



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

**Il Patrimonio Culturale e
il suo Eco-Sistema:
un nuovo approccio metodologico basato
su tecniche di Prototipazione Virtuale
per gestirne il ciclo di vita e
migliorare l'interazione con gli utenti**

Ph.D. Dissertation of:

Alma Leopardi

Supervisor:

Prof. Maura Mengoni

Ph.D. Course coordinator:

Prof. G. Di Nicola

XVIII edition - new series

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
Via Brezze Bianche — 60131 - Ancona, Italy

Ringraziamenti

Questa tesi è parte di un lavoro di ricerca cofinanziato da Systems Projects Services, l'Università Politecnica delle Marche e la Regione Marche nel contesto del Programma Eureka.

Il mio primo ringraziamento va a questa Istituzione e a questa importante Impresa per avermi dato l'opportunità di fare questa esperienza.

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine alla mia Tutor Accademica, la Prof.ssa Maura Mengoni, per la sua guida, incoraggiamento e stima che ha dimostrato nei miei confronti, negli anni di dottorato. Inoltre, la ringrazio per avermi dato la possibilità di partecipare a diversi progetti di ricerca e di aver potuto incontrare molte persone nuove e aziende, che insieme hanno contribuito nella realizzazione di questo traguardo, alla mia crescita professionale e personale.

Desidero ringraziare il mio tutor aziendale, Diego Signoretti, per aver contribuito alla mia crescita professionale e personale e anche tutto il team della SPS per avermi fatto subito sentire parte del gruppo e per avermi accompagnato e aiutato a formarmi umanamente e professionalmente.

Un ringraziamento è doveroso anche al Museo Archeologico Nazionale delle Marche e alla sua direttrice la Dot. ssa Nicoletta Frapicini, al Polo Museale delle Marche e al direttore Peter Aufreiter, allo staff del gruppo DiStoRi Heritage e a chi ha partecipato al progetto CIVITAS (ChaIn for excellence of reflectiVe Societies to exploit dIgitAl culTural heritAge and museumS) composto da 7 dipartimenti e da diversi ricercatori dell'Università Politecnica delle Marche.

Un ringraziamento particolare va anche a Silvia, Andrea, Alex, Keyum, Antony, Giacomo, la cui amicizia e tempo passato insieme, hanno permesso di trascorrere con allegria e serenità gli anni di dottorato.

Infine, vorrei ringraziare la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto in questi anni. Grazie a mio Padre, che mi ha sempre spinto ad usare la fantasia e vedere lontano, insegnandomi a non pormi mai dei limiti. Grazie a mia Madre, che mi ha sempre incoraggiato e sostenuto amorevolmente, in tutti i momenti sia belli che brutti. Grazie a mia Sorella, inseparabile compagna di avventure, che mi è sempre stata vicino e che mi ha supportato e aiutato sempre sia moralmente che fisicamente. Infine, un ringraziamento a mio Fratello, angelo custode, che dal cielo mi ha protetto e accompagnato in tutti questi anni, dandomi come diceva quando era piccolo la "pazienza" di affrontare tutte le difficoltà.

Abstract (ita)

I musei oggi hanno assunto un nuovo significato, non sono più solo luoghi dediti alla conservazione ed esposizione di collezioni e opere d'arte, ma rappresentano uno dei mezzi di comunicazione privilegiati per diffondere la cultura e renderla accessibile ad un pubblico più vasto possibile. Grazie all'emergere della filosofia della "nuova museologia", il rapporto tra i musei, i luoghi d'arte, la società e la comunità, è profondamente cambiato, riducendo via via la divisione presente tra cultura trattata in modo classico e nuovi canali di comunicazione introdotti con la diffusione delle tecnologie.

Numerosi sono gli interventi volti a creare strategie e strumenti per conservare e diffondere l'intero patrimonio, soprattutto laddove esso risulti fragile e deteriorabile, ma fino ad ora non è stato sviluppato un approccio metodologico strutturato, volto alla gestione efficiente del patrimonio culturale.

Infatti, i profondi cambiamenti dovuti alla trasformazione digitale ed alla rinnovata centralità dell'utente devono essere affrontati con un approccio razionalmente e compiutamente organizzato, che consideri il reperto storico in tutte le fasi del suo ciclo di vita, dal ritrovamento alla conservazione all'interno di un museo e dalla digitalizzazione alla fruizione, considerando il reperto come un prodotto fisico che passa attraverso l'elaborazione e la conservazione digitale.

Grazie al Prototipo Virtuale e all'Eco-Sistema del Bene Culturale, tutto questo è possibile. Gli studi condotti hanno permesso di porre al centro il reperto storico e il visitatore, permettendo a entrambi di usufruire di tutti gli strumenti a disposizione per valorizzarsi reciprocamente all'interno del nuovo ambiente: l'Eco-Sistema del Bene Culturale.

Questo lavoro di tesi, grazie agli studi svolti sulla digitalizzazione ed alle varie installazioni create e testate con gli utenti avvalendosi dell'intera metodologia sviluppata, ha permesso di ottenere risultati innovativi, soprattutto nell'utilizzo delle tecnologie per garantire, dal punto di vista del reperto, la valorizzazione, preservazione, conservazione, che si riflettono in engagement, accessibilità, interattività a visitatori di diversa formazione socio-culturale e contesto.

Abstract (eng)

Museums today have taken on a new meaning, they are no longer just places dedicated to the conservation and exhibition of collections and artworks, but represent one of the privileged means of communication to spread culture and make it accessible to the widest possible public. Thanks to the emergence of the philosophy of the "new museology", the relationship between museums, places of art, society and the community has profoundly changed, gradually reducing the present division between culture treated in a classical way and new channels of communication introduced with the spread of technology.

There are numerous interventions aimed at creating strategies and tools to preserve and disseminate the entire heritage, especially where it is fragile and deteriorable, but so far no structured methodological approach has been developed for the efficient management of cultural heritage.

In fact, the profound changes due to the digital transformation and the renewed centrality of the user must be tackled with a rationally and fully organized approach, which considers the historical find in all phases of its life cycle, from discovery to conservation within a museum and from digitization to fruition, considering the find as a physical product that passes through digital processing and preservation.

Thanks to the Virtual Prototype and the Eco-System of Cultural Heritage, all this is possible.

The studies carried out have made it possible to place the historical find and the visitor at the centre, allowing both to take advantage of all the tools available to enhance each other within the new environment: the Eco-System of Cultural Heritage.

This thesis work, thanks to the studies carried out on digitization and the various installations created and tested with the users using the entire methodology developed, has allowed to obtain innovative results, especially in the use of technologies to ensure from the point of view of the find enhancement, preservation, conservation, which are reflected in engagement, accessibility, interactivity to visitors of different socio-cultural training and context.

Sommario

Ringraziamenti	4
Abstract (ita).....	6
Abstract (eng)	8
Sommario	10
Lista delle Figure	14
Lista delle Tabelle	18
Capitolo 1.	20
Introduzione.....	20
1.1 Contesto della Ricerca e Obiettivi	20
1.2 Innovazione	23
Capitolo 2.	24
Stato dell'Arte	24
2.1 Digital Cultural Heritage	24
2.1.1 Tecniche e Strumenti di Digitalizzazione per il Cultural Heritage	25
2.2 Fruizione nei Beni Culturali	28
2.2.1 Tecnologie di X-Reality per la Visualizzazione	28
2.2.2 Tecnologie di X-Reality per l'Interazione Tattile.....	31
2.2.3 Presence ed Experience Economy nel Museo Virtuale.....	32
Capitolo 3.	36
Eco-Sistema del Bene Culturale	36
Capitolo 4.	44
Elementi Eco-Sistema del Bene Culturale.....	44
4.1 Il Prototipo Virtuale	44
4.2 Il Reperto e la Sua Vita	46
4.3 Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi	46
4.3.1 Inquadramento del Caso Studio	49
4.3.2 Digitalizzazione	52
4.3.3 Valutazione e Analisi.....	56
4.4 Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione per il Digital Heritage	59

4.4.1	Analisi del Contesto d'Uso, Contenuti, Visitatori	59
4.4.2	Modello di Fruizione Sensoriale: Mono-Sensoriale e Multisensoriale	62
4.4.3	Metriche di Valutazione delle Installazioni Museali	65
Capitolo 5.	70
Casi Studio Digitalizzazione, Valutazione e Analisi		70
5.1	Acquisizioni con Laser Scanner a Triangolazione	70
5.1.1	Statuetta in Bronzo – Lisippo di Fano	72
5.1.2	Vasellame Smaltato	75
5.1.3	Testa di Augusto	79
5.2	Acquisizioni con Laser Scanner e Structure From Motion	82
5.2.1	Venere di Frasassi	84
Capitolo 6.	88
Casi studio Sistemi di Fruizione		88
6.1	Sistema di Fruizione Mono-Sensoriale: Visual	89
6.2	Sistema di Fruizione Multi-sensoriale	93
6.2.1	Visual e Motion	93
6.2.2	Visual e Sound	96
6.2.3	Visual e Haptic	102
6.2.3.1	Additive Manufacturing per la Riproduzione di Reperti	102
6.2.3.2	Haptic Device per Esplorare i Manufatti Storici	104
Capitolo 7.	108
Sperimentazione		108
7.1	Analizzare Piccoli Reperti Archeologici: la Venere di Frasassi	108
7.1.1	Confronto Generale tra le Tecnologie Impiegate	108
7.1.2	Confronto tra i Due Modelli 3D Ottenuti	110
7.2	Tecnologie di X-Reality a Confronto per la Visualizzazione di Reperti Archeologici	115
7.3	Spatial Augmented Reality nello Studiolo del Duca Federico a Urbino	120
Capitolo 8.	128
Conclusioni e Sviluppi Futuri		128

Bibliografia.....	130
Appendice.....	142
Ciclo di Vita del Reperto.....	143
Confronto tra i Modelli 3D: il Caso delle Venere di Frasassi.....	146
Modelli 3D per il Caso Studio: SAR nello Studiolo del Duca Federico a Urbino.....	148
Haptic Device per Esplorare i Manufatti Storici.....	149

Lista delle Figure

Figura 1 - Tecniche di Digitalizzazione.....	27
Figura 2 - Eco-Sistema del Bene Culturale	37
Figura 3 - Schema: Prototipo Virtuale.....	38
Figura 4 -Ciclo di Vita del Reperto – Macro-Fasi (Mengoni & Leopardi, 2019).....	39
Figura 5 - Ciclo di Vita del Reperto - Schema Generale (Mengoni & Leopardi, 2019).....	40
Figura 6 - Tipologie di Modelli 3D	41
Figura 7 - Andamento Piramidale per Rappresentazione del Prototipo Virtuale.....	45
Figura 8 - Dall'Oggetto Fisico all'Avatar Animato Passando per il Prototipo Virtuale (Direct Dimensions Sculpture)	45
Figura 9 – Ciclo di Vita del Reperto - Schema Dettagliato	47
Figura 10 – Schema: Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi	48
Figura 11 - Processo di Reverse Engineering	52
Figura 12 - Esempio di Casi Studio di Tecniche di Reverse Engineering nel Settore dei Beni Culturali	53
Figura 13 – Confronto di Diverse Tecnologie: Matrice 3D dei Bisogni, Tecnologie e Fasi Tecniche	54
Figura 14 - Pipeline di Acquisizione	55
Figura 15 – Metodologia di Valutazione e Analisi (Mengoni & Leopardi, 2019).....	58
Figura 16 - Schema: Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione per il Digital Heritage	60
Figura 17 - Milgram Continuum.....	61
Figura 18 – Tecnologie di Realtà Virtuale.....	62
Figura 19 - Componenti Sistema VR (Raponi, 2016).....	63
Figura 20 – Schema Modello di Fruizione Sensoriale.....	64
Figura 21 - Principio di Funzionamento della Triangolazione Laser (Mengoni & Leopardi, 2019).....	71
Figura 22 - Strumentazione Utilizzata per l'Acquisizione con Laser Scanner.....	72
Figura 23 - Riproduzione in Scala 1:11 dell'Atleta di Fano o Lisippo di Fano (14cm)	73
Figura 24 - Modello 3D del Lisippo di Fano	74
Figura 25 - Dettaglio di un'Acquisizione del Mezzo Busto del Lisippo di Fano.....	75
Figura 26 - Frammento di Piatto con Decorazione Floreale.....	75
Figura 27 - Modello 3D del Frammento Piatto con Decorazione Vegetale.....	76
Figura 28 – Frammento Bacino con Decorazione a Righe	77
Figura 29 – Modello 3D del Frammento del Bacino	77

Figura 30 - Analisi Geometrica e Dimensionale del Frammento di Bacino	78
Figura 31 - Ipotesi Ricostruttiva della Geometria del Bacino	79
Figura 32 - Augusto Capite Velato (38cm)	79
Figura 33 - Acquisizione dell'Augusto Capite Velato di Ancona.....	80
Figura 34 – (a) Modello 3D dell'Augusto Capite Velato; (b) Modello 3D Sezionato per Studi sulla Forma.....	81
Figura 35 - Strumentazione per l'Acquisizione Fotogrammetrica (Mengoni & Leopardi, 2019).....	82
Figura 36 - Modello per Calcolare la Rotazione del Manufatto Durante la Fase di Acquisizione (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).....	83
Figura 37 - Movimento del Piano Focale Durante l'Acquisizione con la Tecnica Focus Stacking (Mengoni & Leopardi, 2019) (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).....	84
Figura 38 - La Venere di Frasassi (8.7cm) (Mengoni & Leopardi, 2019).....	85
Figura 39 - Acquisizione con Laser Scanner.....	85
Figura 40 – Modello 3D Laser Scanner: (a) Sovrapposizione tra le Diverse Scansioni Dopo l'Allineamento (b) Dettagli dei Fori nel Modello 3D (Mengoni & Leopardi, 2019).....	86
Figura 41 - Acquisizione Fotografica (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).....	87
Figura 42 - Modello di Fruizione Sensoriale: Casi Studio.....	88
Figura 43 – Tecnologie di X-Reality Studiate	89
Figura 44 – Struttura del Sistema VM.....	91
Figura 45 - I Reperti Archeologici. Da Sinistra: Augusto Capite Velato, Pugnale e Kylix.	91
Figura 46 - Le Applicazioni VM Considerate nello Studio: (a) Head Mounted Display; (b) AR mobile; (c) Desktop 2D; (d) Proiezione Olografica; (e) Stereoscopia Attiva;	93
Figura 47 - Basilica di Vitruvio: Vista della Piazza Antistante	94
Figura 48 - Basilica di Vitruvio: Vista della Piazza Antistante	95
Figura 49 - Particolare dell'Interno della Basilica di Vitruvio con i Reperti Conservati	95
Figura 50 - Parete Nord ed Est dello Studiolo del Duca Federico nel Palazzo Ducale di Urbino.....	96
Figura 51 – Ricostruzione in Laboratorio di una Porzione dello Studiolo del Duca Federico nel Palazzo Ducale di Urbino	97
Figura 52 - L'Architettura del Sistema (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).....	98
Figura 53 - Mirror Head	99
Figura 54 - Punti d'Interesse Considerati (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019)	100
Figura 55 – Schema dello Scenario dei Bambini (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019) (Clini, et al., 2020).....	101
Figura 56 – Riproduzione: (a) Venere di Frasassi; (b) Arco di Traiano	103
Figura 57 – Riproduzione di un Particolare della Formella di Urbino	103
Figura 58 - Omega 6 Prodotto da Force Dimension.....	105
Figura 59 - Modelli 3D dei Reperti Implementati con il Dispositivo Aptico	106
Figura 60 - Sculpturing della Venere.....	106

Figura 61 - Installazione nel Museo del Dispositivo Aptico	107
Figura 62 - Differenze tra i Modelli 3D: (a) Laser Scanner - SfM (Distanza Massima 0.5 mm); (b) Vista dall'Alto (Mengoni & Leopardi, 2019)	111
Figura 63 - Dettaglio della Testa, Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.4mm) (Mengoni & Leopardi, 2019).....	112
Figura 64 - (a) Sezione Lungo il Piano XY nella Testa, (b) Deviazione tra i Due Profili (Mengoni & Leopardi, 2019).....	113
Figura 65 - Viso della Venere di Frasassi (Mengoni & Leopardi, 2019)	113
Figura 66 - (a) Sezione in Corrispondenza della Bocca, (b) Dettaglio della Bocca (Mengoni & Leopardi, 2019)	113
Figura 67 - Griglia di Sezioni nell'Area della Bocca	114
Figura 68 - Deviazione nelle Sezioni Orizzontali.....	114
Figura 69 - Deviazione nelle Sezioni Verticali.....	115
Figura 70 – Risultato del Questionario della Presence	116
Figura 71 – Risultato complessivo per il Questionario della Visitor Experience	117
Figura 72 – Relazione tra 4 Fattori della Visitor Experience e le 5 Tecnologie di X-Reality	119
Figura 73 – Risultati per il Questionario Attitude Towards Experience.....	119
Figura 74 - Classificazione delle Tecnologie di X-Reality.....	120
Figura 75 - Riproduzione in Laboratorio di Parte dello Studiolo del Duca Federico	121
Figura 76 - Posizione della Mirror Head nella Pianta dello Studiolo in Base alle Dimensioni della Ricostruzione in Laboratorio	122
Figura 77 - Esempio di Applicazione di Proiezione Dinamica, (Gallery Invasion).....	123
Figura 78 - Proiezione del Modello 3D sulla Parete Riprodotta in Laboratorio:.....	124
Figura 79 - Effetto Glow sullo Scoiattolo: (a) Mappatura Errata; (b) Mappatura Corretta	124
Figura 80 - Effetto Glow: (a) Maschera Sbagliata; (b) Maschera Corretta.....	124
Figura 81 - Effetto Glow sullo Scoiattolo.....	125
Figura 82 - Parete Est: Effetto Glow sullo Scoiattolo.....	125
Figura 83 - Effetto Occhio di Bue sulla Parete Est Dove si Trova la Lesena	127
Figura 84 - Effetto ad Occhio di Bue sulla Speranza.....	127
Figura 85 - Dal Ritrovamento al Trasferimento	143
Figura 86 – Dalla Conservazione Passiva o Restauro alla Pubblicazione	144
Figura 87 – Esposizione in un Museo.....	145
Figura 88 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.1mm)	146
Figura 89 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.2mm)	146
Figura 90 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.3mm)	147
Figura 91 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.4mm)	147
Figura 92 - Modello 3D del Clavicordo	148
Figura 93 - Modello 3D dell'Ermellino	148
Figura 94 - Modello 3D dello Scoiattolo	148
Figura 95 - Interfaccia Utente con Istruzioni per l'Uso dell'Haptic Device al Museo	149
Figura 96 - Interfaccia Utente con Istruzioni per Applicazione di Sculpturing	149

Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Requisiti per Differenti Tipi di Modelli 3D (Mengoni & Leopardi, 2019).	49
Tabella 2 - Schema QFD per Specificare i Requisiti del Modello 3D nei Casi di Fruizione. (Mengoni & Leopardi, 2019).....	50
Tabella 3 - Schema QFD per Specificare i Requisiti del Modello 3D in Caso di Restauro e Conservazione. (Mengoni & Leopardi, 2019).....	51
Tabella 4 - Questionario: Presence	65
Tabella 5 - Questionario: Attitude Towards Experience	66
Tabella 6 - Questionario: Visitor Experience	67
Tabella 7 - Questionario: System Usability Scale	68
Tabella 8 - Confronto Scansioni sul Numero di Passate.....	73
Tabella 9 – Parametri Campagna di Acquisizione Lisippo Fano.....	74
Tabella 10 – Studio della Geometria del Frammento di Bacino.....	78

Capitolo 1.

Introduzione

1.1 Contesto della Ricerca e Obiettivi

Il patrimonio culturale italiano è un bene di inestimabile valore e come tale deve essere custodito e tutelato nel tempo e valorizzato in modo adeguato. Numerosi sono gli interventi volti a creare strategie e strumenti per conservare l'intero patrimonio, soprattutto laddove esso risulti fragile e deteriorabile. Inoltre, alla base ci deve essere una cultura di promozione a diversi livelli territoriali, culturali/sociali, educativi e di ricerca scientifica, di esaltazione del valore che i reperti e manufatti storici portano in sé, con l'obiettivo di trasmetterlo nel modo più efficace possibile, garantendo una facile fruizione da parte di tutte le categorie di utenti/visitatori con abilità fisiche e cognitive diverse.

Grazie alla attuale diffusione della tecnologia nella vita quotidiana, le barriere che erano presenti in passato nei loro confronti sono sempre più diminuite, ma allo stesso tempo è aumentato il divario tra cultura e storia trattata in modo classico, rendendo i musei con questa connotazione sempre più lontani dal presente. Tuttavia, già dagli anni '90 (Vergo, 1997) con l'emergere della cosiddetta filosofia della "nuova museologia", è iniziato un progressivo ma radicale cambiamento nel rapporto tra musei, società e comunità. Questa divisione si è andata ad assottigliare sempre più; tanto che oggi i visitatori hanno acquisito una crescente centralità nel rapporto con il museo, diventando interlocutori fondamentali per quanto riguarda la fruizione (McCall & Gray, 2014).

Oggi i musei sono molto più che luoghi dedicati alla conservazione e all'esposizione di collezioni e opere d'arte. Essi dovrebbero essere visti come mezzi di comunicazione privilegiati e svolgere un ruolo centrale nel rendere la cultura accessibile al pubblico di massa (Carrozzino & Bergamasco, 2010); (Clini, et al., 2020), in modo più aperto, inclusivo e creativo, per offrire ai visitatori contenuti educativi in modo ludico e coinvolgerli emotivamente.

Se da un lato l'applicazione di tali tecnologie sta contribuendo a rendere la cultura accessibile al grande pubblico, dall'altro ha avviato un processo di desacralizzazione dell'istituzione museale, estendendo i suoi confini oltre la moderna industria dello spettacolo (Nikonova & Biryukova, 2017). Ciò ha anche contribuito a creare una certa diffidenza verso le innovazioni tecnologiche, soprattutto nel caso di edifici storici adibiti a museo (ad esempio, il Palazzo Ducale di Urbino, Villa Borghese a Roma, Palazzo Te a Mantova, ecc.). In questi casi, infatti, la struttura-contenitore svolge un ruolo importante

nell'attrarre il pubblico e nel determinare l'esperienza del visitatore. Dall'altro canto, dove le sale del museo sono completamente ricoperte da decorazioni ricche di dettagli e contenuti simbolici (ad esempio, affreschi, intarsi, arazzi ecc.), è di fondamentale importanza fornire ai visitatori informazioni adeguate, per consentire loro di apprezzare appieno le opere d'arte (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).

In questo equilibrio così precario, il paradigma del Digital Cultural Heritage (DCH), può rappresentare un valido strumento di aiuto per migliorare la fruizione del patrimonio culturale per le persone che visitano i musei, in modo inclusivo e più coinvolgente emozionalmente, pur attribuendo il dovuto valore che esso rappresenta.

Le applicazioni basate su tecnologie X-Reality (i.e., Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality), sviluppate utilizzando tecniche di storytelling e Gamification appropriate (Palombini, 2017), possono offrire nuove esperienze divertenti, informative e piacevoli ai visitatori e aumentare il loro livello di coinvolgimento e interesse (Sylaiou, Mania, Karoulis, & White, 2010); (Mortara, et al., 2014). Inoltre, possono essere molto utili per combinare scopi educativi con la capacità di coinvolgere emotivamente i visitatori (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017).

Un numero crescente di sistemi museali virtuali (VM) è stato proposto negli ultimi anni (Carrozzino & Bergamasco, 2010), per valorizzare le collezioni e gli oggetti esposti tradizionali con i moderni sistemi tecnologici (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019); (Clini, et al., 2020). Questa tendenza è in continua crescita, per cui è chiaro che la tecnologia avrà un ruolo sempre più importante nell'esperienza museale moderna. La maggior parte di queste installazioni pone una serie di limitazioni pratiche, come la complessità dello sviluppo, gli elevati costi di installazione e manutenzione (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017), l'inaccessibilità delle tecnologie VR immersive, la bassa usabilità e l'alta manutenzione necessaria (Tan & Rahaman, 2009). Questi problemi riducono fortemente la possibilità di ottenere un intrattenimento di massa commercialmente efficace. Inoltre, durante lo sviluppo dei contenuti, le caratteristiche demografiche e culturali dei gruppi target (Nyaupane & Andereck, 2014) sono generalmente trascurate, cosicché le applicazioni risultanti non forniscono ambienti di apprendimento efficaci (Tan & Rahaman, 2009); (Gregory, Ehmann, & Lin, 2000). Una delle cause maggiori risiede nel fatto che finora il budget è stato il principale fattore discriminante nella scelta delle tecnologie (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017). Oggi, però, sono disponibili diverse tecnologie XR a basso costo, caratterizzate da vari dispositivi di supporto, spazio di lavoro per l'utente e diversi livelli di immersione, interazione e presenza. Ma questo non basta, perché data la vastità delle tecnologie a disposizione, è molto importante disporre di metodi di valutazione che consentano di confrontare oggettivamente i vari possibili assetti tecnologici, al fine di individuare la soluzione più adatta a soddisfare le esperienze desiderate dai visitatori.

In letteratura troviamo vari esempi a riguardo, (Sylaiou, Mania, Karoulis, & White, 2010); (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016); (He, Wu, & Li, 2018), ma tutti confrontano solo alcune tecnologie su ambiti diversi, e tramite aspetti diversi, che li rendono impossibili da considerare insieme per un eventuale valutazione oggettiva su grande scala e ad ampio

spettro. Per quanto è nostra conoscenza della letteratura, solo (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017) ha proposto una metodologia per effettuare una valutazione comparativa di diversi ambienti virtuali attraverso studi sugli utenti, che però non è sufficiente, perché comunque è limitata principalmente all'usabilità dell'interfaccia con il sistema, come fattore comparativo. Nessuno studio ha proposto metodi per effettuare una valutazione comparativa di configurazioni tecnologiche X-Reality alternative, al fine di determinare le migliori specifiche tecniche sulla base della qualità complessiva percepita dall'utente e della conseguente esperienza museale dei visitatori, considerata in termini di ciò che affermano (Pine & Gilmore, 1998).

Questa mancanza è ancora più evidente, se non si considerano solo le tecnologie di X-Reality di visualizzazione, ma anche le tecnologie X-Reality di interazione, come quelle che implementano canali sensoriali diversi, sia singolarmente che in combinazione. Un caso particolare, per esempio, è rappresentato dalla crescente diffusione degli Haptic Device o Dispositivi Aptici. Infatti, ci sono molti tipi di dispositivi disponibili sul mercato, ognuno dei quali permette vari gradi di libertà e producono un feedback diverso (Butler & Neave, 2008), (Comes, 2016); (Jamil, et al., 2018).

Inoltre, non si può parlare di fruizione digitale senza includere il modello 3D, ottenibile attraverso tecniche di acquisizione virtuale, dette anche di "digitalizzazione". I musei sono interessati alla digitalizzazione delle loro collezioni (Comes, 2016), non solo per preservare il patrimonio culturale, ma anche per rendere il contenuto informativo fruibile a un pubblico più vasto in un modo nuovo, accessibile e attraente (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019); (Clini, et al., 2020). La digitalizzazione dei beni culturali è un processo multidimensionale, che aiuta a salvare l'identità culturale e ad aumentare la consapevolezza dei valori e delle memorie. A questo proposito è fondamentale considerare l'esplosione innovativa subita negli ultimi decenni, legata all'applicazione di tecnologie di acquisizione 3D, prototipazione rapida, rendering computerizzato a supporto dello sviluppo della documentazione digitale (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001); (Mengoni & Leopardi, 2019). Questa crescita nel concetto di digitalizzazione, si deve anche ai progressi nelle tecniche di Reverse Engineering, come l'evoluzione degli strumenti hardware e software e i risultati negli algoritmi di ricostruzione 3D (Bradley & Currie, 2005).

Il punto critico è da ricercare nelle procedure di lavoro, infatti non esiste una metodologia per identificare quale sia la migliore tecnologia in una particolare situazione, in cui ci si può trovare di fronte ad esigenze e scale diverse (ad esempio, manufatti archeologici, siti, architettura e monumenti, dipinti e sculture). Basti pensare ai numerosi piccoli manufatti facenti parte del patrimonio artistico italiano, i quali solitamente presentano dettagli invisibili ad occhio nudo. Nonostante le varie applicazioni in questo campo, la loro digitalizzazione 3D e ricostruzione rimane una questione aperta, a causa delle loro piccole dimensioni e dei vincoli di gestione che impongono (Mengoni & Leopardi, 2019). Analogamente, si possono riscontrare problemi anche in caso di grandi quantità di reperti da digitalizzare con poco tempo a disposizione per effettuare acquisizioni, anche qui i problemi di gestione e conoscenza delle tecnologie disponibili sul mercato, creano non poche difficoltà (Osorio, Figueroa, Prieto, Boulanger, & Londoño, 2011).

Pertanto, la diffusione e crescita delle tecnologie, porta con sé molti rischi sempre maggiori, di selezionare soluzioni tecnologiche non adatte ad ottenere una digitalizzazione fedele all'originale, di creare installazioni tecnologicamente avanzate, innovative e con investimenti in termini di budget consistenti, ma che allo stesso tempo possono risultare inefficaci e dannose per l'intero museo. Infatti, in quest'ultimo caso l'effetto a cui si può andare incontro, è quello della creazione di un' "isola tecnologica", completamente scollegata dall'ambiente che la circonda o peggio fortemente invasiva nei confronti dell'utente (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).

Questo rischio, come anche quello specifico di una scorretta digitalizzazione esposto in precedenza, può essere scongiurato nel momento in cui si applica una metodologia strutturata, basata su studi svolti da più punti di vista con diverse tecnologie, e verificati tramite test incrociati con operatori (in caso di digitalizzazione) e visitatori (in caso di fruizione), che vengono man mano raccolti all'interno di una piattaforma comune come quella proposta e sviluppata in questo lavoro di ricerca.

I principali obiettivi possono essere riassunti in:

- Studiare e creare una metodologia operativa per la costruzione di uno strumento in grado di strutturare, rendere coerente e mettere a sistema tutti i contenuti digitali del Bene Storico;
- Sviluppare una metodologia in grado di gestire in modo integrato e coerente, tutti quegli aspetti che riguardano la digitalizzazione del Bene Storico;
- Ideare un Modello/Metodo di fruizione che permetta di correlare diverse interfacce multimodali e multisensoriali per valorizzare e semplificare la fruizione dei beni stessi.

1.2 Innovazione

Il presente lavoro di ricerca intende studiare e definire innovative metodologie per l'acquisizione, digitalizzazione, fruizione e strutturazione del bene archeologico e/o artistico e sviluppare strumenti interattivi dedicati all'implementazione di tale metodologia, basati sul paradigma del Prototipo Virtuale (VP). La definizione di queste metodologie viene raccolta all'interno di un ambiente definito Eco-Sistema del Bene Culturale, alla base del quale troviamo il Reperto Storico Artistico, che deve essere preservato e valorizzato.

Nello specifico per raggiungere questo scopo, sono stati sviluppate e in parte testate nuove metodologie e procedure, in particolare:

- Definizione del Prototipo Virtuale (VP);
- Definizione del Ciclo di Vita del Reperto;
- Definizione di una Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi;
- Definizione di un Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione Sensoriale per il Digital Heritage.

Capitolo 2.

Stato dell'Arte

Questo lavoro di tesi ha come scopo primario quello di abbracciare il reperto archeologico, sito storico, architettura, monumento, libro antico, dipinto o scultura, a tutto tondo tenendo conto di vari aspetti, in modo da farli confluire insieme in un unico "luogo". Per questo motivo e data l'interdisciplinarietà della ricerca, lo stato dell'arte va specificato per i diversi settori, considerando il problema da più punti di vista e su più livelli.

La ricerca si è svolta prima di tutto sul concetto del Digital Cultural Heritage in senso ampio, per passare successivamente ad un'analisi di vari casi studio presenti in letteratura, focalizzandosi in particolare sulle tecnologie di acquisizione e digitalizzazione adottate per questo contesto specifico dei Beni Culturali.

La seconda parte della ricerca, verte invece, su tutto quello che riguarda il concetto di fruizione nel contesto Culturale. Partendo dalle tecnologie di X-Reality di visualizzazione e di interazione aptica, analizzando anche la loro influenza sul concetto di Presence, passando al concetto di Museo Virtuale ed "Experience Economy" e "Visitor Experience", che in un mondo sempre più dinamico e centrato sulla persona non possono essere trascurati.

2.1 Digital Cultural Heritage

La salvaguardia e la conservazione del patrimonio culturale, storico, archeologico e paesaggistico, si colloca come principio istitutivo della Comunità Europea, tanto che numerosi sono i progetti H2020 che toccano tale tematica, ed obiettivo primario e trasversale di numerosi documenti programmatici ai vari livelli, regionale (Protocollo di Intesa della Regione Marche per la tutela dei beni ecclesiastici, formazione della Rete Diculther della Regione Marche), nazionale (Smart Cities and Communities and Social Innovation), e già citato Europeo (Council Work Plan for Culture 2011-2014 – Area B Cultural and Creative Industries, Europeana Programmes for digitalization, H2020 Joint Programming Initiatives in Cultural Heritage, LINKED HERITAGE project (LINKED HERITAGE project) ecc.).

Dall'analisi di tali documenti è evidente come esso rappresenta un obiettivo strategico da assumere per la gestione sostenibile delle risorse del territorio, quale catalizzatore per il rafforzamento dell'identità culturale, della coesione sociale e dello sviluppo sul piano sia culturale sia economico.

In quest'ottica, è di fondamentale importanza il concetto di digitalizzazione dei manufatti e reperti, come strumento preventivo di conservazione e valorizzazione del patrimonio, non solo come memoria storica, ma anche possibilità di creare nuove opportunità di sviluppo del turismo e dell'economia. Ciò nonostante le start-up culturali e le imprese che operano nel settore della conoscenza storica, culturale, archeologica ed artistica presenti nel territorio marchigiano, che si rivolgono al mercato nazionale ed europeo, sono davvero scarse ed offrono ad oggi servizi di modesto valore per l'incremento delle conoscenze. Un aspetto molto importante di cui non si deve trascurare gli effetti, è il decadimento naturale a cui sono soggetti i manufatti storici per effetto dell'esposizione agli elementi che lo circondano, secondo (Bergamasco, Frisoli, & Barbagli, 2002) è improbabile che un'opera d'arte duri per sempre. Questa affermazione dovrebbe far riflettere sul pericolo a cui si va in contro, nonostante gli sforzi messi in atto da sempre nella salvaguardia del patrimonio culturale.

C'è anche il problema del trasporto, che può causare danni e quindi, in generale, la maggior parte delle opere d'arte non sono trasportate lontano dalla loro origine. Questo limita il numero di persone che possono goderne, solo a coloro che sono in grado di viaggiare e recarsi dove si trova l'opera d'arte (Butler & Neave, 2008). Introducendo il concetto di copia digitale dell'opera d'arte, grazie alle tecniche di digitalizzazione che hanno raggiunto livelli molto alti, il bacino di fruizione si può allargare a più persone, basti pensare per esempio alla possibilità di visualizzare l'opera d'arte via internet, come (Google Art & Culture); (Sketchfab). C'è chi sostiene anche, che gli originali non sono così importanti, ma che in realtà la conoscenza che ne deriva è la più importante e che le copie digitali possono raggiungere questo obiettivo (Asano, Ishibashi, Minezawa, & Fujimoto, 2005).

Altri sostengono che, oltre all'esposizione del reperto o manufatto nel suo stato attuale, possa essere di interesse anche la sua storia (Bergamasco, Brogni, Frisoli, Salvini, & Vignoni, 2002). Per esempio, se l'opera d'arte è stata danneggiata dall'esposizione o spezzata in sezioni, allora si potrebbe presentare anche queste fasi di vita del manufatto. In pratica, usare la storia del reperto per raccontare la sua progressione, fino a che lo spettatore possa interagire con esso.

Tali obiettivi non sono ancora stati affrontati, in maniera integrata e multidisciplinare, in modo da far divenire l'aspetto conservativo un elemento di divulgazione e conoscenza.

