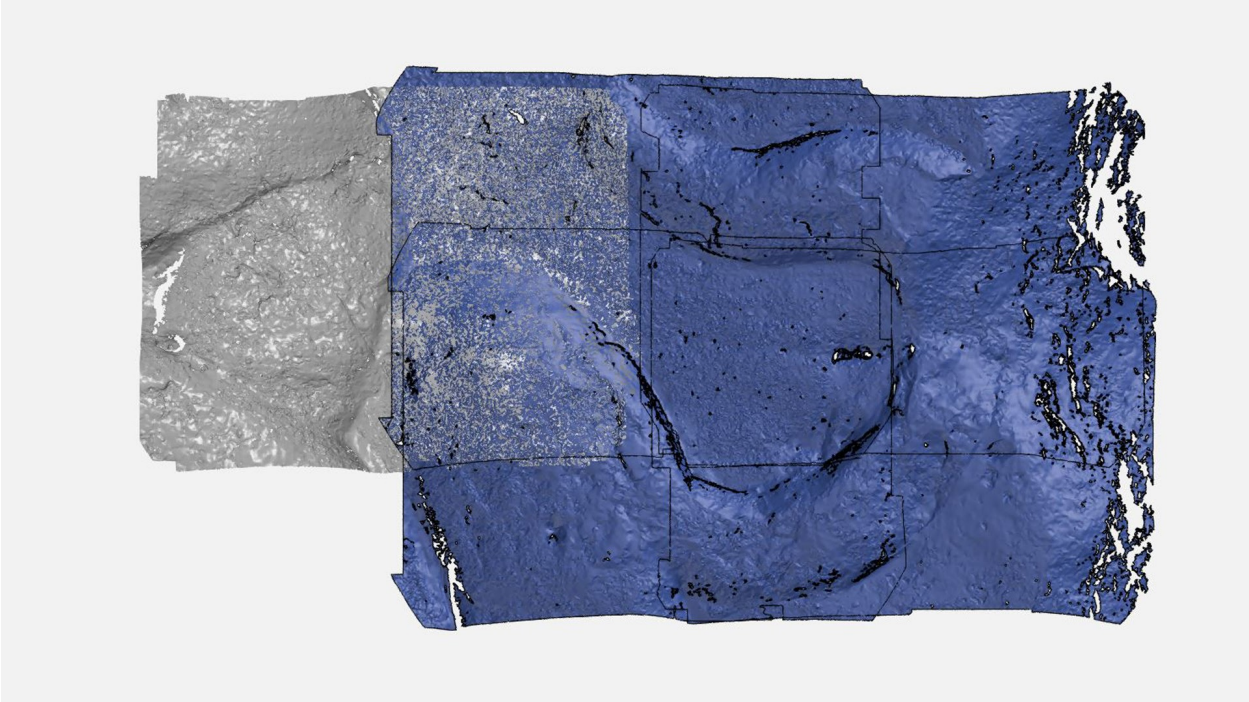

Figura 51. Il prossimo file .stl viene importato su GOM Inspect e la procedura di allineamento si ripete fino alla realizzazione del modello completo

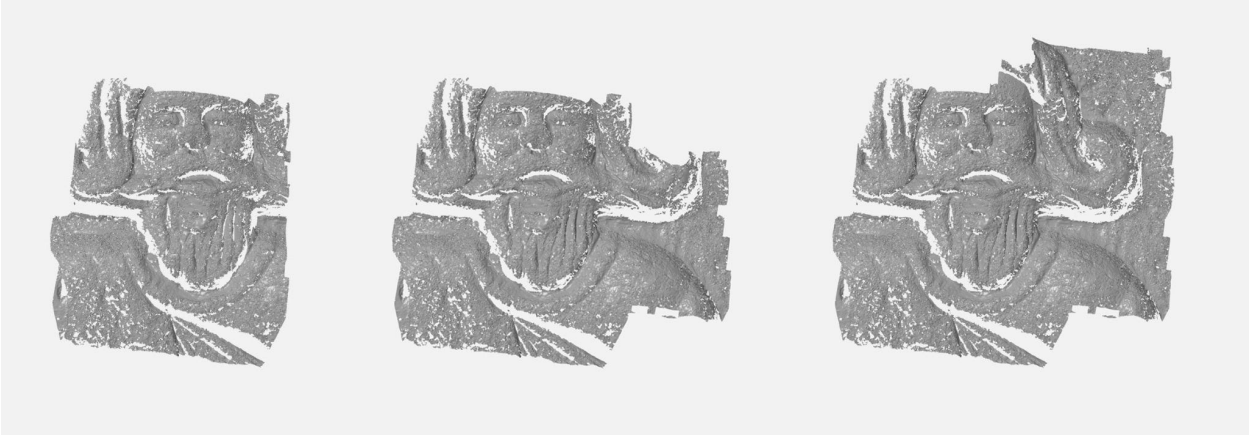

Figura 52. L'allineamento delle scansioni del volto

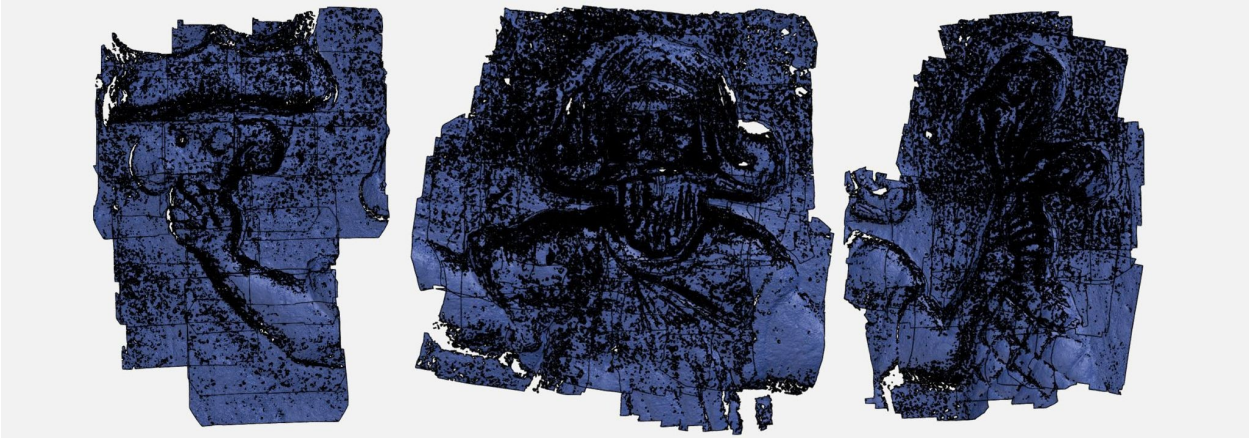

Figura 53. Le scansioni della parte superiore del modello

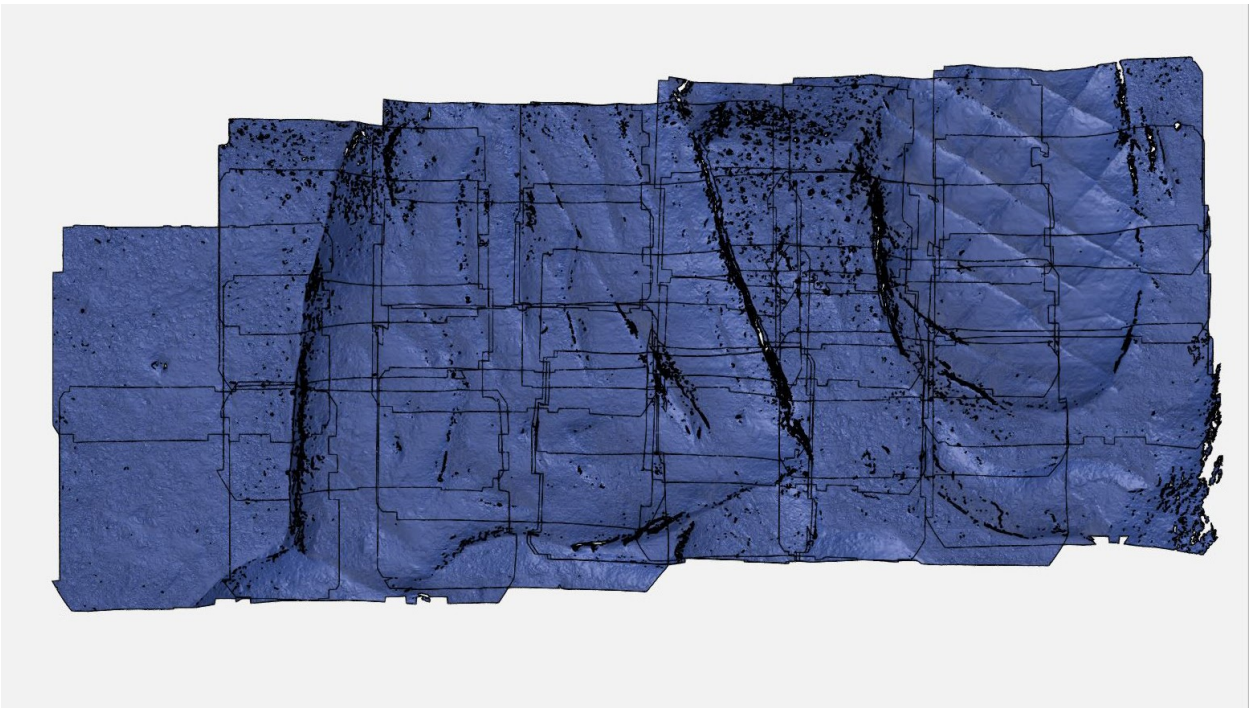

Figura 54. Le scansioni della parte mediana del modello

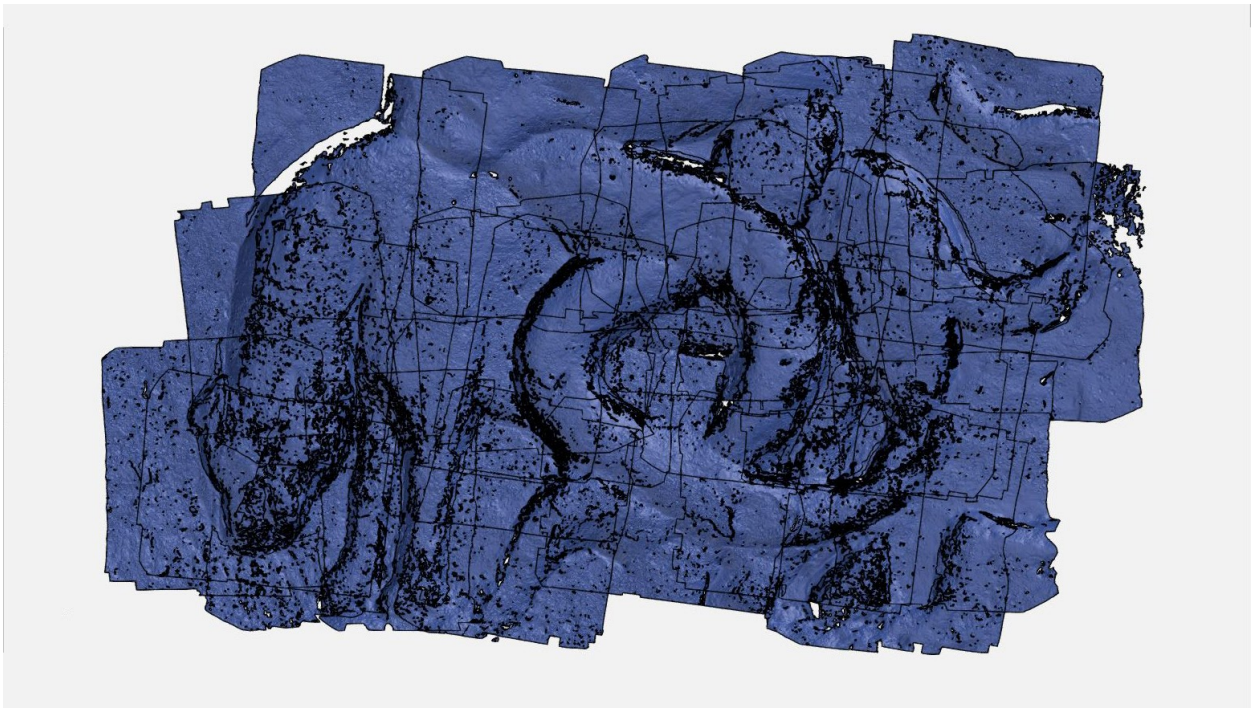

Figura 55. Le scansioni della parte inferiore del modello

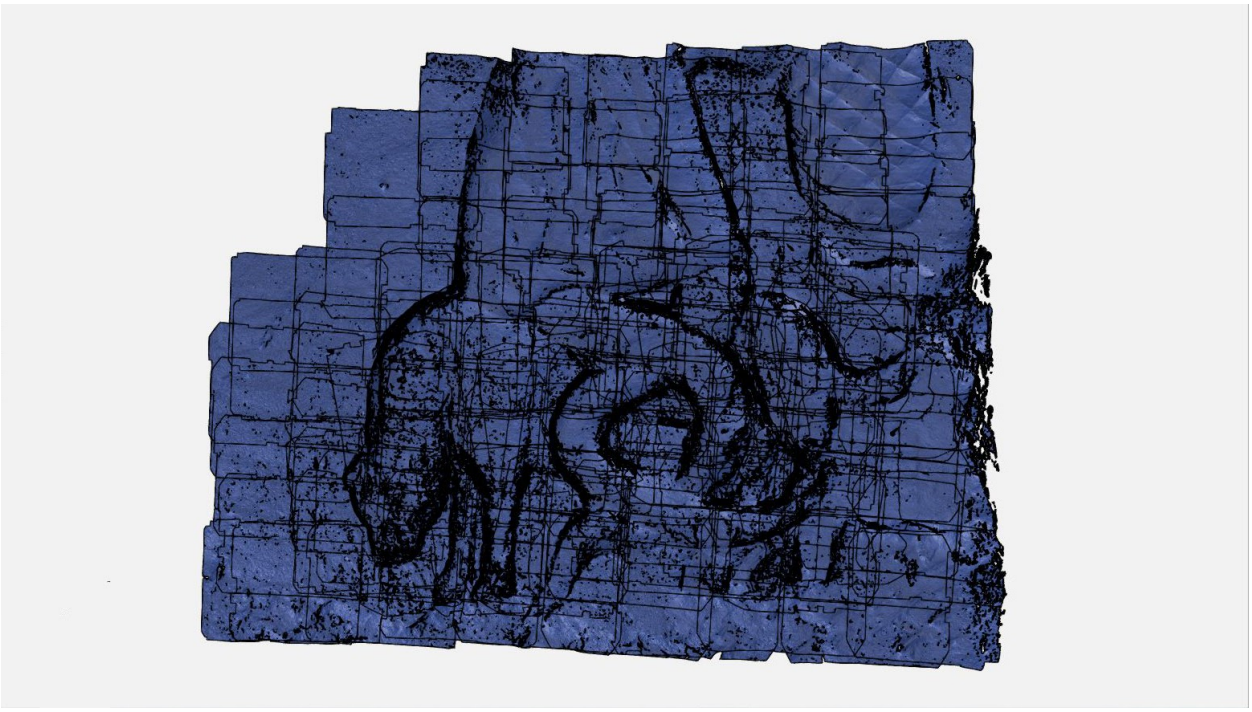

Figura 56. Le scansioni della parte mediana e della parte inferiore del modello uniti

Figura 57. Il modello completo dell'Inganno

Semplificazione

Ogni stampante 3d è in grado di gestire un certo numero di punti. Il file grezzo della figura intera dell'Inganno è un file di 1.66 GB, troppo pesante per la stampa 3d. Ai fini di ottenere un file più leggero e ridurre i difetti presenti sulla superficie del modello come rumore, rugosità e l'effetto buccia d'arancia, il modello è stato sottoposto ai metodi di semplificazione.