2.1.1 Tecniche e Strumenti di Digitalizzazione per il Cultural Heritage

I sistemi Information and Communication Technology (ICT) sviluppati negli ultimi 20 anni hanno messo a disposizione strumenti sempre più duttili e portatili per la documentazione digitale ed il rilievo tridimensionale dei beni culturali. Grazie all'evoluzione delle metodologie di computer grafica, il patrimonio culturale sta ottenendo grandi vantaggi nello studio, rappresentazione e conservazione dei manufatti digitali (Berndt & Carlos, 2000). Infatti, i metodi tradizionali (ad esempio, calibro, righello, disegni manuali, rapporti) non consentono di ottenere un facsimile digitale sufficientemente dettagliato e preciso o in breve tempo, rispetto alle tecniche basate sull'acquisizione 3D (Guidi, Russo, & Angheleddu, 2014); (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001). La documentazione 3D è divenuta

quindi, pratica quotidiana per le campagne di valorizzazione (Osorio, Figueroa, Prieto, Boulanger, & Londoño, 2011); (Tucci, Cini, & Nobile, 2011); (3D-COFORM); (3D-ICONS), grazie anche alla diffusione dei sistemi di scansione prima e di fotogrammetria digitale poi, con l'utilizzo di acquisizioni fotografiche anche non dedicate. Gli archivi 3D sono più durevoli e non soggetti a cambiamenti, come lo possono essere quelli ottenuti con metodi tradizionali; inoltre grazie allo sviluppo di piattaforme digitali come Sketckfab (Sketchfab); 3DHOP (Potenziani, et al., 2015); SACHER (Apollonio, et al., 2017)), oggi si ha una maggiore e più semplice diffusione della conoscenza del patrimonio culturale rispetto a quella cui si aveva accesso nel passato. Inoltre, i modelli digitali rappresentano un valido aiuto nelle pratiche di monitoraggio del degrado e conservazione del manufatto (Arbace, et al., 2013); (Levoy, et al., 2000); (Barrile & Bilotta, 2018). Come affermano (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001), la gestione dei beni culturali richiede un'attenzione particolare, per questo motivo i protocolli di acquisizione sono molto più severi di quelli necessari per la scansione di oggetti meno preziosi, come ad esempio, nelle applicazioni industriali. Di rimando anche gli strumenti di acquisizione, devono presentare dei requisiti particolari, infatti data la delicatezza, le caratteristiche particolari delle forme e dei materiali (Osorio, Figueroa, Prieto, Boulanger, & Londoño, 2011) e il valore inestimabile attribuibile, solo alcune delle tecnologie presenti sul mercato (Figura 1) possono essere prese in considerazione.

Gli strumenti senza contatto, sono quelli che nella maggior parte delle situazioni, presentano una tecnologia idonea per effettuare delle acquisizioni nel caso di reperti storici di qualunque dimensione e natura (ad esempio, sito storico, reperto archeologico, architettura, monumento, dipinto o scultura). Alcuni degli strumenti maggiormente impiegati per la digitalizzazione dei beni culturali sono: sistemi a triangolazione laser, scanner a luce strutturata, scanner a tempo di volo, tecniche fotogrammetriche. I sistemi a triangolazione laser sono tecnologie molto diffuse per la creazione di modelli 3D di oggetti. Il loro volume di acquisizione è di medie dimensioni (portata massima di circa 1m), presentano un sensore attivo e sono basati sulla teoria di triangolazione ottica (Par. 5.1) (Bernardini & Rushmeier, 2002); (Mengoni & Leopardi, 2019); (Graham, Akoglu, Lassen, & Simon, 2017). I sistemi a luce strutturata hanno un meccanismo differente rispetto ai precedenti, anche se fanno parte del gruppo di sensori attivi, infatti, sfruttano la deformazione risultante da un pattern di luce che viene proiettato sull'oggetto da acquisire, (Berndt & Carlos, 2000). Sono un'altra delle tecnologie più impiegate nell'acquisizione di oggetti di piccole e medie dimensioni nel campo dei Beni Culturali (Bici, Campana, Colacicchi, & D'Ercoli, 2018); (Levoy, et al., 2000); (Scopigno, et al., 2003). Tra i sistemi attivi, troviamo anche gli scanner a tempo di volo (o TOF, Time of Flight), che si basano sulla misurazione del tempo che impiega un impulso luminoso inviato verso l'oggetto ad andare e tornare indietro, per ottenere la distanza tra l'oggetto e l'emettitore, come riportato nell'equazione (1) (Bradley & Currie, 2005):

$$d = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

Questi sistemi sono sensori a lungo raggio, in grado di coprire un grande volume in una singola scansione o con poche scansioni, con distanze superiori ai 10m. Purtroppo, la precisione assoluta che permettono di ottenere è inferiore rispetto ai precedenti, dell'ordine del centimetro. Per le loro caratteristiche sono molto adatti ad acquisizioni di reperti di grandi dimensioni, come siti archeologici e palazzi (Nespeca, 2019); (Yastikli, 2007). Per quanto riguarda i sistemi che presentano un sensore di tipo passivo, tra i più utilizzati c'è la fotogrammetria, che consiste nella realizzazione di un modello 3D basandosi su immagini 2D ottenute da diversi angoli di visuale (Cipriani, Fantini, & Bertacchi, 2017). Questa tecnica opera secondo lo stesso principio del sistema di visione umana: quando una persona guarda un punto, la distanza dal punto è determinata confrontando il suo apparente spostamento di posizione tra i due occhi (Par. 5.2) (Figura 36). Questo tipo di sistema si adatta sia ad oggetti con dimensioni piccolo-media (Jamil, et al., 2018), con alcuni accorgimenti, sia a oggetti su grande scala (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016); (Marshall, Johnson, Summerskill, Baird, & Esteban, 2019).

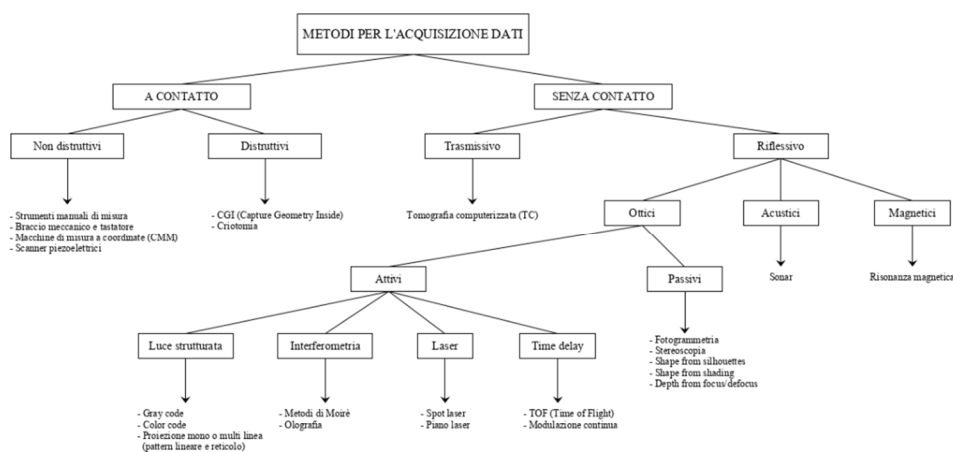


Figura 1 - Tecniche di Digitalizzazione

In letteratura, sono poche le applicazioni che confrontano tecnologie diverse utilizzate per lo stesso caso studio, (Yastikli, 2007) ; (Russo, Remondino, & Guidi, 2011); (Rasztovits & Dorninger, 2013). Infatti, nella maggior parte dei casi studio non sono confrontate le tecnologie, ma sono integrate nell'applicazione (Bayram, et al., 2015) (Koska & Kremen, 2013); (Pattee, Höfle, & Seitz, 2015). Questo metodo di lavoro, non porta alla determinazione dell'efficacia delle singole tecnologie impiegate, infatti non si riesce a comprendere se effettivamente sono necessarie entrambe le tecnologie o solamente una tra quelle implementate. Inoltre, soprattutto nel caso di manufatti di piccole dimensioni, per cui la precisione e accuratezza sono fondamentali, non esiste una metodologia strutturata che permetta di verificare, se l'integrazione delle tecnologie sia stata effettivamente efficace

oppure se abbia portato a degli errori (Evgenikou & Georgopoulos, 2015); (Mengoni & Leopardi, 2019); (Patrucco, Rinaudo, & Spreafico, 2019).

Oltre al problema da un punto di vista della fedeltà del dato, sorge anche una questione legata ai costi di investimento necessari per ottenere degli archivi digitali su grande scala. Infatti, il rischio maggiore risiede nella possibilità di vanificare un investimento verso una tecnologia/metodologia di acquisizione, che si può rivelare non idonea nei confronti degli obiettivi e aspettative iniziali. L'aspetto economico non deve essere mai trascurato, soprattutto in relazione al risultato che si vuole ottenere.

2.2 Fruizione nei Beni Culturali

Negli ultimi decenni il turismo culturale è enormemente cresciuto, grazie ai nuovi mass media che hanno cambiato l'accesso alle informazioni (es. internet, pubblicità...). Ciò ha portato ha una evidente evoluzione e diversificazione del concetto stesso di turismo. Per soddisfare le richieste della domanda, sempre più dinamica e differenziata, servono pertanto nuove strategie di marketing e comunicazione, volte a garantire una sempre maggiore flessibilità dell'offerta. Il concetto di Fruizione del Cultural Heritage assume quindi una grande importanza, e deve essere visto in un modo nuovo e personalizzato in base alle caratteristiche dell'utenza, così da rendere la comunicazione più efficace e migliorare l'esperienza del turista/visitatore, e consentire a persone di diversa estrazione sociale, formazione culturale e con disabilità di poter fruire contenuti che altrimenti sarebbero loro inibiti o di difficile comprensione.

2.2.1 Tecnologie di X-Reality per la Visualizzazione

Il termine X-Reality è utilizzato per indicare tutte le varie tipologie di realtà, secondo quanto proposto nella classificazione stilata da (Milgram & Kishino, 1994), rappresentato dal "Reality-Virtuality Continuum" (Figura 17), che descrive l'intervallo che si trova tra ambienti reali e ambienti virtuali. Tra questi estremi, ci sono tecnologie mediate di realtà che integrano mondi fisici e virtuali a diversi livelli: Augmented Reality (AR), Augmented Virtuality (AV) e Mixed Reality (MR). L'AR è più vicina al mondo reale, mentre l'AV ad un ambiente virtuale. La MR fonde i due estremi del "Reality-Virtuality Continuum", sincronizzando le informazioni provenienti dal mondo reale e virtuale, in modo che lo spazio digitale esistente e quello fisico siano combinati in varie proporzioni e presentati come un tutto uno (Milgram, Takemura, Utsumi, & Kishino, 1995). La Virtual Reality (VR), quando pienamente sfruttata, immerge completamente gli utenti in un ambiente sintetico, interamente generato al computer (Wei, Qi, & Zhang, 2019). L'AR valorizza la realtà aggiungendo informazioni generate dal computer, allineate spazialmente (ad esempio, modelli 3D, annotazioni testuali, ecc.) sull'ambiente reale dell'utente, per mezzo di speciali tecnologie di visualizzazione (Regenbrecht & Schubert, 2002). L'AV "aumenta" il mondo virtuale sovrapponendo scene contemporaneamente del mondo reale su ambienti virtuali (Regenbrecht, et al., 2004). La MR si caratterizza per la fusione totale di elementi virtuali (es. ologrammi o proiezioni) con il mondo reale, in modo che gli utenti possano

interagire contemporaneamente con contenuti digitali e reali (Mengoni, Ceccacci, Generosi, & Leopardi, 2018).

Nel corso degli anni, numerosi studi dimostrano la fattibilità di diversi sistemi basati su VR, AR e MR per diverse aree di applicazione nel Cultural Heritage (ad esempio, (Noh, Sunar, & Pan, 2009); (Carrozzino & Bergamasco, 2010); (Rua & Alvito, 2011); (He, Wu, & Li, 2018); (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019)), mentre l'AV sembra non aver suscitato alcun interesse.

Quando l'interazione con gli oggetti, o ambiente, è mediata da una tecnologia di comunicazione, l'utente è costretto a percepire contemporaneamente in varia misura due ambienti separati: da un lato l'ambiente fisico in cui si trova effettivamente, e dall'altro l'ambiente digitale presentato attraverso la tecnologia. Per questo motivo, la qualità della grafica 3D e le caratteristiche delle tecnologie di interazione e visualizzazione adottate, determinano di fatto il coinvolgimento dell'utente con l'ambiente di X-Reality risultante, e di conseguenza influenzano l'esperienza soggettiva dell'utente durante l'interazione con il Museo Virtuale (Mengoni, Raponi, & Ceccacci, 2016); (Iachini, et al., 2019).

In particolare, l'immersione rappresenta uno dei fattori tecnologici che influenzano principalmente il coinvolgimento degli utenti in ambienti XR e determinano il "senso di presenza" (Bowman & McMahan, 2007). L'immersione può essere definita come il grado in cui un sistema riesce a riprodurre la percezione naturale e l'azione attraverso display multisensoriali e tracking (Nilsson, Nordahl, & Serafin, 2016), in questo modo è strettamente dipendente dalla capacità della tecnologia XR di fornire una stimolazione sensoriale e un'interattività. Il "Senso di presenza" o Presence, invece, è solitamente definita come "l'esperienza soggettiva di trovarsi in un luogo o ambiente, anche quando uno è fisicamente situato in un altro" (Witmer & Singer, 1998).

Quindi a seconda del livello di Immersione e di Presence che forniscono, i sistemi XR possono essere classificati in sistemi non immersivi, semi-immersivi e immersivi (Burdea & Coiffet, 2003). I sistemi non immersivi consistono in desktop o display da tavolo e interfacce basate su dispositivi; solitamente sono utilizzati per la visualizzazione di web-based per i Musei Virtuali (Sylaiou, Karoulis, Stavropoulos, & Patias, 2008). I sistemi semi-immersivi sfruttano tecnologie di visualizzazione più simili alle esperienze cinematografiche su grande schermo (ad esempio, proiezione toroidale, proiezione stereoscopica Powerwall, videowall, proiezione olografica). Poiché questi sistemi permettono di ospitare contemporaneamente un gran numero di visitatori, sono comunemente adottati nei musei (Carrozzino & Bergamasco, 2010); (Ch'ng, Cai, Leow, & Zhang, 2019). Tuttavia, di solito implementano sistemi di interazione non utilizzabili da più utenti, ad esempio dispositivi palmari, interfacce gestuali (Pietroni & Adami, 2014). I sistemi immersivi, come HMD e CAVE, permettono ai visitatori di sentirsi realmente situati all'interno di un ambiente virtuale; incorporano sistemi di tracciamento avanzati, in grado di fornire un'interazione naturale di alta qualità e di fornire esperienze virtuali più realistiche (Fineschi & Pozzebon, 2015).

Oggi, una delle maggiori sfide per chi lavora all'interno del contesto museale è come migliorare l'esperienza del visitatore e coinvolgerlo nell'interazione con i manufatti e le

collezioni. Per raggiungere questo obiettivo, la VR e l'AR sono gli strumenti più promettenti, in quanto permettono di attrarre i visitatori e personalizzare la propria esperienza, presentando le collezioni delle opere d'arte in modo più accattivante ed emozionante, attraverso la generazione di esposizioni museali virtuali.

Nell'ultimo decennio, molti luoghi dediti al turismo culturale come gallerie d'arte, musei o siti storici appartenenti al patrimonio culturale hanno scoperto l'AR e la VR. Grazie a queste tecnologie hanno migliorato le esperienze dei visitatori con innovazioni che vanno da implementazioni virtuali per rivivere siti ed eventi storici, interagire con i contenuti nei musei, o per visitare destinazioni remote in ambienti virtuali (Carrozzino & Bergamasco, 2010); (Sylaiou, Mania, Karoulis, & White, 2010). Inoltre, per arricchire le tradizionali applicazioni di guida con contenuti personalizzati, sono state proposte diverse soluzioni per veicolare informazioni attraverso canali di comunicazione innovativi e nuovi metodi di narrazione, che sfruttano varie forme di presentazioni multimediali, VR, AR e giochi (Mortara, et al., 2014); (Wojciechowski, Walczak, White, & Cellary, 2004).

La tecnologia AR può essere considerata la soluzione ottimale per i sistemi di guida, al fine di coinvolgere i visitatori e migliorare la loro esperienza nell'esplorazione dei manufatti, perché ha il vantaggio di non isolare i visitatori dall'ambiente e permette una semplice presentazione informativa tramite tecniche di storytelling (Carrozzino, Colombo, Tecchia, Evangelista, & Bergamasco, 2018), comprendendo anche i riferimenti agli oggetti esposti per una migliore comprensione (tom Dieck, Jung, & tom Dieck, 2018).

Oggi, la maggior parte delle applicazioni AR proposte, sono basate su dispositivi mobili (Moro, Rita, Ramos, & Esmerado, 2019). Tuttavia, smartphone e tablet possono distrarre i visitatori dalla mostra e avere un impatto negativo sull'interazione con le opere d'arte, per cui gli utenti preferiscono modalità di interazione più naturali (Kosmopoulos & Styliaras, 2018). A questo scopo, sono state proposte diverse soluzioni basate sull'utilizzo di smart glasses (tom Dieck, Jung, & Han, 2016); (Mason, 2016), che forniscono un'esperienza immersiva senza la necessità di trasportare un dispositivo e di passare dal dispositivo alla mostra, come accade quando si utilizzano smartphone.

Un'altra tecnologia emergente, che ha in sé il potenziale di trasformare l'apprendimento, è la Spatial Augmented Reality (SAR). La SAR permette a oggetti reali e virtuali di coesistere efficacemente nello stesso spazio realizzando la cosiddetta "fusione digitale". Tale paradigma, alimentato da tecniche di video mapping, viene adottato in vari contesti museali per migliorare la percezione e l'apprendimento dei dettagli geometrici dei manufatti, difficili da distinguere a causa di effetti di invecchiamento come l'erosione, ad esempio la pietra runica danese (Basballe & Halskov, 2010), le sculture egiziane (Ridel, et al., 2014).

Inoltre, negli ultimi anni stanno emergendo anche nuove tecnologie di proiezione, come la proiezione dinamica, che prevede l'uso di uno specchio interattivo high tech (Mirror Head) (Figura 53), che viene azionato digitalmente e utilizzato in combinazione con dei proiettori per spostare rapidamente o lentamente le immagini, i video e i testi proiettati su qualsiasi superficie immaginabile. In questo modo, le proiezioni possono essere spostate da una superficie all'altra o rimanere staticamente proiettate su una superficie specifica.

Questa tecnologia è stata finora utilizzata solo in mostre d'arte contemporanea o in fiere commerciali e in altri contesti pubblici, per scopi di intrattenimento. Per esempio, "Gallery Invasion" di Skullmapping (Gallery Invasion) era un'applicazione sperimentale di proiezione dinamica realizzata per una galleria d'arte a Leuven (Belgio), che trasforma una mostra statica in uno spazio vivace, pieno di creature diverse. Tuttavia, per quanto a nostra conoscenza, non è mai stato utilizzato nei musei, per migliorare la comprensione da parte del visitatore delle decorazioni allegoriche che caratterizzano le sale degli edifici storici.

Infine, nonostante l'implementazione di sistemi adattativi, in grado di personalizzare i servizi informativi nei musei, hanno un grande potenziale, molte sfide non sono ancora state affrontate, limitandone ancora l'ampia adozione. Queste sfide sono dovute principalmente alla mancanza di strumenti per la localizzazione con un'infrastruttura minima, dispositivi non intrusivi e metodi per l'estrazione dinamica del profilo per la misurazione del coinvolgimento dei visitatori e per la profilazione di gruppo (Kosmopoulos & Styliaras, 2018).

2.2.2 Tecnologie di X-Reality per l'Interazione Tattile

Tra le tecnologie di X-Reality, oltre alle tecnologie di visualizzazione, possono essere inserite anche tecnologie che permettono un'interazione a diversi livelli. Le classiche tecnologie come il mouse (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017) sono affiancate dalle sempre più diffuse tecnologie touch (Sundén, Lundgren, & Ynnerman, 2017); (Pietroni & Adami, 2014), che consentono di interagire con l'ambiente virtuale. Tuttavia, questi strumenti non permettono una vera interazione tattile, come i Dispositivi Aptici o Haptic Device (HD).

I Dispositivi Aptici sono dispositivi elettromeccanici con manipolatori che consentono il movimento con diversi gradi di libertà (DoF). Se abbinati a simulatori virtuali, forniscono all'utente il senso del tatto oltre alla vista (Escobar-Castillejos, Noguez, Neri, Magana, & Benes, 2016). Infatti, la simulazione del senso del tatto nell'ambiente virtuale, è resa possibile grazie a sistemi robotici che permettono all'utente di interagire con oggetti virtuali, rappresentati spesso da mesh poligonale con una texture (Bergamasco, Frisoli, & Barbagli, 2002); (Comes, 2016). La stimolazione tattile può essere ottenuta con due diverse metodologie: tramite forze feedback che riproduce un feedback cinestetico, e tramite tecnologia cutanea per creare una sensazione tattile sulla consistenza e rugosità della superficie. Gli Haptic Device sviluppati in ambito accademico sono numerosi. Ad esempio, esiste un sistema tattile, chiamato "InTouch", che può essere utilizzato come modellatore geometrico per plasmare modelli virtuali basati su una rappresentazione a mesh poligonale degli oggetti (Gregory, Ehmann, & Lin, 2000).

In generale le tecnologie aptiche giocano un ruolo molto importante nel determinare il livello di immersione, interazione e presenza in un ambiente virtuale.

Il loro più vasto impiego, lo si può trovare in ambiti completamente diversi da quello dei Beni Culturali; nel campo medico, per l'addestramento dei medici per le pratiche operatorie (Basdogan, et al., 2004); (Escobar-Castillejos, Noguez, Neri, Magana, & Benes, 2016); o

nell'ambito industriale, per la simulazione delle operazioni meccaniche da svolgere con ausili, come robot antropomorfi (Pocheville, Kheddar, & Yokoi, 2004); (Perret, 2019). Nell'ultimo ventennio sono molti i ricercatori che si chiedono se la tecnologia degli Haptic Device sia utilizzabile per applicazioni culturali, come ad esempio (Brogni, Avizzano, Evangelista, & Bergamasco, 1999); (Bergamasco, Frisoli, & Barbagli, 2002); (Bergamasco, Brogni, Frisoli, Salvini, & Vignoni, 2002); (Dettori, et al., 2003); (Butler & Neave, 2008); (Jamil, et al., 2018). I vantaggi riscontrabili sono molteplici, per esempio la possibilità di esporre una collezione di opere d'arte più ampia rispetto al numero di manufatti esposti realmente (Jamil, et al., 2018), permettendo inoltre di poterne fruire la forma, aspetto che solitamente in un museo non è consentito, come anche l'interazione con opere d'arte rare o fragili (Butler & Neave, 2008).

In questo nuovo modo di fruire i beni Culturali, la vista non è più l'unico senso necessario per apprezzare l'opera d'arte, perché subentra anche il tatto, fornendo l'opportunità a coloro che non possono vedere di godere dell'opera d'arte (Brewster S. A., 2001).

Ad oggi ci sono già dei musei che implementano la tecnologia che sfrutta il senso del tatto, ma su piccola scala in situazioni molto specializzate (Brewster S. A., 2005). Alcuni esempi sono: il Museo della Forma Pura (Grow, Verner, & Okamura, 2007); (Tecchia, Ruffaldi, Frisoli, Bergamasco, & Carrozzino, 2007), un museo virtuale interattivo che permette l'interazione con l'opera virtuale tramite la combinazione di dispositivi tattili e proiezioni stereoscopiche in 3D; "The Interactive Art Museum" della University of Southern California, il cui scopo principale è quello di dare la possibilità di toccare ciò che era classicamente noto come opera d'arte intoccabile. Un altro esempio di integrazione degli Haptic Device è rappresentato dall'Università di Glasgow, la quale ha utilizzato un mouse 2D tattile per interagire con gli oggetti di una mostra (Brewster S. A., 2001), permettendo ai visitatori di fruire le informazioni lungo due gradi di libertà.

Ci sono anche studi, che indagano confronti tra modelli di rappresentazione virtuale del reperto con un'interazione differente, come fa (Bergamasco, Frisoli, & Barbagli, 2002); (Jamil, et al., 2018). Ma come sostiene (Asano, Ishibashi, Minezawa, & Fujimoto, 2005), nonostante le indagini condotte sui musei tattili, c'è poca letteratura che considera la percezione pubblica di questa realtà mista come abilitante per i musei. Infatti, secondo (Butler & Neave, 2008) deve essere condotta una ricerca per stabilire se effettivamente i Dispositivi Aptici siano considerabili come uno strumento che permetta di avere una fruizione più completa del reperto. Infatti, la sola percezione visiva manca di molte informazioni importanti, che invece può fornire una fruizione tattile, come il peso, rugosità ecc (Brewster S. A., 2005); (Comes, 2016).

2.2.3 Presence ed Experience Economy nel Museo Virtuale

Riprendendo la definizione di Presence e la classificazione delle varie tipologie di realtà, sembra che i sistemi full-immersive VR, caratterizzati da display che circondano e isolano un utente dal mondo reale (Stevens, Jerrams-Smith, Heathcote, & Callear, 2002), siano quelli che meglio rispecchiano questo concetto, che non è completamente appropriato per altri tipi di realtà, come AR e MR. Infatti, ambienti aumentati e misti suscitano un diverso

tipo di Presence: danno l'impressione che gli oggetti virtuali siano presenti nell'ambiente reale, piuttosto che trasportare o immergere l'utente in un altro ambiente.

In questo contesto, è più utile considerare la Presence come "illusione percettiva della non mediazione" (Lombard & Ditton, 1997), o come un'esperienza in cui l'individuo non si accorge "della para-autenticità degli oggetti mediati" o "dell'artificialità degli oggetti simulati" (Lee, 2004). Infatti, tali definizioni non distinguono tra oggetti o ambienti reali e virtuali, per cui si applicano ad ogni tipo di realtà. Di conseguenza, secondo quanto afferma (Yim, Cicchirillo, & Drumwright, 2012), non si distingue tra Presence e Tele-Presence.

La Presence è una risposta psicologica soggettiva, individuale e dipendente dal contesto: dipendente dall'immaginario mentale dell'utente (Iachini, et al., 2019) e dalla capacità dell'utente di isolarsi da eventi esterni all'ambiente virtuale (Witmer & Singer, 1998). Gli studiosi concordano sul fatto che il giudizio di valutazione in termini di Presence dell'utente è uno dei principali criteri di usabilità dei sistemi VEs (Stanney, 2003). Inoltre, il concetto di Presence è stato ampiamente utilizzato per comprendere gli atteggiamenti dei consumatori e le intenzioni comportamentali future in vari contesti AR e VR (Wei, Qi, & Zhang, 2019). Il metodo più comune per misurare la Presence è il self-report post-esperimento basato su questionari standardizzati (Schuemie, Van Der Straaten, Krijn, & Van Der Mast, 2001). In particolare, il Questionario della Presence (PQ) di (Witmer & Singer, 1998) è il più utilizzato, anche se è stato definito per valutare la Presence in ambienti virtuali immersivi. Infatti, molti autori hanno definito nuovi questionari, riadeguando il PQ, per confrontare il livello di Presence in ambienti caratterizzati da diversi livelli di immersione (Yim, Cicchirillo, & Drumwright, 2012).

Tuttavia, pochissimi studi (Sylaiou, Mania, Karoulis, & White, 2010); (Loizides, El Kater, Terlikas, Lanitis, & Michael, 2014) hanno riportato un'analisi comparativa, che mette a confronto le performance effettive degli ambienti museali virtuali basati su diverse tecnologie di realtà virtuale, in rapporto a quelli che sono gli aspetti della Presence.

Oggi, una delle maggiori sfide per il marketing museale è come migliorare l'esperienza dell'utente e coinvolgere i visitatori con i manufatti e le collezioni. Già (Pine & Gilmore, 1998), tempo fa avevano coniato il termine "Experience Economy", per descrivere una nuova opportunità di business, basata non solo sulla vendita di prodotti e servizi, tipici dell'economia dei servizi, ma sull'arricchimento di prodotti o servizi attraverso l'offerta di quella che può essere definita "esperienza memorabile". Trasponendo questo concetto nel mondo dei Beni Culturali, i musei di oggi dovrebbero concentrarsi sui visitatori e sulla loro esperienza, piuttosto che sulle campagne di raccolta e di marketing per aumentare il numero di ingressi e ampliare il pubblico di riferimento: dovrebbero mettere in scena esperienze che soddisfino i desideri del visitatore (Neuburger & Egger, 2017). Tantopiù che il museo, grazie alle tecnologie ICT, non è più come un luogo fisico, ma come una rete di servizi, che iniziano ben prima della vera e propria visita e terminano molto dopo. La visita stessa è completamente reinventata e modellata attraverso modalità di fruizione moderne, dinamiche e molto coinvolgenti, come i sistemi di VR o di AR e le tecnologie che simulano il touch tramite un sistema di telecamere o puntatori laser in grado di riconoscere gli oggetti (Walsh, Enz, & Canina, 2008). Infatti, diversi studi hanno dimostrato, il forte effetto

rappresentato dall'esperienza sulle intenzioni comportamentali dei visitatori, in termini di probabilità di ripetere e raccomandare la visita (Radder & Han, 2015); (Jung, Chung, & Leue, 2015); (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016). Per raggiungere questo obiettivo, le tecnologie di X-Reality rappresentano uno strumento promettente in quanto permettono di attrarre i visitatori e personalizzare la loro esperienza, presentando le collezioni d'arte in modo più attraente ed emozionante, attraverso la generazione di mostre virtuali in vari modi (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).

Secondo (Pine & Gilmore, 1998), per raggiungere questo obiettivo, l'esperienza deve includere anche una combinazione di: apprendimento, intrattenimento, fuga ed estetica. Trasponendo questi aspetti nel caso dei musei e delle tecnologie di X-Reality, queste dovrebbero: facilitare l'esperienza di apprendimento, soddisfare nuove aspettative di intrattenimento, migliorare l'esperienza estetica e contribuire alla fuga dalla realtà (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016).

Tuttavia, diversi studi hanno rilevato che le caratteristiche tecnologiche e gli elementi che compongono gli ambienti virtuali, influenzano fortemente l'esperienza del visitatore del museo. Ad esempio, (He, Wu, & Li, 2018) hanno esaminato diverse alternative di progettazione di Musei Virtuali con l'AR e hanno trovato quella soluzione che offre un alto livello di presenza e una migliore esperienza estetica. (Pallud, 2017) e (tom Dieck, Jung, & tom Dieck, 2018) hanno osservato che l'interattività tecnologica percepita influenza fortemente le componenti dell'esperienza del visitatore relative al regno dell'edutainment. Di conseguenza, la scelta della tecnologia abilitante deve dipendere dal contesto applicativo e dall'esperienza che l'applicazione considerata intende fornire. Ad esempio, la realtà aumentata sembra essere preferibile nella valorizzazione delle mostre, mentre la realtà virtuale sembra essere migliore per i musei virtuali (Ch'ng, Cai, Leow, & Zhang, 2019). Infatti, solo (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016) ha esaminato l'impatto di un ambiente virtuale sull'esperienza del visitatore, applicando la teoria dell' "Experience Economy". Nessuno studio ha proposto metodologie a supporto della valutazione comparativa, al fine di comprendere le disparità su come le soluzioni di progettazione di un VM, basate su diverse tecnologie di X-Reality determinano l'esperienza dei visitatori, considerando i quattro ambiti dell'esperienza di (Pine & Gilmore, 1998).

Capitolo 3.

Eco-Sistema del Bene Culturale

In questo capitolo si riporta lo schema generale sviluppato per l'Eco-Sistema del Bene Culturale, un ambiente, alla base del quale troviamo il Manufatto Artistico, che deve essere preservato e valorizzato in tutti i suoi dettagli e particolari, indipendentemente dalla dimensione e tipologia, sia esso un reperto archeologico, sito storico, architettura, monumento, dipinto o scultura.

L'Eco-Sistema, come mostrato nella Figura 2, è considerato come un insieme di metodologie e modelli, che coprono vari aspetti, dalla catalogazione o digitalizzazione del Bene Storico, fino alla sua fruizione attraverso canali multisensoriali integrati tra loro. Tutto questo è realizzabile grazie alle tecnologie hardware e software che si sono sviluppate nel tempo, fino a raggiungere livelli sempre più elevati, da permetterne la completa integrazione nell'ambito dei Beni Culturali (Berndt & Carlos, 2000), (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001), (Guidi, Russo, & Angheluddu, 2014).

Fondamento dell'Eco-Sistema è il Prototipo Virtuale (VP), inteso come insieme coerente e strutturato di un modello 3D digitale del Bene Storico (opera pittorica, statua, reperto archeologico, monile, ecc.) nel suo contesto (architettonico, archeologico, paesaggistico) e di tutti i contenuti culturali interdisciplinari che convergono, per generare una conoscenza di base del bene stesso utile a diversi scopi (conservazione, fruizione digitale, diagnostica). Tali contenuti possono essere foto HD, testi, video, risultati di simulazioni di assemblaggio di reperti e di operazioni di restauro, contenuti audio, avatar per l'illustrazione delle fasi storiche di evoluzione di un certo sito, ecc. Come è riportato nella Figura 3, il Prototipo Virtuale funge da collegamento tra le varie discipline e contenuti, che convergono in esso. Il concetto stesso di Prototipo Virtuale applicato al Cultural Heritage (CH) ha forti implicazioni sia a livello di metodologia di gestione dei Beni Culturali sia di strumenti per la sua valorizzazione e fruizione.

Infatti, a differenza di altre piattaforme o strumenti già presenti, come piattaforme di visualizzazione, Sketckfab (Sketchfab), 3DHOP (Potenziani, et al., 2015) e ARIADNE (ARIADNE); oppure piattaforme di gestione delle fasi del restauro e conservazione, SACHER (Apollonio, et al., 2017), CHER-Ob (Wang, Shi, Akoglu, Kotoula, & Rushmeier, 2018) e SICaR (Baracchini, Fabiani, Grilli, & Vecchi, 2009); (Napolitano, Scherer, & Glisic, 2018), l'Eco-Sistema del Bene Culturale, vuole assumere una valenza diversa a più ampio spettro, che possa mettere in collegamento in modo strutturato, più discipline appartenenti ai vari ambiti che ruotano intorno al Cultural Heritage.

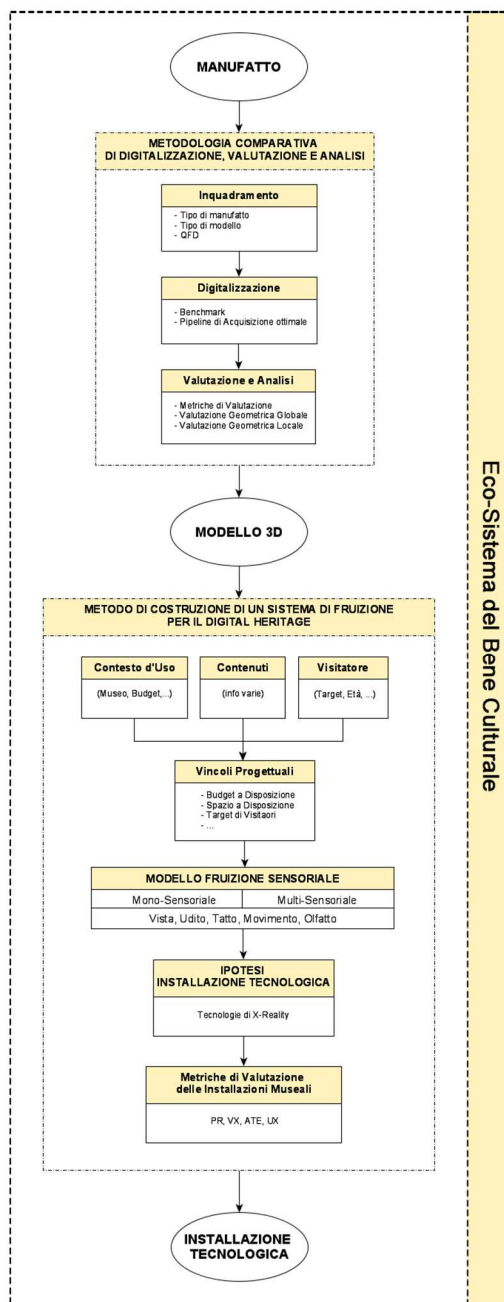


Figura 2 - Eco-Sistema del Bene Culturale

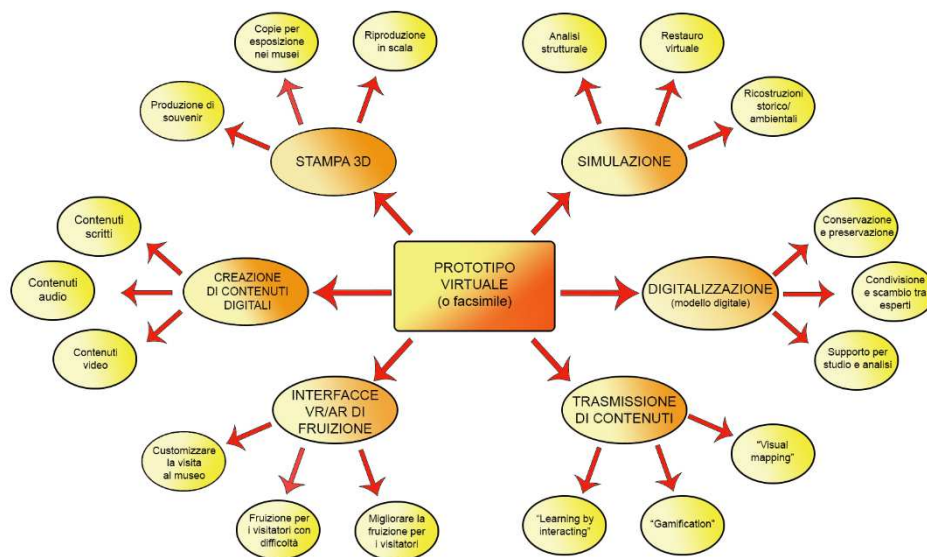


Figura 3 - Schema: Prototipo Virtuale

Per procedere alla costruzione dell'Eco-Sistema del Bene Culturale e quindi del Prototipo Virtuale, è necessario seguire un approccio strutturato, che permetta, allo stesso tempo, di identificare sia i requisiti necessari per le tecnologie da utilizzare per le varie fasi (digitalizzazione, analisi, fruizione), sia le caratteristiche intrinseche del manufatto (dimensioni, forma e materiale), sia le fasi attraverso le quali il manufatto storico deve passare nella sua vita (Remondino & Stylianidis, 2016). Pertanto, si può introdurre il concetto di Ciclo di Vita del Reperto (Figura 4) (Mengoni & Leopardi, 2019), passando dal ritrovamento alla conservazione all'interno di un museo e dalla digitalizzazione alla stampa 3D, considerando il reperto come un prodotto fisico che passa attraverso l'elaborazione e la conservazione digitale (Pedeli & Pulga, 2002). Ogni macro-fase del Ciclo di Vita del Reperto, divisibile in ulteriori sotto-fasi (Figura 5), può essere supportata da differenti tecnologie, come laser scanner e macchine fotografiche, strumenti CAD, software di simulazione, strumenti di calcolo, strumenti per la fruizione multisensoriale, che possono impattare in diversi modi la comprensione dell'oggetto e la trasmissione del suo valore (Belhi, Fofou, Bouras, & Sadka, 2017).

Elemento base del Prototipo Virtuale o del facsimile è il modello 3D del manufatto, al quale sono collegati tutti gli altri contenuti che sono raggruppati ordinatamente nell'Eco-Sistema del Bene Culturale. Di conseguenza, è necessario un approccio interdisciplinare per specificare i parametri del modello digitale (ad es. risoluzione, precisione, dimensione) e una procedura di reverse engineering basata sulla conservazione, restauro e uso del manufatto.

Da un'analisi svolta sullo stato dell'arte, si è potuto comprendere, che non esiste una Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi, che permetta di identificare la soluzione tecnologica più idonea per ottenere un modello che possa rappresentare a pieno il manufatto da preservare. La mancanza di una metodologia è particolarmente evidente nel caso di manufatti che, pur avendo dimensioni ridotte, presentano molti dettagli e particolari (Jamil, et al., 2018); (Mengoni & Leopardi, 2019). Infatti, a seconda dello scopo o del contesto di utilizzo del modello digitale, il suo impiego richiede un alto livello di fedeltà. Questo ovviamente influisce sulla scelta della tecnologia adottabile, e soprattutto sul livello di accuratezza che può raggiungere.



Figura 4 –Ciclo di Vita del Reperto – Macro-Fasi (Mengoni & Leopardi, 2019)

Di conseguenza, si può parlare di tipologie di modelli 3D: come supporto alla catalogazione in fase di scavo; per la creazione di una teca idonea alla conservazione ed esposizione (Levoy, et al., 2000); per il trasporto e/o l'immagazzinamento nei musei; per lo studio, il restauro e la conservazione (Arbace, et al., 2013); per la fruizione pubblica (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019). In particolare, è possibile dividere la tipologia di modello in due gruppi: modello per la fruizione pubblica e modello per lo studio e la conservazione. Quest'ultimo a sua volta distinto in: modello per il restauro, modello per la conservazione permanente e modello per lo studio (Figura 6).

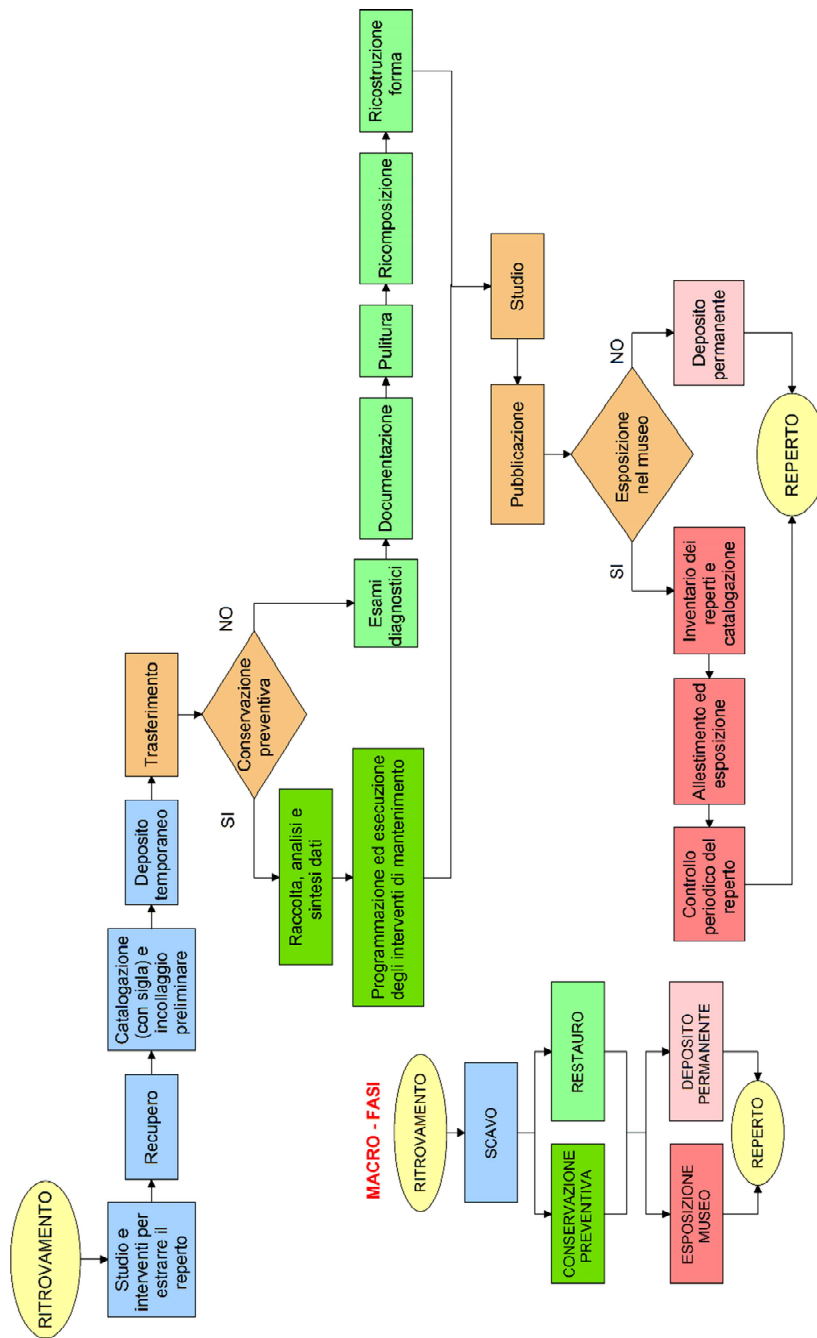


Figura 5 - Ciclo di Vita del Reperto - Schema Generale (Mengoni & Leopardi, 2019)

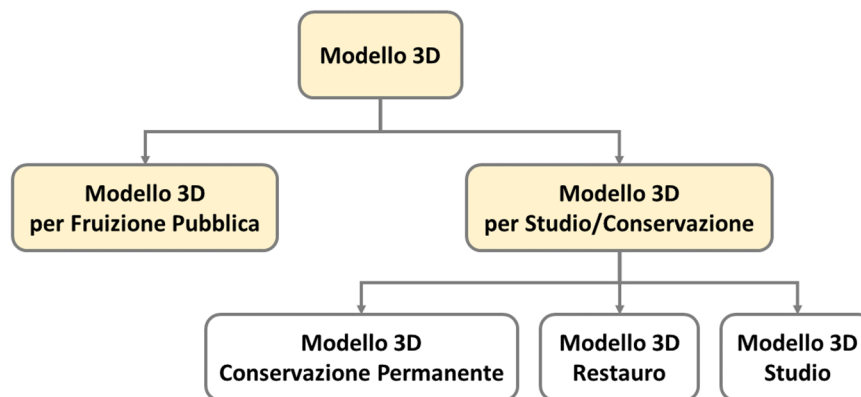


Figura 6 - Tipologie di Modelli 3D

Altro aspetto molto importante nella fase precedente alla digitalizzazione, è un'analisi qualitativa del modello 3D. Questa fase è stata già impiegata in altri studi (Cipriani, Fantini, & Bertacchi, 2017), che si basano solo su quattro parametri, che forniscono una valutazione qualitativa generale, e non specifica di quelli che sono i requisiti necessari che deve possedere il modello 3D in relazione alle specifiche degli strumenti di acquisizione e modellazione. Quindi, si è ritenuto opportuno introdurre degli strumenti che sono già ampiamente impiegati nella progettazione di un nuovo prodotto: il metodo Quality Function Deployment (QFD), un approccio orientato al cliente per l'innovazione di prodotto. Supporta i team di progettazione per sviluppare i prodotti in modo strutturato, riferendosi alla domanda del mercato attraverso: specifiche tecniche, specifiche dei pezzi e variabili del processo produttivo, e quindi alla pianificazione delle operazioni di produzione (Govers, 1996).

Conclusa questa prima parte definibile come Inquadramento, si procede con la seconda fase, quella di Digitalizzazione, in cui è fondamentale utilizzare un approccio strutturato che guidi la scelta della tecnologia di digitalizzazione, in accordo ai bisogni del modello che si vuole realizzare, ai requisiti dell'applicazione in cui si vuole impiegare (es. accuratezza e precisione) e alle caratteristiche del processo di acquisizione (es. tempo di acquisizione, tempo di post-processamento dei dati). Per procedere ad una corretta acquisizione, è necessario un Benchmark delle tecnologie, sulla base dei requisiti e bisogni emersi dalla fase di Inquadramento. Solo grazie a questo confronto e all'implementazione di una Pipeline di Acquisizione ottimale rispetto agli obiettivi della digitalizzazione, all'analisi degli applicativi software per l'elaborazione della nuvola e alla ricostruzione di un modello 3D di superfici esatte e/o approssimate in base a criteri quali interoperabilità, integrazione con altri sistemi, usabilità, efficienza del processo, è possibile selezionare una serie di tecnologie per la fase successiva di validazione e analisi.

Già dalla fase di digitalizzazione si ottengono vari modelli 3D del manufatto, ma solo grazie all'ultimo step di analisi e valutazione, è possibile verificare e validare la correttezza e fedeltà dei modelli ottenuti rispetto al Bene Storico originale. Infatti, è necessario analizzare le criticità intrinseche di ciascun modello, per selezionare quale tecnologia o combinazione di tecnologie, sia più efficace per ottenere e rispettare l'obiettivo prefissatosi all'inizio dello studio. Per svolgere questa valutazione è necessario utilizzare metriche oggettive, confronti geometrici a livello globale e confronti geometrici a livello locale, nei punti con maggiore dettaglio.

Tutti i dati raccolti insieme concorrono alla definizione della o delle tecnologie più idonee per rappresentare a pieno il Bene Storico considerato, avendo rispettato gli obiettivi prefissatisi all'inizio dello studio dello specifico manufatto in esame (Mengoni & Leopardi, 2019).

Una volta ottenuto il modello 3D o fac-simile virtuale dell'opera d'arte, la problematica che sorge è: come renderla disponibile e fruibile ad un target di utenti più ampio possibile, caratterizzato da individui con differenti background sociali e culturali, interessi, atteggiamenti, abilità fisiche e cognitive, ecc.

Pertanto, è stato ideato e definito un Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione Sensoriale per il Digital Heritage che sfrutti l'uso del Prototipo Virtuale e dei contenuti digitali ad esso associati, con lo scopo di studiare e sviluppare interfacce utente innovative, per interagire con i Prototipi Virtuali in modo da migliorare e aumentare il coinvolgimento e l'inclusione sociale degli utenti all'interno del contesto museale. Tutto questo viene realizzato anche tramite paradigmi quali ad esempio, di "learning by interacting" e/o di "gamification" finalizzati a creare un'esperienza dell'opera d'arte e/o del contesto più attraente e coinvolgente, promuovere percorsi interattivi adattabili a specifiche esigenze dei visitatori, favorire l'apprendimento dei valori culturali.

Il Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione Sensoriale proposto in questo lavoro, si divide in tre momenti, come si può vedere dalla Figura 2. In un primo momento sono analizzati, quelli che possono essere definiti i pilastri del sistema, per la costruzione del Modello di Fruizione Sensoriale: il contesto d'uso, i contenuti disponibili o da creare, il visitatore. Il risultato di questa analisi, porta alla definizione di quelli che saranno i vincoli sia nella scelta della tecnologia, che nella costruzione dell'installazione. Uno tra i rischi maggiori, in questi termini, è quello di non tenere in considerazione tutti i limiti, in termini di spazio, budget a disposizione, struttura del museo, tipologia di contenuti a disposizione o da dover realizzare, visitatori a cui ci si rivolge, sia in termini di età, di capacità fisiche e cognitive, che di contesto culturale di provenienza.

In un secondo momento, quindi, si procede con la Definizione del Modello, che consiste nella scelta della combinazione migliore di tecnologie e dei canali sensoriali che si vogliono impiegare. In questo modo, l'applicazione sviluppata risponde alle esigenze e agli obiettivi prefissatisi all'inizio del lavoro, senza perdere di vista quale è il soggetto dell'applicazione da valorizzare e fruire, le sue peculiarità, caratteristiche e punti di forza.

Come si può intuire, un ruolo centrale nel Modello di Fruizione Sensoriale, è rappresentato appunto dai canali sensoriali, in particolare dalla loro combinazione e tipologia, la motivazione risiede nel loro ruolo chiave in termini di immersione, inclusione, coinvolgimento nei confronti dei visitatori. Questi canali ricalcano in parte i cinque sensi, e sono: vista, tatto, udito, olfatto e movimento; derivano dalla classificazione delle tecnologie di Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR) basata sui sensi che attivano, secondo la teoria sostenuta da (Burdea & Coiffet, 2003).

Lo schema che si è andati a costruire in questo lavoro, prevede una divisione del Modello di Fruizione Sensoriale del Digital Heritage in due gruppi: mono-sensoriale o multisensoriale. Questa divisione è molto importante, per poter costruire un'applicazione che abbia un'efficacia in termini di impatto sul visitatore, e per facilitarne la sua costruzione in fase di ideazione.

Infatti, uno dei rischi maggiori in cui si può incorrere è l'invasione della tecnologia, che non garantisce una completa fusione dei contenuti digitali con l'ambiente fisico, per questo motivo seguire un metodo strutturato, permette di realizzare uno spazio integrato, dove digitale e reale coesistono armonicamente. Altrimenti l'effetto ottenuto non porterà ad un miglioramento in termini di fruizione del manufatto e inclusione del visitatore, anzi provocherà l'effetto contrario, in cui il visitatore attirato dalla tecnologia, viene distolto dall'ambiente museale e dal manufatto che si è andati a valorizzare.

Inoltre, per valutare se la combinazione e implementazione delle tecnologie ipotizzate utilizzando diversi canali sensoriali sia efficace, è necessario prevedere all'interno del Modello, una terza fase in cui si va svolgere una valutazione con i visitatori su vari aspetti, tramite l'uso di questionari strutturati. Gli aspetti su cui indagano i questionari sono: la Presence (PR) (Bowman & McMahan, 2007), la Visitor Experience (VX) (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016), l'Attitude Towards Experience (ATE) (Moore, 2011) e la User Experience (UX) (Cabrera, et al., 2005).

Lo studio strutturato condotto in maniera integrata e multidisciplinare dell'Eco-Sistema del Bene Culturale e l'implementazione del concetto di Prototipo Virtuale, hanno permesso di costruire un ambiente in cui il manufatto è al centro e viene valorizzato sia dal punto di vista della conservazione che della fruizione su più livelli.

La costruzione e lo sviluppo dell'intero Eco-Sistema del Bene Culturale, è stato possibile grazie all'analisi e implementazione di diversi casi studio, di cui si riporta una descrizione dettagliata nei capitoli a seguire.

Capitolo 4.

Elementi Eco-Sistema del Bene Culturale

L'Eco-Sistema del Bene Culturale, come visto nel capitolo precedente, è costituito da diversi elementi, che insieme vanno a comporre l'intero ambiente in cui il Prototipo Virtuale si trova al centro e funge da collegamento tra tutti gli elementi inseriti. Nel capitolo di seguito si riporta una descrizione dettagliata di tutti gli elementi e le metodologie appartenenti all'Eco-Sistema.

4.1 Il Prototipo Virtuale

Il Prototipo Virtuale (Figura 3), all'interno dell'Eco-Sistema del Bene Culturale, ha la funzione di anello di collegamento tra tutti gli elementi presenti nell'ambiente, al cui centro si trova il manufatto.

A differenza del modello geometrico, definito come un insieme di entità geometriche, adeguatamente strutturate, usate per descrivere gli aspetti di forma degli oggetti; il Prototipo Virtuale è un modello su calcolatore di un prodotto con tutte le caratteristiche necessarie (non solo geometriche) per concepirlo, svilupparlo, produrlo e assicurarne tutti i servizi. Quindi, si può sintetizzare il Prototipo Virtuale, come un modello geometrico arricchito di informazioni funzionali e tecnologiche. Per comprendere più facilmente la logica che è alle spalle della definizione, ci si può avvalere dello schema a piramide della Figura 7, dove troviamo alla base il modello 3D o 2D, fino ad arrivare al vertice con il Prototipo Virtuale, al quale sono linkate tutte le informazioni, quali per esempio: modello geometrico, vincoli e parametri, simulazioni...

Per ottenere il modello 3D ci si avvale di tecniche di Reverse Engineering con l'obiettivo di catturare, formalizzare e trasferire le specifiche e le informazioni relative ad un reperto in una rappresentazione capace di migliorarne la comunicazione, trasmissione e riproduzione di queste informazioni.

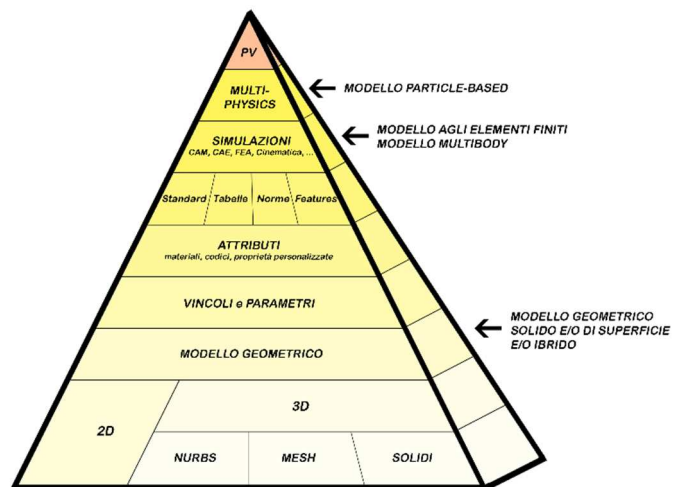


Figura 7 - Andamento Piramidale per Rappresentazione del Prototipo Virtuale

La Figura 8 rappresenta a pieno la funzione svolta dal Prototipo Virtuale nel DH, in cui una volta acquisito il modello della forma reale, è possibile ricreare differenti rappresentazioni digitali della statua: modello digitalizzato 3D, modello 3D per analisi delle curvature, modello 3D ricostruito delle parti mancanti, fino ad arrivare all'avatar 3D animato.



Figura 8 - Dall'Oggetto Fisico all'Avatar Animato Passando per il Prototipo Virtuale (Direct Dimensions Sculpture)

4.2 Il Reperto e la Sua Vita

Prima di procedere con lo sviluppo dell'Eco-Sistema, si è effettuato uno studio approfondito su tutto quello che riguarda i beni culturali, dal loro ritrovamento fino al loro stoccaggio nei magazzini dei musei o esposizione. In questo modo si è potuto comprendere quali sono le problematiche e le criticità in cui è possibile applicare le tecnologie di digitalizzazione e fruizione per portare miglioramento e innovazione.

Attraverso l'analisi dello stato dell'arte in materia di ritrovamento di reperti archeologici, restauro e conservazione (Carrubba) (Niglio, 2012) (MiBAC), è stato possibile estrapolare e schematizzare una serie di passaggi a cui il manufatto andrà incontro nel suo percorso di vita. La schematizzazione di questo percorso ha richiesto uno studio da più punti di vista, considerando reperti di qualsiasi natura, forma e materiale (Colombi, et al., 2002), nell'ottica di costruire uno schema valido per ogni tipo di manufatto, sia esso reperto archeologico, sito storico, architettura, monumento, dipinto, scultura o ceramica.

La prima scrematura del materiale raccolto ha permesso di ottenere un quadro generale di quelle che sono le fasi della pratica comune, come si può vedere nella Figura 4, in cui si individuano tre grandi momenti: scavo, conservazione preventiva o restauro, esposizione o immagazzinamento permanente; questi a loro volta sono divisibili in altre sotto-fasi, come riportato nello schema della Figura 5. La transizione tra le macro-fasi avviene tramite dei passaggi intermedi, quali: il trasferimento, la scelta della tipologia di conservazione da mettere in atto, lo studio approfondito, la pubblicazione e la scelta tra una conservazione a lungo termine o l'esposizione in un museo. Sulla base di queste decisioni, come si può vedere dallo schema generale, il percorso a cui va incontro il reperto è diverso e di conseguenza anche le tecnologie che possono fungere da supporto sono differenti. A seguito della stesura dello schema generale del Ciclo di Vita del Reperto, è stata effettuata un'ulteriore integrazione andando nel dettaglio delle singole operazioni, costruendo uno schema guida, per permettere una maggiore integrazione e semplicità di comunicazione tra esperti del settore dei Beni Culturali ed esperti del settore delle tecnologie di Digitalizzazione e Fruizione (Figura 9).

Nelle Figura 85, Figura 86, Figura 87, presenti in Appendice, è riportato il dettaglio dello schema in Figura 9.

4.3 Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi

Una volta ottenuto un quadro completo del Reperto che si sta andando ad analizzare, si entra all'interno del meccanismo dell'Eco-Sistema del Bene Storico, sviluppato per questo lavoro di ricerca. In particolare, si approccia quello che può essere definito come passaggio primario per la costruzione del sistema: la creazione del modello 3D, base per il Prototipo Virtuale. Per realizzare il modello 3D, come già anticipato nel capitolo della descrizione dell'Eco-Sistema, sono necessarie tecnologie e tecniche di digitalizzazione opportunamente selezionate nella vasta gamma di strumenti e procedure a disposizione sul mercato, il cui utilizzo è consolidato da tempo (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001).

Figura 9 – Ciclo di Vita del Reperto - Schema Detagliato

Ciclo di vita del reperto	CICLO DI VITA DEL REPERTO															FOTO	PROFESSIONI	LIVELLO ORGANIZZATIVO (CONFRONTO CON LE ATTIVITÀ)	DESCRIZIONE ATTIVITÀ	REQUISITI FORMATIVI	REQUISITI PROFESSIONALI							
	SCAD					INFORMAZIONE	REPERTELLA					PROF.	LIVELLO	DESCRIZIONE ATTIVITÀ	REQUISITI FORMATIVI							REQUISITI PROFESSIONALI						
	SCAD	SCAD	SCAD	SCAD	SCAD		REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA												REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA	REPERTELLA
<p>DESCRIZIONE ATTIVITÀ</p> <p>Attività di natura tecnica e operativa, svolta in modo organizzato e sistematico, che richiede l'acquisizione di conoscenze specifiche e l'addebi- tamento di competenze professionali, per consentire l'individuazione, l'analisi, l'elaborazione e la comunicazione di informazioni. Le attività sono svolte in modo sistematico e organizzato, con l'obiettivo di individuare, analizzare e comunicare informazioni. Le attività sono svolte in modo sistematico e organizzato, con l'obiettivo di individuare, analizzare e comunicare informazioni.</p>																												
<p>CONSIDERAZIONI PRESENTATI</p> <p>Le attività sono svolte in modo sistematico e organizzato, con l'obiettivo di individuare, analizzare e comunicare informazioni.</p>																												

* Il presente regolamento non si applica alle attività svolte nei centri di servizio ai cittadini, alle attività di natura tecnica e operativa, alle attività di natura amministrativa e di supporto, alle attività di natura formativa e di ricerca, alle attività di natura culturale e di promozione del territorio.

* Per informazioni sui corsi di studio e sui requisiti di accesso, si consiglia di consultare il sito internet dell'Ente di appartenenza.

Prima di tutto quindi, è necessario svolgere quello che si può definire, inquadramento del caso studio che si va ad affrontare, successivamente si procede con la fase di digitalizzazione vera e propria e quindi si conclude con la valutazione e analisi dei modelli ottenuti, per validare il risultato digitale rispetto al manufatto vero oggetto dello studio (Figura 10). Nei paragrafi seguenti si riporta una descrizione dettagliata delle singole fasi.

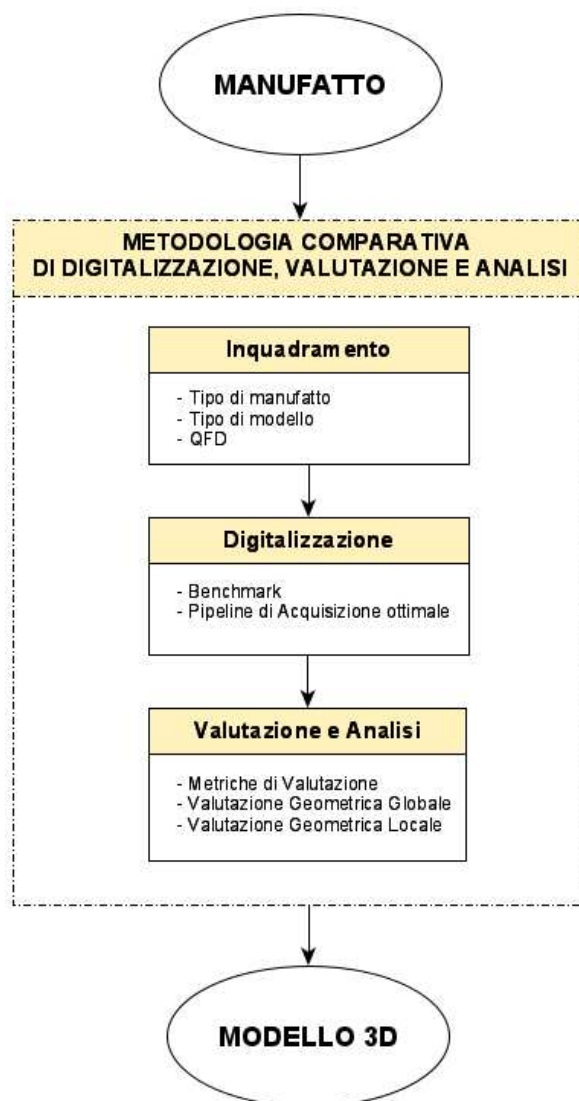


Figura 10 – Schema: Metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi

4.3.1 Inquadramento del Caso Studio

La selezione di una tecnologia rispetto ad un'altra dipende da vari fattori, come: caratteristiche del rilievo, forma dell'oggetto, posizione nello spazio, tipo di materiale con cui è realizzato, condizioni logistiche del contesto in cui si trova, dimensione del reperto e dallo scopo per cui si va a realizzare il modello 3D. Infatti, come anticipato precedentemente, il modello 3D può avere diversi obiettivi: ausilio alla catalogazione in fase di scavo; creazione di un contenitore idoneo per il trasporto e mostra; simulazione del trasporto; stoccaggio nei musei; studio (Bici, Campana, Colacicchi, & D'Ercoli, 2018), restauro e conservazione (Arbace, et al., 2013); fruizione pubblica (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).

Inoltre, ci sono dei requisiti come: accuratezza, precisione, colore, scala e costo, che hanno priorità diverse a seconda del tipo di modello (Cipriani, Fantini, & Bertacchi, 2017) (Mengoni & Leopardi, 2019). Nella Tabella 1 è riportato il peso di ogni requisito, per le varie tipologie di modello 3D considerate in questo studio: modello 3D per la fruizione pubblica, modello 3D per lo studio/conservazione, che a sua volta si divide in modello per il restauro, immagazzinamento e per lo studio.

Tabella 1 - Requisiti per Differenti Tipi di Modelli 3D (Mengoni & Leopardi, 2019).

Requisiti	Modello 3D Fruizione Pubblica	Modello 3D per Studio/Conservazione		
		Restauro	Immagazzinamento	Studio
Accuratezza	3	9	9	9
Precisione	3	9	3	9
Scala*	3	9	3	9
Colore	9	3	3	9
Costo (fattore)**	9	0	3	3
Fedeltà Visiva	9	3	3	3
Resa Visiva	9	3	3	3
Valore: 0 non importante; 3 importante; 9 molto importante				
* Scala rispetto all'oggetto reale				
** Incidenza del fattore costo nella realizzazione del lavoro				

I requisiti sopra elencati, oltre all'importanza che hanno per il tipo di modello, costituiscono la base del confronto tra le tecnologie di digitalizzazione, che inizia già dalla fase di inquadramento del caso studio. Entrando nel dettaglio, oltre a questi requisiti basilari, ce ne sono altri ancora più specifici strettamente collegati alla tipologia di modello, che devono essere messi in relazione alle specifiche degli strumenti impiegati. Per effettuare questa ulteriore analisi ci si avvale, come già riportato in precedenza, dell'approccio metodologico definito Quality Function Deployment (QFD) (Govers, 1996). Questo approccio è stato

introdotto e specificato per i due tipi di modello 3D. La Tabella 2 riporta lo schema del QFD specificando i requisiti del modello 3D nei casi di fruizione nei musei, mentre la Tabella 3 riporta l'analisi degli stessi requisiti per il modello 3D per lo studio/conservazione. In questo studio è stata utilizzata solo una parte della Casa della Qualità, facente parte dell'approccio QFD, quella che viene definita matrice delle relazioni, in cui i requisiti del modello 3D sono riportati nelle righe, mentre nelle colonne sono riportate le specifiche tecniche degli strumenti di acquisizione e modellazione. I requisiti comprendono i principali aspetti che devono essere presi in considerazione durante l'analisi di un modello. Alcuni requisiti sono strettamente correlati alla coerenza del modello con l'oggetto analizzato, ad esempio, scala reale, fedeltà, colore e livello di dettaglio.

Tabella 2 - Schema QFD per Specificare i Requisiti del Modello 3D nei Casi di Fruizione. (Mengoni & Leopardi, 2019)

	Specifiche Tecniche degli Strumenti di Acquisizione, Modellazione	Requisiti Modello 3D per la Fruizione Pubblica	Importanza del Requisito	Importanza del Requisito %	1	2	3	4	5	6	7	8	Totale Assegnato (righe)	Tecnologia	
					Accuratezza (X e Y)	Precisione (Z)	Risoluzione (Mpx)	Volume di Acquisizione	Distanza di Acquisizione	Illuminazione	Tempo di Acquisizione	Tempo di Processamento		Laser Scanner	Fotogrammetria
1	Dimensione del File	1	3.7	3	3	5	5						16	3	1
2	Scala Reale	3	11.1	5	5	5		3					18	5	1
3	Fedeltà	4	14.8	5	5	1							11	5	3
4	Colore	5	18.5			3			5				8	1	5
5	Costo	3	11.1				3			5	5		13	5	3
6	Livello di Dettaglio	4	14.8	5	5	5	3	3					21	5	3
7	Tempo di Realizzazione	3	11.1				5			5	5		15	5	5
8	Consistenza della Procedura	4	14.8					3	3	5	5		16	5	4
Totale		27	100										118		

Altri si riferiscono al modello digitale, ad esempio, la dimensione del file, il colore e la coerenza della procedura. Invece, nelle colonne sono riportati i parametri tecnici da considerare in relazione ai requisiti.

Nella matrice, si inseriscono le intensità di correlazione tra i requisiti e le caratteristiche degli strumenti, cercando di assegnare un valore alla relazione tramite una scala numerica: 1 relazione debole, 3 relazione media e 5 relazione forte.

Nella Tabella 2 e nella Tabella 3 si riporta inoltre, un esempio di benchmark delle tecnologie in termini di qualità attesa rispetto ai requisiti di modello.

Tabella 3 - Schema QFD per Specificare i Requisiti del Modello 3D in Caso di Restauro e Conservazione. (Mengoni & Leopardi, 2019)

Specifiche Tecniche degli Strumenti, Acquisizione, Modellazione		Importanza del Requisito	Importanza del Requisito %	1	2	3	4	5	6	7	8	Totale Assegnato (righe)	Tecnologia	
				Accuratezza (X e Y)	Precisione (Z)	Risoluzione (Mpx)	Volume di Acquisizione	Distanza di Acquisizione	Illuminazione	Tempo di Acquisizione	Tempo di Processamento		Laser Scanner	Fotogrammetria
Requisiti Modello 3D per Studio/Conservazione														
1	Dimensione del File	3	10.0	3	3	5	5					16	3	1
2	Scala Reale	5	16.7	5	5	5		3				18	5	1
3	Fedeltà	5	16.7	5	5	1						11	5	3
4	Colore	2	6.7			3			5			8	1	5
5	Costo	2	6.7				3			5	5	13	5	3
6	Livello di Dettaglio	5	16.7	5	5	5	3	3				21	5	3
7	Tempo di Realizzazione	3	10.0				5			5	5	15	5	5
8	Consistenza della Procedura	5	16.7					3	3	5	5	16	5	4
Totale		30	100									118		

4.3.2 Digitalizzazione

Conclusa la fase di inquadramento del caso studio, si dispone di tutte le informazioni necessarie per procedere alla fase successiva di digitalizzazione del reperto. Questa fase, punto cardine di tutto l'Eco-Sistema del Bene Culturale, è di fondamentale importanza, e richiede un'attenzione particolare.

Il concetto di digitalizzazione, soprattutto nell'ambito dei beni culturali, in cui lo scopo è quello di andare a riprodurre in digitale o digitalizzare un oggetto reale, si innesta all'interno della pratica che viene chiamata "Reverse Engineering" o "Ingegneria Inversa". Infatti, il processo di Reverse Engineering consente la ricostruzione di un modello 3D digitale a partire da un oggetto reale o da una sua parte. È definita come "Time Compression Technique" (TCT) che permette di ottenere un modello geometrico solido o di superficie a partire dall'elaborazione di un dataset di punti acquisiti mediante diverse tecnologie di scansione 3D (Varady, Martin, & Cox, 1997). Il metodo prende avvio dalla digitalizzazione e dalla misurazione delle coordinate dei punti appartenenti alla superficie di un oggetto, e prosegue con la traduzione della nuvola di punti acquisiti, in un modello geometrico CAD-based (Computer-Aided Design), attraverso diverse tecniche scelte in funzione della sua geometria (Figura 11).