Il primo comando utilizzato per la semplificazione del modello è “Thin Mesh”. Il comando Thin Mesh, riduce, in modo intelligente, il numero di triangoli della Mesh, convergendo i due punti di un triangolo in un unico punto. Per mantenere l'errore al minimo possibile, il software sposta il punto nello spazio di conseguenza. Il comando riduce il volume dei dati e se questa riduzione non viene controllata può significativamente abbassare la qualità dei dati. Il comando è il seguente:
Operations -> Mesh -> Thin

I parametri da definire sono:

- Tolleranza di superficie : La tolleranza di superficie (The Surface Tolerance) determina la massima ruvidità o rumore che si desidera ridurre. Il software lavora solo sulle aree per le quali la rugosità è inferiore del valore specificato.
- Numero di punti : Questa opzione, permette di inserire il numero di punti della Mesh. Se il numero di punti è troppo piccolo, il modello perde i dettagli e di conseguenza la forma del modello cambia.

Inizialmente il comando è stato eseguito con una tolleranza di 0.05 mm per ottenere un modello più leggero rispetto al modello iniziale ma comunque molto dettagliato e ricco di informazioni. Questo modello può essere utilizzato come un modello di riferimento per eventuali futuri progetti o una riproduzione in scala 1:1. Per ottenere un modello più facile da gestire e compatibile con le stampanti 3d, il comando è stato eseguito con una tolleranza di 0.1 mm. Il risultato è un modello comunque dettagliato che nonostante sia più leggero e facile da gestire, non perde la sua forma e rimane fedele al modello di partenza.

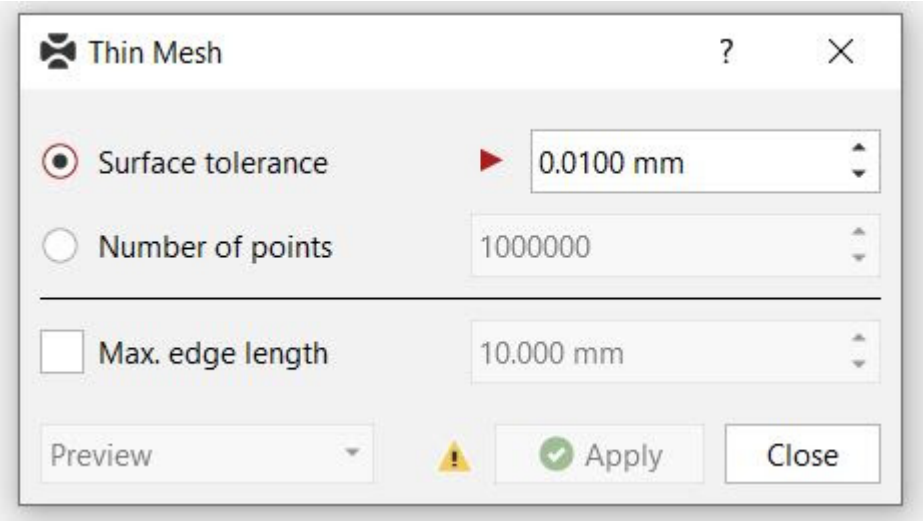

Figura 58. Il comando "Thin Mesh" riduce il numero di triangoli della Mesh, convergendo i due punti di un triangolo in un unico punto

Il secondo comando utilizzato per la semplificazione del modello è "Leviga Mesh o Smooth Mesh". Usando la funzione Leviga Mesh, si può levigare le aree Mesh selezionate. Questa funzione può ridurre la qualità dei dati della Mesh. Il comando è il seguente:
Operations -> Mesh -> Smooth

I parametri da definire sono:

- Raggio del filtro: Il Raggio del Filtro (The Filter Radius), indica la grandezza dell'area selezionato per ogni punto del poligono. È possibile scegliere la grandezza del raggio di filtro tra le seguenti opzioni: piccolo, normale, grande e molto grande. Più grande è il raggio, più la Mesh diventa liscia.
- Nitidezza dei dettagli: La Nitidezza dei Dettagli (The Detail sharpness), determina il livello dei dettagli dell'oggetto e quanto ne vengono mantenuti. La funzione limita il raggio del filtro ai dettagli e ai bordi dell'oggetto. È possibile scegliere la nitidezza dei dettagli tra alta, normale, bassa e molto bassa.

- Tolleranza di superficie (The Surface Tolerance): Per avere un modello più liscio che comunque mantiene le forme e i dettagli, il modello è stato levigato con una tolleranza di 0.15mm.

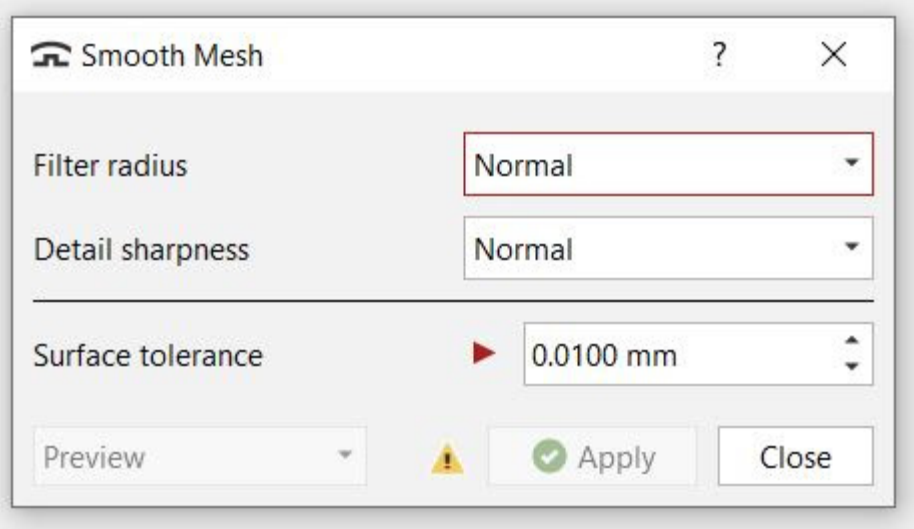

Figura 59. Il comando "Leviga Mesh (Smooth Mesh"), leviga le aree Mesh selezionate

L'ultimo comando utilizzato per la semplificazione del modello è "Scala". Il modello finale, pronto per la stampa 3d è in scala 1:10.

Il risultato finale è un file di 167 KB che non occupa tanto spazio, è più gestibile ed è adatto alla stampa 3d ma comunque un modello dettagliato e fedele al modello originale.

Figura 60. Dettaglio del modello tridimensionale dell'Inganno prima delle procedure di semplificazione

Figura 61. Dettaglio del modello tridimensionale dell'Inganno dopo le procedure di semplificazione

Figura 62. Il modello tridimensionale dell'Inganno prima (sinistra) e dopo (destra) delle procedure di semplificazione

Chiusura Buchi

Le parti della superficie che non sono state catturate dallo scanner 3d nella fase di acquisizione, si manifestano come dei buchi sulla superficie del modello. Attraverso Rapidform XOR, un software di elaborazione dati di scansione 3d e la modellazione parametrica, i buchi sono stati chiusi. I comandi utilizzati sono Chiusura Buchi (Fill Holes) e Rewrap, tramite i quali i fori sono stati individuati e poi riempiti attraverso la generazione di una superficie costituito da triangoli.

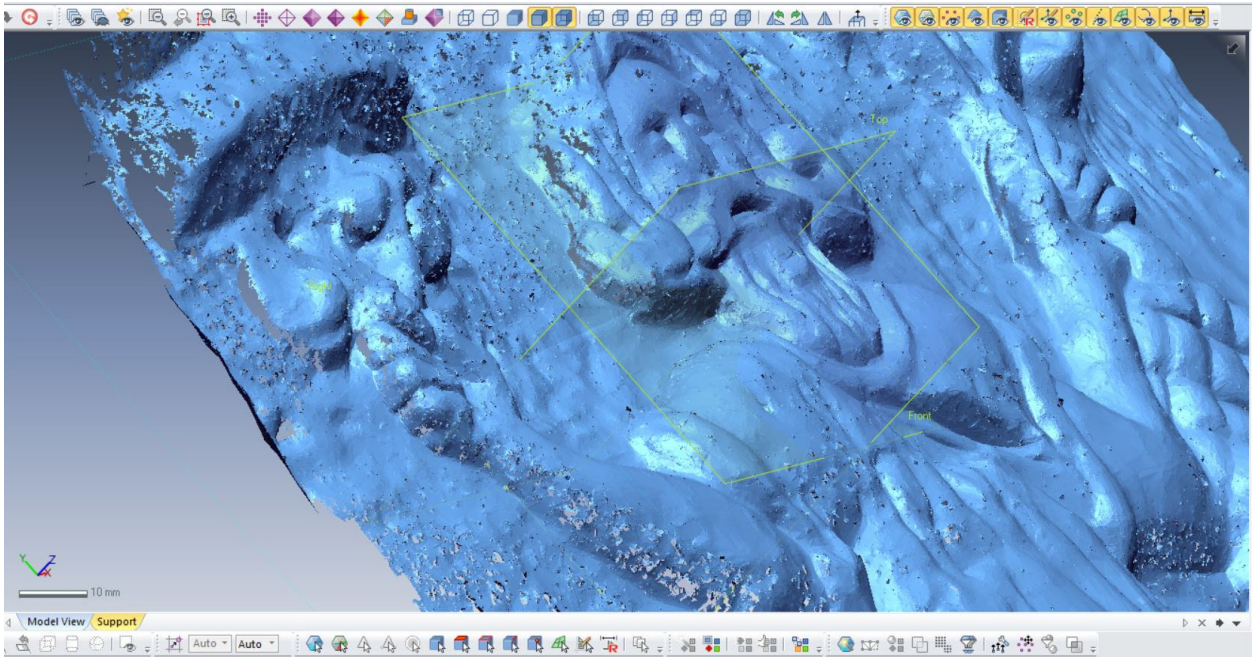

Figura 63. Il modello tridimensionale dell'Inganno prima della chiusura dei buchi

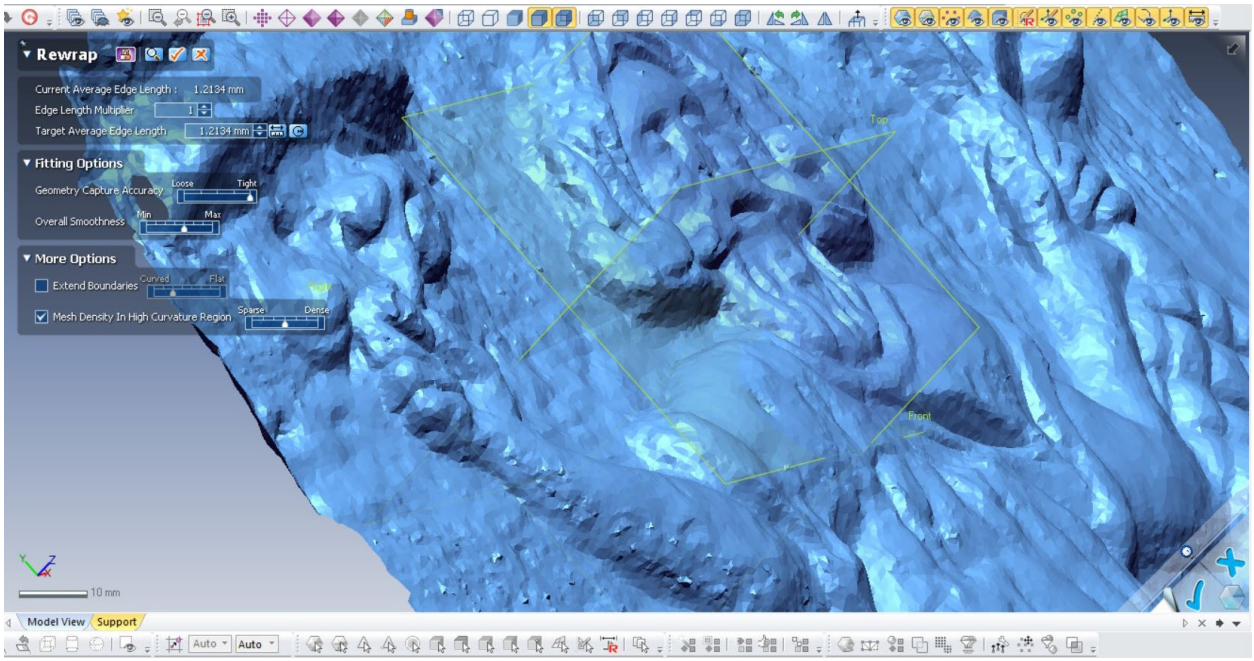

Figura 64. Il modello tridimensionale dell'Inganno dopo la chiusura dei buchi, Rapidform XOR

Mesh a Solido Chiuso

Una volta il modello della superficie è completo e privo di difetti, è necessario trasformarlo ad un solido chiuso. Per eseguire questo passaggio il file STL del modello è stato importato su 3ds Max, software di modellazione 3d di Autodesk e il modello della superficie dell'Inganno è stato estruso di 5mm attraverso il comando Estrudi (Extrude).

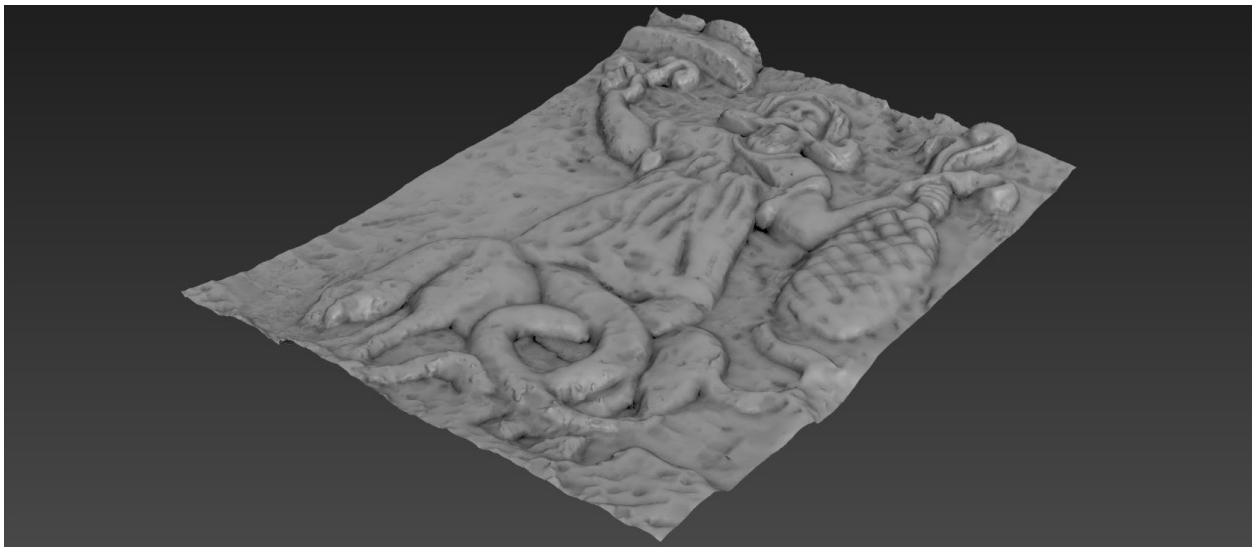

Figura 65. La superficie del modello tridimensionale dell'Inganno

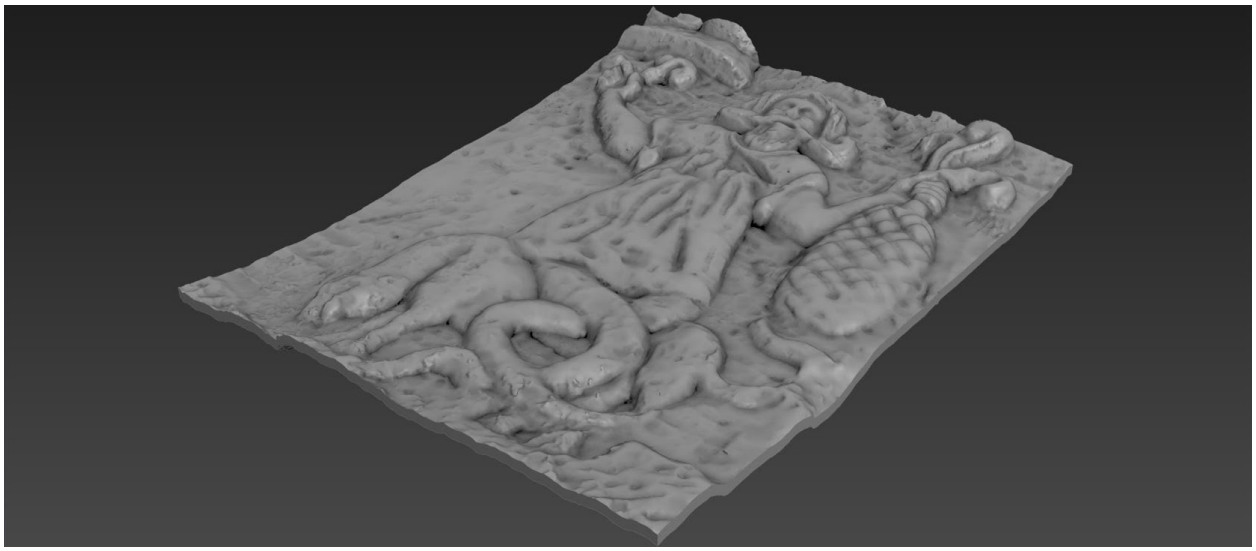

Figura 66. Il modello tridimensionale dell'Inganno con lo spessore di 5mm, 3ds Max

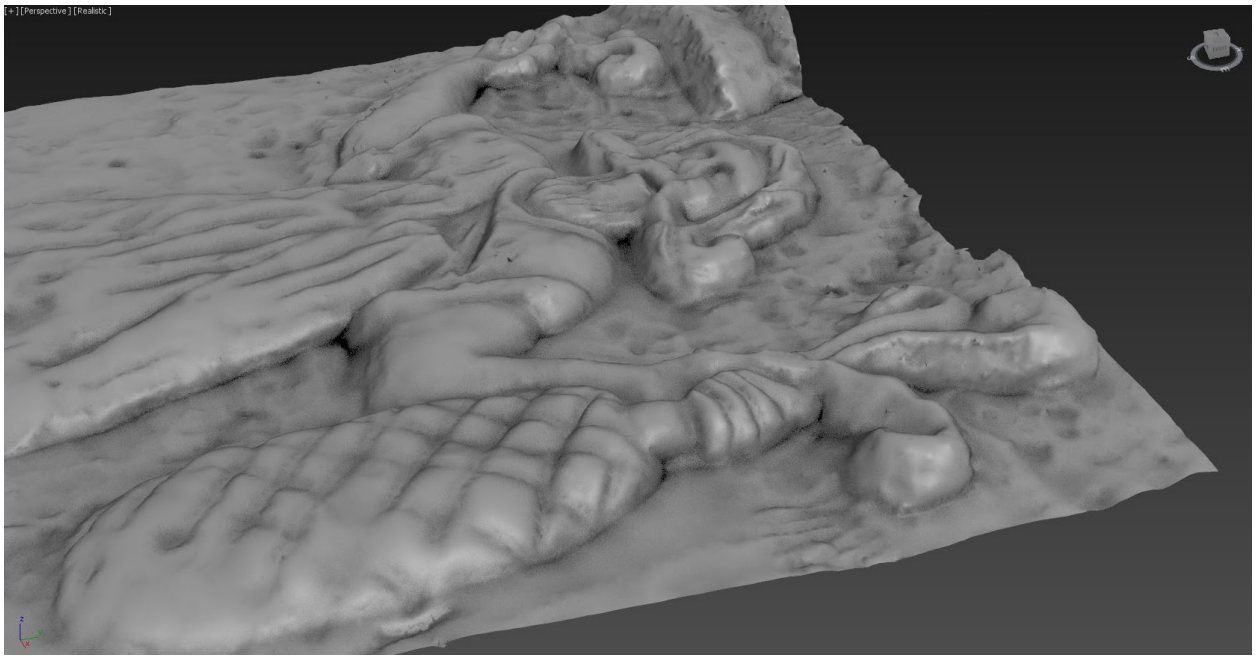

Figura 67. Dettaglio della superficie del modello tridimensionale dell'Inganno

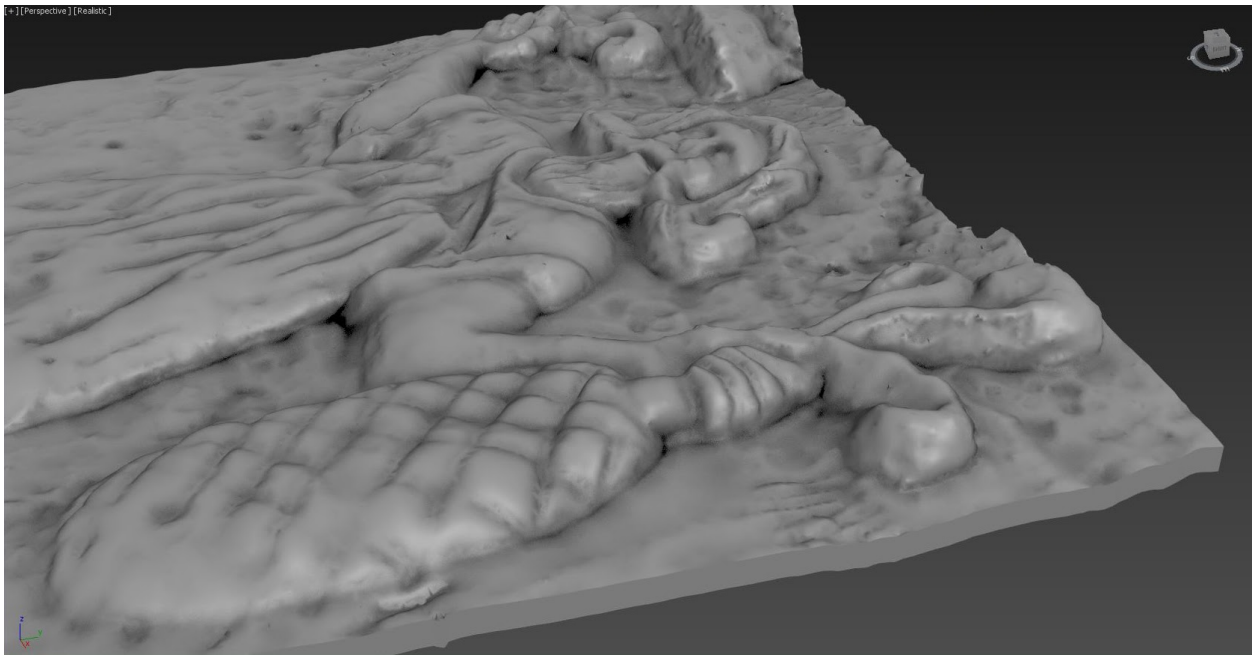

Figura 68. Dettaglio del modello tridimensionale dell'Inganno con lo spessore di 5mm, 3ds Max

Il modello chiuso è pronto per la stampa 3d.

Stampa 3d

Tecnologie di Stampa 3d

La Stampa 3d è la tecnologia che permette la fabbricazione di un oggetto fisico attraverso il Controllo Numerico Computerizzato (Computerized Numerical Control, CNC) partendo da un modello CAD o un modello tridimensionale digitale. La tecnologia chiamata anche Prototipazione Rapida, Produzione Additiva o Manifattura Additiva (Additive Manufacturing), consiste in realizzazione dell'oggetto strato dopo strato solidificando, depositando o unificando il materiale di costruzione.

Esistono diverse tecnologie di manifattura additiva che variano in base al metodo che utilizzano per la creazione degli strati. Ogni tecnologia ha i propri vantaggi e svantaggi e viene selezionata in base al costo, dimensione, velocità, disponibilità di materiali e colorazione. Le tecnologie più comuni della stampa 3d sono Stampa 3d a Filamenti, Polyjet, Stereolitografia e Sinterizzazione Selettiva con laser.

Stampa 3d a Filamenti (FDM)

Stampa 3d a Filamenti, Fused Filament Fabrication (FFF) o più comunemente conosciuto come Fused Deposition Modeling o FDM è la tecnologia di stampa 3d più diffusa al mondo. La tecnologia è stata inventata nella fine degli anni 80 da S. Scott Crump, il cofondatore di Stratasys. Il termine Fused Deposition Modeling e l'acronimo FDM sono coperti da copyright per quanto siano stati registrati come proprietà di Stratasys nel 1991.

La fabbricazione dell'oggetto avviene tramite la fusione ed estrusione di polimeri termoplastici. Il filamento di materiale plastico si fonde all'interno di un ugello riscaldato ed una volta uscita dall'estrusore viene depositato, seguendo un pattern controllato, su un vassoio o piatto di stampa accanto o sopra l'estrusione precedente. Il materiale termoplastica si solidifica immediatamente e si unisce agli strati sottostanti creando un'unica struttura. Una volta è

concluso uno strato del modello, l'estrusore si sposta sulla asse Z, dal basso verso l'alto per formare lo strato successivo fino a completare il modello.

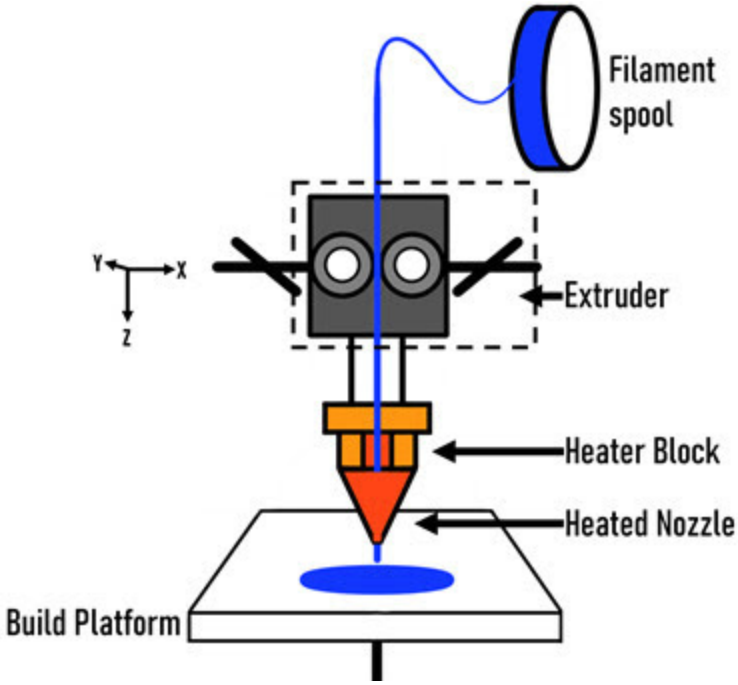

Figura 69. Schema del processo della stampa 3d a filamenti, Image credit: Christian Cavallo Consulting

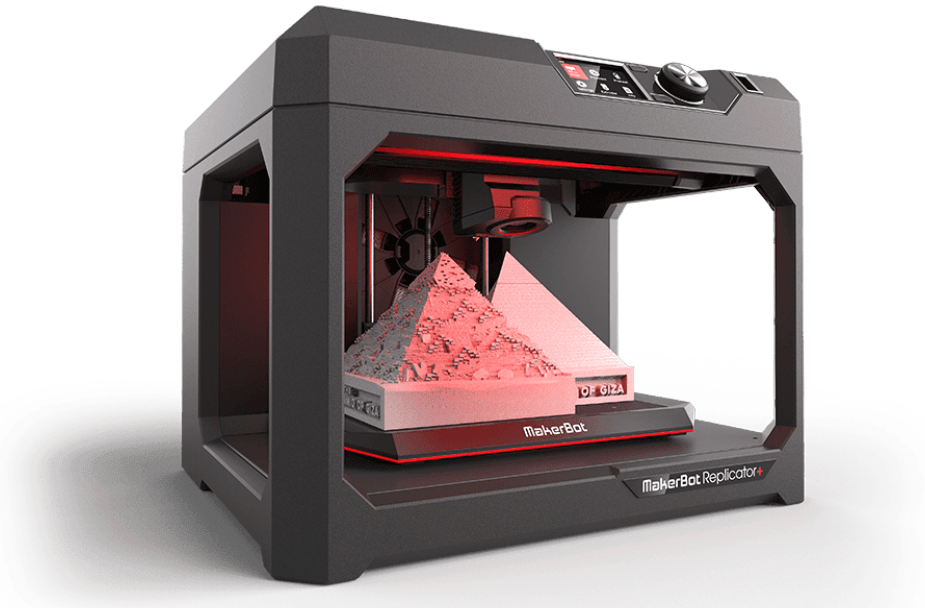

Figura 70. Esempio di una stampante 3d a filamenti, The Makerbot Replicator+

I materiali più utilizzati per FDM sono ABS, PLA, ASA, PC-ABS ,Ultem e policarbonati. Grazie alla proprietà dei materiali, la tecnica di unione degli strati tramite fusione e solidificazione e la creazione di un legame meccanico tra di loro, i pezzi prodotti dalle stampanti 3d a filo hanno delle ottime proprietà meccaniche, sono robusti, durevoli e più resistenti nelle temperature alte.

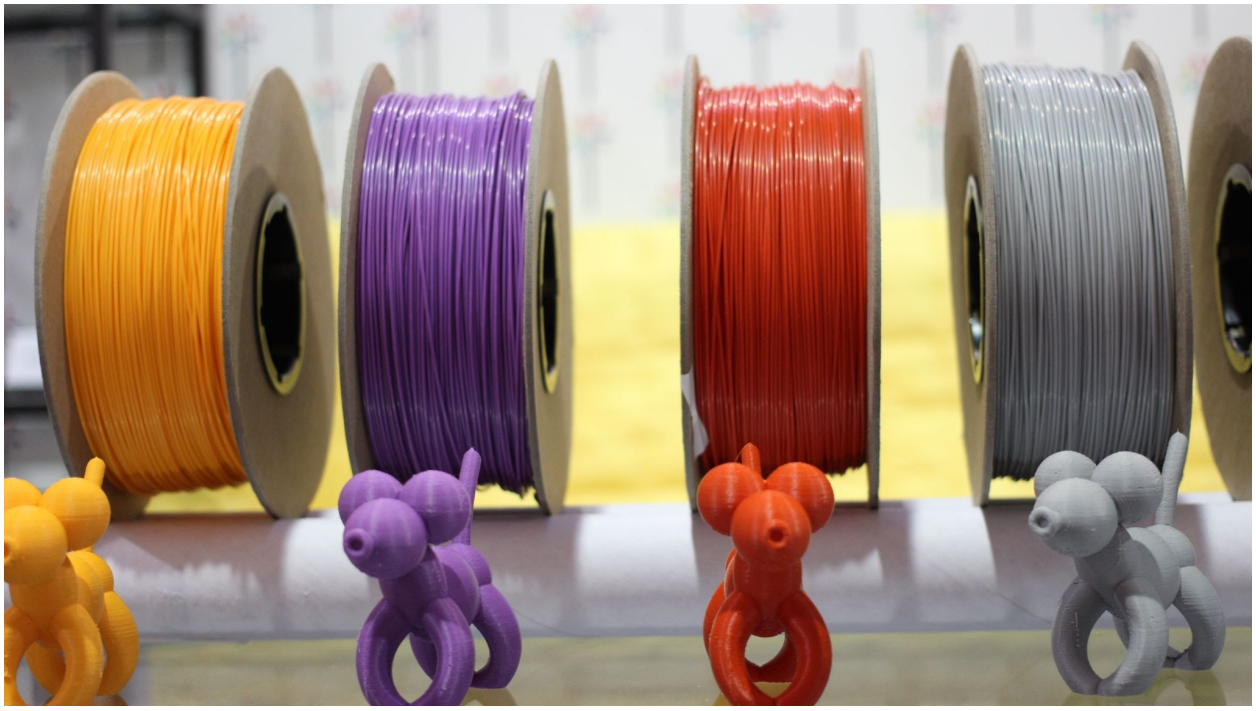

Figura 71. I filamenti nelle diverse colorazioni, Foto di Maurizio Pesce from Milan, Italia, CC BY 2.0, Via Wikimedia Commons

FDM è tra le tecnologie più semplici da utilizzare e la sua velocità, diversità del materiale e il costo relativamente basso lo rendono la tecnologia di stampa 3d più utilizzata al mondo. Tuttavia, gli strati del modello stampato con FDM sono poco fini e subito visibili e dunque non sono idonei per i casi dove la qualità estetica del modello stampato è più importante della resistenza meccanica.