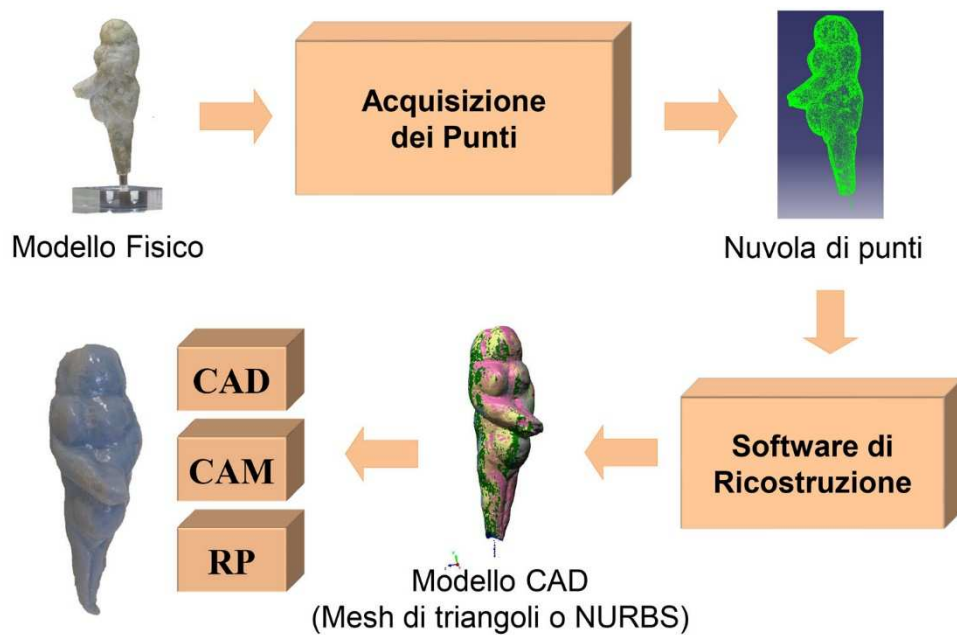


Figura 11 - Processo di Reverse Engineering

Concettualmente si oppone all'Ingegneria Diretta, che tradizionalmente prende avvio dall'elaborazione di un modello CAD per ottenere un oggetto, prototipo, manufatto fisico. Tra i settori in cui è maggiormente applicato questo processo, troviamo appunto il settore dei Beni Culturali (Figura 12), soprattutto in funzione dello studio delle forme dei reperti (Levoy, et al., 2000) e del restauro (Arbace, et al., 2013) (Armesto-González, Riveiro-Rodríguez, González-Aguilera, & Rivas-Brea, 2010). Successivamente si procede con lo studio delle tecnologie di acquisizione, andando a svolgere una selezione tra quelle disponibili sul mercato, come riportato nello schema di Figura 1.

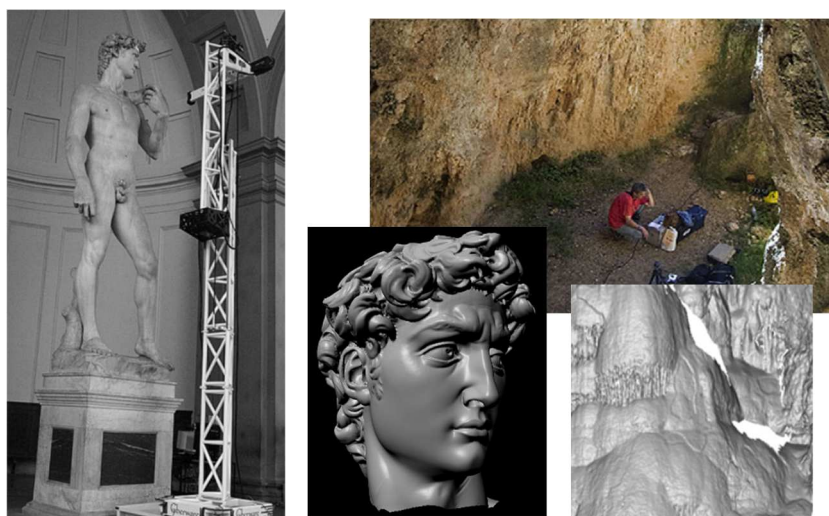


Figura 12 - Esempio di Casi Studio di Tecniche di Reverse Engineering nel Settore dei Beni Culturali

Solitamente, in funzione delle criticità proprie del settore, come: non invasività delle tecniche di scansione, problematiche di riflettività delle superfici lapidee e metalliche, scala del particolare e dell'insieme, ecc., si prediligono tecniche di acquisizione ottica. Per ottenere un buon risultato, conforme alle specifiche iniziali e in base anche alle informazioni raccolte fino a questo punto, la metodologia sviluppata prevede una fase di benchmark delle tecnologie selezionate fino a questo punto del processo. Il benchmark insieme alla pipeline di acquisizione, permette il confronto di diverse tecnologie sulla base dei requisiti in precedenza definiti, attraverso la costruzione di matrici 3D, in cui sono presenti tecnologie, bisogni e fasi tecniche (Figura 13). Vista l'importanza, all'interno della metodologia di comparazione, della Pipeline di Acquisizione, in relazione anche alla funzione combinata con il benchmark delle tecnologie, è fondamentale strutturarla in una forma più generale possibile e applicabile indipendentemente, sia dalla tecnologia che si utilizza, sia dal manufatto che si analizza.

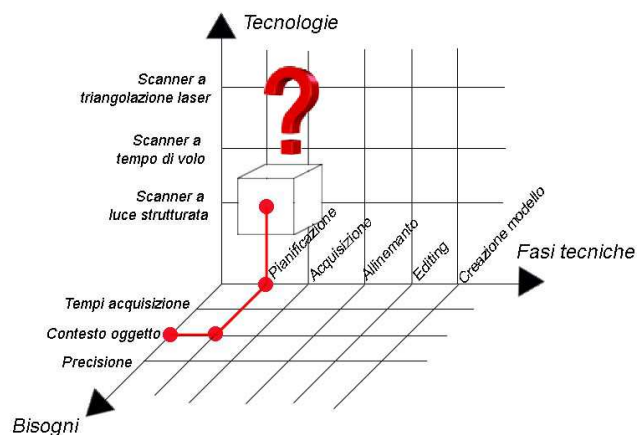


Figura 13 – Confronto di Diverse Tecnologie: Matrice 3D dei Bisogni, Tecnologie e Fasi Tecniche

In letteratura, si possono trovare diversi esempi di Pipeline di Acquisizione (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001); (Bayram, et al., 2015); (Bernardini & Rushmeier, 2002), dai quali si è preso spunto, per realizzare una Pipeline generale che permetta l'integrazione di diverse tecnologie, anche in scala differente, per ottenere un risultato più completo possibile. Nello schema di Figura 14 è riportata la pipeline di acquisizione ottimizzata per l'uso all'interno dell'Eco-Sistema del Bene Culturale. È costituita da otto step, di cui si riporta una breve descrizione.

- Step 1. Pianificazione della campagna di acquisizione: consiste nell'organizzazione del lavoro da svolgere nella fase di acquisizione, in parte dipende dal tipo di strumento di scansione, ma soprattutto dalle caratteristiche morfologiche dell'oggetto da scansionare. Con questa attività si ottimizza il tempo di acquisizione e la copertura della superficie dell'oggetto.
- Step 2. Acquisizione: costituisce il punto di partenza di tutto il processo. Lo scanner emette un fascio laser, dove questo incontra la superficie dell'oggetto registra una serie di punti in coordinate x, y, z. Nel caso di oggetti di piccole dimensioni o con superfici piane estese, può essere utile posizionare nel campo di acquisizione altri oggetti che presentano spigoli (es. dado, pezzi di scacchi), oppure dei target, che faciliteranno la fase di allineamento. I dati acquisiti, adeguatamente elaborati, vengono registrati in un file di testo in formato ASCII. Quest'ultimo contiene le coordinate di tutti i punti registrati, ogni sua riga contiene le tre coordinate spaziali del generico punto (prima la coordinata x, poi la y ed infine la z). L'insieme di questi punti forma la nuvola, che è l'input per le successive fasi. I punti all'interno del file possono essere più o meno disposti in maniera casuale. La possibilità di disporre di dati già ordinati porta ad una diminuzione del tempo di calcolo nelle fasi successive.

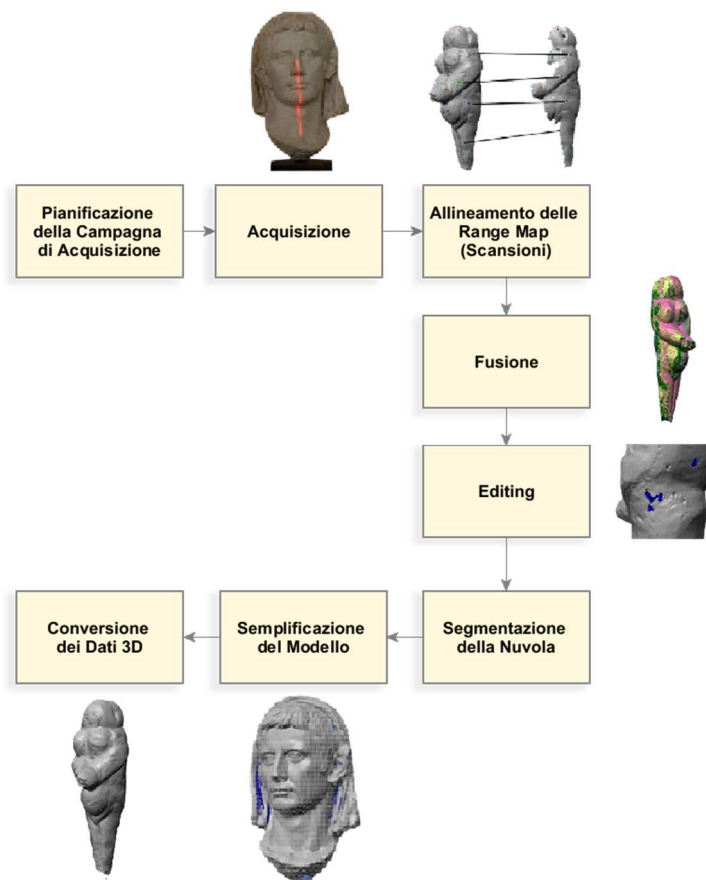


Figura 14 - Pipeline di Acquisizione

- Step 3. Allineamento delle Range Map (scansioni): ogni scansione (nuvola) si trova in un sistema di coordinate che è riferito al dispositivo di acquisizione (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001). Ci sono due fasi da svolgere: un primo allineamento manuale, tramite la selezione di almeno tre coppie di punti corrispondenti oppure target (riferimenti); una seconda fase successiva alla precedente di allineamento automatico, in cui grazie all'utilizzo di un algoritmo di calcolo, che varia in base al software, le scansioni vengono allineate andando a minimizzare la distanza tra i punti appartenenti a nuvole diverse (Bernardini & Rushmeier, 2002). Questa è la prima fase operativa, ed è la più costosa in termini di tempo di elaborazione.
- Step 4. Fusione: prima di unire le scansioni in un'unica nuvola, si devono ridurre le sovrapposizioni tra le acquisizioni riducendo in questo modo il numero di punti.

Successivamente vengono unite le scansioni formando un'unica superficie triangolata (Bernardini & Rushmeier, 2002).

- Step 5. Editing: vengono eliminati tutti gli elementi che non fanno parte dell'oggetto da scansionare, le piccole anomalie topologiche, i buchi, le imperfezioni, il rumore (triangoli allungati) ecc. Questa fase può essere fatta anche al termine dell'allineamento di tutte le scansioni.
- Step 6. Segmentazione della Nuvola: per agevolare le successive fasi di post-processing e di ricostruzione di superfici, si suddivide nuovamente l'intera nuvola in sottoinsiemi differenti.
- Step 7. Semplificazione del Modello: spesso l'acquisizione completa restituisce un modello sovra-campionato, che è bene andare a ridurre.
- Step 8. Conversione dei dati 3D: si crea un file di tipo STL o altro formato per poterlo convertire con software appositi in un modello triangolato di superficie (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001).

4.3.3 Valutazione e Analisi

Ultimo passo della metodologia comparativa di digitalizzazione, validazione e analisi, è appunto la metodologia di valutazione e analisi, come riportato nella Figura 15 (Mengoni & Leopardi, 2019). La metodologia si articola in 6 fasi, che tengono conto di diversi aspetti, sia di carattere estetico che geometrico, a livello macroscopico e microscopico.

Come si vede dallo schema, il primo step integra i risultati delle precedenti fasi descritte nei paragrafi 4.3.1 e 4.3.2, queste comprendono la selezione delle tecnologie più adatte al campo di applicazione, a seconda del soggetto da acquisire e del tipo di risultati da raggiungere. Infatti, non tutte le tecnologie di scansione disponibili sono adatte a tutti i casi, per questo motivo è imperativo un benchmark preliminare, anche in relazione al reperto, compresi il materiale, le dimensioni e la topologia.

La seconda fase prevede la digitalizzazione del manufatto con le tecnologie selezionate (due o tre) e l'applicazione della pipeline di acquisizione per ottenere i modelli 3D.

Il terzo passo riguarda la definizione di un insieme di metriche di valutazione utilizzate per il confronto delle prestazioni delle tecnologie selezionate e dei risultati della digitalizzazione. Le metriche di valutazione considerate sono le seguenti: tempi di acquisizione e di elaborazione, numero di scansioni necessarie per coprire la superficie dell'oggetto, le fasi della pipeline di elaborazione e i relativi tempi. Altre metriche potrebbero essere l'accuratezza dei modelli, le unità di misura dei modelli 3D e la percentuale della superficie coperta dell'oggetto.

La quarta fase prevede l'allineamento dei modelli e il confronto geometrico; questa fase comprende un confronto geometrico macroscopico generale e l'analisi delle deviazioni ottenute. Si tratta di un punto critico della metodologia di valutazione e analisi. In primo luogo, si inizia imponendo un valore di deviazione massima di 1 mm per trovare il valore di deviazione massima effettiva. Successivamente devono essere verificati altri valori via via inferiori di deviazione massima consentita, fino ad arrivare ad un punto in cui il valore selezionato non è più rappresentativo del confronto tra i modelli, in quanto i valori di

deviazione presenti sono in buona parte superiori al limite che si è imposto. Anche in questo caso è previsto un controllo attraverso l'ausilio delle mappe colorate, per comprendere meglio le differenze tra i modelli 3D analizzati.

A seguito dei casi studio analizzati, di cui si discuterà in seguito in questa trattazione, si è compreso che, nel caso particolare di reperti di piccole dimensioni, l'analisi della deviazione, si deve concentrare su aree in cui ci sono dettagli per i quali la deviazione massima accettabile dovrebbe essere significativamente ridotta. Quindi è necessario individuare, in questa fase, le aree del modello per le quali si deve condurre un'analisi più dettagliata.

Per quanto riguarda la visualizzazione dei risultati tramite l'ausilio delle mappe colorate, bisogna fare molta attenzione, perché è corretto ritenere che i risultati mostrati in questo modo sono molto utili in quanto più intuitivi; tuttavia, i valori numerici non devono essere mai trascurati, per non incorrere in errori.

La quinta fase riguarda la valutazione geometrica locale, eseguita su sezioni trasversali, focalizzandosi nelle aree di dettaglio, selezionate dallo step precedente. Le sezioni trasversali devono essere eseguite ogni 1 mm verticalmente e orizzontalmente in modo da intersecare i punti di maggiore interesse da selezionare. In ogni sezione trasversale, la distanza tra i profili generati viene confrontata, sempre con l'aiuto delle mappe colorate in un primo momento, per passare poi all'estrapolazione dei valori della deviazione lungo la sezione creata. Inoltre, parte della quinta fase, è anche la costruzione di sezioni locali per formare una griglia nelle aree con dettagli significativi. La griglia è costituita da sezioni trasversali verticali e orizzontali ogni 0,25 mm. A questo punto si procede all'estrazione del valore della deviazione massima individuata allo stesso modo della fase precedente.

Il sesto e ultimo passo consiste nella definizione di una procedura di digitalizzazione, modifica e validazione ripetibile da applicare con tutte le tecnologie di scansione 3D analizzate (due o più), o nella scelta della migliore tecnologia tra quelle messe a confronto, avendo come obiettivo primario quello di garantire l'affidabilità dei risultati ottenuti. Nei capitoli successivi, si riporta una descrizione dettagliata dei casi studio che hanno permesso di costruire e validare la metodologia, e dei risultati ottenuti.

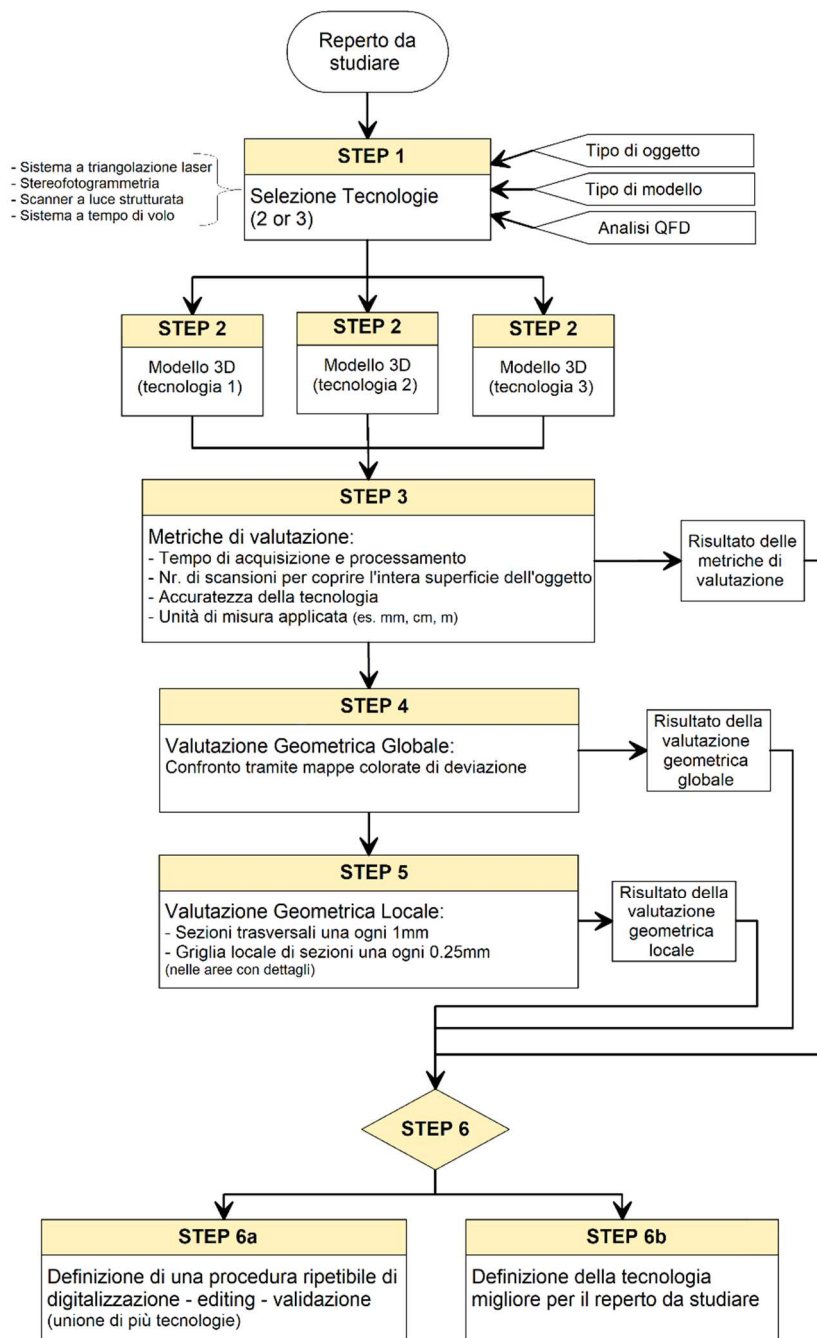


Figura 15 – Metodologia di Valutazione e Analisi (Mengoni & Leopardi, 2019)

4.4 Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione per il Digital Heritage

Dalla fase precedente, si ottiene il modello 3D o fac-simile del reperto studiato, insieme ad una serie di informazioni riguardanti la sua forma, geometria, dettagli, e altre analisi effettuate. Tutte queste informazioni possono essere raccolte e conservate all'interno del Prototipo Virtuale, e allo stesso modo, tramite lo stesso prototipo, possono essere fruite. La problematica che sorge è: come renderle disponibili e fruibili ad un target di utenti più ampio possibile, creando una sensazione di immersione e inclusione all'interno dello spazio reale o virtuale ricreato. Per risolvere questa problematica, ci si può avvalere di paradigmi quali di "learning by interacting" e/o di "gamification", finalizzati a creare un'esperienza dell'opera d'arte.

Il Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione per il Digital Heritage sviluppato in questo lavoro (Figura 16), si compone di tre fasi: analisi del contesto d'uso, dei contenuti disponibili e dei visitatori, per stilare una serie di vincoli ai quali il sistema deve sottostare, poi successivamente la fase di creazione e implementazione dell'applicazione tramite quello che è stato definito Modello di Fruizione Sensoriale, infine una fase di valutazione dell'installazione tramite l'utilizzo di questionari validati e ottimizzati per l'ambito dei Beni Culturali. Nei paragrafi seguenti si riporta una descrizione dettagliata delle singole fasi.

4.4.1 Analisi del Contesto d'Uso, Contenuti, Visitatori

Come nella fase di digitalizzazione e analisi, anche quando si parla di Fruizione del modello 3D del reperto, è fondamentale svolgere un inquadramento da più punti di vista. Prima di tutto si deve analizzare quello che è il contesto d'uso, cioè il museo. Le tipologie di museo sono varie, per esempio: museo archeologico, palazzo storico, pinacoteca, museo di arte moderna, mostra temporanea; ognuno con una varietà di manufatti conservati, che quindi comporta uno studio e l'implementazione di tecnologie diverse, che meglio si adattino. Altro aspetto sempre riguardante il contesto d'uso, è un'analisi degli spazi messi a disposizione, su cui deve integrarsi l'installazione tecnologica. I casi da considerare possono essere vari, basti pensare ad un'applicazione di tipo diffuso all'interno dell'intero museo, oppure in un sito archeologico all'esterno, oppure per un reperto di particolare valore in una sala. Di conseguenza variando la scala di applicazione, anche le tecnologie che meglio si prestano variano, infatti, come accade per le tecnologie di digitalizzazione, non tutte le tecnologie di fruizione si adattano ai vari spazi. Soprattutto in un'ottica di inclusione della tecnologia nell'ambiente che la circonda, di mobilità dei visitatori all'interno del museo e di invasività della tecnologia nei confronti dei visitatori stessi, è molto importante aver ben presente i limiti imposti in partenza dal museo.

Un altro aspetto che solitamente frena la diffusione delle tecnologie, nonostante molti affermino che porti a notevoli incrementi sia in termini di conservazione che di fruizione (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001), è il fattore Budget e costi da sostenere (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017), per realizzare un'applicazione. A questo aspetto solitamente viene data troppa importanza, anche perché cominciano a diffondersi tecnologie di

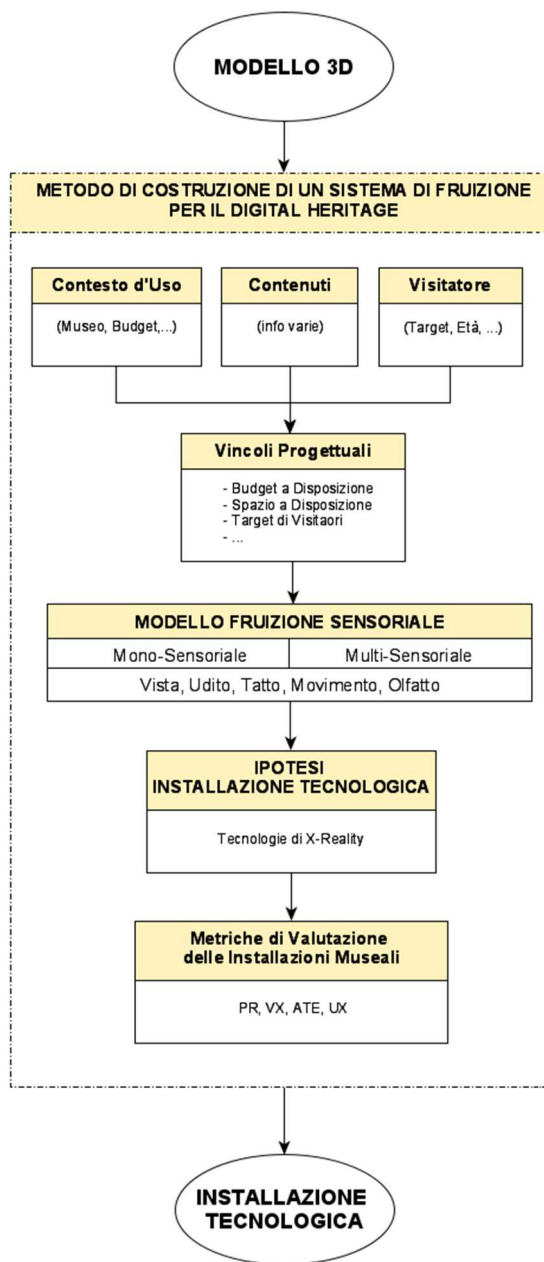


Figura 16 - Schema: Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione per il Digital Heritage

X-Reality anche a basso costo, pur permettendo di ottenere dei risultati soddisfacenti. Resta comunque il fatto, che il fattore costo è uno di quegli aspetti che non possono essere trascurati per la buona riuscita dell'applicazione.

Altri aspetti che fanno sempre parte del contesto d'uso sono: accessibilità e usabilità dei sistemi, accettazione da parte degli utenti, qualità dell'esperienza sensoriale, e così via. In particolare, questi ultimi sono anche determinati dal terzo fondamento a cui ci si deve riferire in questa fase di inquadramento: il visitatore. Le informazioni da considerare in questo caso sono varie, prima di tutto l'età media al quale si vuole indirizzare preferenzialmente l'applicazione che si sta andando a realizzare. Basti pensare alle scolaresche di bambini, che spesso sono in visita nei musei, per i quali si devono utilizzare canali comunicativi più ludici e coinvolgenti, rispetto ad un visitatore adulto, per il quale è adatta una comunicazione basata più su aspetti informativi storici. Inoltre, si devono considerare anche aspetti quali, caratteristiche socio-culturali e fisiche, come la presenza di handicap o meno. In quest'ultimo caso, la tecnologia svolge veramente un ruolo fondamentale, come anche dimostrano diversi studi (Mengoni, Raponi, & Ceccacci, 2016), perché permette di supportare il visitatore.

Infine, si deve procedere con la raccolta e analisi dei contenuti e informazioni già presenti, per avere un quadro generale su ciò che si ha disposizione e su ciò che manca, che perciò deve essere integrato o creato da nuovo. Ad esempio, ponendo l'attenzione sull'età del visitatore, spesso mancano installazioni per bambini, per i quali la trasmissione dei contenuti deve avere una connotazione molto diversa. In questo contesto intervengono quelle che sono definite Tecniche di Storytelling (Palombini, 2017); (Carrozzino, Colombo, Tecchia, Evangelista, & Bergamasco, 2018), paradigmi di "Learning by Interacting" (Pallud, 2017) e/o di "Gamification" (Shirai, Kose, Minobe, & Kimura, 2015); (Hammady, Ma, & Temple, 2016), che aiutano nell'elaborazione delle informazioni.

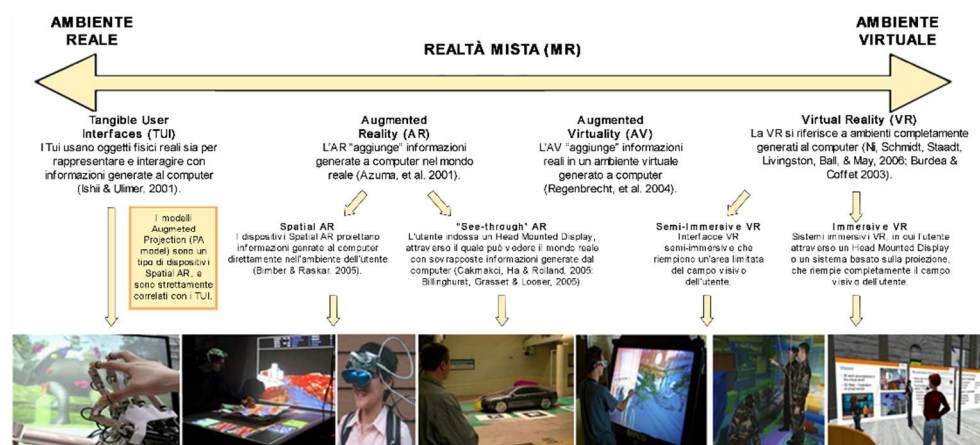


Figura 17 - Milgram Continuum

Tutti i risultati vengono raccolti insieme e vanno a formare i vincoli dell'applicazione, che insieme ai contenuti disponibili e alle informazioni, sono gli input e le linee guida per la fase successiva, che consiste nel Modello di Fruizione Sensoriale.

4.4.2 Modello di Fruizione Sensoriale: Mono-Sensoriale e Multisensoriale

Il Modello di Fruizione Sensoriale raccoglie al suo interno tutte le operazioni necessarie per costruire l'Installazione tecnologica con l'obiettivo di valorizzare il reperto, qualsiasi sia la sua natura, dimensione, importanza. Questo comprende tutti i passi che bisogna svolgere, dalla scelta del tipo di realtà secondo quanto propone nella sua classificazione (Milgram & Kishino, 1994), alla selezione delle tecnologie e sistemi di input/output, fino alla costruzione vera dell'applicazione ed ai test strutturati con gli utenti, per valutarne l'efficacia in termini di Presence, User Experience, Attitude Towards Experience e Visitor Experience.

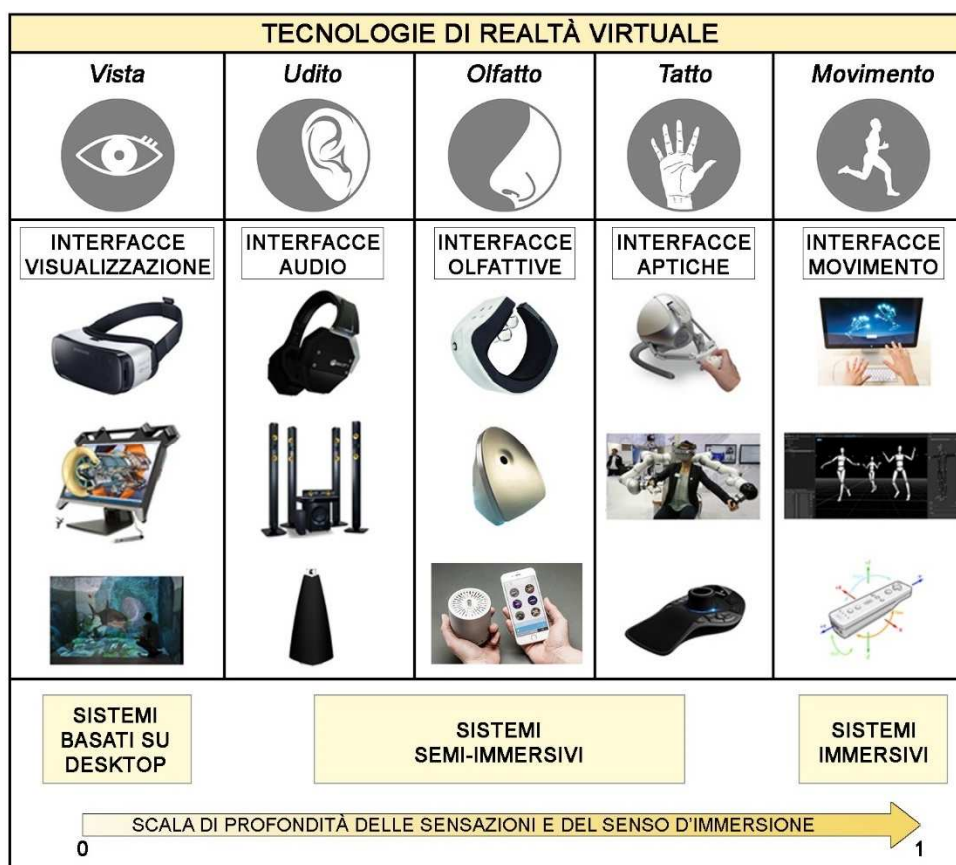


Figura 18 – Tecnologie di Realtà Virtuale

La prima scelta da fare, che si pone alla base del Modello di Fruizione, è la tipologia di realtà in cui si vuole operare: realtà aumentata (AR), realtà mista (MR) o realtà virtuale (VR), riassumendo quanto definito da (Milgram & Kishino, 1994) nel suo schema, che si riporta in Figura 17.

Partendo dalla definizione di (Burdea & Coiffet, 2003) della realtà virtuale, come: “is a high-end user-computer interface that involves real time simulation and interactions through multiple sensorial channels. These sensorial modalities are visual, auditory, tactile, smell and taste.”, si possono classificare le tecnologie di realtà virtuale in funzione delle modalità sensoriali che vengono attivate durante l’interazione con il Prototipo Virtuale (Figura 18). In particolare, si parla di Interfacce di visualizzazione o “Visual display” per intendere tutti i dispositivi di visualizzazione dei contenuti digitali; Interfacce audio o “Sound display” per tutti gli strumenti necessari alla riproduzione di suoni; Interfacce aptiche o “Haptic display” i dispositivi capaci di riprodurre alcune proprietà tattili degli oggetti, ossia contatto, peso, rugosità; Interfacce Olfattive o “Olfactory display” quei dispositivi che stimolano il senso dell’olfatto attraverso l’emissione di profumi, aromi ed odori; Interfacce di movimento o “Motion Interfaces” comprendono diversi dispositivi di manipolazione dei prototipi virtuali e di interfacciamento tra reale e virtuale in modo da poter riprodurre il senso del movimento (Raponi, 2016). Questa classificazione è fondamentale per correlare i bisogni scaturiti dall’analisi svolta nella prima fase, rispetto alle tecnologie e ambienti a disposizione.

Se invece si tiene conto del sistema di interazione uomo-computer, le tecnologie possono essere classificate in: Dispositivi di Input, Dispositivi di Output, Hardware di elaborazione e Strumenti Software, come viene riportato nello schema di Figura 19.

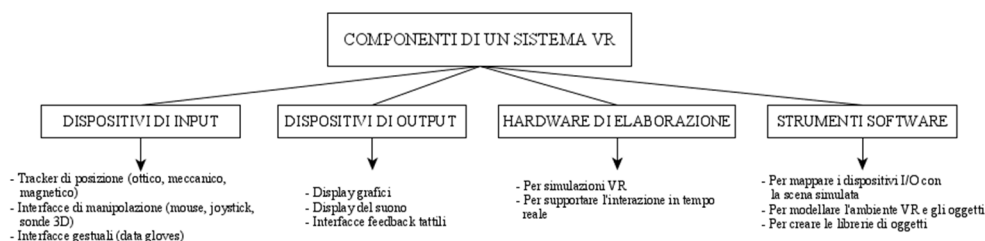


Figura 19 - Componenti Sistema VR (Raponi, 2016)

Combinando i componenti dei quattro sensi definiti o gli I/O display, gli ambienti VR possono essere classificati in tre categorie, che tengono conto della complessità dell’interazione uomo-macchina, del grado di presenza ed immersione raggiunto e della profondità delle sensazioni provate dall’utente: Sistemi desktop o non immersivi, Sistemi semi – immersivi e Sistemi immersivi (per una descrizione dettagliata vedere paragrafo 2.2.1).

Fatta questa premessa, seguendo lo schema riportato in Figura 20, si delinea il quadro completo sia a livello concettuale che tecnologico, che comprende la selezione dei canali sensoriali, della X-Reality in cui si vuole operare e degli strumenti di input/output più idonei.

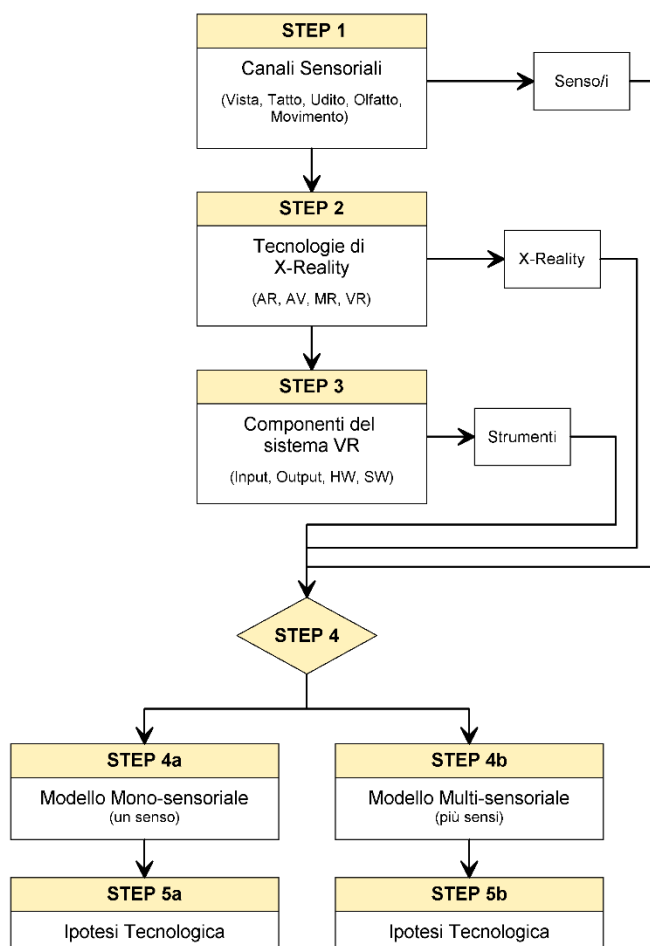


Figura 20 – Schema Modello di Fruizione Sensoriale

Entrando nel dettaglio, si deve distinguere il caso in cui il Modello di Fruizione Sensoriale presenti un unico canale sensoriale, quale per esempio la vista, uno dei sensi maggiormente adottati all'interno di applicazioni museali già implementate nella pratica comune (He, Wu, & Li, 2018); oppure il caso in cui si combinino canali sensoriali insieme, come per esempio vista e udito o tatto e udito.