Polyjet

Polyjet è una delle tecnologie più veloce e precisa di stampa 3d attualmente disponibili. Questa tecnologia costruisce un oggetto gettando migliaia di goccioline di fotopolimero liquido solidificabile su un vassoio o una piattaforma di produzione. Le gocce depositate in maniera controllato, seguendo il pattern derivato dal modello CAD, si polimerizzano e si solidificano immediatamente tramite esposizione ai raggi UV. Il materiale vieni depositato strato dopo strato fino alla realizzazione del modello completo.

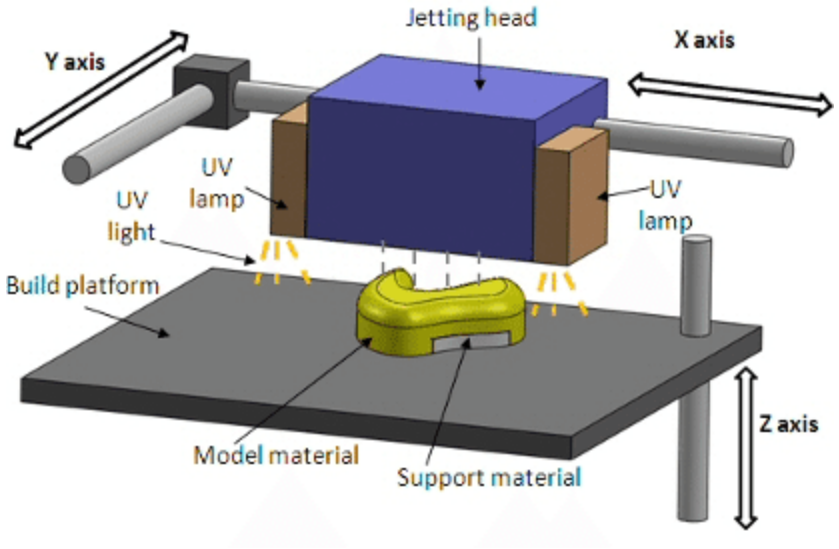

Figura 72. Schema del processo di stampa 3d attraverso la tecnologia Polyjet

Al contrario di FDM, gli strati del modello stampato con Polyjet sono ultrasottili, tra 16µm e 32 µm e quindi risultano in una finitura liscia e dettagliata. Il prodotto finale è di un elevato livello di realismo, estremamente preciso e fedele al modello originale. Proprio per questo motivo Polyjet è più adatta a stampare i modelli estetici dove la finitura e l'apparenza del modello sono più importanti che la sua resistenza meccanica.

Un altro punto di forza di Polyjet è la varietà di materiale. Con Polyjet è possibile produrre i modelli sia rigidi che flessibili e gommosi, sia colorati che trasparenti e semi-trasparenti e anche

del materiale biocompatibile come bio-resina. Per lo più, le stampanti Polyjet sono in grado di stampare materiali diversi contemporaneamente dato che sono dotati di più ugelli.

Le stampanti Polyjet sono di grande dimensioni e occupano tanto spazio, quindi solitamente è necessario fornire un loro area di lavoro.

Figura 73. Esempio di una stampante Polyjet

Stereolitografia

Stereolitografia, Stereolithography o SLA, è la prima tecnologia di stampa 3d e una delle più diffuse al mondo. La SLA è stata inventata negli anni 80 ed è basato su fotopolimerizzazione della resina liquida. La resina liquida fotosensibile, viene polimerizzata attraverso esposizione ai raggi UV e si solidifica immediatamente. Il laser colpisce la vasca contenente della resina nel modo selettivo, seguendo il modello CAD dell'oggetto e costruisce il modello strato dopo strato, solitamente in una posizione sottosopra.

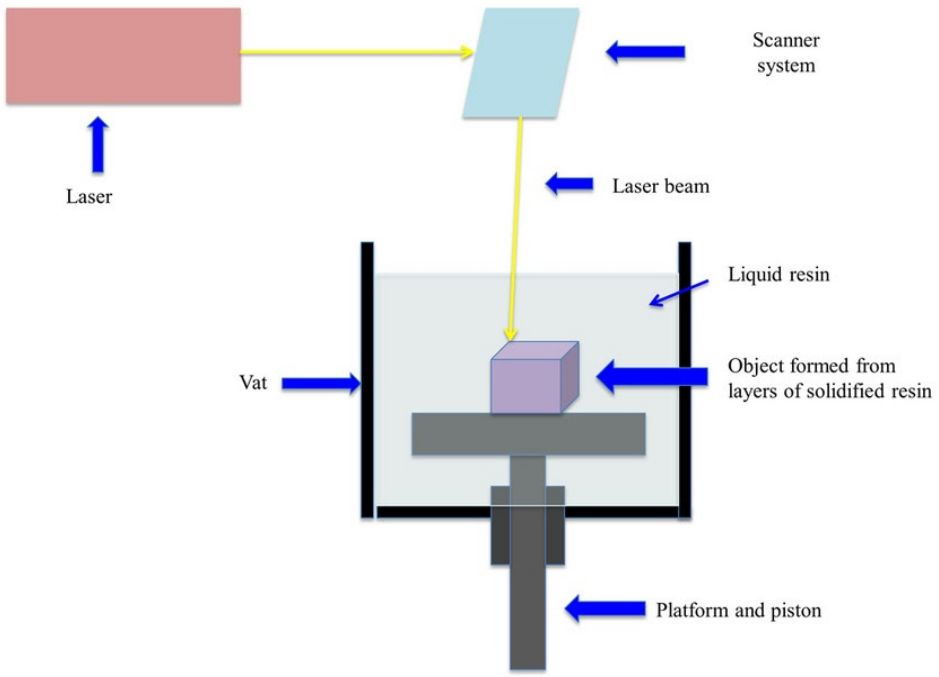

Figura 74. Schema del processo di Stereolitografia

I modelli stampati mediante stereolitografia, sono isotropici, robusti, estremamente dettagliati, precisi ed accurati. Dato la sottigliezza degli strati, i modelli stampati con SLA sono dotati di una finitura liscia, sono raffinati e molto fedele all'oggetto originale.

Stereolitografia offre una vasta gamma di materiale resina ed è in grado di produrre modelli rigidi, flessibili, opachi, trasparenti e semi-trasparenti ma dato che la fabbricazione tramite SLA è

a base di fotopolimerizzazione, non è possibile produrre oggetti metallici o di altre tipologie di materiale.

La tecnologia Polyjet è una derivata di Stereolitografia per quanto utilizza la fotopolimerizzazione per produrre i modelli.

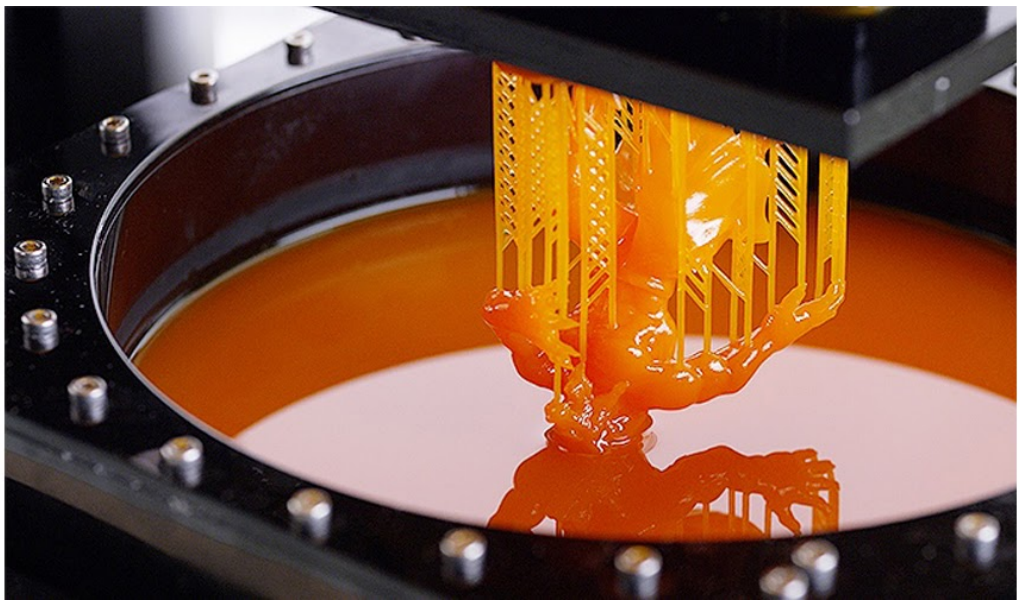

Figura 75. Il laser colpisce la vasca contenente della resina seguendo il modello CAD dell'oggetto e costruisce il modello strato dopo strato, solitamente in una posizione sottosopra

Figura 76. Esempi delle stampanti stereolitografiche 3d

Sinterizzazione Selettiva con Laser

Sinterizzazione Selettiva con laser, Selective Laser Sintering o SLS è una tecnologia di stampa 3d basata sul processo di sinterizzazione. La polvere del materiale, di solito le poliammide (PA) o microparticelle di nylon, all'interno di un letto di polvere, viene sinterizzata attraverso l'utilizzo di un laser potente. Il laser, riscalda le particelle, in maniera selettiva e seguendo il modello 3d, fino a raggiungimento ad una temperatura alta ma comunque poco inferiore alla temperatura di fusione del materiale. Le particelle si saldano tra di loro e costruiscono una struttura solida, strato dopo strato dal basso verso l'alto. Il modello completo viene rimosso dal letto di polvere e di seguito pulito o manualmente o con la sabbiatura per togliere la polvere in eccesso. La polvere non sinterizzata sostiene la struttura solida durante la procedura di stampa e agisce come materiale di supporto. Una volta conclusa la stampa, la polvere residuo può essere riciclata e riutilizzata.

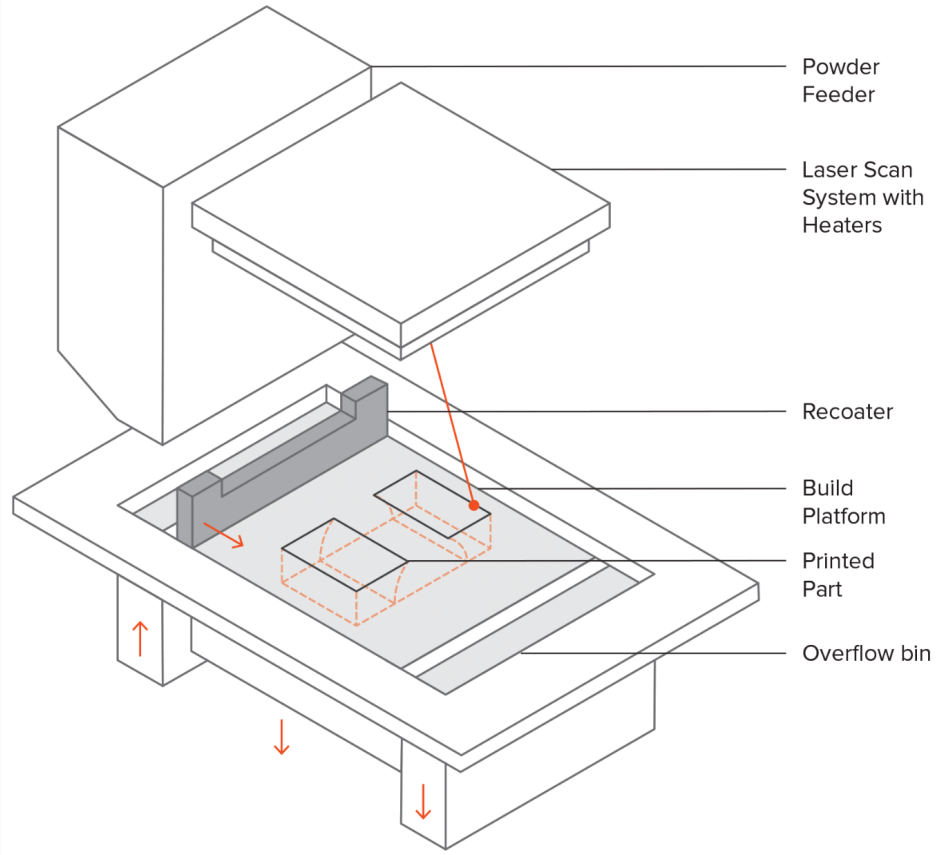

Figura 77. Schema del processo di sinterizzazione laser selettiva

La SLS è un metodo di alta precisione, idoneo alle geometrie complesse e produce pezzi rigidi, durevoli e robuste. Tuttavia, questa tecnologia permette una scelta limitata di materiale e del colore e nonostante sia molto precisa in termini di forma, non è adatta ai modelli con una finitura fine e dettagliata.

Figura 78. Il modello completo viene rimosso dal letto di polvere e di seguito viene pulito, o manualmente o con la sabbiatura, per togliere la polvere in eccesso

Stampa 3d della Figura dell'Inganno

Il modello fisico dell'Inganno è stato riprodotto utilizzando due tecnologie: La stampa 3d a Filamento e Polyjet.

Stampa 3d a Filamento

La stampante 3d F370 di Stratasys è stato utilizzato per riprodurre il modello fisico intero dell'Inganno in scala 1:10. F370 è uno stampante 3d a filamento della serie F123 di Stratasys che utilizza la tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Il file .stl del modello è stato importato su GrabCAD Print, il software CAD-to-Print sviluppato da Stratasys. Dopo aver definito parametri quali il materiale, la densità di riempimento e l'altezza slicing, il progetto è stato esportato come un file .cmb (Coordinate Machine Binary), compatibile con la F370 e gli stampanti a filamento in generale. Il file .cmb può essere inviato alla stampante via bluetooth o con una chiavetta dopodiché è possibile avviare la stampa.

Figura 79. La stampante 3d a filamento, F370 di Stratasys

stratasys

SPECIFICHE DEL PRODOTTO					
Dimensioni e peso del sistema	**F120:** 889 x 870 x 721 mm (35 x 35 x 29 pollici), 124 kg (275 libbre) **F170, F270, F370:** 1.626 x 864 x 711 mm (64 x 34 x 28 in.), 227 kg (500 libbre) con materiali di consumo				
Specifiche relative al rumore	46 dB massimo in fase di costruzione, 35 dB quando non attiva				
Spessore degli strati		0,330 mm (0,013 pollici)	0,254 mm (0,010 pollici)	0,178 mm (0,007 pollici)	0,127 mm (0,005 pollici)[1]
	PLA	○	●	○	○
	ABS-M30	●	●	●	●
	ABS-CF10[1]	●	●	●	○
	ASA	●	●	●	●
	PC-ABS	●	●	●	●
	ABS-ESD7™	○	●	●	○
	Diran™ 410MF07	●	●	●	○
	FDM™ TPU 92A	○	●	●	○
Precisione[2]	I componenti sono prodotti con un margine di precisione pari a +/- 0,200 mm (0,008 pollici) o +/- 0,002 mm (0,002 pollici/pollici), prevalendo tra i due il valore maggiore.				
Connettività di rete	Cablata: protocolli TCP/IP a 100 Mbps minimo 100 Base T, protocollo Ethernet, connettore RJ45 pronto per il wireless: IEEE 802.11n, g o b; Autenticazione: WPA2-PSK, 802.1x EAP; Crittografia: CCMP, TKIP				
Requisiti di sistema	Windows 7, 8, 8.1 e 10 (solo a 64 bit) con almeno 4 GB di RAM (8 GB o più consigliati)				
Ambiente operativo	**In funzione:** Temperatura: 59 – 86 °F (15 – 30 °C), umidità: 30 – 70% RH **Stoccaggio:** Temperatura: 32 – 95 °F (0 – 35 °C), umidità: 20 – 90% RH				
Alimentazione	100–132V/15A o 200 – 240V/7A. 50/60 Hz				
Conformità alle normative	CE (direttiva a basso voltaggio ed EMC), FCC, EAC, cTUVus, FCC, KC, RoHs, WEEE, Reach				

	F120	F170	F270	F370
Materiale disponibile	ABS-M30™, ASA, Materiale di supporto SR-30	PLA[3], ABS-M30, ABS-CF10, ASA, TPU 92A, Materiale di supporto QSR	PLA[3], ABS-M30, ABS-CF10, ASA, TPU 92A, Materiale di supporto QSR	PLA[3], ABS-ESD7, ABS-M30, ABS-CF10, ASA, Diran 410MF07[3], FDM TPU 92A, PC-ABS, Materiale di supporto QSR
Dimensione del vassoio	254 x 254 x 254 mm (10 x 10 x 10 pollici)	254 x 254 x 254 mm (10 x 10 x 10 pollici)	305 x 254 x 305 mm (12 x 10 x 12 pollici)	355 x 254 x 355 mm (14 x 10 x 14 pollici)
Alloggiamenti per i materiali	2 in totale (esterni) 1 modello/1 supporto	2 in totale 1 modello/1 supporto	4 in totale 2 modello/2 supporto	4 in totale 2 modello/2 supporto
Software	GrabCAD Print™	GrabCAD Print	GrabCAD Print	GrabCAD Print Insight™

Figura 80. Specifiche di F370 di Stratasys

Parametri

Materiale

Il materiale selezionato per riprodurre il modello è ASA (Acrilonitrile Stirene Acrilato), un termoplastico amorfo sviluppato in alternativa all' ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene) con le proprietà meccaniche e estetiche ottimizzate.

Figura 81. Filamento di materiale ASA

QSR (Quick Support Release) è stato scelto come materiale di supporto. QSR è un materiale di supporto solubile adatto ai modelli con le geometrie più complicate dove la rimozione manuale del supporto risulta più difficile. Il QSR viene rimosso attraverso immersione in una soluzione di acqua calda e idrossido di sodio.

Densità di Riempimento

Densità di riempimento o infill, definisce la densità della struttura interna del modello. Gli oggetti stampati non hanno sempre bisogno di essere pieni soprattutto se si tratta dei modelli che hanno uno scopo espositivo dove una resistenza meccanica alta non è una necessità. Dunque, per risparmiare materiale e ridurre i tempi di stampa si può optare per una densità di riempimento più bassa e scegliere lo stile di infill in base allo scopo finale del modello. I pattern

dell'infill possono essere delle linee, triangolari, a griglia, a nido d’ape, ecc., e possono influenzare in modo significativo il consumo del materiale di supporto. L'infill scelto per il modello dell'Inganno è a nido d'ape, chiamato "sparso" su GrabCAD Print, ideale per un integrità strutturale elevata.

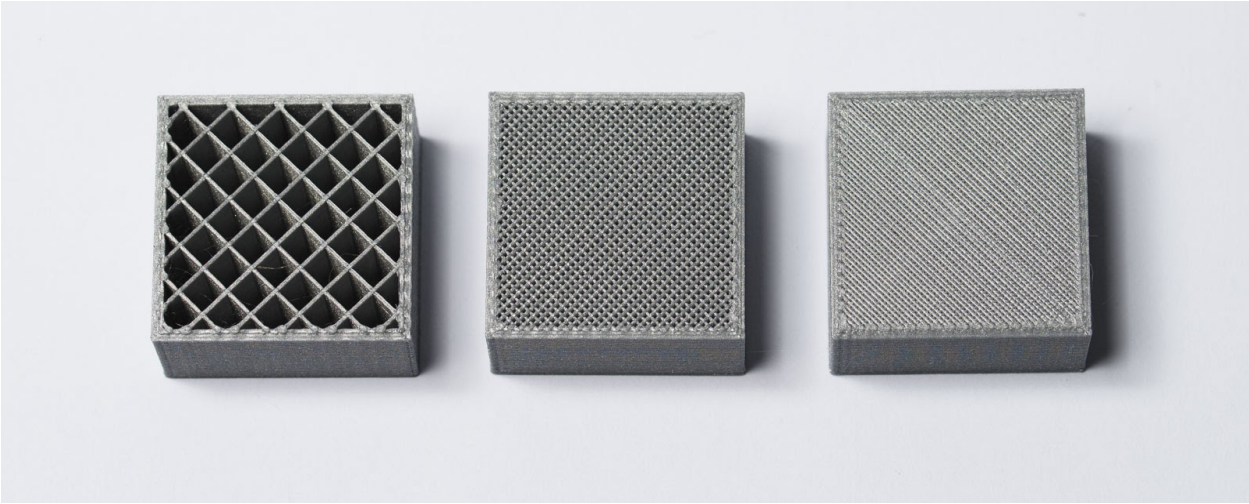

Figura 82. Diverse densità di riempimento o infill che definiscono la densità della struttura interna del modello

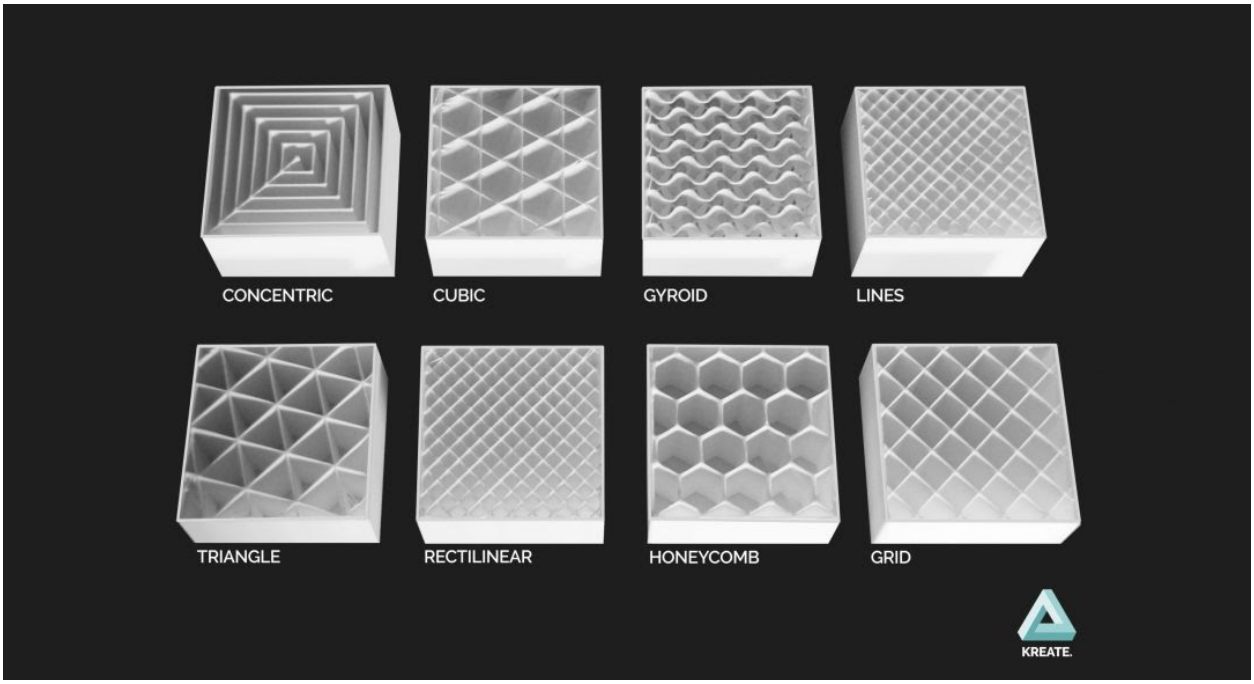

Figura 83. Diversi pattern dell’infill

Altezza Slicing

Con l'Altezza Slicing si riferisce all'altezza di ogni strato del materiale, in questo caso ASA e QSR, depositato dall'estrusore. Gli strati più alti sono più visibili e di conseguenza abbassano la qualità estetica del modello però velocizzano i tempi della stampa e consumano meno materiale mentre gli strati più sottili migliorano l'aspetto del modello per quanto sono più fini e richiedono meno lavoro di post-processing ma in cambio impiegano più tempo, materiale e consumo di energia elettrica. La scelta dell'altezza degli strati dipende dallo scopo finale del modello.

Prima di stampare il modello intero dell'Inganno, sono state effettuate due prove di stampa della mano sinistra della figura, delle dimensioni 70x100mm, con due altezze di strato diversi: 0,127 mm e 0,254 mm. Il modello con l'altezza di strati di 0,127 mm, ha gli starti molto fini e un'elevata qualità estetica. Tuttavia, la sua fabbricazione richiede più tempo e materiale. Il modello con l'altezza di strati di 0,254 mm, ha gli strati ben distinti e visibili e dunque una qualità estetica inferiore ma consuma meno tempo e materiale.

Figura 84. Il dettaglio della mano con l'altezza slicing di 0,254 mm (sinistra) e 0,127 mm (destra)

Esaminando i risultati, per la stampa della figura intera si è optato per l'altezza slicing di 0.178mm, una via di mezzo tra le due prove, per quanto dà la possibilità di riprodurre un modello con le forme ben definite e contemporaneamente risparmiare tempo, materiale e energia. Per la stampa della figura intera con l'altezza di strati di 0.178mm, la stampante ha utilizzato 192.22 cm^3 di materiale per il modello (ASA), 317.7 cm^3 di materiale di supporto (QSR) e ha impiegato 2 giorni, 4 ore e 46 minuti.

Figura 85. Per la stampa della figura intera con l'altezza di strati di 0.178mm, la stampante ha utilizzato 192.22 cm^3 di materiale ASA, 317.7 cm^3 di materiale di supporto e ha impiegato 2 giorni, 4 ore e 46 minuti.

Figura 86. Il raffreddamento del modello stampato

Figura 87. ASA, il materiale del modello (grigio) e QSR, il materiale di supporto (bianco)

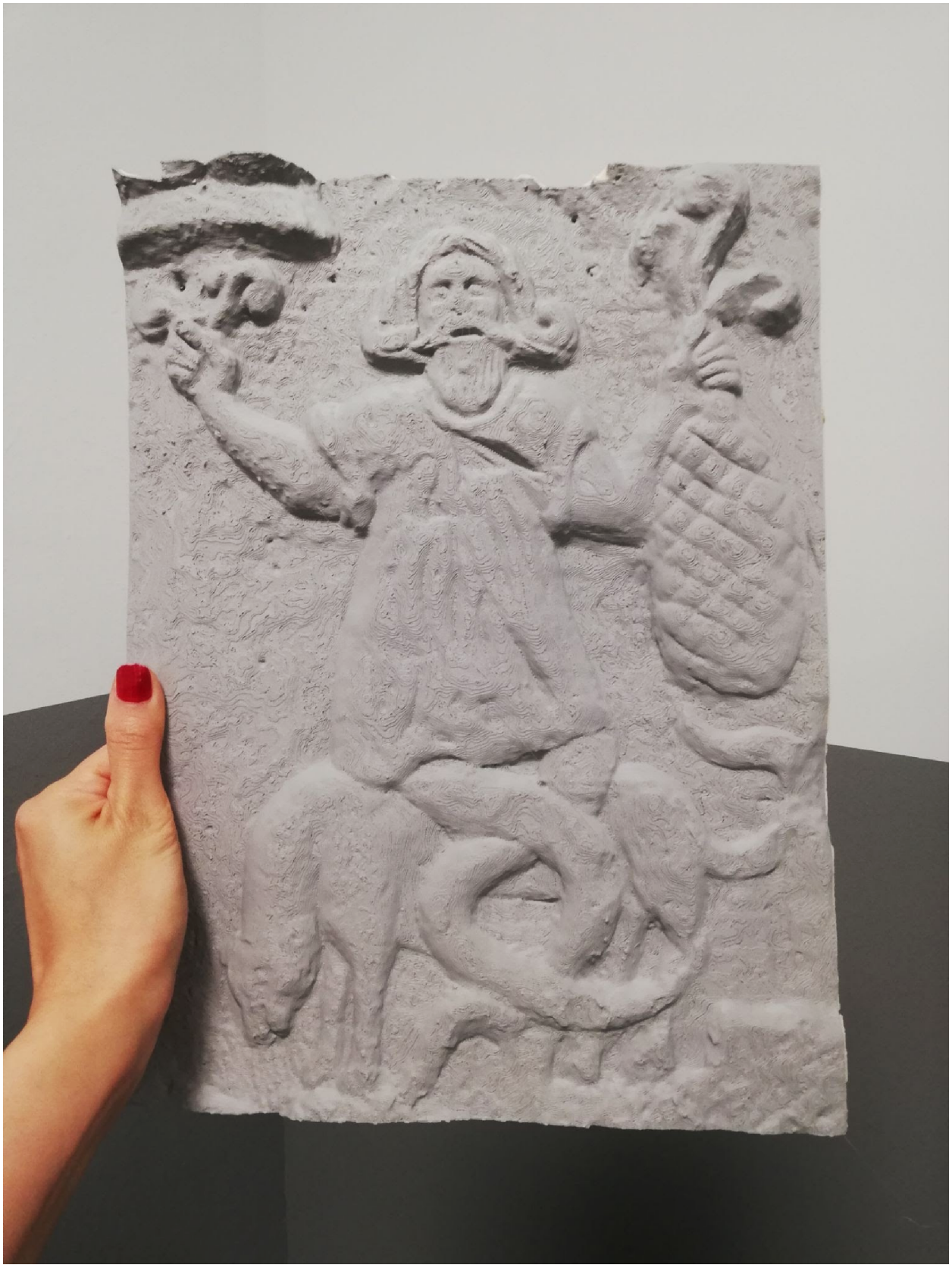

Figura 88. Il modello intero in scala 1:10, stampato con la F370 di Stratasys

Figura 89. Il modello intero in scala 1:10, stampato con la F370 di Stratasys

Post Processing

Una volta il modello si raffredda è possibile procedere con la rimozione del materiale di supporto. QSR è un materiale solubile però per velocizzare la procedura, i primi strati del supporto che non erano in contatto con la superficie del modello dell'Inganno, sono stati rimossi manualmente. Dopo aver rimosso la parte esterna di materiale di supporto, per eliminare i residui in contatto diretto con la superficie, il modello è stato messo in immersione per 8 ore in una soluzione composta da 700 gr di idrossido di sodio e 40 L d'acqua a 70°.

Figura 90. La rimozione del materiale di supporto

Figura 91. La rimozione manuale dei primi strati del materiale di supporto

Figura 92. La rimozione manuale del materiale di supporto

Figura 93. L'immersione del modello in una soluzione composta da 700 gr di idrossido di sodio e 40 L d'acqua a 70°

Figura 94. Il modello privo del materiale di supporto, retro

Figura 95. Il modello privo del materiale di supporto, fronte

Finitura

Una finitura composta da cementite, sabbia e colori a tempera è stata applicata alla superficie del modello per richiamare l'aspetto del bassorilievo originale composto da arenaria.

Figura 96. Diverse prove con cementite, colla Vinavil, sabbia e colori a tempera

Figura 97. La finitura è stata applicata solo alla metà del modello per mettere in esposizione anche il materiale ASA

Figura 98. La finitura è composta da cementite, sabbia e colori a tempera e richiama l'arenaria

Figura 99. Il materiale ASA (sinistra) e il composto di cementite, sabbia e colori a tempera (destra)

Polyjet

Per sperimentare la riproduzione del modello con altri materiali con caratteristiche diverse, il dettaglio della mano sinistra dell'Inganno è stato riprodotto utilizzando la stampante 3d Object 30 di Stratasys che utilizza la tecnologia Polyjet. Il file .stl è stato importato su Object Studio, il software sviluppato da Stratasys per la stampante Object 30. L'altezza di strati disponibili sulla Object 30 sono 28 µ e 16 µ, due misure che garantiscono una qualità estetica ottima. Per ottenere un modello con gli strati più sottili possibile, l'altezza di strati di 16 µ è stato scelto. Il secondo parametro da definire su Object Studio è la finitura del modello. La scelta è stata una finitura "glossy" ovvero lucida. Dopo aver scelto il materiale e il materiale di supporto il progetto è stato salvato come un file .objtf, il formato compatibile con Object 30 e poi inviata alla stampante.