Si ottiene quella che è l'ipotesi di installazione tecnologica, da inserire all'interno del contesto museale per la quale si è svolto lo studio. Questa installazione, in entrambi gli scenari sia Mono-sensoriale sia Multi-sensoriale, deve essere valutata per verificarne l'efficacia sotto diversi aspetti, quali l'immersione e l'inclusione del visitatore all'interno dell'ambiente ricreato, sia esso completamente virtuale o in parte. La valutazione che viene svolta è finalizzata alla comprensione dell'efficacia dell'installazione tecnologica, per capire se siano necessarie delle modifiche per migliorarla.

4.4.3 Metriche di Valutazione delle Installazioni Museali

È evidente, come anticipato nel paragrafo precedente, che prima di poter permettere la fruizione pubblica di un'installazione, questa debba essere valutata, per questo motivo sono stati sviluppati dei questionari, opportunamente modificati per il settore particolare a cui ci si rivolge, quello dei beni culturali. I questionari derivano da adattamenti su test di autovalutazione già validati in altri ambiti, che per alcuni aspetti, presentano delle somiglianze con il contesto in oggetto. I questionari attualmente verificati e implementati nel Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione Sensoriale, sono 4.

Un primo riguarda la misurazione della Presence (Tabella 4), tramite 7 item adattati da (Yim, Cicchirillo, & Drumwright, 2012), che utilizzano una scala likert di attribuzione di un punteggio, da 1 a 5. Gli estremi sono rappresentati dalle espressioni "per niente" per il valore 1, fino ad "assolutamente" per il valore 5.

Tabella 4 - Questionario: Presence

Item in Inglese	Item in Italiano
How completely were all of your senses engaged?	Fino a che punto l'esperienza coinvolge tutti i tuoi sensi?
How much did the visual aspects of the environment involve you?	Fino a che punto l'aspetto visivo dell'ambiente influenza la tua esperienza?
How compelling was your sense of objects moving through space?	Quanto è realistico il senso di movimento degli oggetti nello spazio?
How much did your experiences in the virtual environment seem consistent with your real-world experiences?	Fino a che punto puoi paragonare l'esperienza nel mondo virtuale con quella che provi nel mondo reale?
How compelling was your sense of moving around inside the virtual environment?	Quanto è realistica la sensazione di muoverti all'interno dell'ambiente virtuale?
How closely were you able to examine objects?	Fino a che punto puoi esaminare da vicino gli oggetti?
How involved were you in the virtual environment experience?	Quanto ti senti coinvolto nell'esperienza con l'ambiente virtuale?

Un altro questionario studiato per essere implementato nel metodo misura l'Attitude Toward Experience (ATE) dei visitatori (Tabella 5). È stato adattato da (Moore, 2011). Comprende 4 coppie di aggettivi e due quesiti, da valutare sempre con una scala likert da 1 a 7, in cui 1 corrisponde a “per niente” e 7 ad “assolutamente”. L’obiettivo di questo questionario è quello di valutare l’atteggiamento dei visitatori nei confronti dell’esperienza, in termini anche di intenzione di ripetere l’esperienza della visita al museo e di raccomandarla.

Tabella 5 - Questionario: Attitude Towards Experience

Item in Inglese	Item in Italiano
good / bad	Buono / Cattivo
appealing / unappealing	Attraiante / Non attraiante
positive / negative	Positivo / Negativo
liked / disliked	Mi piace / Non mi piace
What is the likelihood of you repeating the (virtual museum) experience?	Fino a che punto vuoi ripetere l'esperienza (museo virtuale)?
What is the recommending the (virtual museum) experience to others?	Fino a che punto raccomanderesti agli altri questa esperienza (museo virtuale)?

Un terzo questionario ha come scopo principale quello di indagare la qualità dell’esperienza di visita museale del visitatore, secondo quanto sostiene (Pine & Gilmore, 1998). È il questionario della Visitor Experience (Tabella 6), composto da 16 affermazioni adattate dai questionari di (Radder & Han, 2015); (Jung, Tom Dieck, Lee, & Chung, 2016). Le affermazioni sono divisibili in 4 fattori ognuno composto da 4 affermazioni: Education (fattore Educazione) (EDU), Entertainment (fattore Intrattenimento) (ENT), Escapism (fattore Fuga) (ESC) e Aesthetics (fattore Estetica) (EST). Come per il questionario precedente, si utilizza una scala liker che va da 1 a 7, in cui 1 vuol dire “fortemente in disaccordo” con l’affermazione, mentre 7 “fortemente in accordo”.

Tabella 6 - Questionario: Visitor Experience

Item in Inglese	Item in Italiano
Education	
The overall experience stimulate my curiosity.	L'intera esperienza ha stimolato la mia curiosità.
The overall experience has increase my desire to know more about the artifact.	L'intera esperienza ha accresciuto il mio desiderio di conoscere di più sui reperti.
This experience has increased my interest to the details of the object.	Questa esperienza ha accresciuto la mia attenzione per i dettagli dei reperti.
I learned something about the artifact from this experience.	Ho imparato qualcosa sui reperti da questa esperienza.
Entertainment	
I would like repeat this experience.	Vorrei ripetere questa esperienza.
This experience stimulated me emotionally.	Questa esperienza mi ha stimolato emotivamente.
During the experience I had fun.	Mi sono divertito durante questa esperienza.
This experience was unusual.	Questa esperienza è stata inusuale.
Escapism	
I have lost the track of time.	Ho perso traccia del tempo.
I have lost track of where I was.	Ho perso traccia di dove mi trovavo.
I have escaped from reality.	Mi sono sentito fuori dalla realtà.
I felt that I don't was interacting with the artifact.	Ho sentito di non aver interagito con i reperti.
Esthetics	
This experience was better than the one I could have with the real object.	Questa esperienza è stata migliore rispetto a quella che avrei avuto con i reperti reali.
Experimenting this technology was enjoyable.	Sperimentare questa tecnologia è stato piacevole.
The virtual artifact was attractive.	I reperti virtuali erano attraenti.
The virtual technology was attractive.	La tecnologia era attraente.

Un altro aspetto che deve essere considerato in una fase di valutazione, è quello dell'usabilità dei dispositivi, soprattutto nel caso si implementino delle tecnologie in cui l'interazione fisica con esse sia molto importante. Per studiare questi aspetti si è implementato il System Usability Scale (SUS) (Tabella 7), uno strumento che permette di effettuare una valutazione "quick and dirty" per misurare l'usabilità. Si tratta di una misura affidabile e ampiamente validata dell'usabilità complessiva percepita (Bangor, Kortum, & Miller, 2008). È stato scelto perché molto diffuso e consente un confronto tra risultati e prodotti esistenti (Wetzlinger, Auinger, & Dörflinger, 2014). Consiste in un questionario di 10 item con cinque opzioni di risposta, che variano da 1 "Fortemente in disaccordo", fino a 5 "Fortemente d'accordo". Creato da (Brooke, 1996), consente di valutare un'ampia gamma di prodotti e servizi, tra cui hardware, software, dispositivi mobili, siti web e applicazioni.

Tabella 7 - Questionario: System Usability Scale

Item in Inglese	Item in Italiano
I think that I would like to use this system frequently	Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente.
I found the system unnecessarily complex	Ho trovato il sistema complesso senza che ce ne fosse bisogno.
I thought the system was easy to use	Ho trovato il sistema molto semplice da usare.
I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system	Penso che avrei bisogno del supporto di una persona già in grado di utilizzare il sistema.
I found the various functions in this system were well integrated	Ho trovato le varie funzionalità del sistema bene integrate.
I thought there was too much inconsistency in this system	Ho trovato incoerenze tra le varie funzionalità del sistema.
I would imagine that most people would learn to use this system very quickly	Penso che la maggior parte delle persone potrebbero imparare ad utilizzare il sistema facilmente.
I found the system very cumbersome to use	Ho trovato il sistema molto macchinoso da utilizzare.
I felt very confident using the system	Ho avuta molta confidenza con il sistema durante l'uso.
I needed to learn a lot of things before I could get going with this system	Ho avuto bisogno di imparare molti processi prima di riuscire ad utilizzare al meglio il sistema.

Secondo la metodologia sviluppata, la fase di valutazione con i questionari deve essere svolta a conclusione della costruzione dell'applicazione e prima dell'uso diretto con i visitatori, in modo che si possa poi procedere con la modifica del sistema stesso, nel caso si riscontrino dei risultati negativi da questi questionari.

Nei capitoli successivi, si riporta una descrizione dettagliata dei casi studio che hanno permesso di costruire e validare la metodologia, e dei risultati ottenuti.

Capitolo 5.

Casi Studio Digitalizzazione, Valutazione e Analisi

Lo sviluppo della metodologia Comparativa di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi, è stato possibile grazie a diversi studi svolti con dei reperti archeologici, manufatti, ceramiche, riproduzioni di statuette e quadri. Per alcuni di questi casi, è stata implementata solo una parte dell'intera metodologia, che trova la sua completa applicazione nel caso studio della Venere di Frasassi (Mengoni & Leopardi, 2019). Quest'ultima, sia per il suo valore storico e artistico incalcolabile, che per le sue dimensioni ridotte, che per problemi di riflettività delle superfici che presenta, risulta essere il caso studio più importante trattato. Grazie a questi esempi che differiscono per forma, dimensione e materiale, si è potuto svolgere parallelamente, uno studio anche sui dispositivi di digitalizzazione disponibili sul mercato.

In particolare, sono state studiate in dettaglio due tecnologie di digitalizzazione di tipo ottico senza contatto, proprio perché i manufatti sono oggetti molto delicati e di valore inestimabile. La differenza risiede nel tipo di sensore (Remondino, 2011): sensore passivo, come le fotocamere digitali, in cui il modello 3D è ottenuto attraverso immagini 2D (foto) e alcune formule matematiche; sensore attivo, come i laser scanner o i radar, dove le informazioni 3D sono ricavabili direttamente dallo strumento.

Nei paragrafi seguenti si riportano i singoli studi svolti per la costruzione della metodologia di Digitalizzazione, Valutazione e Analisi. Prima di ogni caso studio è stata riportata una breve descrizione della tecnologia di digitalizzazione impiegata.

5.1 Acquisizioni con Laser Scanner a Triangolazione

In una prima fase del lavoro, sono state effettuate diverse prove di acquisizione su materiali differenti, quali: bronzo, ceramica smaltata e ceramica grezza. Queste acquisizioni sono state svolte con l'impiego di un laser scanner a triangolazione 3D senza contatto: Konica Minolta Range 7 (Figura 22).

Uno scanner laser a triangolazione è uno strumento basato sulla triangolazione ottica il cui principio di funzionamento è descritto in dettaglio in (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001). Esso utilizza la relazione nell'Equazione 2 per ottenere la distanza r tra il laser e i punti illuminati dell'oggetto:

$$r = b \tan^{-1}(\alpha + \beta) \quad (2)$$

dove α e β sono gli angoli, e b è la distanza tra la telecamera e l'emettitore laser (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001). Lo schema di lavoro è mostrato in Figura 21: l'emettitore laser proietta un raggio laser sull'oggetto da scansionare e contemporaneamente un sensore CMOS (videocamera) cattura la striscia di luce (Cipriani, Fantini, & Bertacchi, 2017). Il vantaggio nell'utilizzare un laser come emettitore, risiede nella generazione di una striscia con uno spessore limitato e costante nell'intera profondità di proiezione, grazie alla riduzione dell'angolo di divergenza. Per ottenere l'intero oggetto, la procedura viene ripetuta da diversi punti di vista per coprirne tutta la superficie.

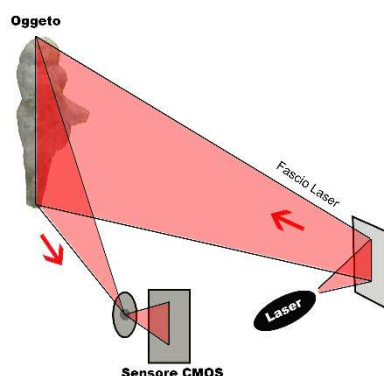


Figura 21 - Principio di Funzionamento della Triangolazione Laser (Mengoni & Leopardi, 2019)

In dettaglio, lo scanner utilizzato per i test ha una precisione di $4\mu\text{m}$ e l'accuratezza di $\pm 40\mu\text{m}$, è dotato di due tipi di obiettivi: WIDE e TELE, la differenza tra i due è nella distanza massima di acquisizione, che a sua volta influenza le dimensioni del campo di acquisizione e la precisione. La tecnologia impiegata per lo strumento ha quasi completamente permesso di risolvere il problema delle superfici specchiate e molto riflettenti, attraverso una modalità di lavoro particolare che permette di acquisire dati anche su oggetti che presentano queste caratteristiche. In questo modo non è stato necessario eseguire l'acquisizione in ambienti con illuminazione controllata, portando ad una semplificazione organizzativa e velocità d'esecuzione. Lo scanner deve essere collegato ad un pc, in cui è installato il software Range Viewer che permette di settare tutti i parametri per l'acquisizione della range map, avviare le acquisizioni e fare un primo allineamento per verificare la superficie acquisita. Lo strumento non necessita di altri ausili, se non la presenza di marker, nel caso di superfici poco complesse e con elementi planari di notevole dimensione, e di una piattaforma girevole graduata, su cui può essere posto il reperto, per facilitare le acquisizioni. Tutte le operazioni di allineamento, editing e analisi sono state effettuate tramite il software PolyWorks (PolyWorks).

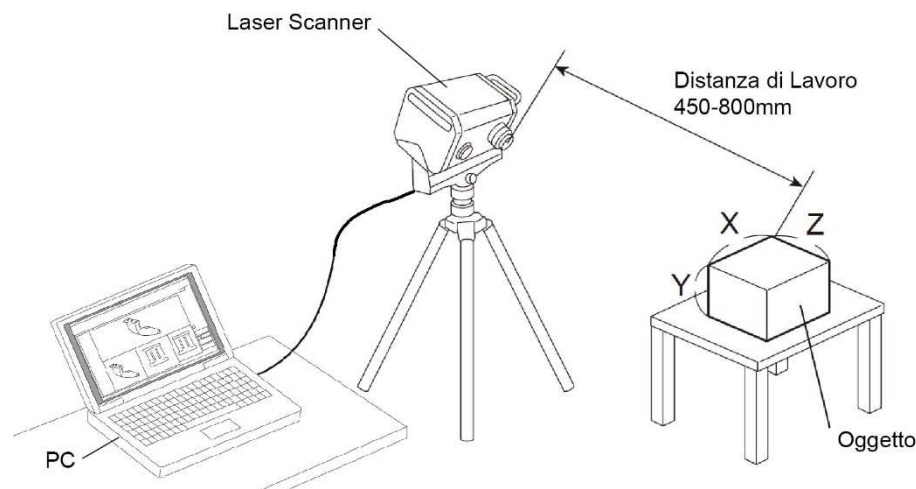


Figura 22 - Strumentazione Utilizzata per l'Acquisizione con Laser Scanner

5.1.1 Statuetta in Bronzo – Lisippo di Fano

Uno dei primi reperti oggetto di studio, è la riproduzione in scala 1:11 dell'Atleta di Fano, Atleta vittorioso, Atleta che si incorona o Lisippo di Fano (Figura 23). L'originale attualmente è conservato al J. Paul Getty Museum; si tratta di una statua in bronzo rappresentante un atleta di circa quindici anni, che riporta sul capo una corona d'ulivo, simbolo che fa pensare ad un giocatore olimpico (Viacava, 1994).

Come per la statua originale, anche la riproduzione, oggetto dello studio condotto, è in bronzo e riporta tutti i particolari dell'opera originale. La scelta di eseguire lo studio su questa riproduzione è stata motivata da diversi fattori, primo fra tutti il materiale con cui è stata realizzata, che è bronzo, quindi un metallo, che nel caso venga colpito da un fascio luminoso con angolazioni particolari, può presentare delle zone lucide e ad alta riflettività; secondo le dimensioni ridotte della statuetta e infine i particolari molto piccoli che presenta. Infatti, la riproduzione ha dimensioni: (14 x 6 x 2.5) cm (h x l x p), per queste ragioni i dettagli del volto e dei capelli risultano essere molto piccoli.

Essendo uno dei primi casi studio affrontati, ci si è concentrati maggiormente sulla stesura e verifica della pipeline di acquisizione, sull'analisi delle caratteristiche dello strumento di acquisizione e anche sul materiale con cui è realizzata. La riproduzione è stata acquisita tramite laser scanner a triangolazione senza contatto, Konica Minolta Range 7.

Nella fase iniziale sono stati studiati tutti i parametri che lo strumento mette a disposizione, come per esempio: esposizione automatica o meno (AE), messa a fuoco automatica o meno (AF), numero di passate per ogni scansione (da 1 a 5), modalità superfici scure. Il primo aspetto che si è andati ad indagare è il numero di passate per ogni singola scansione, per comprendere se un incremento di passate, che si traduce in un incremento di dati raccolti



Figura 23 - Riproduzione in Scala 1:11 dell'Atleta di Fano o Lisippo di Fano (14cm)

(numero di punti), possa essere considerato vantaggioso in relazione non solo al livello di dettaglio che si desidera ottenere, ma anche al tempo di acquisizione e al numero di scansioni da effettuare.

Nella Tabella 8, è riportato un confronto numerico tra due acquisizioni eseguite con un numero diverso di passate, mantenendo costanti tutti gli altri parametri, tra cui: distanza dall'oggetto, tipo di obiettivo montato, inquadratura dell'oggetto, messa a fuoco. Il confronto è stato fatto eseguendo una scansione con 3 passate e una con 5 passate. Come si può vedere, nel caso delle 5 passate, c'è un incremento del + 4.35 % sul numero di punti campionati, che a fronte di altri fattori come: tempo e qualità della superficie ottenuta, non porta un valore aggiunto tanto da giustificare la scelta di utilizzare più passate per ogni scansione.

Tabella 8 - Confronto Scansioni sul Numero di Passate

Numero di Passate	3	5
Obiettivo	WIDE	WIDE
Messa a Fuoco	AF	AF
Distanza di Scansione (mm)	680	680
Tempo di Acquisizione (sec/scansione)	12	16
Numero di Punti	528'433	551'441
		+ 4.35 %

Dopo questa prima considerazione, si è proceduto all'acquisizione vera e propria dell'intera ricostruzione della statuetta del Lisippo di Fano. Questa procedura si è svolta in due fasi, una prima fase di acquisizione di tutta la statuetta, successivamente una seconda fase sempre di campionamento, in cui ci si è concentrati sulle parti mancanti dall'acquisizione precedente e sull'effettuare ulteriori scansioni nelle zone dove si è individuato la presenza di dettagli molto piccoli. In questa seconda fase si è utilizzato l'obiettivo TELE, a differenza della prima fase in cui si è utilizzato l'obiettivo WIDE, questo perché il dettaglio richiesto imponeva una densità di campionamento superiore ottenibile solo con un obiettivo che permette di acquisire ad una distanza inferiore. I parametri impostati per lo strumento sono riportati nella Tabella 9.

Tabella 9 – Parametri Campagna di Acquisizione Lisippo Fano

	Prima Fase	Seconda Fase
Obiettivo	WIDE	TELE
Messa a Fuoco	Manuale	Manuale
Esposizione	Auto	Auto
Numero di Passate	3	3
Distanza di Scansione (mm) (min-max)	525-695	455-490

In totale sono state effettuate 17 acquisizioni da diverse angolazioni, sia dal basso che dall'alto che frontalmente; di queste sono state utilizzate solo 10 scansioni per ricostruire il modello ottenuto nella Figura 24. La nuvola di punti presentava 6'752'102 punti, ridottosi a 1'875'562 dopo la pulizia da tutte le parti non appartenenti alla riproduzione (i.e. la tavola girevole utilizzata per le acquisizioni, il tavolo su cui poggiava la tavola).



Figura 24 - Modello 3D del Lisippo di Fano

Per quanto riguarda il materiale di cui è composta la ricostruzione, cioè bronzo, si è potuto notare che alcune acquisizioni, da angolazioni particolari, hanno riscontrato dei problemi, soprattutto nelle zone più vicine ai bordi. La Figura 25 mostra un dettaglio di una delle prime acquisizioni, in cui è evidente come i bordi siano “frastagliati”. Questo ha comportato un lavoro di editing, come: pulizia dei bordi, chiusura di micro-fori e lisciamiento, per non andare ad inficiare la qualità del modello finale (Figura 24).



Figura 25 - Dettaglio di un'Acquisizione del Mezzo Busto del Lisippo di Fano

5.1.2 Vasellame Smaltato

Un'altra tipologia di materiali su cui si è svolto uno studio, sono dei reperti in ceramica smaltata. Il primo reperto preso in considerazione per i test è un frammento smaltato di un piatto su cui sono rappresentate delle foglie verde scuro (Figura 26).



Figura 26 - Frammento di Piatto con Decorazione Floreale

La presenza dello smalto sulla superficie, come si può vedere dall'immagine, crea dei riflessi su alcune zone, in particolare dove la curvatura del piatto è più accentuata. Queste aree, nonostante la tecnologia ottimizzata che presenta lo strumento, il Konica Minolta Range 7, hanno dato notevoli problemi, tanto che su alcuni punti, non si è riusciti ad acquisire completamente tutta la superficie, come si può vedere dal modello 3D ottenuto, (aree in blu) (Figura 27). Per realizzare il modello 3D, delle 17 acquisizioni effettuate con l'obiettivo TELE, ne sono state utilizzate solo 16, a dimostrazione che la pipeline di acquisizione che via via è stata ottimizzata di volta in volta, porta ad ottenere una maggiore efficienza. La nuvola presentava 5'823'591 punti, che sono stati ridotti a 2'639'920, una volta effettuata la pulizia da tutti i punti non appartenenti al soggetto dell'acquisizione. Questo tipo di manufatti, nonostante le elevate prestazioni della strumentazione, ha evidenziato la presenza di alcune criticità per quanto riguarda il rivestimento superficiale, che è un aspetto molto importante di cui si deve tenere conto in fase di acquisizione (Osorio, Figueroa, Prieto, Boulanger, & Londoño, 2011). Sempre per quanto riguarda la superficie del reperto, la tecnologia ha mostrato un particolare molto importante: il rilievo con cui sono state realizzate le decorazioni sul piatto, dettaglio non individuabile a occhio nudo, se non posizionandosi contro luce, oppure toccando con un dito la superficie del piatto, azione che non è possibile all'interno di un museo.

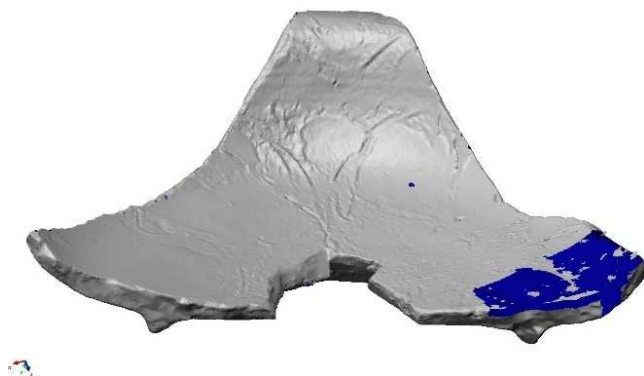


Figura 27 - Modello 3D del Frammento Piatto con Decorazione Vegetale

Come si può vedere dal modello 3D della Figura 27, l'acquisizione ha rivelato la pennellata con cui sono rappresentate le foglie e i disegni sulla superficie. All'interno del contesto museale, offrire la possibilità al visitatore di poter vedere ed esplorare gli oggetti con questo livello di dettaglio molto elevato, è un aspetto molto importante di cui si deve tener conto.

Il secondo manufatto, sempre in materiale ceramico con la superficie smaltata, di cui si è realizzata l'acquisizione, è un frammento di un bacino, che presenta una decorazione a righe, come si può vedere dalla Figura 28.



Figura 28 – Frammento Bacino con Decorazione a Righe

Nell'acquisire questo reperto, non sono state riscontrate tutte le criticità emerse nel caso precedente, perché la superficie nonostante sia smaltata, è risultata essere leggermente opaca. Inoltre, la forma presenta una curvatura meno accentuata, e questo ha fatto sì che si è potuto realizzare l'intero modello, come mostrato nella Figura 29. Sono state effettuate 11 scansioni con l'obiettivo WIDE, di cui solo 9 sono state utilizzate, per un totale di 6'774'530 punti, che si sono ridotti a 1'466'861 dopo la pulizia ed editing.

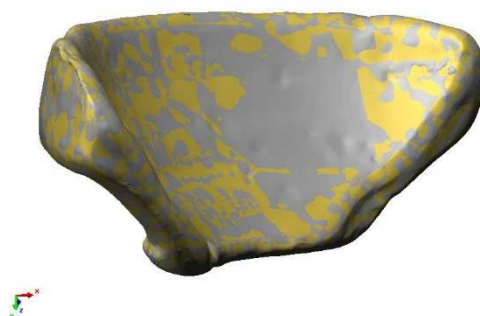


Figura 29 – Modello 3D del Frammento del Bacino

Per questo reperto particolare, data la sua forma semplice e riconducibile a geometrie primitive come circonferenze e tronchi di cono, si è svolta un'ulteriore analisi geometrica sulle sue dimensioni. Si è riusciti ad individuare alcuni diametri, andando a adattare alla mesh ottenuta delle geometrie elementari. In dettaglio, sono stati identificati un tronco di cono e tre circonferenze, due facenti parte del tronco di cono e una circonferenza alla base (Figura 30). Per individuare queste geometrie, è stato utilizzato un software di analisi, IMInspect (PolyWorks). Nella Tabella 10, si riporta in dettaglio le dimensioni individuate.

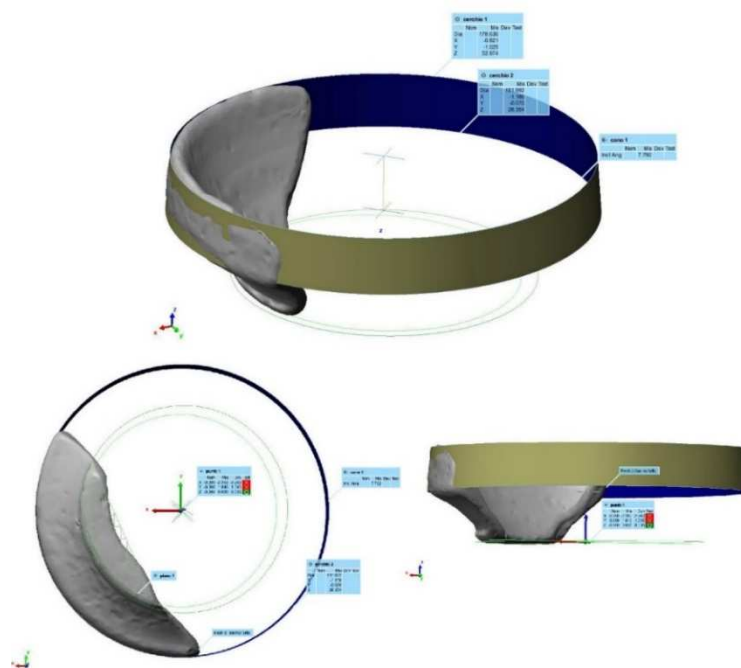


Figura 30 - Analisi Geometrica e Dimensionale del Frammento di Bacino

Quest'analisi è molto importante, perché getta le basi per studi riguardanti il restauro del manufatto, inoltre permette di comprendere l'intento funzionale del reperto e la sua forma completa primordiale (Scopigno, et al., 2003); (Arbace, et al., 2013).

Tabella 10 – Studio della Geometria del Frammento di Bacino

	Diametro (mm)	Centro della Circonferenza			Angolo (°)
		x (mm)	y (mm)	z (mm)	
Circonferenza Superiore Tronco Cono	178.63	1.442	-2.07	52.939	7.792
Circonferenza Inferiore Tronco Cono	181.992	1.077	-1.115	28.319	
Circonferenza di Base	128.48	0	0	0	-

Inoltre, si è proceduto anche ad un ipotesi ricostruttiva parziale del manufatto, utilizzando le circonferenze individuate come guida per la geometria. La Figura 31 mostra il risultato ottenuto andando a ripetere il frammento acquisito altre 3 volte, completando in questo modo parte della forma originale del Bacino.

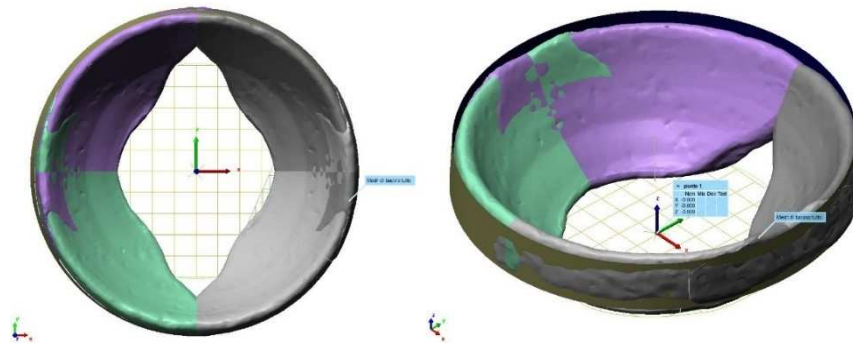


Figura 31 - Ipotesi Ricostruttiva della Geometria del Bacino

5.1.3 Testa di Augusto

Uno dei casi studio digitalizzati che ha richiesto un notevole impegno è l'Augusto Capite Velato (Figura 32), una testa in marmo di epoca romana (14 d.C. circa), conservata al Museo Archeologico Nazionale delle Marche di Ancona (Marconi); (Museo Archeologico Nazionale delle Marche). La testa di Augusto presenta le seguenti dimensioni (38 x 27 x 23) cm (h x l x p). Il reperto è posto su di un piedistallo alto circa 1.6m con un basamento largo circa (1 x 1) m.

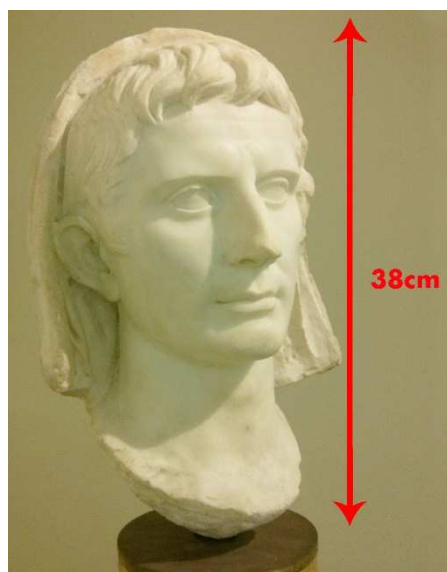


Figura 32 - Augusto Capite Velato (38cm)

Lo strumento di acquisizione utilizzato è il laser scanner a triangolazione senza contatto, Konica Minolta Range 7, posizionato su di un cavalletto che permette di raggiungere un'altezza di circa 3m. L'obiettivo montato sullo strumento era il WIDE, a causa anche della distanza minima a cui è stato possibile porre il cavalletto e lo strumento, che non ha permesso di utilizzare il TELE (obiettivo a focale corta).

Questo studio ha permesso di indagare diversi aspetti, come le problematiche dovute alla collocazione all'interno della sala del museo, il materiale e le dimensioni.

Data la posizione del reperto, sopra un piedistallo molto alto con un basamento largo collocato vicino al muro della sala, e la sua dimensione e peso, la campagna di acquisizione ha evidenziato alcune difficoltà soprattutto dal punto di vista logistico. Infatti, a differenza degli altri casi sopra esposti, in cui era il reperto ad essere spostato e ruotato, in questo caso è stato necessario muovere lo strumento di acquisizione, nei limiti degli spazi consentiti (Figura 33). Questi ostacoli hanno permesso di mettere a punto la parte di Pianificazione della Campagna di Acquisizione, primo step della pipeline, mettendo in atto nuove metodologie di comportamento. Inoltre, le acquisizioni sono state effettuate da 3 altezze differenti, le quali soprattutto nel caso dell'altezza massima, hanno richiesto particolare attenzione, sia per l'elevata altezza a cui si è dovuto porre lo strumento, sopra i 2m, sia per il peso dello strumento, che per la movimentazione del cavalletto con lo strumento posto a quell'altezza.



Figura 33 - Acquisizione dell'Augusto Capite Velato di Ancona

Per quanto riguarda le dimensioni del reperto, esso è uno dei più grandi acquisiti tra i casi studio presi in esame, soprattutto in relazione al campo di acquisizione massimo di ogni singola scansione dello strumento, che è circa di (30 x 25) cm. Questo ha comportato un grande numero di acquisizioni per coprire tutta la superficie, incrementando anche i tempi di acquisizione. In totale sono state effettuate 40 scansioni e ne sono state utilizzate solo 37, che hanno permesso di ricoprire quasi la totalità del reperto (Figura 34 (a)). Il modello finale risulta avere 9'266'909 punti.

Infine, per quanto riguarda il materiale con cui è realizzato il manufatto, il marmo, ha creato alcuni problemi soprattutto nei punti difficili da raggiungere, in cui la superficie da acquisire è risultata orientata parallelamente al dispositivo. Questo è molto evidente come si può vedere dalla Figura 34 (a) nelle zone laterali della toga, in cui è stato difficile effettuare un'acquisizione nonostante si sia disposto lo strumento con angolazioni particolari. Infatti, il manufatto, nonostante abbia una superficie prevalentemente opaca, in alcuni punti presenta piccoli cristalli o porzioni riflettenti, che hanno creato un leggero disturbo sulla superficie risultante dall'acquisizione.

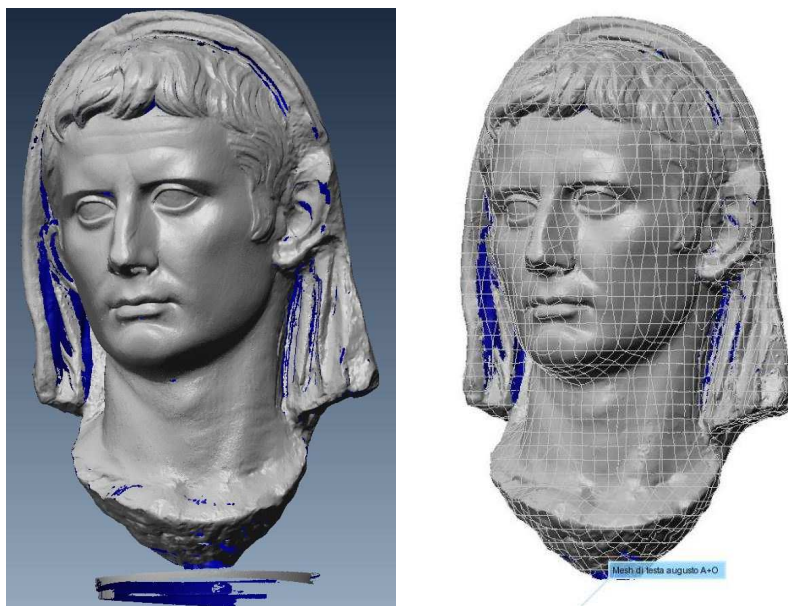


Figura 34 – (a) Modello 3D dell'Augusto Capite Velato; (b) Modello 3D Sezionato per Studi sulla Forma

Infine, come studio della forma, sono state realizzate delle sezioni sia in direzione verticale che orizzontale ogni 10 mm (Figura 34 (b)).