Materiale

Due materiali con le proprietà e caratteristiche molto diverse sono stati scelti per sperimentare sul dettaglio della mano sinistra, un pezzo delle dimensioni 70x100mm. Il primo è Vero Clear, un fotopolimero trasparente che simula il Polimetilmetacrilato (PMMA) noto anche come acrilico e plexiglass. Vero Clear è adatto a riprodurre il vetro e i pezzi trasparenti. Il secondo materiale è TangoBlack, una tipologia di resina simile alla gomma e dunque il modello risulta morbido e flessibile. Come materiale di supporto, SUP705 è stato scelto. SUP705 è un fotopolimero simil-gel atossico che dipendendo dalla complessità e fragilità del modello, può essere rimosso manualmente o tramite l'utilizzo di un getto d'acqua ad alta pressione.

Post Processing

Dopo aver lasciato il modello a raffreddare, il materiale di supporto è stato rimosso. SUP705 essendo un materiale gelatinoso e morbido è stato rimosso manualmente in poco tempo. È importante l'utilizzo dei guanti adeguati durante la fase di rimozione del materiale di supporto.

Dato la forma complessa del modello dell'inganno, non è stato possibile rimuovere tutto il materiale di supporto manualmente. I residui sono stati eliminati mediante l'utilizzo di un getto d'acqua ad alta pressione nella stazione di pulizia o WaterJet cleaning unit.

Figura 100. Il dettaglio della mano sinistra, prodotto attraverso la tecnologia Polyjet con il materiale Vero Clear

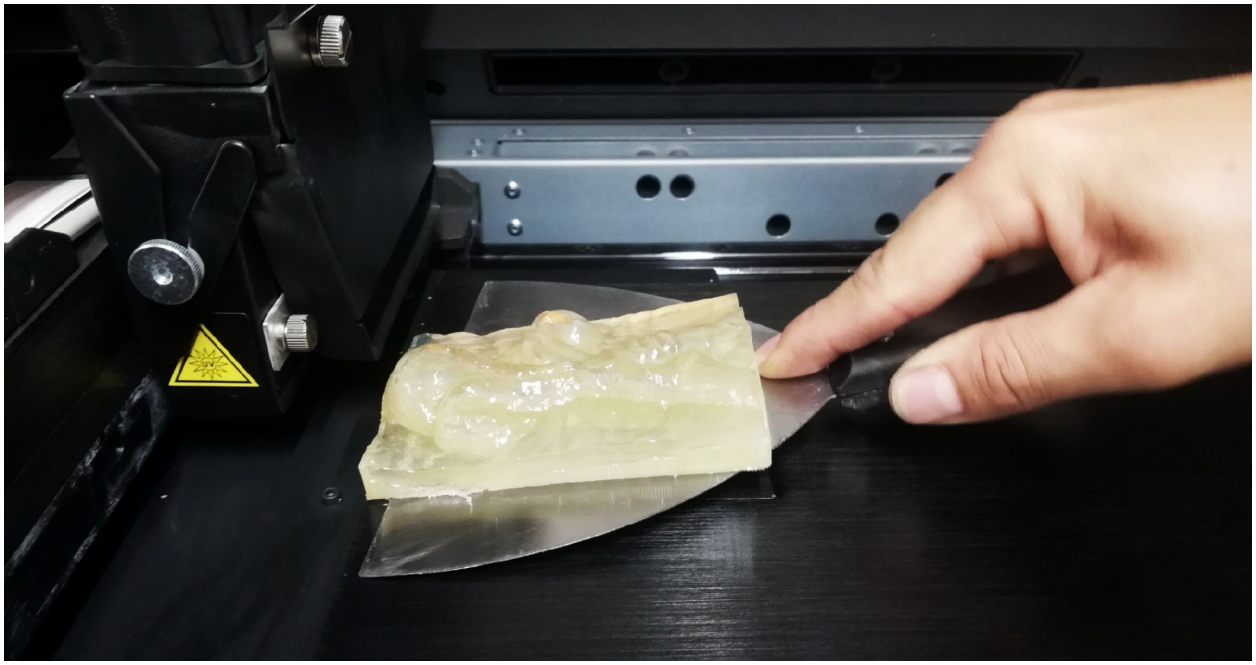

Figura 101. Rimozione del modello raffreddato dalla stampante

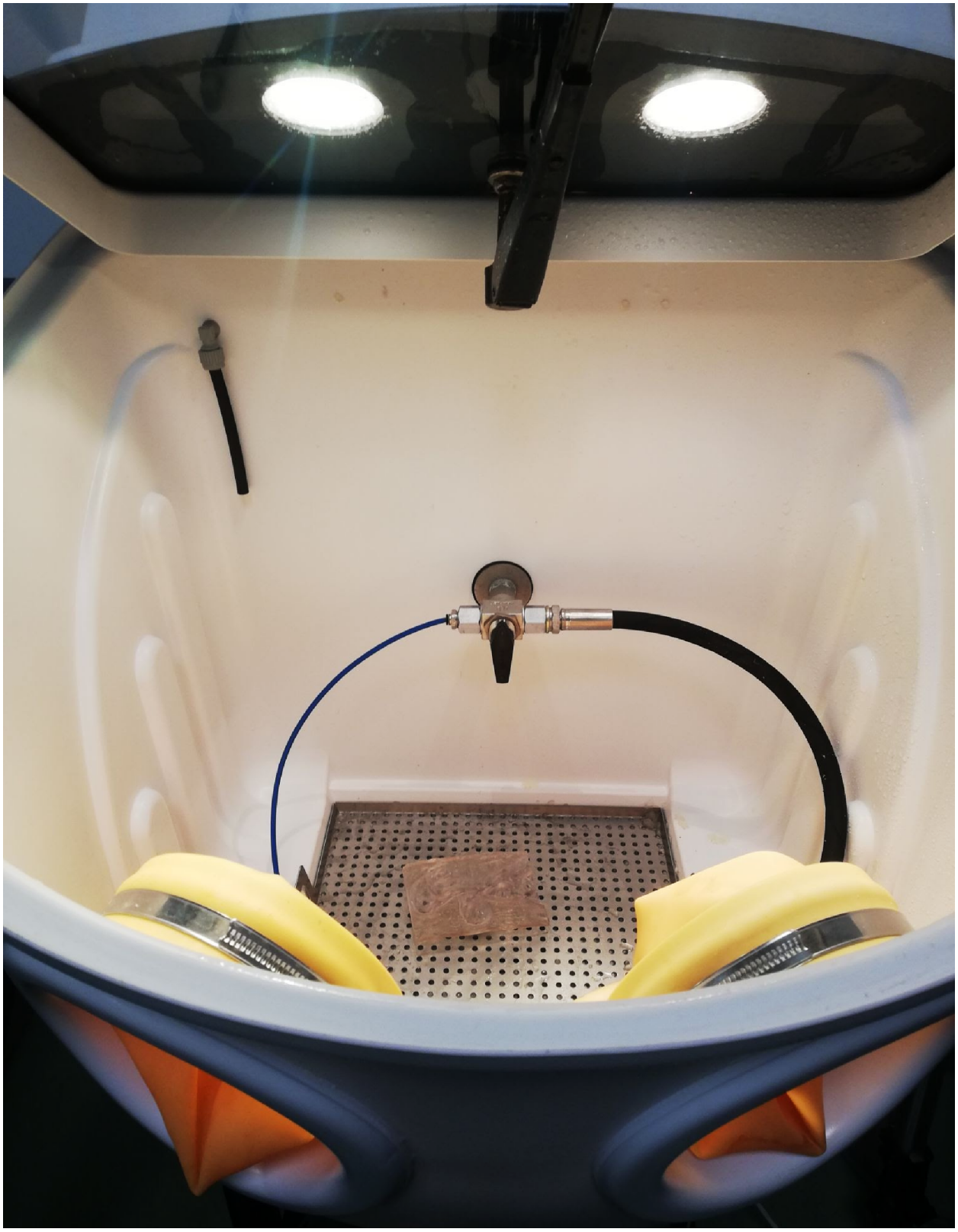

Figura 102. Rimozione dei residui del materiale di supporto tramite un getto d'acqua ad alta pressione nella stazione di pulizia o waterjet cleaning unit

Figura 103. Il risultato finale del modello prodotto attraverso la tecnologia Polyjet con il materiale trasparente Vero Clear

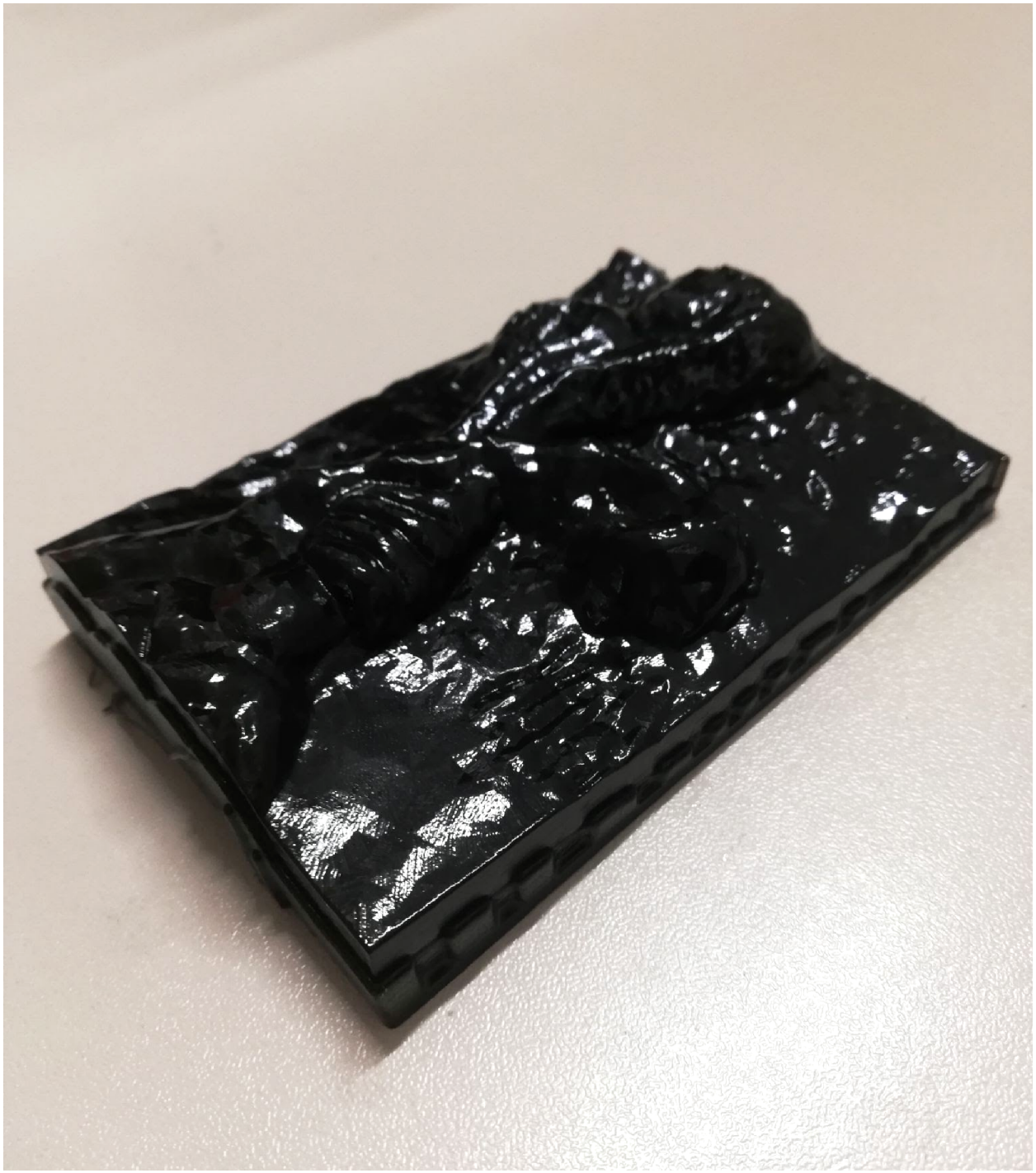

Figura 104. Dettaglio della mano sinistra della figura dell'Inganno prodotto attraverso la tecnologia Polyjet con il materiale resina simile alla gomma, Tango Black

Figura 105. Il risultato è un modello morbido e flessibile

ESPOSIZIONE DEI BASSORILIEVI E DELLE GROTTE DI PALAZZO CAMPANA

Lo scopo di questa ricerca è quello di impedire che le Grotte di Palazzo Campana vengano dimenticate e dunque di trovare delle soluzioni, fisiche o virtuali, per poter permettere al pubblico di conoscerli e in qualche modo interagire con loro.

Esposizione del Modello Fisico

Riproduzione in Scala 1:1

La fabbricazione della figura dell'Inganno attraverso la stampa 3d in scala 1:10, insieme al suo rivestimento simile ad arenaria hanno confermato la fattibilità della riproduzione dei bassorilievi delle grotte Campana. I dati grezzi acquisiti attraverso la scansione 3d sono talmente dettagliati che possono essere sufficienti per la riproduzione delle figure in scala 1:1. Le figure prodotte in scala possono essere esposte in uno spazio museale o espositivo ed essere messe a disposizione del pubblico per essere fruite. Le repliche possono anche essere esposte nei diversi punti della città, per esempio in vicinanza del Palazzo Campana o nelle piazze principali di Osimo. Ci sono diversi esempi dell'esposizione delle repliche degli artefatti o monumenti storici che sono stati creati attraverso le tecnologie della produzione additiva. Uno di questi esempi è la riproduzione della replica dell'Arco di trionfo di Palmira. L'Arco di trionfo di Palmira, era una struttura di stile romano del II e III secolo situata a Palmira, Siria, distrutta quasi completamente dallo Stato Islamico nel 2015. Secondo il progetto di The Institute for Digital Archaeology (IDA) frutto di collaborazione tra Università di Oxford, Università di Harvard e The Museum of the Future di Dubai, una replica dell'arco centrale è stata riprodotta attraverso la tecnologia di stampa 3d. La replica è circa due terzi delle dimensioni dell'arco originale, è alta circa 6 metri, pesa 11 tonnellate ed è stata fabbricata in Italia. La replica dell'arco è stata svelata per la prima volta a Londra in Trafalgar Square, in Aprile 2016 dopodiché è stata messa in esibizione a New York, Dubai, Firenze e Arona.

Figura 106. Arco di trionfo a Palmira in Siria prima della sua distruzione nel 2015

Figura 107. L'inaugurazione della replica dell'arco di trionfo di Palmira a Londra, Trafalgar Square, 19 Aprile 2016, Foto di Tolga Akmen, Anadolu Agency, Getty Images

Figura 108. La replica dell'arco di trionfo di Palmira in Piazza della Signoria a Firenze in occasione del G7 della Cultura, Aprile 2017

Figura 109. La replica dell'arco di trionfo di Palmira a Dubai, World Government Summit, 2017

Un’altra soluzione è la costruzione di una replica dell’intera grotta insieme ai bassorilievi. Un esempio di costruzione della replica di una grotta intera è quello della grotta Chauvet. La grotta Chauvet nell’Ardèche, regione Rhône-Alpes, in Francia è una grotta del Paleolitico superiore ed è uno dei siti preistorici più importanti di Europa, inserito nell’elenco dei siti del patrimonio mondiale UNESCO nel 2014. La grotta Chauvet è stata scoperta nel 1994 ma subito chiusa ai visitatori per proteggere la grotta e soprattutto per preservare i dipinti al suo interno. I dipinti sono degli esempi più antichi di arte preistorica e raffigurano per la maggior parte gli animali tra cui mammut, rinoceronti lanosi, leoni e stambecchi.

Figura 110. La valle dell'Ardèche e Pont d'Arc, Rhône-Alpes, Francia

Figura 111. Il paesaggio ricostruito con il portico preistorico della grotta Chauvet

Figura 112. Gli elementi geologici all'interno della grotta Chauvet

Figura 113. I dipinti all'interno della grotta Chauvet tra i più antichi esempi di arte preistorica

Figura 114. La figura di una rinoceronte femmina

Sia per preservare che per promuovere il patrimonio della grotta Chauvet, è stato nato un progetto per costruire una replica della grotta con tutti gli elementi geologici e artistici al suo interno. La replica della grotta è posizionata a sud dell'Ardèche da 3km dalla grotta originale ed è nascosta dentro una struttura di cemento. Le impalcature di metallo costituiscono lo scheletro della struttura, le pareti della rotta sono costruiti con cemento e gli elementi geologici come stalattiti e stalagmiti sono di resina. Anche i dipinti preistorici sono stati disegnati da un gruppo di artisti, nella posizione corrispondente a quella originale. Il progetto è costato 55 milioni di euro ed è durato per 8 anni da progettazione all'esecuzione. La costruzione della replica è cominciata nel 2012 e la grotta è stata aperta al pubblico nel 2015. Da allora, due milioni di persone da tutto il mondo hanno visitato la replica della grotta di Chauvet.

Figura 115. La replica della grotta Chauvet a sud dell'Ardèche da 3km dalla grotta originale

Figura 116. L'interno della replica della grotta Chauvet durante i lavori di costruzione. Photo di Stéphane Compoint

Nonostante questa soluzione dia l'unica possibilità di interagire con le Grotte di Campana al pubblico e sperimentare i suoi spazi, trovare i finanziamenti giusti per coprire i costi e la localizzazione giusta per la costruzione della replica sono tra le sue criticità.

Riproduzione della Maquette

È sempre possibile realizzare la maquette, sia dei bassorilievi che le grotte di Palazzo Campana nel suo insieme, in una scala ridotta ed esporla all'interno del palazzo, ad un museo o in una localizzazione centrale della città.

Esposizione Virtuale

Il concetto dei musei virtuali viene interpretato nel modo diverso da ogni museo ma generalmente i tour virtuali consistono in simulazioni dello spazio fisico dei musei, utilizzando una combinazione di video e immagini, accessibile sul web.

Oggi, soprattutto dopo la pandemia di Covid-19, quasi tutti i musei hanno una presenza online, dalle soluzioni più semplici, come collezioni online con le foto di alta risoluzione e video tour, alle soluzioni più elaborate come esperienze immersive attraverso l'utilizzo di Realtà Virtuale e Realtà Aumentata.

Google Arts & Culture, l'iniziativa di Google lanciata nel 2011, è una piattaforma online che dà accesso agli archivi e alle collezioni di foto e video di alta qualità di artefatti e opere d'arte, presenti in più di 2000 musei in tutto il mondo, al pubblico e fornisce dei tour virtuali a 360 gradi utilizzando la tecnologia di Street View di Google. Grazie a Google Arts & Culture, il numero dei musei che offrono le soluzioni virtuali sono aumentati.

Esistono varie soluzioni virtuali che possono dare visibilità alle grotte di Palazzo Campana e i suoi bassorilievi: collezioni online di immagini, video tour, tour a 360 gradi e esperienze immersive attraverso l'utilizzo di Realtà Virtuale e Realtà Aumentata.

Una Collezione Online

Creare una collezione online delle immagini di alta qualità dei bassorilievi delle Grotte Campana, è una soluzione semplice ed efficace. Le immagini possono essere accompagnate dalle informazioni utili riguardo le principali caratteristiche di ogni bassorilievo come dimensione, collocazione all'interno della grotta, simbologia, iconologia, storia, dettagli riguardo le parti danneggiati e possibili minacce.

La collezione dei dipinti della Galleria degli Uffizi su Google Arts & Culture insieme a migliaia di altre collezioni disponibili sulla piattaforma, forniscono degli ottimi esempi di collezioni di arte online.

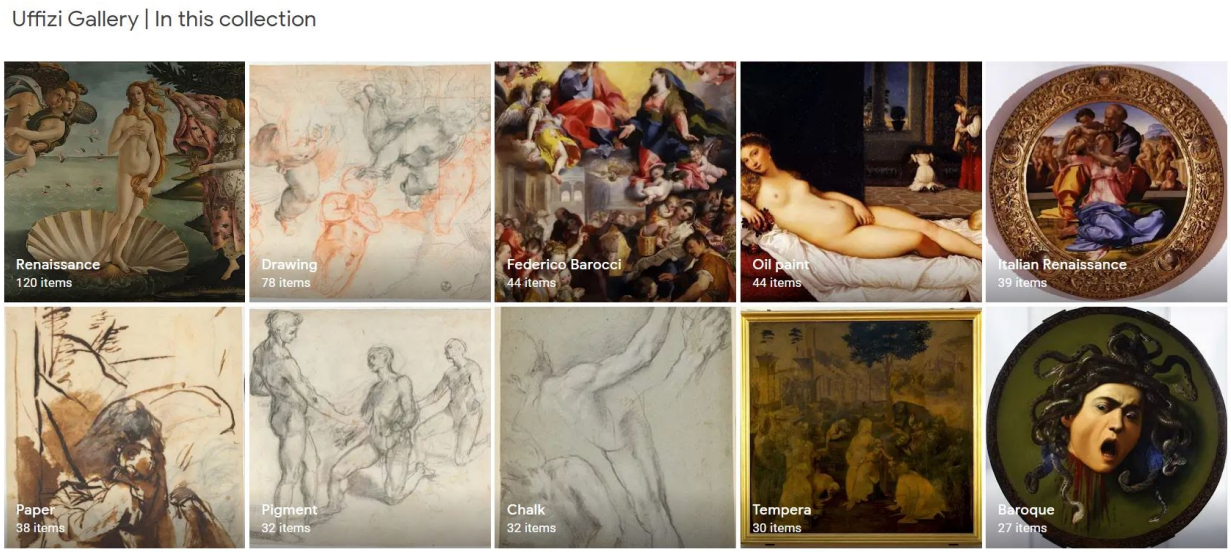

Figura 117. La collezioni online del Museo degli Uffizi di Firenze su Google Arts & Culture

Video Tour

Uno dei metodi più semplici che permettere di sperimentare l'ambiente interno delle grotte ed osservare i bassorilievi nel modo virtuale sono i Video Tour che consistono di semplici video accompagnati dalle informazioni utili.

Uno degli esempi interessanti dei Video Tours, sono Passeggiate del Direttore, una mini-serie di 30 puntate su YouTube di durata di 5-13 minuti, creata dal Museo Egizio di Torino. Questa iniziativa è stata ideata durante il lockdown, quando i musei erano chiusi a causa della pandemia di Covid-19 ed è stata un mezzo per mantenere il contatto con il pubblico durante questo periodo. Nel Passeggiate del Direttore, Christian Greco, il direttore del museo, mostra le diverse sale e artefatti del Museo Egizio di Torino e racconta le loro storie.

Tour a 360 Gradi

Un tour virtuale a 360 gradi delle Grotte Campana, permette la visita alle grotte attraverso un cellulare, un PC o un tablet, da qualsiasi parte del mondo. Utilizzando la tecnologia di Google Street View, i visitatori possono navigare all'interno delle grotte, visionare i bassorilievi e osservare i loro dettagli zoomando su ogni figura.

Oggi, la maggior parte dei musei più importanti del mondo, offrono un tour a 360 gradi: I Musei Vaticani, il Museo del Louvre, Il Metropolitan Museum of Art, ecc. Un esempio dei tour virtuali a 360 gradi delle gallerie sotterranee, è quello delle Catacombe di San Paolo. Le Catacombe di San Paolo sono un complesso sotterraneo di cimiteri romani che si trovano nella zona Ħal Bajjada di Rabat in Malta, in vicinanza della città di Mdina e rappresentano la prima e più grande testimonianza archeologica del cristianesimo a Malta.

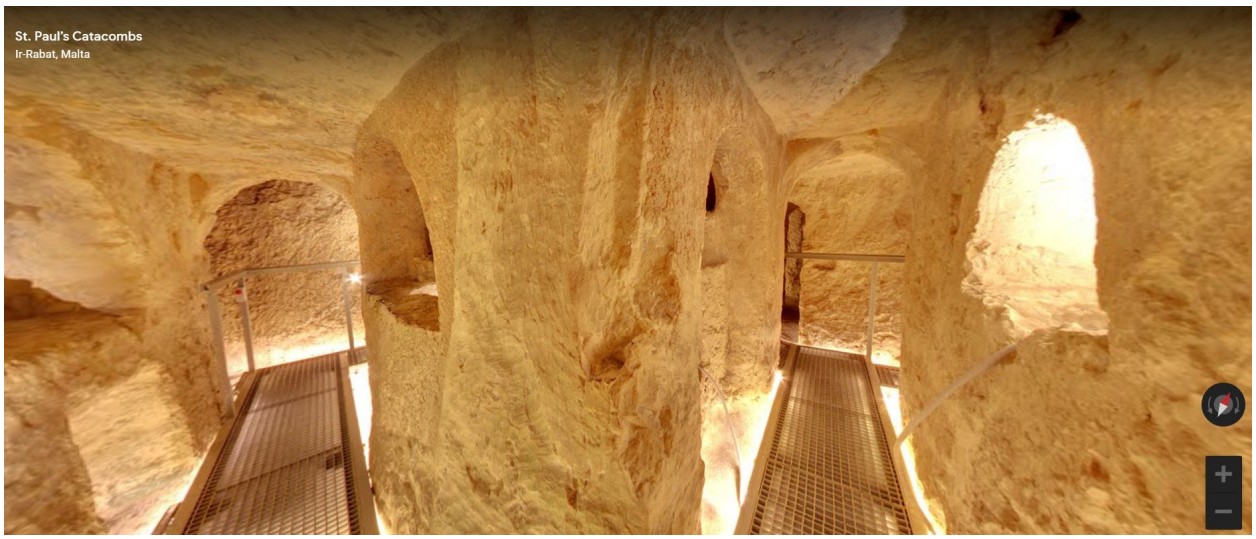

Figura 118. Tour a 360 gradi delle Catacombe di San Paolo a Rabat in Malta con l'utilizzo di Google Street View

Realtà Virtuale e Realtà Aumentata

Realtà virtuale e realtà aumentata sono due delle tecnologie in maggiore sviluppo negli ultimi anni e nonostante a tanti possano sembrare la stessa cosa, sono due concetti molto differenti. Realtà virtuale, virtual reality o VR è una esperienza immersiva dove il mondo reale è sostituito da un mondo virtuale. Il mondo simulato, che può essere sia immaginaria che un posto esistente nel mondo reale, è visibile attraverso i visori opachi che bloccano totalmente l'ambiente reale che circonda l'utente. Mentre la realtà virtuale è completamente immersiva e dà l'impressione di essere totalmente in un altro posto all'utente, realtà aumentata non è totalmente immersiva e soltanto sovrappone elementi virtuali al mondo reale. Realtà aumentata, augmented reality o AR consente all'utente di sperimentare il mondo reale, che è stato digitalmente "aumentato" attraverso i dispositivi personali come smartphone, PC e tablet o gli occhiali appositi che al contrario dei visori di VR, sono trasparenti.

Figura 119. Esempio di un visore realtà virtuale

Figura 120. Realtà aumentata sovrappone elementi virtuali al mondo reale. Pokémon GO è uno degli esempi più conosciuti dell'utilizzo della realtà aumentata.

Negli ultimi anni, l'applicazione di realtà virtuale e aumentata all'ambito museale, archeologico, architettonico e ai beni culturali è aumentato.

L'utilizzo di realtà virtuale e realtà aumentata può essere una soluzione elaborata per le Grotte di Palazzo Campana. Attraverso VR, l'utente può accedere alle grotte in un'esperienza immersiva e esaminare i bassorilievi, semplicemente utilizzando un visore VR. L'esperienza di realtà virtuale sviluppata da Emissive per la missione Scan Pyramids, è tra uno degli esempi di VR che dà accesso ad un posto altrimenti non visitabile.

ScanPyramids è un progetto ideato dall'Università del Cairo e dall'Istituto francese Heritage Innovation Preservation, con lo scopo di scansionare le piramidi dell'Antico Regno per scoprire le strutture interne ancora sconosciute. L'esperienza virtuale, sviluppata da Emissive, permette all'utente di visitare Piramide di Khufu, conosciuta anche come Grande Piramide di Giza, in scala 1:1. L'utente può vedere la piramide da diverse angolazioni e diverse altezze ed accedere a tutte le stanze, anche quelle non visitabili.

Figura 121. Il tour virtuale della Grande Piramide di Khufu è disponibile presso il museo Cité de l'Architecture et du Patrimoine di Parigi dal 2019

Figura 122. Attraverso un visore realtà virtuale, il visitatore può scoprire la Grande Piramide di Khufu, la sua storia e la sua architettura in scala reale

Figura 123. Il tour virtuale permette all'utente di visitare la Grande Piramide di Khufu sia da fuori che da dentro e di accedere alle sale che normalmente sono chiuse al pubblico

Utilizzare realtà aumentata per dare accesso alle Grotte Campana, può essere un metodo relativamente meno costoso rispetto a realtà virtuale. I visitatori non hanno bisogno dei visori e tutto quello che gli serve è uno smartphone. È possibile ricreare il percorso del labirinto sotterraneo in un altro spazio dove l'utente può accedere. Camminando lungo il percorso, l'utente potrà visualizzare i modelli tridimensionale dei bassorilievi sul proprio dispositivo attraverso realtà aumentata.

L'Ara Com'Era, un intervento di valorizzazione in realtà aumentata di L'Ara Pacis Augustae o Altare della pace di Augusto, è un esempio dell'applicazione di AR ai beni culturali nell'ambito museale. Grazie a questa iniziativa del Museo dell'Ara Pacis di Roma, i visitatori possono visionare Altare della pace di Augusto, uno dei più importanti capolavori dell'arte romana, nella sua colorazione originale.

Figura 124. L'Ara Pacis Augustae o l'Altare della pace di Augusto al museo Museo dell'Ara Pacis di Roma

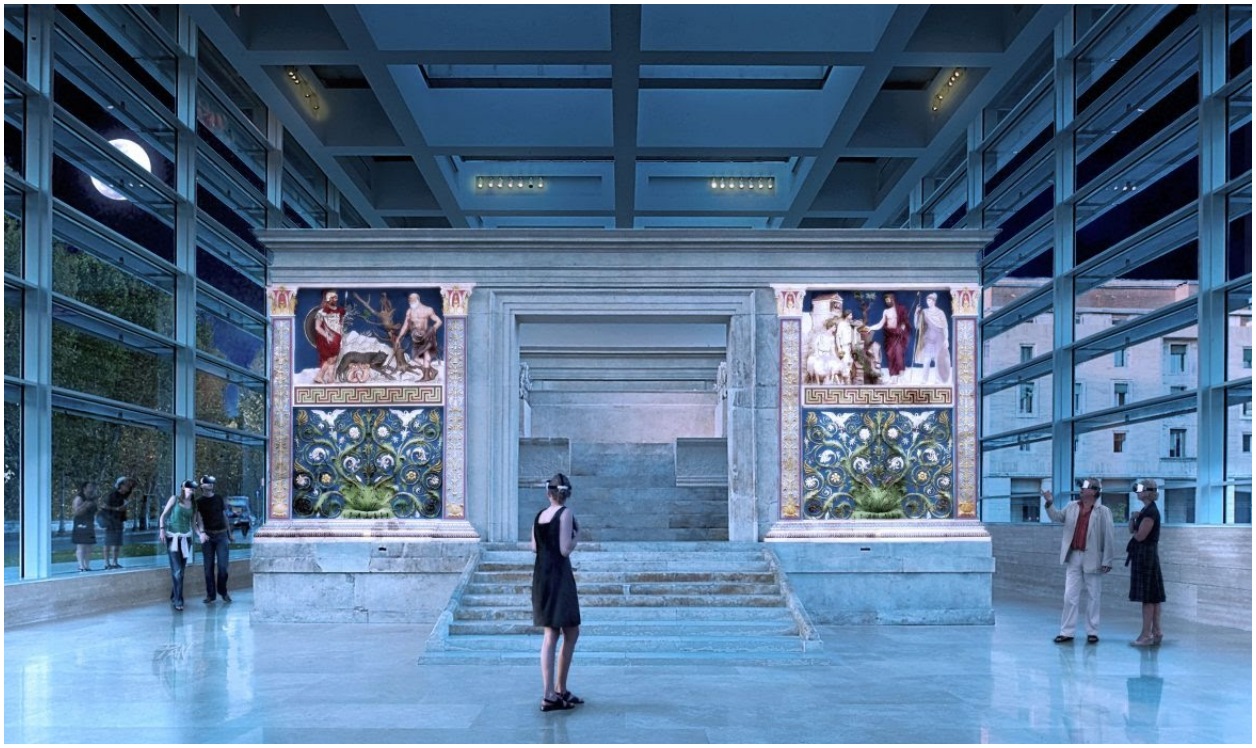

Figura 125. L'Ara Com'Era è un intervento di valorizzazione in realtà aumentata di L'Ara Pacis Augustae al museo Museo dell'Ara Pacis di Roma

Figura 126. Attraverso realtà aumentata i visitatori possono vedere Altare della pace di Augusto nella sua colorazione originale

CONCLUSIONE E FUTURE PROSPETTIVE DI RICERCA

Lo scopo delle repliche degli artefatti e dei monumenti storici non è quello di sostituire l'opera originale ma di complementarla ed arricchirla. Sia nell'ambito museale ed espositivo che nell'ambito educativo, attraverso l'utilizzo delle repliche, un'esperienza che può essere solamente visiva ed a volte passiva, si trasforma in un'esperienza dove l'utente coinvolge i propri emozioni e sensi. Mentre l'opera originale mantiene il proprio valore intrinseco, le repliche apportano un valore aggiunto e nello stesso tempo assumono un loro proprio valore del tutto autonomo[30].