5.2 Acquisizioni con Laser Scanner e Structure From Motion

Dopo una prima serie di casi studio appena descritti, riguardanti le sole acquisizioni tramite laser scanner a triangolazione, sono state effettuate delle acquisizioni anche con tecniche fotogrammetriche. Questa serie di ulteriori prove ha portato alla completa definizione e implementazione della Metodologia di Confronto, Digitalizzazione, Valutazione e Analisi. Di seguito si riporta una breve descrizione della seconda tecnologia impiegata per le acquisizioni, insieme alla scansione laser a triangolazione.

La Structure from Motion (SfM) è una tecnica fotografica attraverso la quale vengono realizzati modelli tridimensionali (modelli 3D) dalla combinazione di una serie di foto. Questa tecnica è considerata un'evoluzione della fotogrammetria perché è più automatica delle altre.

La SfM, in fase di acquisizione, necessita di alcuni strumenti: una fotocamera full frame reflex, un light box, due lampade e un piatto girevole (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016). In casi particolari, è necessario anche l'utilizzo di un computer con software specifici per il controllo della macchina fotografica digitale. L'oggetto da digitalizzare è posto su un piatto girevole all'interno della light box; mentre la macchina fotografica digitale, montata su un treppiede, si trova di fronte ad esso, come in Figura 35. La light box viene utilizzata per diffondere la luce delle due lampade, in questo modo non si formano ombre sull'oggetto durante tutta l'acquisizione, che comporterebbero difficoltà in fase di processamento. Il piatto girevole permette di ruotare l'oggetto tra due scatti consecutivi, mantenendo fissa la fotocamera (Mengoni & Leopardi, 2019); (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).

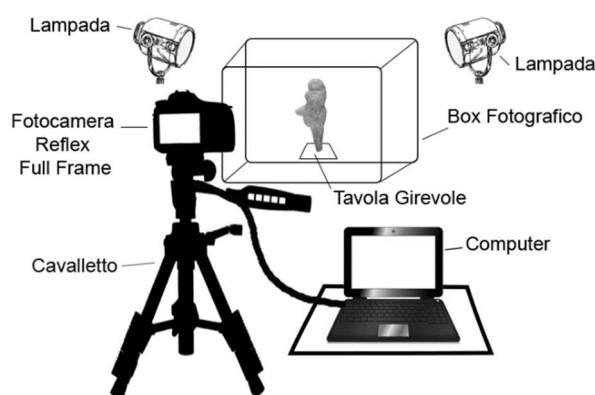


Figura 35 - Strumentazione per l'Acquisizione Fotogrammetrica (Mengoni & Leopardi, 2019)

Prima della fase di acquisizione è necessario stilare uno schema, che viene chiamato "Progetto di Presa"; questo si basa su dei parametri, come per esempio: caratteristiche del sensore della fotocamera, distanza di acquisizione, lunghezza focale, dimensione

dell'oggetto e sovrapposizione tra due immagini. Come si può vedere dalla Figura 36, l'operatore deve calcolare i gradi di rotazione tra le due immagini, applicando la formula dell'Equazione 3, che considera i suddetti parametri:

$$\alpha = (100 - \%) \cdot \arcsin \left\{ \frac{D \cdot \sqrt{(D^2 - r^2) / r^2}}{[(D^2 - r^2) / r^2 + 1] \cdot r} \right\} \quad (3)$$

Dove:

- α = angoli di rotazione tra due immagini
- D = distanza della fotocamera dall'oggetto
- r = raggio dell'oggetto (sotto forma di cilindro)
- $\%$ = percentuale di sovrapposizione tra due immagini consecutive (per oggetti piccoli, si raccomanda minimo l'80%)

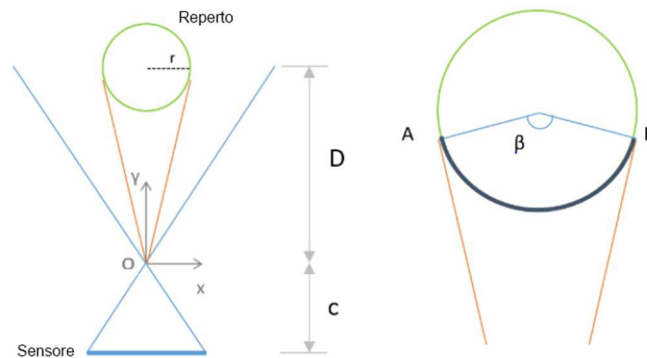


Figura 36 - Modello per Calcolare la Rotazione del Manufatto Durante la Fase di Acquisizione (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016)

Nonostante la SfM sia una tecnica molto adatta per oggetti di piccole e medie dimensioni, in alcuni casi (es. oggetti di pochi centimetri) possono esserci dei problemi legati alla profondità di campo; per questo motivo si utilizza la tecnica del Focus Stacking. Per ogni posa della fotocamera viene realizzata una serie di immagini a diversi piani di messa a fuoco, che combinati permettono di ottenere l'intero oggetto a fuoco, come in Figura 37. Il problema principale è la ridotta profondità di campo (DoF), che si traduce in una piccola porzione a fuoco dell'artefatto.

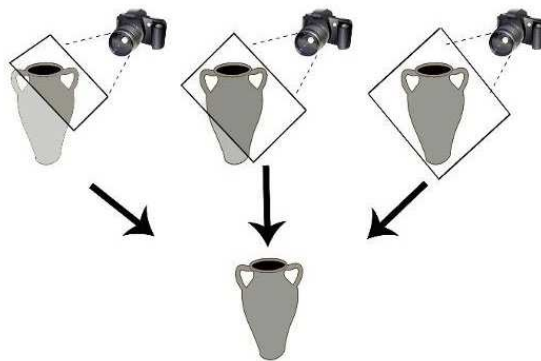


Figura 37 - Movimento del Piano Focale Durante l'Acquisizione con la Tecnica Focus Stacking (Mengoni & Leopardi, 2019) (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016)

5.2.1 Venere di Frasassi

Il caso studio in cui è stata validata l'intera Metodologia è quello della “Venere di Frasassi” Figura 38, uno dei più importanti pezzi in mostra al Museo Archeologico Nazionale delle Marche (Ancona) (Museo Archeologico Nazionale delle Marche) (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019). Il materiale con cui è costruita questa piccola statua (8.7 x 2.6) cm è la pietra calcarea, tipica dell'area centrale delle Grotte di Frasassi nell'Appennino marchigiano. Infatti, quest'area è caratterizzata da numerose grotte con stalattiti da cui si suppone sia stata ricavata la statuetta.

In questo studio, sono state utilizzate due diverse tecnologie di acquisizione, ovvero la triangolazione laser scanner e la Structure From Motion SfM (basata sulla fotogrammetria), applicate ad un piccolo reperto. Il confronto svolto, prende in considerazione le prestazioni dell'hardware e del software di supporto, le caratteristiche dei modelli 3D realizzati e l'efficienza dell'intero processo. Inoltre, è stato condotto anche un confronto tecnologico generale, con il supporto di tutte le fasi della metodologia descritta nei capitoli precedenti, che quindi è stata compiutamente strutturata nella sua forma definitiva.

Ciò che distingue questa ricerca dai lavori precedenti (Pieraccini, Guidi, & Atzeni, 2001) (Remondino & Stylianidis, 2016); (Rasztovits & Dorninger, 2013); (Graham, Akoglu, Lassen, & Simon, 2017), sono le caratteristiche degli oggetti che, al di là delle loro piccole dimensioni, sono ricchi di dettagli invisibili ad occhio nudo, ma significativi per gli studi storici, il restauro, la conservazione e, infine, la riproduzione digitale. Di conseguenza, quando lo scopo e l'uso di un modello 3D richiede una resa molto dettagliata di questi particolari, il modello deve essere strettamente fedele all'oggetto originale.

A tal fine, il dettaglio dell'accuratezza richiesta per l'acquisizione deve essere molto elevato.



Figura 38 - La Venere di Frasassi (8.7cm) (Mengoni & Leopardi, 2019)

Tuttavia, per il confronto sono stati selezionati altri parametri, come ad esempio le caratteristiche intrinseche degli oggetti e i requisiti per le fasi del Ciclo di Vita del Reperto. Per effettuare le acquisizioni è stato utilizzato, uno scanner 3D a triangolazione laser senza contatto: Konica Minolta Range 7 (Figura 39) equipaggiato con l'obiettivo TELE (Mengoni & Leopardi, 2019) e una fotocamera reflex full frame Nikon D810, con 36 megapixels ed equipaggiata con un obiettivo con una lente macro Nikkor 105 mm (Figura 41) (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).



Figura 39 - Acquisizione con Laser Scanner

Per quanto riguarda l'acquisizione tramite il laser scanner a triangolazione, date le piccole dimensioni dell'oggetto, la messa a fuoco e l'esposizione sono state impostate sulla modalità automatica e lo scanner ha eseguito tre passaggi per ogni singola scansione.

La distanza di acquisizione è compresa tra i 50 cm e i 68 cm. In totale la durata di tutta la campagna di acquisizione è stata circa di 1-2 ore, durante le quali sono state effettuate 13 scansioni e un primo allineamento manuale, effettuato tramite il software Range Viewer di Konica Minolta.

Il primo allineamento è stato effettuato selezionando tre punti corrispondenti tra le due range maps., in questo modo è stata ottenuta un'anteprima delle scansioni per verificare la porzione di superficie acquisita fino a quel momento.

Range Viewer non è un software utilizzato per l'allineamento, e per questo motivo le scansioni sono state riallineate con il software PolyWorks (PolyWorks) utilizzando il best fit alignment, un algoritmo interattivo, che ha lo scopo di minimizzare la distanza tra le superfici sovrapposte, all'interno di un gruppo di scansioni dove il punto di acquisizione è sconosciuto (Figura 40(a)). L'allineamento è stato effettuato utilizzando solo 10 delle 13 scansioni, e ha prodotto una deviazione standard media di 0,0257 mm (min 0,0198mm; max 0,0338mm). Il risultato dell'allineamento della scansione è stata una nuvola di punti di 1,53 mln. La sovrapposizione tra le diverse scansioni è stata poi ridotta, ottenendo una nuvola finale di 898k punti con una distanza media di 0.0928 mm.

Al termine della fase di allineamento e dopo la fase di editing, è stato generato un modello di mesh in cui tutti i fori inferiori a 0,4 mm sono stati chiusi. Come si può vedere dalla Figura 40 (b), ci sono fori le cui dimensioni mostrano una evidente mancanza di dati, probabilmente a causa di particelle riflettenti presenti nel materiale.

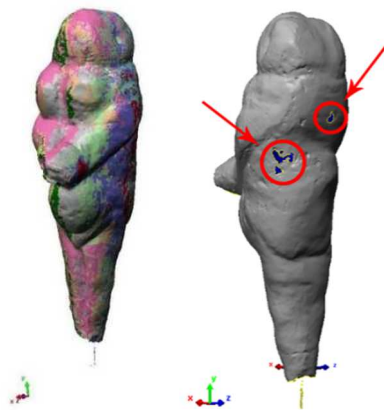


Figura 40 – Modello 3D Laser Scanner: (a) Sovrapposizione tra le Diverse Scansioni Dopo l'Allineamento (b) Dettagli dei Fori nel Modello 3D (Mengoni & Leopardi, 2019)

Per quanto riguarda invece l'acquisizione tramite SfM, la fotocamera è stata posta ad una distanza di 43cm, con una lunghezza focale di 105 mm, ottenendo un GSD di 0,020 mm. In totale sono state effettuate 72 immagini, una ogni 15° a tre diverse altezze, che sono state importate nel progetto fotogrammetrico con il software Agisoft Photoscan 1.1.6 (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016) (Agisoft Metashape). Il modello è stato costruito seguendo la tipica pipeline per la ricostruzione 3D: allineamento delle immagini (Zinßer, Schmidt, & Niemann, 2005), scalatura e orientamento del modello, costruzione di una nuvola densa, modello mesh e texturing finale.

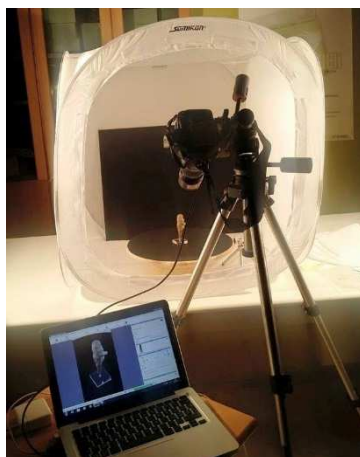


Figura 41 - Acquisizione Fotografica (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016)

La nuvola di punti ottenuta inizialmente era costituita da 98k punti a bassa risoluzione per passare successivamente ad una da 42 milioni di punti alla massima risoluzione; l'errore medio di allineamento nella nuvola di punti di 98k era di 0,674 pixel (massimo 0,722 e minimo 0,630 pixel) e 250k di proiezioni.

Il test ha evidenziato alcuni aspetti importanti della scansione laser (ad alta precisione), per indagare dettagli nascosti e raggiungere obiettivi in un'ottica di conservazione dei manufatti. I risultati sperimentali sono stati fortemente influenzati dalla particolare topologia e dal materiale con cui è realizzata la statuetta. La scelta delle due tecnologie per il confronto dipende anche dal contesto applicativo e dalla nota competizione tra la fotogrammetria e le tecniche di acquisizione laser-based. Tuttavia, questi aspetti hanno influenzato i valori raggiunti in termini di durata delle fasi della pipeline di acquisizione e il target di accuratezza del modello digitale, ma non l'applicabilità della metodologia. Nel paragrafo 7.1 sono riportati i risultati numerici della sperimentazione.

Capitolo 6.

Casi studio Sistemi di Fruizione

Lo sviluppo del Metodo per la Costruzione di un Sistema di Fruizione è stato possibile grazie a diversi studi svolti con reperti e ambienti virtuali, implementando tecnologie di realtà aumentata e virtuale a vari livelli.

Grazie a questi esempi che combinano diversi canali sensoriali e tecnologie è stato possibile studiare e creare diverse installazioni museali. Sempre grazie ai vari studi svolti con gli utenti, sono stati anche costruiti e validati dei questionari per comprendere la Presence (PR), Visitor Experience (VX), Attitude Towards Experience (ATE) ed User Experience (UX) nel settore dei beni culturali.

I paragrafi seguenti presentano i vari casi studio svolti, sulla base del Metodo per la Costruzione di un Sistema di Fruizione. I casi studio sono riportati a seconda del numero e tipo di canali sensoriali che implementano (Figura 42).

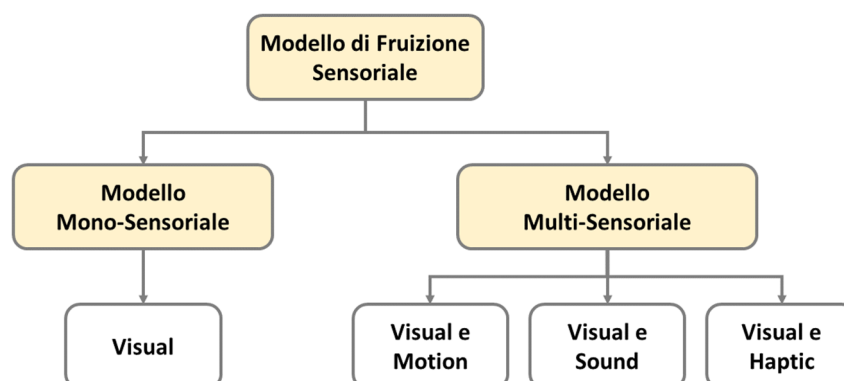


Figura 42 - Modello di Fruizione Sensoriale: Casi Studio

6.1 Sistema di Fruizione Mono-Sensoriale: Visual

Uno dei primi studi svolti, riguarda una valutazione comparativa di Sistemi per Musei Virtuali (VM) basati su diverse tecnologie di X-Reality (XR). Il tema è quello della problematica legata ad alcuni reperti archeologici, che a volte non possono essere fisicamente esposti al pubblico, di conseguenza non possono essere visualizzati e fruiti dai visitatori. L'obiettivo è quello di fornire un metodo di lavoro per la selezione delle tecnologie più appropriate per uno specifico contesto applicativo, come quello rappresentato dai Beni Culturali, per permettere ai visitatori di un museo, la visualizzazione e interazione con le riproduzioni digitali dei reperti.

La metodologia proposta in questo studio è caratterizzata da quattro fasi: definizione di metriche, costruzione delle installazioni tecnologiche, reclutamento dei partecipanti e definizione di una procedura sperimentale. L'approccio di valutazione proposto si concentra in particolare sulla valutazione di tre aspetti:

- Senso di presenza dell'utente sperimentato durante l'interazione con le tecnologie di XR;
- Qualità dell'esperienza museale fornita in termini di valore economico attribuibile all'esperienza;
- Esperienza dei visitatori e la loro volontà nel ripeterla e consigliarla.

La metodologia è stata validata attraverso test con utenti in laboratorio, con l'obiettivo di confrontare cinque sistemi di VM, al fine di determinare quale sia il più adatto a massimizzare la qualità dell'esperienza con riproduzioni digitali di reperti archeologici, nel caso in cui il manufatto reale non possa essere fisicamente esposto al pubblico. In particolare, sono stati presi in considerazione: tre sistemi di VR basati su tecnologie diverse (ad esempio, desktop 2D, proiezione stereoscopica attiva 3D e Head Mounted Display (HMD)), un sistema di AR mobile e un sistema di MR basato sulla proiezione olografica (Figura 43).



Figura 43 – Tecnologie di X-Reality Studiate

I primi quattro sistemi per VM sono già ampiamente utilizzati nei musei, mentre l'ultimo, si basa su una nuova tecnologia olografica a basso costo finora utilizzata principalmente nel settore retail per l'esposizione di prodotti e la pubblicità, che comunque potrebbe essere facilmente adattabile anche al contesto museale.

Il primo sistema adotta un monitor 2D per la visualizzazione e un mouse per l'interazione/navigazione; tale sistema è ampiamente utilizzato soprattutto per il museo virtuale web (Figura 46 (c)). Il secondo sistema è basato sulla proiezione stereoscopica attiva, realizzata con un proiettore F10 AS3D ZOOM di Projection Design su un display flessibile posizionato frontalmente all'emettitore (150" DIAMOND; 300x225 cm). Per visualizzare la proiezione in 3D, gli utenti devono indossare occhiali speciali (ad esempio, occhiali attivi di NuVision) (Figura 46 (e)). Il terzo sistema è costituito da un visore per la VR full immersive, basato su un Head Mounted Display (HMD), ovvero l'HTC Vive (Figura 46 (a)). Il quarto sistema è costituito da un'applicazione AR mobile, in cui gli utenti possono visualizzare in scala reale la riproduzione virtuale del manufatto su uno smartphone con display 2246 x 1080 6.18" FHD+, inquadrando con la fotocamera l'immagine che funge da marker (Figura 46 (b)). Per meglio simulare l'interazione museale, l'immagine (marker) è posta su un piedistallo. Infine, l'ambiente di MR, che sfrutta una nuova tecnologia olografica basata su un effetto di proiezione con dei LED (es. HYPERVSN SOLO L), si crea l'illusione di un ologramma che fluttua nell'aria conferendo all'oggetto rappresentato un senso di tridimensionalità. Questo sorprendente effetto è creato grazie all'utilizzo di barre luminose con dei LED, che ruotano ad alta velocità; in questo modo la struttura hardware è praticamente invisibile, e l'effetto è quello di un video che galleggia nel vuoto (Figura 46 (d)).

Per ogni sistema tecnologico è stata sviluppata un'apposita applicazione Software in Unity 3D di Unity Technologies (Unity Technologies), in base alle impostazioni della struttura richiesta dalle tecnologie di X-Reality considerate (Figura 44).

Ogni applicazione Software permette all'utente di esaminare le riproduzioni digitali di tre reperti archeologici attualmente esposti nel Museo Archeologico Nazionale delle Marche di Ancona (ad esempio, l'Augusto Capite Velato, un pugnale e un kylix attico), e di interagire con essi secondo le configurazioni tecnologiche sviluppate (Figura 45).

In particolare, l'applicazione desktop permette all'utente di: (1) ruotare, (2) muovere e (3) zoomare l'oggetto digitale, rispettivamente: (1) cliccando il tasto sinistro e trascinando il mouse, (2) premendo la rotellina del mouse e trascinando e (3) ruotando la rotellina del mouse. Invece, l'applicazione per la proiezione stereoscopica consente all'utente di interagire con il manufatto (rotazione, movimentazione e zoom) tramite un'interfaccia touch screen. Studi precedenti hanno evidenziato che questo tipo di tecnologia di interazione è risultata la più utilizzabile in un contesto museale (Barbieri, Bruno, & Muzzupappa, 2017). Per quanto riguarda l'applicazione full immersive VR è stata sviluppata utilizzando SteamVR Plugin (SteamVR Plugin), in cui l'interazione con l'utente è realizzata grazie al sistema di tracking HTC Vive, che permette ai visitatori di interagire con l'ambiente in modo del tutto naturale, infatti possono camminare e avvicinarsi all'oggetto, esattamente come nel mondo reale.

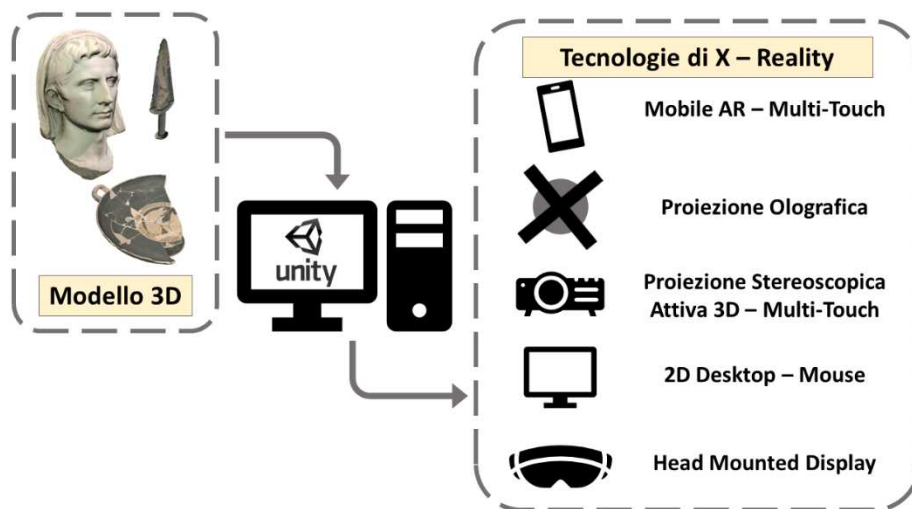


Figura 44 – Struttura del Sistema VM

L'applicazione AR consente all'utente di visualizzare l'oggetto da qualsiasi angolazione, muovendosi, avvicinandosi e allontanandosi dal marker con lo smartphone, è stata sviluppata utilizzando Vuforia Engine (Vuforia Engine). Infine, l'applicazione per il proiettore olografico consiste nel rendering video di riproduzioni digitali realizzate in Unity (Unity Technologies). A differenza delle altre, questa tecnologia non consente alcun tipo di interazione tra l'utente e l'oggetto, ma riproduce e permette di vedere un oggetto che ruota, come se fosse in una vetrina.



Figura 45 - I Reperti Archeologici. Da Sinistra: Augusto Capite Velato, Pugnale e Kylix

Poiché il sistema di VM mira in generale, a migliorare l'esposizione e quindi la fruizione dei manufatti culturali (Carrozzino & Bergamasco, 2010), ogni applicazione sviluppata, è strutturata in modo tale che sia massimizzata la percezione dei manufatti digitali. A tal fine, per focalizzare l'attenzione del visitatore sulla ricostruzione digitale, il design dell'ambiente risulta assolutamente minimo, infatti l'oggetto viene presentato in un ambiente totalmente nero (Figura 46). I modelli digitali considerati sono stati costruiti utilizzando le più recenti tecnologie di digitalizzazione (Mengoni & Leopardi, 2019) e sono caratterizzati da un altissimo livello di accuratezza (Figura 45).

Parallelamente alla costruzione delle installazioni tecnologiche, sono state sviluppate e definite delle metriche di valutazione, divisibili in tre questionari: Presence (PR), Visitor Experience (VX) e Attitude Towards Experience (ATE) (Tabella 4, Tabella 6, Tabella 5). Questi questionari sono stati definiti adattando altri questionari e scale di autovalutazione proposte dalla letteratura precedente. La descrizione delle metriche di valutazione è riportata nel paragrafo 4.4.3.

Infine, si è proceduto alla fase di reclutamento, una delle maggiori sfide, nel caso di studi che coinvolgono soggetti. Il reclutamento comporta una serie di attività, tra cui: l'identificazione dei partecipanti idonei, la spiegazione dello studio ai potenziali partecipanti al fine di ottenere il consenso informato, ecc. Inoltre, è necessario scegliere un metodo di reclutamento (ad esempio, partecipazione volontaria, con incentivi monetari) e identificare un campione appropriato sulla base degli obiettivi e del disegno sperimentale. Per questo studio, un totale di 30 soggetti volontari (11 donne e 19 maschi), di età compresa tra i 18 e i 56 anni (Media = 32, SD = 10,26), senza particolari problemi di vista, sono stati reclutati tra gli studenti della Facoltà di Ingegneria e del personale del "Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche" (DIISM) e del "Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali" (D3A) dell'Università Politecnica delle Marche. Il numero dei partecipanti è stato scelto considerando una stima del numero minimo di soggetti che viene maggiormente considerato nell'analisi statistica (Stutely, 1991); (Hogg, Tanis, & Zimmerman, 1977). La partecipazione al test è stata incoraggiata dalla possibilità di vincere un premio grazie ad un'estrazione a sorte di due buoni Amazon, del valore di 10€ ciascuno. I risultati dei test effettuati con gli utenti sono riportati nel paragrafo 7.2.



Figura 46 - Le Applicazioni VM Considerate nello Studio: (a) Head Mounted Display; (b) AR mobile; (c) Desktop 2D; (d) Proiezione Olografica; (e) Stereoscopia Attiva;

6.2 Sistema di Fruizione Multi-sensoriale

Un sistema che integra più canali sensoriali, si può definire sistema multi-sensoriale, anche quando l'integrazione avviene solo tra due sensi. Su questo tema sono state svolte diverse installazioni nel campo dei beni culturali, nell'ottica di creare delle applicazioni sempre più integrate con l'ambiente in cui si trovano e con il visitatore che ne fruisce.

Si riporta una serie di applicazioni che prevedono l'attivazione durante l'interazione con il Prototipo Virtuale di diverse modalità sensoriali: Visual e Motion, Visual and Sound, Visual e Haptic.

6.2.1 Visual e Motion

Il patrimonio culturale non è fatto di soli reperti, ma anche di siti archeologici, palazzi antichi, dimore storiche, chiese, strutture di epoca medioevale o romana ecc. Anche il concetto stesso di museo è cambiato, oggi non è più considerato come un semplice

contenitore, ma come un luogo ricco di storia e significati. Il Prototipo Virtuale abbraccia anche questo tipo di ambienti, definibili reperti di grande scala.

Per questo motivo, uno dei casi studi è stato rivolto al concetto di Museo Virtuale, completamente immerso nella Realtà Virtuale.

Lo studio che si è condotto, ha riguardato prima di tutto le tecnologie a disposizione e lo stato dell'arte in materia di ambienti virtuali che riproducano ambienti reali. Tra le tecniche maggiormente impiegate, per riprodurre in reale un ambiente esistente, c'è la tecnica del Tour Virtuale. Questa però come si è potuto vedere da diversi test, non permette una navigazione fluida dell'ambiente, ma molto "scattosa", dovuta alla presenza dei soli punti di presa della macchina fotografica, come possibili postazioni di visualizzazione. Questo fenomeno è poco evidente nel caso in cui ci siano molti punti di presa vicini, mentre viceversa è molto fastidioso nel caso i punti siano lontani. In questo modo i due canali sensoriali integrati, visual e motion, hanno un'integrazione diversa che va in contraddizione, creando un effetto non completamente soddisfacente nel visitatore. Infatti, la parte di visualizzazione è molto stimolata, visto che viene rappresentato il reale tramite le fotografie, che però entra in contrasto con la componente del movimento che si sente costretta e non libera di muoversi, come sarebbe portata a fare per effetto di ciò che vede. Alcune installazioni presenti allo stato dell'arte hanno cercato di risolvere questo problema, come ad esempio la tecnologia presentata da Pro 2D Camera della Matterport (Matterport), ma i risultati non sono completamente soddisfacenti.

Per questa ragione, si è svolto uno studio non approfondito, su ambienti di realtà virtuale ricostruiti tramite modellazione 3D e tecniche di rendering avanzate, andando a creare quello che è definibile un museo completamente virtuale (non esiste nella realtà), il Museo della Basilica di Vitruvio (Figura 47, Figura 48). La tecnologia di realizzazione è quella che solitamente si trova maggiormente applicata ai videogiochi. La Basilica di Vitruvio è un edificio di epoca romana, di cui non sono mai stati ritrovati i resti e si pensa possa trovarsi nella città di Fano, che all'epoca veniva chiamata Fanum Fortunae.



Figura 47 - Basilica di Vitruvio: Vista della Piazza Antistante

Grazie alla ricostruzione 3D virtuale con software di modellazione, quali 3dsMax dell'Autodesk (3dsMax Autodesk) e Unity 3D di Unity Technologies (Unity Technologies), è stato possibile navigare l'ambiente virtuale, in un primo momento, tramite tastiera e mouse del pc, successivamente tramite il telecomando della Wii, il WiiMotion.



Figura 48 - Basilica di Vitruvio: Vista della Piazza Antistante

Inoltre, all'interno del modello 3D dell'edificio, sono stati posizionati dei modelli 3D di reperti realizzati con tecniche di fotogrammetria e laser scanner, per ricostruire un vero e proprio museo virtuale (Figura 49).



Figura 49 - Particolare dell'Interno della Basilica di Vitruvio con i Reperti Conservati

6.2.2 Visual e Sound

Il presente studio mira a definire un'applicazione in grado di aumentare il coinvolgimento dei visitatori dello Studiolo di Federico da Montefeltro, in funzione del loro comportamento e delle loro caratteristiche (es. età, abilità, punti di forza ecc.), per migliorare l'apprendimento e infine spingere i visitatori a tornare al museo. Lo studio svolto, per evitare l'invadenza tecnologica e garantire una completa fusione dei contenuti digitali con l'ambiente fisico, in modo da creare uno spazio integrato, dove digitale e reale coesistono, si è concentrato sulla definizione di un quadro tecnologico completo, che sfrutta la Spatial Augmented Reality (SAR), basata sulla proiezione dinamica e audio spaziale. Lo Studiolo di Urbino rientra all'interno del progetto Strategico di Ateneo: "Civitas - ChaIn for excellence of reflectiVe societies to exploit dIgitAl culTural heritAge and museumS. A pilot case in Palazzo Ducale at Urbino" (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019) (Clini, et al., 2020).



Figura 50 - Parete Nord ed Est dello Studiolo del Duca Federico nel Palazzo Ducale di Urbino

Lo "Studiolo del Duca" presente nel Palazzo Ducale di Urbino è una saletta di 3.6 x 3.35 m le cui pareti sono interamente rivestite fino a circa 2.22 m da intarsi in legno chiamate tarsie, realizzati con oltre quaranta tipi diversi di legno. Questi intarsi raffigurano armadi lasciati aperti, in cui trovano posto vari oggetti (libri, strumenti musicali e spartiti,

armature, armi), animali e altre figure, il tutto caratterizzato da una forte simbologia che riconduce alle gesta e al potere del Duca Federico da Montefeltro (Figura 50). Essendo estremamente particolare e ricco di significati, ha richiesto un periodo per documentarsi, per comprendere attentamente quali siano il contenuto e il messaggio che l'opera vuole trasmettere.

L'idea di base consiste nella realizzazione di un sistema di guida digitale museale con caratteristiche sia ludiche che educative, attraverso la proiezione di contenuti multimediali sull'intarsio ligneo dello Studiolo di Federico. Dato l'inestimabile valore dell'opera, si è deciso di procedere ad una ricostruzione a grandezza naturale nel laboratorio, di una parte dell'intera sala, solo un angolo, quello tra la parete nord e la parete est (Figura 51). La scelta di queste due pareti è motivata dalla ricchezza simbolica che caratterizza la decorazione di questa parte. Inoltre, una delle due pareti, la parete est, ha al centro un pilastro che può generare criticità dal punto di vista tecnologico. La ricostruzione è stata fatta con pannelli di legno, dove sono state applicate alcune foto ad alta definizione, realizzate con tecniche fotografiche (Clini, et al., 2020).



Figura 51 – Ricostruzione in Laboratorio di una Porzione dello Studiolo del Duca Federico nel Palazzo Ducale di Urbino

Dallo studio dello stato dell'arte, si è potuto comprendere che la creazione di contenuti digitali che vadano ad arricchire un ambiente reale nel campo dei beni culturali, è una attività non ancora svolta e che può portare a dei miglioramenti per quanto riguarda la fruizione (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019).

L'architettura di sistema proposta (Figura 52) è composta da diversi moduli: tracciamento del visitatore, rilevamento del profilo del visitatore, gestione dei contenuti multimediali che meglio si adattano al profilo del visitatore considerato e visualizzazione dei contenuti.

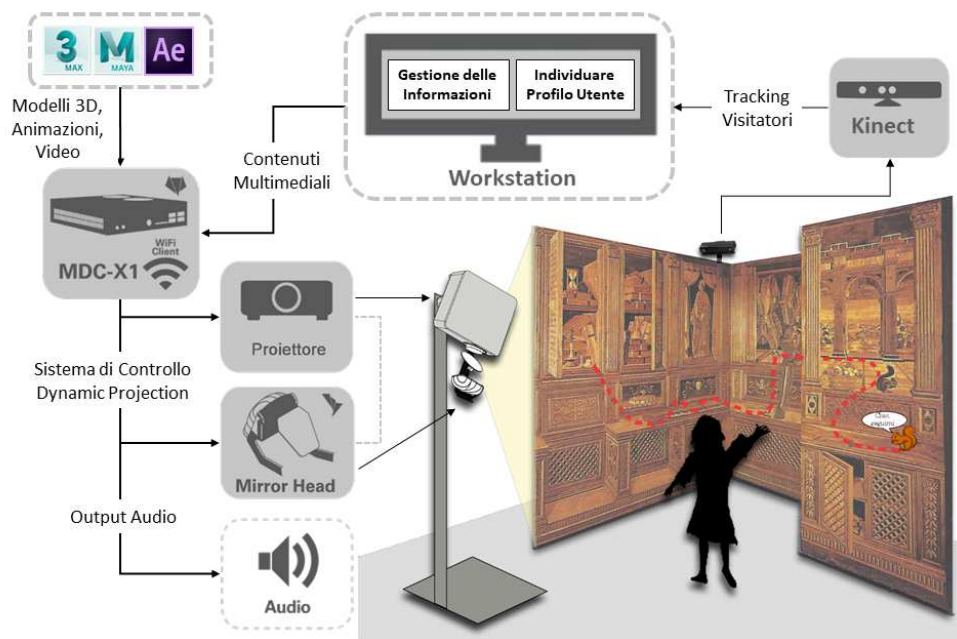


Figura 52 - L'Architettura del Sistema (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019)

L'immagine RGB a colori fornita dalla Kinect può essere facilmente elaborata attraverso appositi algoritmi di machine learning per rilevare automaticamente il profilo del visitatore (es. sesso ed età) e partecipazione (es. analizzando il comportamento e le emozioni che traspaiono dagli occhi). In letteratura vengono proposti diversi metodi basati sull'elaborazione delle immagini e sulle Convolution Neural Networks, che permettono di determinare il sesso e l'età dell'utente, di eseguire l'eye-tracking dell'utente e la rilevazione delle emozioni (Generosi, Ceccacci, & Mengoni, 2018); (Generosi, et al., 2019).

Per garantire una corretta gestione dei servizi informativi, in base alle esigenze del visitatore, è possibile adottare un sistema di supporto alle decisioni, simile a quello proposto da (Ceccacci, Generosi, Girdali, & Mengoni, 2018), che sfrutta algoritmi di intelligenza artificiale (machine learning) basati sull'inferenza induttiva, consentendo di

mappare, strutturare e gestire attraverso modelli semantici le conoscenze relative all'utente, al contesto ed ai servizi informativi.

Quando i visitatori entrano nel campo dell'interazione, il sistema rileva e riconosce il profilo corrispondente all'utente e di conseguenza invia gli opportuni comandi al server MDC-X1 per attivare i contenuti multimediali più adatti. Per riconoscere il profilo dell'utente è possibile procedere in due modi: contando gli utenti presenti nel campo d'acquisizione appartenenti ad ogni categoria, oppure identificando il profilo del primo utente che entra nella stanza.