La replica della figura dell'Inganno, creata attraverso manifattura additiva, mostra la fattibilità della produzione dei bassorilievi delle Grotte Campana, sia in scala 1:1 che in una scala ridotta. Inoltre, la finitura applicata sulla superficie del modello, composta da cementite, sabbia e colori a tempera, che simula l'arenaria, il materiale originale componente dei bassorilievi, garantisce la verosimiglianza del modello alla scultura originale.

Entrambe le tecnologie di stampa 3d a filo e polyjet producono modelli dettagliati e precisi. Tuttavia, dato lo scopo espositivo delle repliche, la tecnologia di polyjet risulta più efficace per quanto produce modelli con la qualità estetica superiore.

Le repliche dei bassorilievi delle Grotte Campana possono essere esposte in uno spazio museale o espositivo in modo tale che i visitatori possano interagire con loro e conoscere la loro storia. Le repliche hanno il vantaggio di essere toccabili e in questo modo possono offrire alle persone ipovedenti un nuovo modo di interagire con i beni culturali.

Inoltre, grazie alle soluzioni virtuali come archivi di immagini, video ed audio online, tour a 360 gradi, realtà virtuale e realtà aumentata, è possibile promuovere le grotte di Palazzo Campana al meglio ed introdurre la loro storia ad un pubblico più ampio.

[30] Lo Turco, M., Giovannini, E. and Tomalini, A., 2021. The Cultural Value Of The Copy In The Museum Domain

Con il modello digitale del bassorilievo in disposizione, è possibile considerare anche un progetto di restauro digitale. I pezzi mancanti del bassorilievo possono essere ricostruiti attraverso la modellazione tridimensionale. Il modello digitale può essere accessibile al pubblico attraverso realtà virtuale e realtà aumentata o essere semplicemente inserito nelle piattaforme online che ospitano i modelli tridimensionali digitali, come 3D Heritage Online Presenter. L'utente potrà visionare il bassorilievo nelle sue condizioni originali, con la possibilità di sovrapporre il pezzo ricostruito e infine osservare il modello completo restauro. Il modello restaurato può anche essere riprodotto tramite la manifattura additiva ed essere messo in disposizione del pubblico come un mezzo per valorizzare il patrimonio ipogeo di Osimo.

BIBLIOGRAFIA

Aliprantis, J. and Caridakis, G., 2019. *A Survey of Augmented Reality Applications in Cultural Heritage*.

Aniwaa Team, 2021. *3D scanning technologies - what is 3D scanning and how does it work*. [online] Aniwaa. Available at: <https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>.

Avinson, 2017. *3D Scanning Technology Comparison | 3 Space*. [online] 3 Space. Available at: <https://3space.com/blog/3d-scanning-technology-comparison/>.

Bazzurri, C., 2016. *Grotte di Osimo: Visita alla misteriosa città sotterranea delle Marche*. [online] Luoghi da vedere. Available at: <https://luoghidavedere.it/luoghi-da-vedere-in-italia/marche/grotte-osimo-visita-citta-sotterranea_13216>.

Blog.trimech.com. 2019. *Using 3D Technology for Heritage Preservation*. [online] Available at: <https://blog.trimech.com/using-3d-technology-for-heritage-preservation>.

Brunori, S., 2014. *Rocca di Osimo*. [online] Italiadiscovery.it. Available at: <http://www.italiadiscovery.it/storia/rocca-di-osimo.html>.

Bulbul, A., Haj Ismail, S. and Cetin, R., 2017. *Reconstruction of Aleppo Umayyad mosque minaret: A different approach*.

Cancellieri, M. and Minelli, M., 2013. *Misteri, Crimini E Storie Insolite Delle Marche*. [Place of publication not identified]: Newton Compton Editori.

Coates, C., 2021. *Virtual Reality is a big trend in museums, but what are the best examples of museums using VR?*. [online] MuseumNext. Available at: <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-virtual-reality/>.

Copparo, F. and Filippetti, F., 1997. *I Tarocchi di Pietra del Palazzo Campana di Osimo*. Osimo.

Culturaitalia. 2011. *Storia e leggende nei sotterranei di Osimo*. [online] Available at: <http://www.culturaitalia.it/opencms/it/contenuti/percorsi/percorso320/capitolo_0002.html?language=it&tematica=Tipologia&selected=1>.

Curry, A., 2015. *Here Are the Ancient Sites ISIS Has Damaged and Destroyed*. [online] History. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/history/article/150901-isis-destruction-looting-ancient-sites-iraq-syria-archaeology>.

Duepassinelmistero.com. 2008. *Osimo sotterranea*. [online] Available at: <http://www.duepassinelmistero.com/osimo_sotterranea.htm>.

Emissive.fr. n.d. *Scan Pyramids | Emissive*. [online] Available at: <https://www.emissive.fr/en/project/scan-pyramids/>.

ETT S.p.A., 2016. *L'ARA COM'ERA - Un racconto in realtà aumentata del Museo dell'Ara Pacis*. [video] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Akd5-r1gZKc>.

ETT SpA - Digital strategy & design. 2021. *Ara Pacis - L'Ara com'era - ETT SpA - Digital Strategy & Design*. [online] Available at: <https://ettsolutions.com/newmedia/progetti/ara-pacis-lara-comera/>.

Fatta, F. and Fischnaller, F., 2018. *Enhancing cultural heritage exhibits in Museum Education: 3D Printing Technology : Video mapping and 3D printed models merged into immersive audiovisual scenography (FSJ-V3D Printing+MM Installation)*.

Filippetti, F. and Ravaglia, E., 2002. *Guida insolita ai misteri, ai segreti, alle leggende e alle curiosità delle Marche*. Roma: Newton Compton Editori.

Filippetti, F. and Ravaglia, E., 2017. *ALLA SCOPERTA DEI SEGRETI PERDUTI DELLE MARCHE*. Newton Compton Editori.

Gentili, G., 1955. *Auximum (Osimo)*. (Roma): Istituto di studi romani.

Gentili, G., 1990. *Osimo nell'antichità*. Casalecchio di Reno: Grafis Edizioni.

Gom.com. n.d. *ATOS Core Scanner ottico 3D*. [online] Available at: <https://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos/atos-core.html>.

Gom-inspect.com. n.d. *GOM Inspect*. [online] Available at: <https://www.gom-inspect.com/it/>.

Google Arts & Culture. n.d. *The Adventure of the Chauvet Cave Replica - Grotte Chauvet - UNESCO World Heritage Site - Google Arts & Culture*. [online] Available at: <https://artsandculture.google.com/exhibit/the-adventure-of-the-chauvet-cave-replica-grotte-chauvet/nAICUhZCtMk9JQ?hl=en>.

Google Arts & Culture, 2018. *Digitally preserving World Heritage with CyArk*. [video] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=ryaWVQM53gQ&t=2s>.

Granier, X., 2018. *3D as a Service for Cultural Heritage*.

Grillantini, C., 2006. *Storia di Osimo - IV edizione*. Osimo.

Grossi, A., 2018. *Le Grotte di Camerano e Osimo, fra storia e mistero - #destinazionemarche blog*. [online] #destinazionemarche blog. Available at: <https://www.destinazionemarche.it/grotte-camerano-e-osimo-storia-e-mistero/>.

Guardian Culture, 2016. *Palmyra's Arch of Triumph replica erected in central London*. [video] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=bq4_-iBCqp8&t=324s>.

Gulfnews.com. 2017. *Dubai's 3D-printed Palmyra arch replica wins award*. [online] Available at: <https://gulfnews.com/going-out/society/dubais-3d-printed-palmyra-arch-replica-wins-award-1.2110014>.

Iluoghidelsilenzio.it. n.d. *Duomo di San Leopardo - Osimo (AN)*. [online] Available at: <https://www.iluoghidelsilenzio.it/duomo-di-san-leopardo-osimo-an/>.

Istituto Campana. n.d. *Istituto Campana Home - Istituto Campana*. [online] Available at: <http://www.istitutocampana.it/>.

Izzo, M. and Mustilli, M., 2015. *Realtà aumentata e valorizzazione dei beni culturali. Riflessioni sull'offerta culturale casertana.*.

Jaehnig, J., 2020. *ToF vs. LiDAR: What's the Difference?*. [online] MUO. Available at: <https://www.makeuseof.com/tof-and-lidar-difference/>.

Jung, T. and Tom Dieck, C., 2017. *Augmented Reality, Virtual Reality and 3D Printing for the Co-Creation of Value for the Visitor Experience at Cultural Heritage Places*.

Knicker, M., 2014. *3D Scanning Basics: How Structured Light Scanning Works*. [online] Info.qpluslabs.com. Available at: <https://info.qpluslabs.com/blog/3d-scanning-basics-how-structured-light-scanning-works>.

Krassenstein, B., 2015. *What is 3D Printing & How Do 3D Printers Work? - A Guide - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. [online] 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. Available at: <https://3dprint.com/82272/what-3d-printing-works/>.

Lavagnoli, G., 2016. *Il Campana. Trecento anni di storia*. Ancona: affinità elettive.

Lo Turco, M., Giovannini, E. and Tomalini, A., 2021. *The Cultural Value Of The Copy In The Museum Domain*.

Luoghimisteriosi.it. n.d. *OSIMO (AN) - LE GROTTE - UN'INCREDIBILE CITTA' SOTTERRANEA*. [online] Available at: <https://www.luoghimisteriosi.it/marche_osimosotterranea.html>.

Mann, L. and Fryazinov, O., 2019. *3D printing for mixed reality hands-on museum exhibit interaction*.

Marche, M., n.d. *Provincia di Ancona: informazioni turistiche e culturali*. [online] Provinciaancona.com. Available at: <http://www.provinciaancona.com/Comuni/Osimo.asp>.

Meloni, P., 2013. *Scanner laser VS scanner a luce strutturata - ShareMind*. [online] Available at: <https://www.sharemind.eu/wordpress/scanner-laser-vs-scanner-a-luce-strutturata/>.

Micali, G., 1832. *Storia degli antichi popoli italiani*. Firenze: Dante.

Mosca, R. and Renna, A., 2006. *Le Grotte, i Cavalieri, le Logge, un intrigante mistero italiano*. Osimo: Osimo Edizioni.

Osimo turismo. n.d. *Il portale ufficiale del turismo del Comune di Osimo | osimoturismo*. [online] Available at: <https://www.osimoturismo.it/>.

Overby, S., 2019. *Augmented reality (AR) vs. virtual reality (VR): What's the difference*. [online] Enterprisersproject.com. Available at: <https://enterprisersproject.com/article/2019/10/ar-vs-vr-whats-difference> [Accessed 10 September 2021].

Pastorius, W., 2015. [online] Lmi3d.com. Available at: <https://lmi3d.com/blog/structured-light-vs-laser-triangulation-3d-scanning-and-inspection/>.

Quilici, L. and Quilici Gigli, S., 1997. *Architettura e pianificazione urbana nell'Italia antica*. Roma: L'Erma di Bretschneider.

Quilici, L. and Quilici Gigli, S., 2002. *Campagna e paesaggio nell'Italia antica*. Roma: L'Erma di Bretschneider.

Quintaregio-picenum.it.gg. n.d. *Regio V - Picenum - Auximum*. [online] Available at: <https://quintaregio-picenum.it.gg/Auximum.htm>.

Ripa, C., 1593. *Iconologia overo descrittione dell'imagini vniversali cavate dall'antichita et da altri lvoghi*. Roma: Gigliotti.

Romanoimpero.com. 2019. *AUXIMUM - OSIMO (Marche)*. [online] Available at: <https://www.romanoimpero.com/2019/01/auximum-osimo-marche.html>.

Saunders, S., 2017. *3D Printing to Preserve Heritage: Replica of Palmyra Arch Draws Millions of Visitors at Fourth Installation Stop in Arona, Italy - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. [online] 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. Available at: <https://3dprint.com/179081/palmyra-arch-in-italy/>.

Siliato, C., n.d. *Laser Scanner 3d - Tipologie e caratteristiche*. [online] Stampiamoin3d.com. Available at: <https://stampiamoin3d.com/laser-scanner-3d/>.

Sites.google.com. n.d. *Il territorio del Picenum - Regio V-Picenum*. [online] Available at: <https://sites.google.com/site/regiovpicenum/il-territorio-del-picenum#sdfootnote1sym>.

Stratasys. n.d. *Stratasys: 3D Printing & Additive Manufacturing*. [online] Available at: <https://www.stratasys.com/>.

Tabone, W., 2019. *Technology for Cultural Heritage*.

The CNN Wire Staff, 2011. *Will one of two destroyed Buddha statues be reconstructed?*. [online] Edition.cnn.com. Available at: <http://edition.cnn.com/2011/WORLD/asiapcf/03/01/buddha.statues/index.html?eref=edition_travel>.

The Conversation. 2019. *How 3D printing is transforming our relationship with cultural heritage*. [online] Available at: <https://theconversation.com/how-3d-printing-is-transforming-our-relationship-with-cultural-heritage-112642>.

Thornsberry, C., 2019. *Photogrammetry vs. 3D Scanning | 3 Space*. [online] 3 Space. Available at: <https://3space.com/blog/photogrammetry-vs-3d-scanning/>.

Thornsberry, C., 2019. *White Light vs. Blue Light 3D Scanning | 3 Space*. [online] 3 Space. Available at: <https://3space.com/blog/white-light-vs-blue-light-3d-scanning/>.

Thornsberry, C., 2020. *Mesh vs. CAD | 3 Space*. [online] 3 Space. Available at: <https://3space.com/blog/mesh-vs-cad/>.

Tong, T., 2011. [online] Lmi3d.com. Available at: <https://lmi3d.com/blog/3d-scanners-laser-versus-white-light/>.

Treccani.it. n.d. *Osimo in "Enciclopedia dell' Arte Antica"*. [online] Available at: <https://www.treccani.it/enciclopedia/osimo_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Antica%29/>.

Unesco, 2021. *List of factors affecting the properties*. [online] Whc.unesco.org. Available at: <https://whc.unesco.org/en/factors/>.

Vectorworks, 2016. *From Point Cloud to Documentation*. [video] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=7H2GX2TgS2k&t=181s>.

Voges, L., 2020. *90 Virtual Museum Tours to Enjoy From Home | Tiqets.com*. [online] tiqets.com. Available at: <https://www.tiqets.com/blog/virtual-museum-tours/>.

Wikimapia.org. 2010. *Palazzo Campana - Wikimapia*. [online] Available at: <http://wikimapia.org/19434121/it/Palazzo-Campana>.