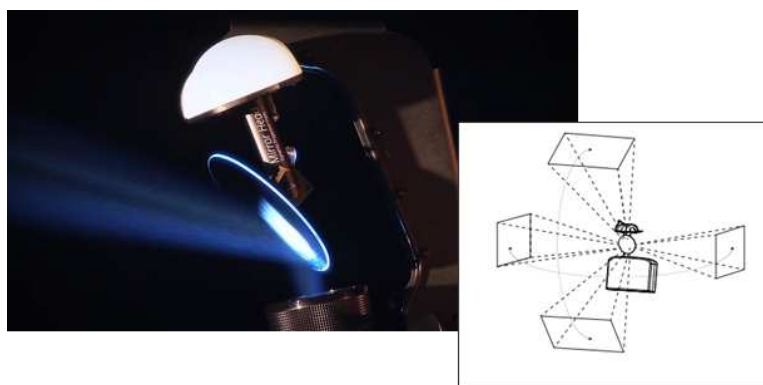


Figura 53 - Mirror Head

Il server MDC-X1 è basato sul sistema Linux; è configurato appositamente per comunicare movimenti e contenuti alla "Mirror Head" realizzata da Dynamic Projection.

La Mirror Head (Figura 53) è uno specchio high-tech che viene azionato digitalmente e utilizzato come supporto aggiuntivo per i proiettori. Comprende: uno specchio, un braccio motor-drive, un motore basculante e un'unità di controllo. Il dispositivo rappresenta il cuore della tecnologia di proiezione dinamica e consente di muovere rapidamente o lentamente i contenuti multimediali proiettati su qualsiasi superficie e di spostarli da una area all'altra, dando l'impressione che si muovano nello spazio. Il server MDC-X1 è dotato anche di un particolare software, denominato MDX, che permette di creare, memorizzare, richiamare, caricare e riprodurre diverse tipologie di contenuti multimediali (es. video, audio, immagini, testi personalizzati, input da telecamera, schede di acquisizione, modelli 3D) e di gestirne la proiezione dinamica sulla superficie desiderata. Il software MDX permette inoltre di combinare in modo appropriato gli elementi che compongono la scena, attraverso l'interazione diretta con la Mirror Head, per gestire i movimenti e realizzare video e foto raddrizzamento, in base alle diverse angolazioni che il proiettore può trovare con le pareti.

I contenuti multimediali vengono proiettati attraverso il modulo di visualizzazione (proiettore, Mirror Head e server MDC-X1) sulle superfici, sovrapponendosi a quanto rappresentato su di esse. Per quanto riguarda la parte di visualizzazione e fruizione dei

contenuti, oltre alla Mirror Head, è stato implementato un proiettore Optoma ZH510T. Si tratta di un proiettore full HD, con risoluzione 1920x1080, 5400 ansilumen. Infine, i contenuti audio, come i versi degli animali, rumore di battaglie e di ferraglia, sono forniti attraverso diversi altoparlanti, anch'essi collegati con il server MDC-X1, in modo che siano sincronizzati con l'animazione.

Per quanto riguarda il contenuto dell'applicazione, lo Studiolo del Duca, grazie alla ricchezza di significati nascosti, si presta a diventare l'ambientazione di una storia, le cui trame nascono dalle decorazioni ad intarsio in legno. Per rendere accessibili le allegorie nascoste nello Studiolo, sono state individuate due tipologie di visitatori in base all'età: bambini in età scolare e adulti. La scelta di queste due fasce d'età sta nel fatto che coprono la maggior parte dei visitatori di Palazzo Ducale di Urbino durante l'anno. Attraverso tecniche di narrazione (Storytelling e Gamification) (Carrozzino, Colombo, Tecchia, Evangelista, & Bergamasco, 2018); (Palombini, 2017); (Shirai, Kose, Minobe, & Kimura, 2015); (Hammady, Ma, & Temple, 2016) sono stati ipotizzati due scenari, la cui struttura e i cui protagonisti sono comuni. I punti di interesse di entrambi gli scenari (Figura 54) sono stati selezionati per la loro forte simbologia, importanza, significato allegorico e posizione nello Studiolo.

Il filo conduttore di entrambe le storie è rappresentato dalla duplice natura del personaggio di Federico: guerriero e uomo di lettere. Tuttavia, l'intreccio narrativo nei due casi si sviluppa in modo diverso: la storia utilizza una narrazione più ludica e meno formale per i bambini, mentre è arricchita da dettagli storici e aneddoti per gli adulti.



Figura 54 - Punti d'Interesse Considerati (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019)

Infatti, nello scenario per gli adulti, Federico stesso descrive la sua personalità di Guerriero, attraverso i simboli dell'armatura, dello struzzo e gli onori ricevuti (ad esempio, l'ermellino, la giarrettiera, ecc.). Il racconto si concentra poi sulla vita dell' "Uomo di Lettere", attraverso l'animazione dei libri, il clavicordo da cui proviene una musica che accompagna il canto della Speranza, una delle tre virtù teologali di maggior ispirazione per Federico. Nello scenario dei bambini (Figura 55), il soggetto narratore è lo scoiattolo, l'alter ego di Federico, che accompagna i piccoli visitatori per tutta la storia. Anche in questo caso si ripercorrono i tratti salienti della personalità di Federico, ma con minore enfasi sulla sua vita di guerriero (sempre rappresentata dall'armatura e dagli animali), prima di passare alla vita di uomo letterario, attraverso l'uso di suoni e animazioni più evocativi per coinvolgere meglio i bambini nella rappresentazione.

Per animare la scena vengono utilizzati diversi contenuti multimediali: per gli animali (es. scoiattolo, ermellino e struzzo) e alcuni oggetti (es. libri, clavicordo, pezzi di armatura, ecc.) vengono adottate animazioni realizzate con modelli 3D, mentre per evidenziare alcuni dettagli (es. lettere sui libri, lo scoiattolo presente, la Speranza) vengono utilizzati effetti luminosi. La procedura alla base dell'animazione è quella di aggiungere contenuti o di evidenziare elementi già presenti, e mai di animare particolare stampati sulle pareti. La rappresentazione dei contenuti su una superficie non bianca, ma con immagini che presentano una cromatografia molto varia e scura, ha necessitato uno studio e diversi test preliminari per comprendere a pieno i limiti della tecnologia nei confronti di un caso così particolare. Si riportano i test svolti con la tecnologia, su questa problematica, nel paragrafo 7.3.



*Figura 55 – Schema dello Scenario dei Bambini (Leopardi, Ceccacci, & Mengoni, 2019)
(Clini, et al., 2020)*

6.2.3 Visual e Haptic

Oltre ai canali sensoriali classici quali vista e udito, si è voluto indagare nuovi paradigmi di fruizione dei Beni Storici sfruttando canali sensoriali e di comunicazione diversi da quelli ordinari, come il tatto. Infatti, per il contesto dei Beni Culturali, il tatto è uno di quei sensi che non possono essere mai utilizzati, per questo motivo è interessante indagarne gli effetti. Il senso del tatto in combinazione con quello della vista e dell'audio conferisce maggiore credibilità agli ambienti virtuali e immerge gli utenti attraverso l'inganno dei loro sensi in una realtà virtuale. Abbiamo bisogno del tatto per capire e apprezzare appieno gli oggetti nello spazio tridimensionale. Lo psicologo David Katz (1989) ha affermato che nessun altro senso è in grado di convincerci della realtà di un oggetto come il nostro senso del tatto. Combinati con gli altri sensi, siamo in grado di comprendere gli oggetti in un modo che non saremmo stati in grado di capire solo con la vista.

Sono stati svolti due studi in questo ambito, attraverso due tecniche diverse di fruizione tattile: la riproduzione di reperti tramite tecniche di Additive Manufacturing e l'esplorazione di manufatti tramite la tecnologia degli Haptic Device.

6.2.3.1 Additive Manufacturing per la Riproduzione di Reperti

Un primo studio è stato realizzato tramite l'impiego di tecniche di Additive Manufacturing per la riproduzione di reperti storici di varia scala. In particolare, sono stati riprodotti la Venere di Frasassi, che si trova al Museo Nazionale Archeologico delle Marche (Museo Archeologico Nazionale delle Marche) in scala 1:1 (8.7 x 2.6) cm (Figura 56 (a)) e la riproduzione in scala 1:50 dell'Arco di Traiano che si trova ad Ancona (22.4 x 9.6 x 27.6) cm (l x p x h) (Figura 56 (b)) (Clini, El Mehtedi, Nespeca, Ruggeri, & Raffaelli, 2018). Le tecnologie di Additive Manufacturing (AM) sono tecnologie che permettono di creare oggetti tramite l'aggiunta di strati di materiale depositati dalla stampante sul piano di stampa, chiamato anche piattaforma di costruzione, seguendo il disegno di un file 3D, spesso in formato STL (Clini, El Mehtedi, Nespeca, Ruggeri, & Raffaelli, 2018). Si possono costruire forme complesse con livelli di dettaglio più o meno elevati, in relazione alle caratteristiche dello strumento che si sta utilizzando.

Esistono molti tipi di tecnologie 3D presenti in commercio, per questo caso studio è stata utilizzata una tecnologia di tipo FDM (Fused Deposition Modelling), in particolare una stampante 3D Fortus 250mc della Stratasys (Stratasys), che consente di ottenere un livello di dettaglio elevatissimo.



Figura 56 – Riproduzione: (a) Venere di Frasassi; (b) Arco di Traiano

I risultati ottenuti hanno dimostrato l'altissimo grado di dettaglio, a diverse scale, che è possibile ottenere con queste tecnologie, confermando la tesi che questa tecnica può essere uno strumento efficace per la riproduzione dei Beni Storici di valore. L'aspetto negativo che ne è risultato, riguarda il materiale, non dal punto di vista della resistenza meccanica, ma dal punto di vista della resa tattile e visiva. Infatti, essendo una plastica non permette di trasmettere tutte le sensazioni ed emozioni che può trasmettere una pietra o marmo quando viene toccata o semplicemente osservata. L'effetto che si ottiene è contrario rispetto a quello voluto, infatti si svaluta fortemente sia la riproduzione che tutta la tecnologia, portando la qualità e il dettaglio raggiunti ad un livello inferiore.

Per questo motivo è stato svolto uno studio diverso, per cercare di sfruttare comunque il livello di dettaglio ottenibile tramite queste tecniche, cercando di ovviare al problema del materiale e del suo effetto materico. Lo studio è stato svolto su un particolare di una formella di Urbino, con l'obiettivo di realizzare una riproduzione ad altissimo dettaglio, con un materiale che permetta di trasmettere sensazioni simili a quelle che il visitatore potrebbe avere toccando il reperto vero che è in pietra.



Figura 57 – Riproduzione di un Particolare della Formella di Urbino

Le problematiche principali delle formelle sono risultate varie: l'estrema fragilità degli originali a causa dell'elevato livello di degrado, le dimensioni considerevoli (84 x 68.5) cm, la collocazione finale all'esterno soggetta ad eventi atmosferici e la riproduzione con un materiale che abbia una resa il più possibile simile alla pietra.

Data la fragilità delle formelle dopo una prima analisi, si è dovuto escludere l'utilizzo di tecniche che prevedano la realizzazione dello stampo direttamente sull'originale. Per questo motivo sono state utilizzate tecniche di digitalizzazione senza contatto, come rilievo laser e fotogrammetria. Una volta acquisito il modello 3D digitale e individuato il grado di dettaglio minimo che doveva presentare il modello per renderlo il più simile possibile agli originali, è stata estratta solo una porzione, di circa (20x20) cm, che è stata riprodotta. La necessità di collocare le riproduzioni all'esterno, per un tempo molto lungo (5-6 anni), senza richiedere troppa manutenzione, ha impedito l'utilizzo dell'ABS, che nonostante sia un materiale molto resistente, è pur sempre di natura plastica, soggetta al degrado atmosferico, dovuta ad un'esposizione diretta agli agenti atmosferici, che nel caso di Urbino sono ancora più aggressivi (es. ghiaccio, neve ...). Inoltre, per questioni di peso, solitamente i prodotti derivanti dall'additive manufacturing non sono mai completamente pieni e questo può facilitare la formazione di muffe interne, che ne accelera il degrado. Quindi dopo uno studio comparato delle possibili soluzioni, si è preferito optare per la creazione di uno stampo con materiale in resina siliconica, per poter fare la colata di materiale a base di polvere di pietra, che successivamente deve essere opportunamente trattato con strati di vernice protettiva. Si può riassumere nei seguenti passaggi la metodologia per ottenere una formella completa:

- Modello 3D dell'intera formella diviso in 12 parti
- Realizzazione con tecniche di Additive Manufacturing di ognuna delle parti
- Assemblaggio delle parti stampate
- Creazione dello stampo con resine siliconiche
- Colatura del materiale in polveri di pietra nello stampo e applicazione di una rete metallica per dare solidità alla struttura
- Finitura superficiale e applicazione di rivestimento esterno.

6.2.3.2 Haptic Device per Esplorare i Manufatti Storici

A seguito degli studi svolti con le tecniche di Additive Manufacturing, si è deciso di spostare la ricerca su quelli che sono chiamati Haptic Device o Dispositivi Aptici. L'applicazione sviluppata è stata realizzata all'interno del progetto "Percorsi didattici interattivi, multisensoriali e multiutente attraverso tecnologie di Virtual Reality: il Museo Archeologico delle Marche" – "Digital Haptic of MANaM". Ha visto la collaborazione con il Museo Archeologico Nazionale delle Marche di Ancona (Museo Archeologico Nazionale delle Marche), nel quale si è installata una postazione multisensoriale per indagare nuove tecniche di fruizione. Questa postazione, grazie all'utilizzo di un Haptic Device, permette ai visitatori del museo di navigare la superficie di alcuni reperti archeologici. La sensazione che l'installazione restituisce è quella di impugnare una penna e di "scivolare" sulle

superfici, così da poterne apprezzare i dettagli e le rugosità del materiale. Di fronte al dispositivo aptico è stato posto uno schermo da 50" per permettere al visitatore di osservare il reperto mentre ne fruisce.

Lo studio effettuato riguardava diversi aspetti: l'interazione con i visitatori, la loro reazione nel trovare tecnologie nuove in un museo, la strutturazione dei contenuti e la fruizione comprensibile di questi ultimi attraverso tecnologie così particolari per il contesto museale. Inoltre, si intendeva studiare il ruolo del senso del tatto e della Gamification per migliorare la User Experience, durante l'interazione con le rappresentazioni digitali VR dei reperti archeologici.

I dispositivi aptici sono strumenti che permettono di simulare il senso del tatto in un ambiente virtuale, in particolare applicano una forza o vibrazione all'utente, che in questo modo ottiene una sensazione tattile quando entra virtualmente in contatto con un oggetto virtuale. Spesso l'oggetto virtuale è una mesh poligonale con una texture.

In questa installazione è stato utilizzato un dispositivo aptico con sei gradi di libertà: l'Omega 6 prodotto da Force Dimension (Figura 58) (Force Dimension). Quando l'utente afferra lo strumento, come se fosse una penna, sullo schermo viene visualizzato un pallino, che permette di comprendere quale punto si sta toccando del reperto virtuale, inoltre l'utente può afferrare il reperto e sentirne il peso. Tramite il linguaggio X3D (basato sul linguaggio XML e sviluppato da Web 3D Consortium) è stato possibile programmare le caratteristiche tattili degli oggetti, come l'attrito statico e dinamico rispetto l'ambiente, la rigidità, definire la gravità e così via.



Figura 58 - Omega 6 Prodotto da Force Dimension

I reperti implementati in questo studio sono la Venere di Frasassi, l'Augusto Capite Velato e la Pisside, tutti conservati al Museo Archeologico Nazionale delle Marche di Ancona (Museo Archeologico Nazionale delle Marche) (Figura 59; Figura 95).

Per ognuno di questi reperti è stato creato un modello digitale acquisito tramite uno scanner laser Konica Minolta Range 7 in combinazione con tecniche fotogrammetriche, secondo la



Figura 59 - Modelli 3D dei Reperti Implementati con il Dispositivo Aptico

procedura descritta da (Mengoni & Leopardi, 2019), successivamente i modelli 3D sono stati immersi in un ambiente in cui poterli navigare singolarmente. Oltre all'applicazione di navigazione, è stato implementato anche uno spazio dedicato alla Gamification, un'applicazione di Sculpturing in cui è possibile scolpire da un blocco di marmo la Venere di Frasassi, che è celata sotto (Figura 60; Figura 96).

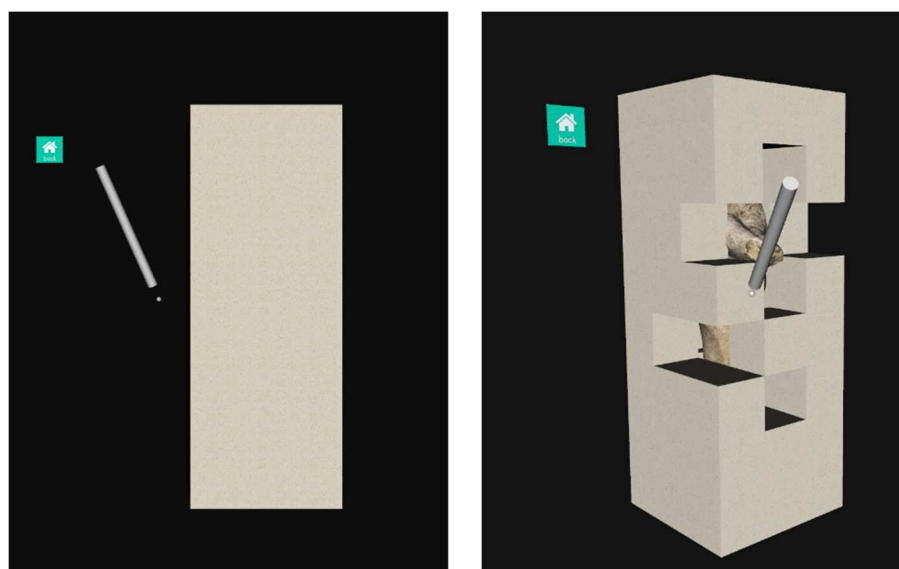


Figura 60 - Sculpturing della Venere

Per questa installazione sono stati svolti dei test con utenti, che hanno un'età compresa tra i 16 e i 30 anni. Durante l'interazione con il modello virtuale, è stato chiesto ai partecipanti di concentrare la loro attenzione sulle proprietà della superficie degli artefatti (es. forma, peso, texture, rigidità e attrito).

Dall'interazione che gli utenti hanno avuto con il dispositivo, si è potuto osservare, il timore nei primi istanti nell'approcciarsi ad uno strumento così lontano dal contesto in cui si trova (Figura 61). L'altra problematica riscontrata riguarda la preoccupazione nell'installare in spazi a contatto con il pubblico, come possono essere i musei, queste nuove tecnologie. In particolare, la preoccupazione maggiore riguarda la loro fragilità in relazione al costo così elevato. Per questo motivo si è deciso di rendere fruibile l'installazione solo in presenza di un operatore del museo, debitamente informato sulle modalità di utilizzo del dispositivo, per evitarne danneggiamenti.



Figura 61 - Installazione nel Museo del Dispositivo Aptico

Capitolo 7.

Sperimentazione

Nel presente capitolo, si riportano i risultati sperimentali ottenuti per alcuni dei casi studio descritti nel Capitolo 5 e nel Capitolo 6.

7.1 Analizzare Piccoli Reperti Archeologici: la Venere di Frasassi

I risultati della metodologia di validazione comprendono innanzitutto: una descrizione/confronto generale delle tecnologie analizzate in termini di differenze tecniche, condizioni di illuminazione operative, tempi di lavoro e costi. A seguire viene riportato il confronto dimensionale e geometrico tra i due modelli 3D ottenuti nella campagna di acquisizione.

Si ricorda che il contesto è il caso studio della “Venere di Frasassi” in cui sono state impiegate le tecnologie di Laser Scanner a triangolazione e SfM (tecnica fotogrammetrica) (Mengoni & Leopardi, 2019).

7.1.1 Confronto Generale tra le Tecnologie Impiegate

Le tecnologia laser scanner e la SfM sono entrambe tecniche di acquisizione ottica basate sulla realtà. Le differenze principali sono riscontrabili nel tipo di sensore:

- sensore attivo o tecnologia range based (laser scanner 3D), dove le coordinate dei punti misurati vengono acquisite direttamente; per questo motivo, la nuvola di punti di dati che ne risulta si trova nel sistema di riferimento cartesiano, comprese le informazioni metriche;
- sensore passivo o tecnologia basata su immagini (SfM, camera), dove i dati 3D vengono estratti dalle immagini (bidimensionali) e convertiti in un modello 3D, quindi geo referenziando e scalando le informazioni metriche con landmark (target).

Attualmente, i sensori passivi sono anche in grado di ottenere modelli digitali tridimensionali molto accurati, come quelli che si possono ottenere con i sensori attivi (Remondino, 2011). La SfM e le tecnologia basate sulle immagini in generale, necessitano di una fase organizzativa precedente alla campagna di acquisizione, chiamata "Progetto di presa". In questa fase preliminare, sono calcolati i punti di acquisizione e si decide la sequenza di foto e il loro numero, sia nel caso di grandi architetture che di piccoli oggetti.

Questa fase comporta un aumento dei tempi di lavoro e rappresenta uno svantaggio, perché richiede uno studio preliminare e la conoscenza della teoria del "Progetto di presa", che non è necessario nella tecnica del laser scanner.

Altro aspetto molto importante da considerare nel confronto, è il rapporto che intercorre tra le dimensioni reali del reperto e le dimensioni del modello 3D. Gli oggetti acquisiti con SfM mantengono le proporzioni, ma la scala viene definita manualmente dall'operatore. Per questo motivo, è facile sbagliare sulle dimensioni; infatti, all'inizio in questo caso studio particolare, le dimensioni della "Venere di Frasassi" erano sbagliate perché in metri anziché in millimetri. Questo problema non si pone con le acquisizioni laser, in cui l'unità di misura è quella reale perché l'acquisizione dei punti è diretta.

Per quanto riguarda l'illuminazione, lo scanner non è influenzato dalle condizioni ambientali per ottenere la nuvola di punti, diverso il discorso per la fotogrammetria, che ha problemi quando l'illuminazione è scarsa, o sovraesposta, retroilluminata o in condizioni di elevata riflettività. Un altro problema, sempre relativo alla luce e alla SfM, è legato alla presenza di un sistema che crei condizioni di luce dinamica, come per esempio una luce statica e una tavola girevole. Per questo motivo, solitamente nel caso di fotogrammetria, si prediligono acquisizioni in condizioni di luci controllate, che solitamente sono facilmente ricreabili in laboratorio. Tuttavia, queste condizioni di illuminazione sono difficili da ottenere nel museo e, soprattutto, nei casi di manufatti di valore, la cui movimentazione è resa complessa da condizioni di sicurezza che devono essere rispettate. Recentemente, questi problemi sono stati ridotti grazie ad azioni di post-processamento (fotoritocco), filtri e treppiedi, ma la difficoltà rimane.

In relazione ai problemi di luce, c'è anche il problema della resa visiva del materiale e quindi il materiale stesso. Infatti, il materiale è un aspetto molto importante nei confronti della tecnologia. Le caratteristiche del materiale sono i dati cromatici e la texture. La SfM è la migliore tecnologia da questo punto di vista, ma recentemente anche gli scanner laser presentano fotocamere digitali integrate per l'acquisizione del colore. L'applicazione della texture e dei colori su un modello digitale è molto difficile se la fotocamera non è integrata nello scanner laser. Nel caso di superfici monocromatiche e superfici riflettenti, anche la fotogrammetria presenta alcuni problemi.

Un altro importante fattore di confronto è il tempo, inteso come la somma del tempo necessario per l'acquisizione e del tempo di elaborazione. Il tempo di acquisizione dipende dall'esperienza dell'operatore, ciò è particolarmente evidente nel caso della SfM. Infatti, quando si acquisisce con questa tecnologia, la configurazione della fotocamera è manuale, e per questo motivo le foto possono non essere messe a fuoco e quindi la procedura deve essere eseguita nuovamente. Invece, nel momento in cui si utilizza il laser scanner, nel caso in cui le condizioni e l'oggetto da acquisire, per la sua conformazione particolare, richiedano la configurazione manuale, lo scanner non esegue la scansione se l'oggetto è fuori fuoco. In generale, il tempo di acquisizione è lo stesso per entrambe le tecnologie. Invece, il tempo per l'elaborazione nella SfM è più lungo rispetto allo scanner laser, circa tre volte di più. Il motivo risiede nel tempo necessario per modificare le foto perché a volte la luce e i colori non sono corretti. L'operazione che richiede più tempo, rimane

l'allineamento per ottenere la mesh. In conclusione, il fattore tempo è molto variabile, tenendo conto anche della possibilità di incorrere in errori dovuti all'operatore, che possono verificarsi nella fase di acquisizione e quindi ripercuotersi nella fase di elaborazione. L'aspetto finale da analizzare, in questo confronto generale, è il costo degli strumenti, di cui si è riportata una descrizione dettagliata nel paragrafo 5.1 per il laser scanner e nel paragrafo 5.2 per la SfM. Nella tecnologia laser scanner, il costo è quattro volte superiore alla SfM; questo aspetto però, va considerato alla luce dei fattori analizzati in questa sezione, in particolare in relazione al tempo e ai possibili errori in cui si può incorrere, e non solo dal punto di vista del costo delle attrezzature.

7.1.2 Confronto tra i Due Modelli 3D Ottenuti

Dopo un confronto tecnologico a livello generale, si è proceduto ad un confronto geometrico tra i due modelli 3D ottenuti con la tecnologia Laser scanner a triangolazione e con la tecnologia SfM (Mengoni & Leopardi, 2019), (Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016). I due modelli 3D sono stati comparati tramite il software di ispezione PolyWorks (PolyWorks), in particolare con il modulo IMInspect.

Il modello 3D ottenuto tramite laser scanner è stato scelto come riferimento, cambiando il sistema di riferimento dal punto in cui si trovava il laser durante l'acquisizione, che quindi è fuori del modello 3D ad un punto nell'estremità bassa delle gambe della statuetta. La scelta del nuovo sistema di riferimento è solo per questioni di comodità per il confronto tra i due modelli. Questo cambiamento è stato effettuato nel momento dell'importazione del modello all'interno del modulo di confronto IMInspect, quindi si è importato anche il modello ottenuto da SfM e si è proceduto all'allineamento. Nel caso in cui i modelli si trovino lontani all'interno dello spazio di lavoro nella fase di importazione, come in questo caso specifico, un primo allineamento manuale per punti è necessario. Successivamente, è stato applicato un algoritmo di "best-fit alignment" per correggere piccoli disallineamenti tra i due modelli, generatisi dall'allineamento manuale. L'algoritmo di allineamento impiegato adotta un metodo basato sulle superfici, che va iterativamente a cambiare posizione e orientamento dell'oggetto da allineare (modello SfM), per minimizzare la deviazione tra i punti rispetto alla superficie dell'oggetto di riferimento (modello laser scanner).

Come per altri studi presenti in letteratura (Rasztovits & Dorninger, 2013); (Graham, Akoglu, Lassen, & Simon, 2017), si procede quindi al confronto sulla base della deviazione tra i due modelli, questo offset (differenza di distanza) viene visualizzata tramite variazioni di colore, le mappe colorate. La Figura 62 (a) mostra un quadro generale della differenza di distanza tra i due modelli, in cui la distanza massima è di circa 0.5mm. In alcune aree i due modelli risultano coincidenti (es. colore: azzurro), come per esempio nelle braccia, alcuni punti nella schiena e bocca, e alcune aree dove ci sono delle differenze (colore: rosso), come la parte superiore della testa (Figura 62 (b)). Questa analisi evidenzia che i due modelli sono pressoché completamente uguali, la deviazione massima è di 0.499mm ed il valore minimo è di -0.196mm.

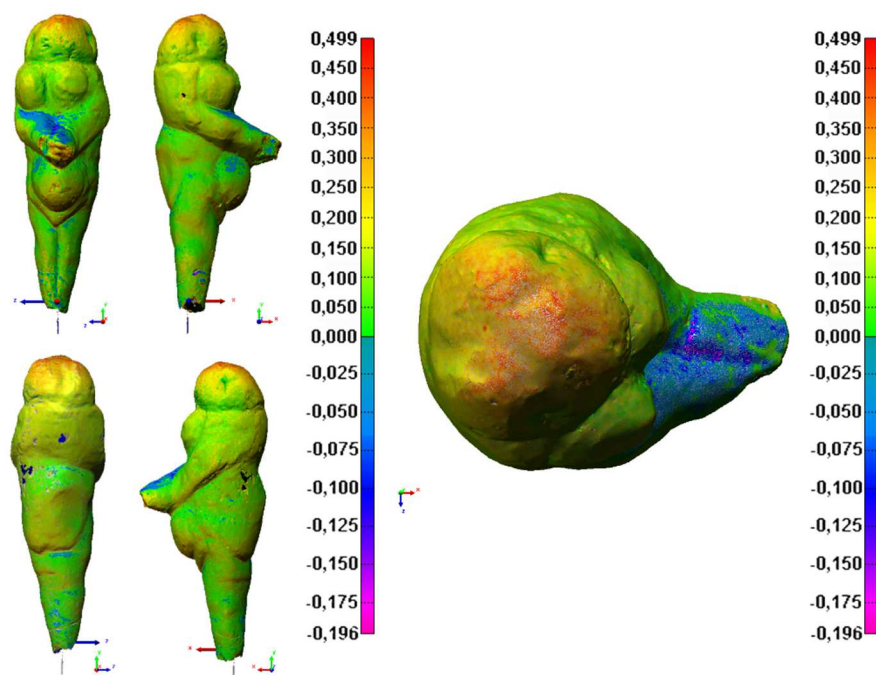


Figura 62 - Differenze tra i Modelli 3D: (a) Laser Scanner - SfM (Distanza Massima 0.5 mm); (b) Vista dall'Alto (Mengoni & Leopardi, 2019)

Una volta dimostrato che i due modelli sono comparabili, la ricerca si è focalizzata su uno studio dettagliato della testa della Venere di Frasassi, essendo la parte meno distinguibile e visibile ad occhio nudo. In questa zona, sono stati effettuati diversi test, andando a cambiare la distanza massima consentita: 0.1mm (Figura 88), 0.2mm (Figura 89), 0.3mm (Figura 90) e 0.4mm (Figura 91). Solo il caso effettuato con 0.4 mm come deviazione massima, è da considerare visto che negli altri casi, i valori ottenuti sono superiori al limite stabilito. La Figura 63 mostra la deviazione in questa zona. La parte superiore della testa presenta la distanza massima (l'area in rosso in Figura 63), mentre il resto del viso e i lati presentano una distanza reciproca inferiore (parti colorate in giallo e verde). Inoltre, per poter visualizzare lo scostamento tra i due profili è stata realizzata una sezione trasversale lungo il piano XY, come si può vedere dalla Figura 64.

Il volto della “Venere di Frasassi” ottenuto con la digitalizzazione tramite laser scanner ha rivelato alcune sorprese, che la SfM non ha permesso di individuare o che il laser scanner ha mostrato con maggior dettaglio. In conclusione, il laser scanner ha permesso di riconoscere più facilmente dettagli sfuggiti ad una prima analisi effettuata con l'altra tecnologia. In particolare, la presenza di una bocca, elemento fondamentale della piccola statuetta, che la umanizza e la rende più affascinante (Figura 65). Questo elemento non è

stato visto nel modello SfM a causa del colore sovrapposto che ha confuso la visualizzazione dei ricercatori. Lo stesso ricercatore ha immediatamente notato la bocca nel modello 3D scannerizzato dove solo la geometria e la topologia erano rappresentate con dettagli e risoluzione elevati. Di conseguenza, la necessità di separare il colore dalla geometria è fondamentale, come dimostrato in questo particolare caso, dove lo scopo principale delle tecnologie è la digitalizzazione per gli studi.

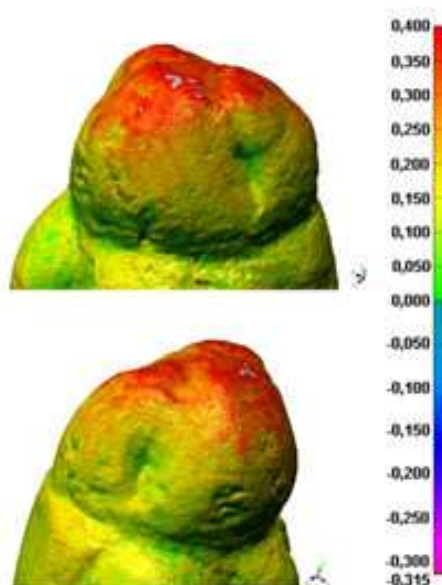


Figura 63 - Dettaglio della Testa, Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.4mm) (Mengoni & Leopardi, 2019)

La bocca è la parte della statuetta su cui si è deciso di condurre ulteriori analisi, essendo l'elemento più piccolo. Pertanto, si è proceduto alla creazione di sezioni sia in direzione verticale che orizzontale, nella parte in cui si trova la bocca. Lo scopo è quello di andare ad analizzare attentamente la deviazione in questi punti. Tra le sezioni verticali e orizzontali realizzate solo nella testa, ogni 1mm, sono state scelte tre sezioni trasversali, come mostrato nella Figura 66 (a). Zoomando nella zona della bocca, si possono vedere i due profili, che sono quasi perfettamente coincidenti. In particolare, in questi punti, i valori minimi di deviazione sono presenti in ciascuna delle tre sezioni e sono pari a -0,047mm (Figura 66 (b)).

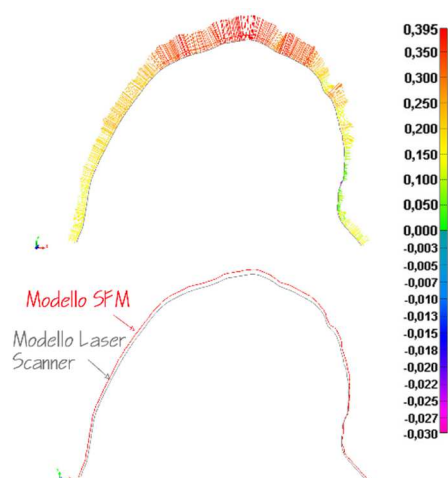


Figura 64 - (a) Sezione Lungo il Piano XY nella Testa, (b) Deviazione tra i Due Profili (Mengoni & Leopardi, 2019)

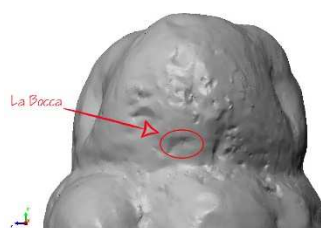


Figura 65 - Viso della Venere di Frasassi (Mengoni & Leopardi, 2019)

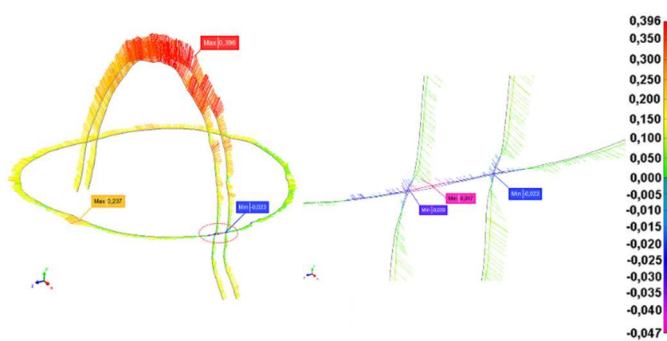


Figura 66 - (a) Sezione in Corrispondenza della Bocca, (b) Dettaglio della Bocca (Mengoni & Leopardi, 2019)

Oltre alle sezioni di cui sopra, è stata realizzata una griglia nella zona della bocca (Figura 67). Le sezioni trasversali sono state realizzate in direzione verticale e orizzontale ogni 0.25mm, per ciascuna di esse è stata calcolata la deviazione tra i due modelli. Sono state realizzate sette sezioni orizzontali e 13 sezioni verticali. I risultati mostrano che i due modelli sono molto simili; infatti, il valore minimo di deviazione tra tutte le sezioni trasversali è di -0.049mm. I valori di deviazione minima, massima e media delle sezioni orizzontali e verticali sono mostrati nella Figura 68, Figura 69. Come si può vedere, l'andamento dei valori di deviazione sia per la sezione verticale che per quella orizzontale è simile. Questo risultato è un ulteriore riprova di quanto i due modelli 3D siano comparabili.

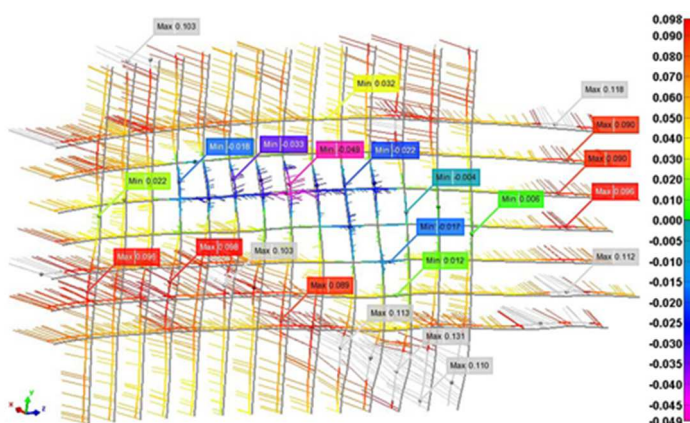


Figura 67 - Griglia di Sezioni nell'Area della Bocca

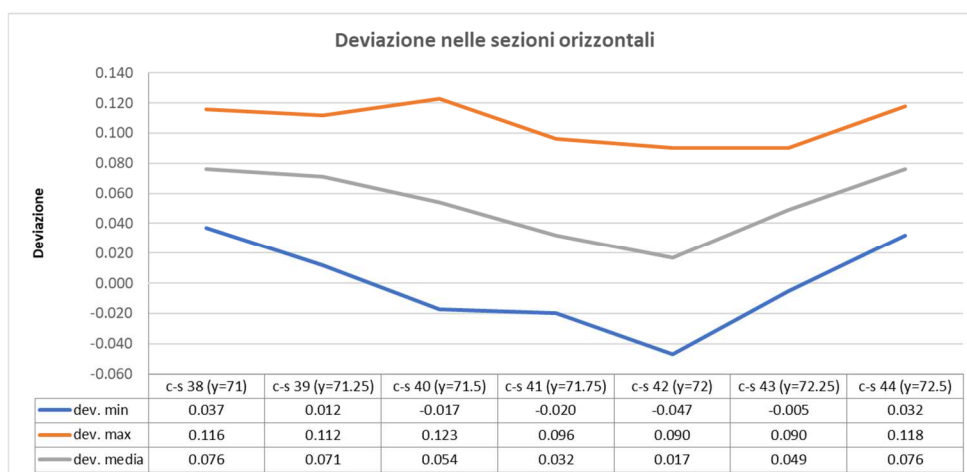


Figura 68 - Deviazione nelle Sezioni Orizzontali

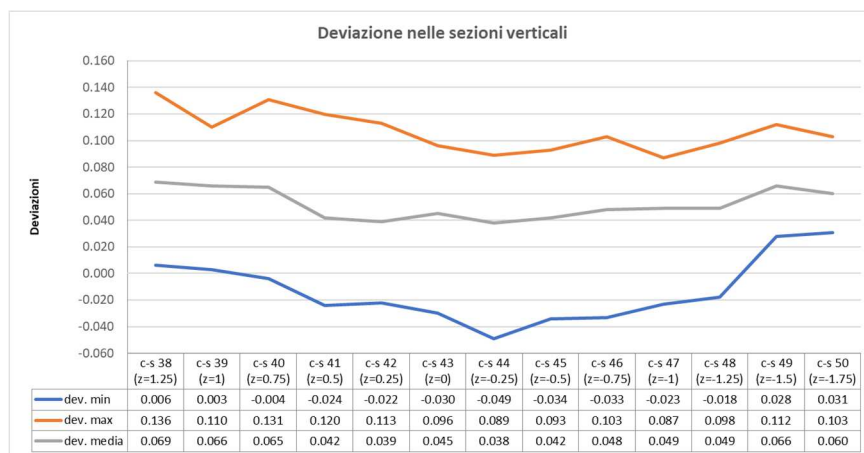


Figura 69 - Deviazione nelle Sezioni Verticali

In conclusione, grazie a questo lavoro si è potuto sviluppare e testare la metodologia comparativa di digitalizzazione, valutazione e analisi, nel caso in cui siano studiate due diverse tecnologie e la pipeline di digitalizzazione per ricostruire modelli 3D di piccoli reperti archeologici. Il risultato dello studio ha messo in evidenza le debolezze cui è soggetta la SfM, nel caso in cui sia necessario un modello in scala molto accurato e realistico, in particolare nel caso di personale non esperto per effettuare acquisizioni. Tuttavia, la soluzione migliore risulta l'integrazione di entrambe le tecnologie, in quanto ognuna presenta delle potenzialità che se considerate insieme permettono di ottenere la soluzione migliore. Infatti, la SfM è adatta per ottenere il facsimile dell'artefatto per interagire con i visitatori attraverso nuove interfacce uomo-macchina, mentre lo scanner 3D è una tecnologia chiave per la velocità di acquisizione e l'alta risoluzione della nuvola di punti.

Questo studio e le scoperte che ne derivano dimostrano la crescente necessità di scansionare gli oggetti del patrimonio culturale, sia per preservarli che per valorizzarli con applicazioni innovative. Inoltre, il confronto tra le due tecnologie ha permesso di comprendere l'importanza di un'analisi comparativa preliminare, per valutare i pro e i contro in relazione al caso specifico da analizzare.

7.2 Tecnologie di X-Reality a Confronto per la Visualizzazione di Reperti Archeologici

Parte dello sviluppo del Metodo di Costruzione di un Sistema di Fruizione è stato possibile grazie all'analisi svolta con le tecnologie di X-Reality, in particolare 5 tecnologie diverse: desktop 2D, proiezione stereoscopica attiva 3D, Head Mounted Display (HMD), AR mobile e un sistema di proiezione olografica. La sperimentazione svolta con gli utenti, prevedeva la visualizzazione di reperti archeologici su ognuna delle tecnologie, secondo

una sequenza casuale di queste ultime. Alla fine di ogni esperienza con una tecnologia, sono stati sottoposti una serie di questionari all'utente.

L'obiettivo dello studio è quello di fornire un metodo di lavoro per la selezione delle tecnologie più appropriate per uno specifico contesto applicativo, come quello rappresentato dai Beni Culturali, per permettere ai visitatori di un museo, la visualizzazione e interazione con le riproduzioni digitali dei reperti, in mancanza degli originali nel caso non siano esonibili per varie ragioni.

Le metriche di valutazione implementate per questo studio sono divisibili in tre questionari: Presence (PR), Attitude Towards Experience (ATE) e Visitor Experience (VX) (Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6). I punteggi relativi a PR, a VX con le dimensioni (EDU, ENT, ESC ed EST), e ad ATE, sono stati calcolati facendo la media dei rispettivi valori dei singoli item per partecipante. Tutti i punteggi sono risultati essere pienamente consistenti (Cronbach sui valori aggregati: PR, $\alpha = .88$; VX, $\alpha = .95$; EDU, $\alpha = .91$; ENT, $\alpha = .87$; ESC, $\alpha = .81$; EST, $\alpha = .89$; ATE, $\alpha = .97$).

La Figura 70 riporta i risultati del questionario della Presence con i sistemi VM considerati. L'ANOVA a misure ripetute, dove le tecnologie (proiezione olografica, desktop, AR, proiezione stereoscopica e HMD) sono considerate come fattore interno dei soggetti e PR come variabile dipendente, ha mostrato che le tecnologie hanno un'elevata significatività, $F(4, 116) = 33.29$, $p < .001$. Considerando il sistema desktop-based ($M = 3.13$, $SD = 0.88$) come base di confronto (es: la tecnologia più economica e la tecnologia più ampiamente utilizzata), il t-test a misure ripetute (Bonferroni-corretto) ha evidenziato che la Presence con HMD ($M = 4.24$, $SD = 0.44$) è significativamente superiore, differenza = -1.114 , $t(29) = -8.050$, $p < .01$, mentre è significativamente inferiore con la proiezione olografica ($M = 2.70$, $SD = 0.87$), differenza = 0.419 , $t(29) = 3.094$, $p < .05$. Non ci sono differenze significative tra desktop e AR ($M = 3.51$, $SD = 0.62$) e tra desktop e proiezione stereoscopica ($M = 3.55$, $SD = 0.80$).

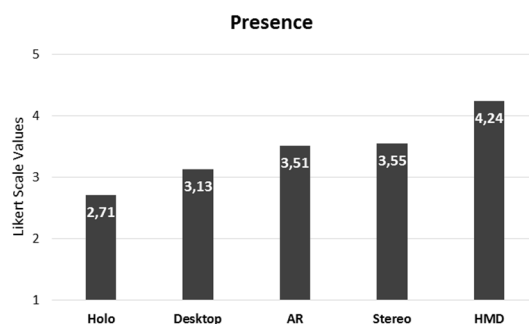


Figura 70 – Risultato del Questionario della Presence

Questo risultato può essere dovuto al fatto che il sistema a proiezione olografica non permette all'utente di interagire in alcun modo con i reperti, se non come spettatore. I sistemi basati su desktop, AR mobile e proiezione stereoscopica, invece, permettono ai visitatori di percepire i manufatti e interagire con loro in diversi modi. Il sistema desktop, caratterizzato da un monitor ad alta risoluzione, permette ai visitatori di apprezzare i reperti anche nei minimi dettagli; la proiezione stereoscopica massimizza la percezione spaziale dei manufatti; il sistema AR mobile permette ai visitatori di osservare le dimensioni reali dei manufatti e interagire con loro in modo naturale. Tuttavia, tutti questi sistemi utilizzano dispositivi esterni (monitor, smartphone, parete per proiezione), per cui la percezione della tecnologia interposta tra l'utente e il reperto è elevata e questo limita l'illusione di un'interazione non mediata. Al contrario, il sistema basato su HMD (cioè, un dispositivo indossabile) è l'unico che permette al visitatore di sperimentare efficacemente l'illusione percettiva della non mediazione.

Per quanto riguarda i risultati relativi alla VX complessiva ci si riferisce alla Figura 71. L'ANOVA a misure ripetute evidenzia un'elevata significatività della tecnologia sulla VX, $F(4, 116) = 22.926$, $p < .001$. Come si può osservare, l'esperienza con l'HMD ($M = 5.56$, $SD = 0.76$) è risultata la più apprezzata, mentre quella fornita dalla proiezione olografica ($M = 3.43$, $SD = 1.26$) è stata giudicata la meno soddisfacente. Il t-test a misure ripetute (Bonferroni-corretto) mostra che l'esperienza con l'AR ($M = 4.41$, $SD = 0.78$) è significativamente più soddisfacente della proiezione olografica, differenza = 0.967, $t(29) = 4.013$, $p < 0.01$. La proiezione stereoscopica ($M = 4.63$, $SD = 1.35$) è significativamente meno soddisfacente dell'HMD, differenza = -0.935, $t(29) = -4.060$, $p < 0.01$. Né AR differisce in modo significativo dalla proiezione stereoscopica, né desktop dalla proiezione olografica.

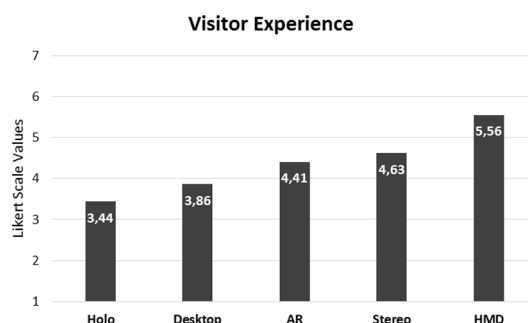


Figura 71 – Risultato complessivo per il Questionario della Visitor Experience

Le analisi con l'ANOVA a misure ripetute sono state effettuate per valutare l'esperienza del visitatore anche a livello dei fattori, che compongono la VX.

I risultati hanno evidenziato un effetto significativo del fattore tecnologia su EDU, $F(4, 116) = 14.307$, $p < .001$, su ENT, $F(4, 116) = 24.203$, $p < .001$, su ESC, $F(4, 116) = 21.044$,

$p < .001$, e su EST, $F(3.121, 90.504) = 15.945$, $p < .001$ (in quest'ultimo caso, il test di Mauchly è stato significativo, per cui è stata utilizzata la correzione di Greenhouse-Geisser).

I t-test a misure ripetute (Bonferroni-corretto) hanno evidenziato che il sistema basato su HMD ha massimizzato i giudizi dei visitatori per quanto riguarda tutte le dimensioni della VX. In particolare, per quanto riguarda la dimensione EDU, il sistema basato sulla proiezione stereoscopica ($M = 4.84$, $SD = 1.47$) ha dato risultati significativamente peggiori dell'HMD ($M = 5.55$, $SD = 1.06$), differenza = -0.717 , $t(29) = -3.273$, $p < 0.05$. Il sistema basato sulla stereoscopia si è comportato significativamente meglio della proiezione olografica ($M = 3.68$, $SD = 1.60$), differenza = 1.150 , $t(29) = 3.905$, $p < 0.01$. Non ci sono differenze significative tra i sistemi basati sulla proiezione stereoscopica, desktop ($M = 4.47$, $SD = 1.46$) e AR ($M = 4.69$, $SD = 1.60$).

Per quanto riguarda la dimensione ENT, AR ($M = 4.92$, $SD = 1.01$) si è comportata significativamente peggio di HMD ($M = 6.08$, $SD = 0.75$), differenza = -1.158 , $t(29) = -6.421$, $p < 0.01$, ma è risultata significativamente migliore del desktop ($M = 3.80$, $SD = 1.65$), differenza = 1.117 , $t(29) = -3.581$, $p < 0.05$. Né AR differisce significativamente dalla proiezione stereoscopica ($M = 4.82$, $SD = 1.48$), né desktop dalla proiezione olografica ($M = 3.77$, $SD = 1.33$).

Per quanto riguarda la dimensione ESC, il sistema basato sulla proiezione stereoscopica ($M = 3.92$, $SD = 1.52$) si è comportato significativamente peggio dell'HMD ($M = 4.90$, $SD = 1.44$), differenza = -0.992 , $t(29) = -3.434$, $p < 0.05$, ma è risultato significativamente migliore del desktop ($M = 2.98$, $SD = 1.32$), differenza = 0.933 , $t(29) = 3.623$, $p < 0.05$. Non ci sono differenze significative tra i sistemi basati su desktop, AR ($M = 3.11$, $SD = 0.95$) e proiezione olografica ($M = 2.71$, $SD = 1.20$).

Infine, per quanto riguarda la dimensione EST, c'è una differenza significativa tra le prestazioni dei sistemi basati su HMD ($M = 5.70$, $SD = 0.75$) e la proiezione stereoscopica ($M = 4.93$, $SD = 1.50$), differenza = 0.767 , $t(29) = 3.155$, $p < 0.05$. Proiezione olografica ($M = 3.60$, $SD = 1.58$) è risultata significativamente peggio della stereoscopia, differenza = -1.333 , $t(29) = -3.730$, $p < 0.01$. Non ci sono differenze significative tra i sistemi basati sulla proiezione stereoscopica, desktop ($M = 4.18$, $SD = 1.59$) e AR ($M = 4.89$, $SD = 0.88$).

Nella Figura 72 sono riportati i valori delle medie delle singole tecnologie per i singoli fattori della VX, l'HMD ha dimostrato avere un risultato migliore per tutti i fattori, mentre la proiezione olografica un risultato peggiore in tutti i fattori.

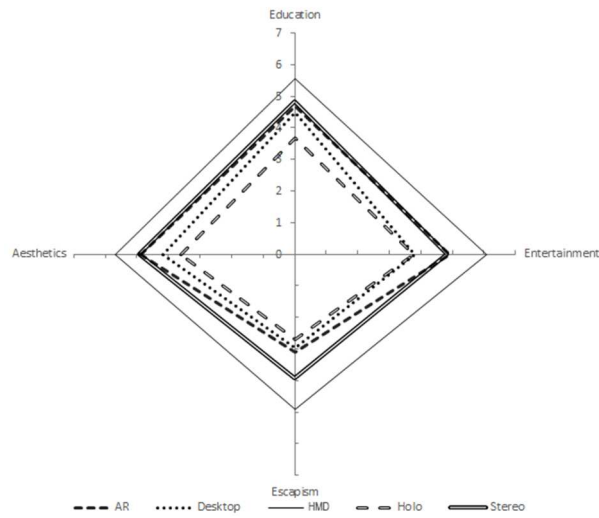


Figura 72 – Relazione tra 4 Fattori della Visitor Experience e le 5 Tecnologie di X-Reality

Infine, nella Figura 73, sono riportati i risultati relativi all'ATE degli utenti con le tecnologie considerate. L'ANOVA a misure ripetute ha rivelato un effetto globale ampiamente significativo delle tecnologie su ATE, $F(4, 116) = 16.56, p < .001$. L'esperienza con il sistema basato su HMD ($M = 6.50, SD = 0.51$) è significativamente più apprezzata dai visitatori rispetto al desktop ($M = 4.79, SD = 1.56$), differenza = $-1.712, t(29) = -5.929, p < .01$ (Bonferroni-corretto). L'esperienza con la proiezione olografica ($M = 4.15, SD = 1.71$) è risultata significativamente meno accattivante di AR ($M = 5.51, SD = 1.05$), differenze = $-1.360, t(29) = -3.862, p < 0.01$ (Bonferroni-corretto), e stereoscopia, differenze = $-1.232, t(29) = -3.298, p < 0.05$ (Bonferroni-corretto). Non sono state riscontrate differenze significative tra desktop, proiezione stereoscopica ($M = 5.38, SD = 1.43$) e AR.

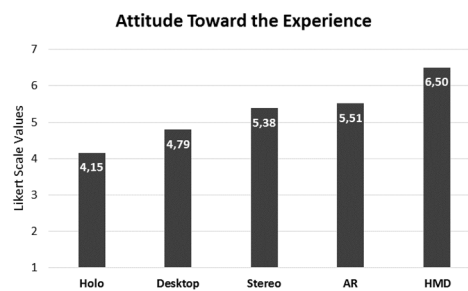


Figura 73 – Risultati per il Questionario Attitude Towards Experience

A conclusione dei test è stato anche chiesto di redigere una classifica delle tecnologie, ponendo il quesito “Stila una classifica delle tecnologie. in base a quella che ritieni più adatta per il contesto museale”. Da questa classifica come si può vedere nella Figura 74, l’HMD risulta essere la tecnologia migliore, come anche la proiezione a stereoscopia attiva, mentre la proiezione olografica la peggiore. Probabilmente influenzata, come già detto prima, dall’impossibilità di interagire con il manufatto, se non come spettatore.

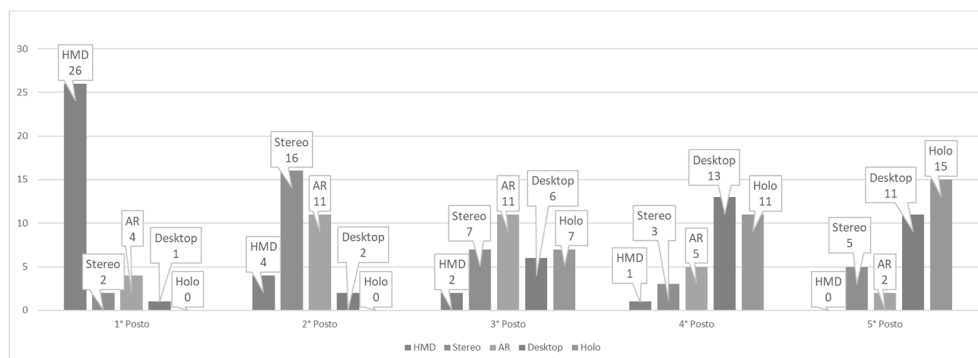


Figura 74 - Classificazione delle Tecnologie di X-Reality

7.3 Spatial Augmented Reality nello Studiolo del Duca Federico a Urbino

Lo scopo primario della sperimentazione è quello di cercare di sviluppare un’installazione digitale che sia il più possibile fusa con l’ambiente reale, per evitare uno tra i problemi più comuni delle applicazioni digitali nell’ambito di luoghi dediti alla cultura, quello di avere delle aree completamente separate dal resto della struttura, sia dal punto di vista concettuale che fisico. L’applicazione proposta, basata sulla proiezione dinamica, mira ad aumentare il coinvolgimento dei visitatori dello Studiolo di Federico da Montefeltro, offrendo contenuti su misura per le caratteristiche del pubblico e minimizzando l’invasione tecnologica, garantendo una completa fusione dei contenuti digitali con l’ambiente fisico. In particolare, la sperimentazione si è concentrata principalmente, sull’indagine dei limiti tecnologici del sistema di proiezione, per ora solo nel caso di ricostruzione in laboratorio (Figura 75), in attesa di poter anche in un futuro svolgere la sperimentazione nel luogo reale.

Gli aspetti da considerare sono molteplici, prima di tutto la scelta del proiettore in relazione alla sua distanza dalla parete. Infatti, ipotizzando l’applicazione nel caso reale dentro lo Studiolo del Duca Federico da Montefeltro, non si può pensare di porre il cavalletto, che sorregge la Mirror Head e il proiettore, in un angolo della stanza, perché rischia di occludere la visualizzazione di parte delle altre pareti, non oggetto dell’animazione.



Figura 75 - Riproduzione in Laboratorio di Parte dello Studiolo del Duca Federico

Allo stesso tempo un altro problema è dato dalle dimensioni ridotte dello studiolo, infatti si possono avere problemi nella distanza di messa a fuoco e di conseguenza limitare le dimensioni massime dell'immagine proiettata, ma anche problemi di occlusione da parte degli utenti a causa della loro presenza sulla linea di proiezione. Inoltre, è stato necessario valutare, l'angolo massimo di apertura della Mirror Head, verificare se effettivamente la posizione scelta, possa essere utilizzata per la proiezione con un unico dispositivo di proiezione. Concluse queste valutazioni e considerazioni, che sono state effettuate, prima dell'acquisto dell'attrezzatura e messe a punto dopo la costruzione della riproduzione in laboratorio, si è deciso di posizionare il cavalletto in modo che lo specchio si trovi circa ad un'altezza di 2m da terra e ad una distanza di 2m da una parete e 2.20m dall'altra, come viene riportato nella Figura 76.

Dall'analisi dell'uso che è stato fatto finora della proiezione dinamica, si è potuto vedere che le applicazioni ad oggi implementate proiettano le informazioni solo su superfici monocromatiche, non decorate e opache (Figura 77).

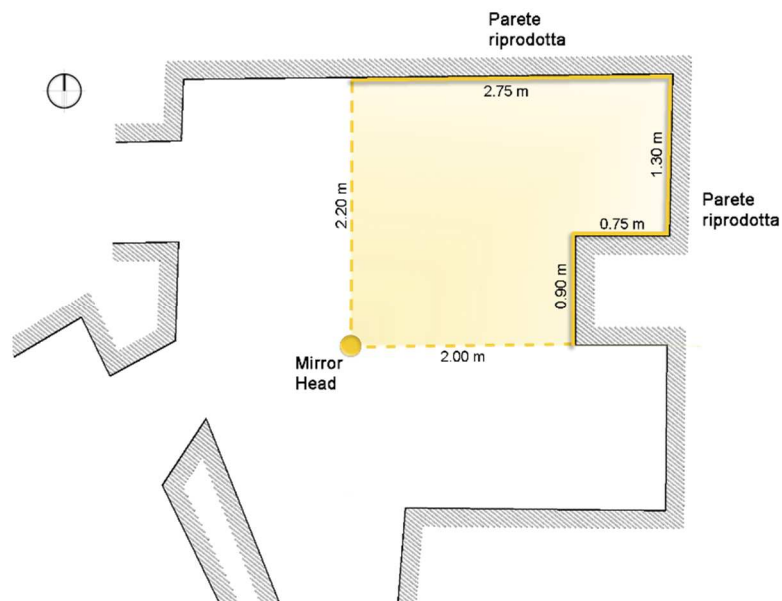


Figura 76 - Posizione della Mirror Head nella Pianta dello Studiolo in Base alle Dimensioni della Ricostruzione in Laboratorio

Tuttavia, le pareti dello Studiolo del Duca sono caratterizzate da un rivestimento in legno semilucido trattato a cera, e presentano un'ampia gamma di colori marroni, che variano da tonalità molto scure a tonalità molto chiare. Nonostante la riproduzione in laboratorio sia stata realizzata appositamente, con delle foto ad altissima definizione con una superficie più opaca rispetto a quella reale, per garantire una buona resa dell'immagine proiettata in funzione delle condizioni di illuminazione ambientale, è stato necessario effettuare diversi test. Questo problema è ridotto in parte dall'elevata luminosità di cui dispone il proiettore (5400 ansilumen), che permette di proiettare anche su pareti dipinte o decorate. Comunque questo problema non è del tutto risolto, come si può vedere dalla Figura 78 in cui il modello 3D dell'ermellino proiettato risulta molto chiaro, nonostante l'illuminazione ambientale a neon, obbligatoriamente presente per poter vedere le riproduzioni stampate, non sia diretta contro la parete.

Le animazioni principalmente sono costituite da modelli 3D animati (scoiattolo, ermellino, libro, clavicordo), loop di video, immagini, filtri luminosi, effetti cinematografici come l'occhio di bue e l'effetto glow.

Per quanto riguarda i modelli 3D, sono stati realizzati in Maya (Maya Autodesk) e anche in 3dsMax (3dsMax Autodesk), in modo da poter creare i loop delle animazioni da inserire all'interno del server MDC-X1 che gestisce tutta l'architettura del sistema di visualizzazione.



Figura 77 - Esempio di Applicazione di Proiezione Dinamica, (Gallery Invasion)

Dopo i primi test, si è compreso che per ottenere una buona resa grafica, i modelli devono presentare una texture più scura rispetto a quella che si era ipotizzata in principio e che forniva una resa realistica sullo schermo del pc. In particolare, si è proceduto andando ad aumentare il contrasto della texture e/o del video in fase di post processamento del loop. Sempre per quanto riguarda il post processamento dei modelli, una volta creato il video è stato necessario applicargli uno sfondo nero, in modo tale da non far proiettare lo sfondo sulla superficie. Questo perché lo sfondo con cui sono proiettati i contenuti tramite il software MDX è nero di default, proprio per incrementare l'effetto di dinamicità al modello che viene proiettato e animato tra le pareti. Come si può vedere dalla Figura 79 (b), nel caso in cui si imposti uno sfondo chiaro e il modello o immagine non siano sufficientemente grandi, il proiettore di conseguenza andrà a proiettare anche lo sfondo chiaro. Un'altra difficoltà riscontrata in fase di costruzione delle animazioni riguarda la deformazioni dei modelli, delle immagini, dei filtri ed effetti cinematografici. In particolare, ha richiesto diverse prove l'effetto glow, che consiste nel creare un alone luminoso intorno ad una figura per evidenziarne la presenza e posizione nello spazio. Uno tra gli elementi selezionati per questo effetto è lo scoiattolo, posto sulla parete est dello Studiolo. La mappatura dell'immagine sulla parete ha richiesto diverso tempo per far aderire alla perfezione la sagoma luminosa sulla figura stampata (Figura 81), questo è stato possibile grazie al software MDC e alla possibilità di utilizzare punti di controllo per deformare via via l'immagine, come si può vedere dalla Figura 79. Un ulteriore problema riscontrato nella creazione di questo effetto, riguarda la maschera luminosa da applicare, infatti in un primo momento si era realizzato solamente il bordo luminoso, lasciando sia l'interno della figura che l'esterno trasparenti (Figura 80(a)), purtroppo però all'interno del software MDC si trasforma in una proiezione nera e quindi è come si applicasse un'ombra sopra l'immagine, creando un effetto contrario a quello voluto (Figura 79).



Figura 78 - Proiezione del Modello 3D sulla Parete Riprodotta in Laboratorio:
 (a) Modello con Texture Normale; (b) Modello con Texture Contrastata



Figura 79 - Effetto Glow sullo Scoiattolo: (a) Mappatura Errata; (b) Mappatura Corretta

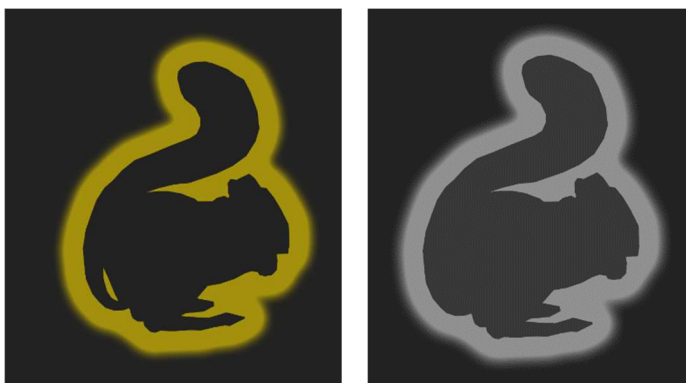


Figura 80 - Effetto Glow: (a) Maschera Sbagliata; (b) Maschera Corretta



Figura 81 - Effetto Glow sullo Scoiattolo

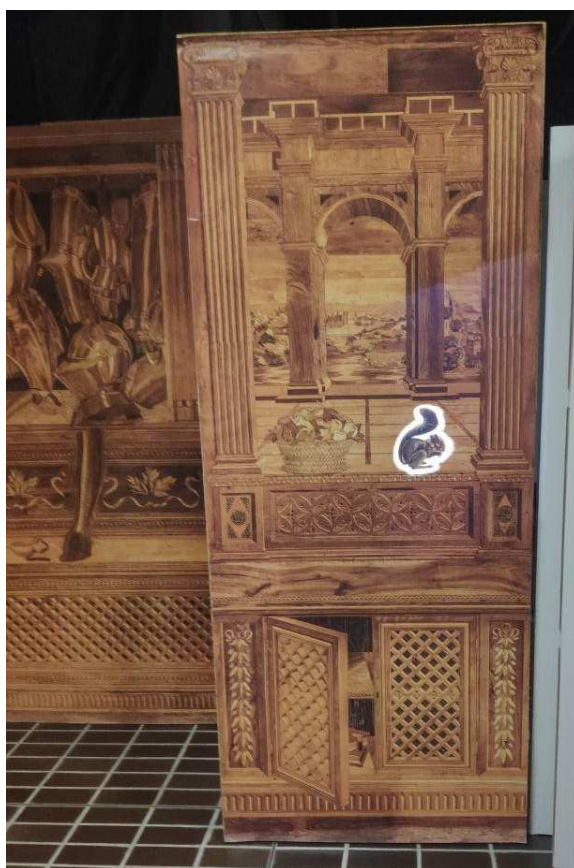


Figura 82 - Parete Est: Effetto Glow sullo Scoiattolo

Quindi è stato necessario costruire la maschera in modo tale da creare una leggera luminosità nella parte interna della figura e un alone molto chiaro all'esterno (Figura 80 (b)), anche per questo motivo si è deciso di utilizzare il colore bianco, al posto del giallo iniziale (Figura 81; Figura 82).

Per quanto riguarda l'altro effetto cinematografico applicato, l'occhio di bue, anche questo ha richiesto diverse prove e imposto dei limiti nel suo uso. A causa della presenza della lesena sulla parete est e dell'angolo che si crea tra questo e il proiettore, si è stati costretti ad escludere il suo utilizzo in questa zona, per evitare di creare una separazione dell'immagine proiettata tra i due piani, come si può vedere dalla Figura 83. Quindi si è deciso di utilizzare questo effetto solo sulla parete Nord e in particolare in corrispondenza della figura rappresentata la Speranza. Anche in questo caso sono stati necessari diversi test, soprattutto per il posizionamento dello specchio nello spazio, per fare in modo che tutta o parte della Speranza risulti all'interno del cono di luce (Figura 84), questo a causa della ridotta distanza di proiezione che limita le dimensioni dell'immagine.

Uno degli aspetti che è necessario indagare è la valutazione dell'impatto del sistema sull'esperienza del visitatore. Anche se tutte le applicazioni basate sulla proiezione dinamica sono finora diventate immediatamente virali, il grado di accettazione del sistema nel contesto considerato deve essere valutato attentamente. Infatti, ad esempio, le immagini proiettate potrebbero influenzare la visualizzazione della decorazione, quindi è necessario valutare se e come eventuali effetti di disturbo possano influenzare l'esperienza del visitatore.

Infine, un altro aspetto molto importante che deve essere approfondito, è la capacità del sistema proposto di incrementare l'apprendimento del visitatore. In particolare, dovranno essere condotti diversi studi, con l'obiettivo di confrontare le prestazioni del sistema proposto con quelle delle tradizionali audioguide fornite dal museo. Sarà inoltre importante confrontare il sistema di guida proposto, basato su una tecnologia di proiezione dinamica, con un'applicazione AR tradizionale visualizzata su dispositivi mobili. Interessante da indagare è la possibilità di rendere il sistema interattivo, consentendo di fornire informazioni specifiche in base alla posizione del visitatore.

Per quanto riguarda invece la sperimentazione con gli utenti, sono in programma test che prevedono il coinvolgimento sia di adulti che di bambini, essendo i due principali gruppi che solitamente visitano il Palazzo Ducale di Urbino.



Figura 83 - Effetto Occhio di Bue sulla Parete Est Dove si Trova la Lesena



Figura 84 - Effetto ad Occhio di Bue sulla Speranza

Capitolo 8.

Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il presente lavoro di tesi ha permesso di sviluppare un ambiente, l'Eco-Sistema del Bene Culturale, al cui interno trovano posto delle metodologie innovative per l'acquisizione; digitalizzazione, fruizione e strutturazione del bene archeologico e/o artistico e strumenti interattivi dedicati all'implementazione di tale metodologia, basati sul paradigma del Prototipo Virtuale (VP).

La struttura dell'Eco-Sistema del Bene Culturale, presenta alla base il reperto storico, che deve essere preservato e valorizzato in tutti i suoi dettagli e particolari, indipendentemente dalla dimensione e tipologia, sia esso un reperto archeologico, sito storico, architettura, monumento, dipinto o scultura. Per raggiungere questo obiettivo, sono state studiate e raccolte metodologie e modelli, che coprono vari aspetti, dalla catalogazione o digitalizzazione del Bene Storico, fino alla sua fruizione attraverso canali multisensoriali integrati tra loro.

Le metodologie innovative sviluppate per il nuovo ambiente, abbracciano a tutto tondo il Manufatto Artistico e le fasi a cui deve andare incontro durante il suo Ciclo di Vita, schematizzato tenendo conto delle necessità e bisogni intrinseci.

Al centro dell'Eco-Sistema, c'è il Prototipo Virtuale, la cui funzione è quella di anello di collegamento tra tutti gli elementi presenti nell'ambiente. Di conseguenza, è stato necessario un approccio interdisciplinare per specificare i parametri del modello digitale (ad es. risoluzione, precisione, dimensione) e una procedura di reverse engineering basata sulla conservazione, restauro e uso del manufatto.

Gli obiettivi prefissati e raggiunti sono i seguenti:

- Studiare e creare una metodologia operativa per la costruzione del VP di un Bene Storico, Archeologico ed Artistico in grado di strutturare, rendere coerenti e mettere a sistema tutti i contenuti digitali che si riferiscono a scale diverse, dettagli diversi, contesti diversi ed usi diversi.
- Studiare e Schematizzare le fasi operative a cui è sottoposto un reperto storico dal suo ritrovamento fino alla sua esposizione o immagazzinamento in strutture apposite.
- Ricercare e sviluppare una Metodologia che permetta di gestire in modo integrato e coerente: a) matching di acquisizioni 3D ottenute a diverse scale (scultoree, archeologiche, pittoriche, ecc.) e con differenti strumenti ottici (laser a

triangolazione, laser a luce strutturata, fotocamere), b) gestione della pipeline di ricostruzione del modello 3D; c) sovrapposizione al modello 3D di immagini ad Alta Definizione, ottenute con tecniche anche molto diverse, al fine di incrementare la conoscenza dell'opera e le informazioni relative.

- Ideare un Modello/ Metodo di fruizione del DH qui rappresentato dal VP, che permetta di correlare diverse interfacce multimodali e multisensoriali per la manipolazione dei contenuti digitali, diversi contesti d'utilizzo e diversi target di utenti con varie caratteristiche psico-fisiche e culturali. Ciò è finalizzato sia alla diffusione di tecnologie ICT capaci di innovare il settore del DH in diverse realtà anche medio-piccole, sia alla Social Inclusion e Cohesion seguendo le direttive della Comunità Europea.

Tutto questo è stato possibile grazie allo sviluppo e implementazione di vari casi studio, nei vari ambiti coperti dalle metodologie sviluppate.

Vista la vastità e complessità del tema rappresentato dal Digital Cultural Heritage, è di fondamentale importanza per il futuro procedere con altri casi studio, soprattutto con casi che presentano particolarità per mettere a punto, arricchire e consolidare l'ambiente sviluppato dell'Eco-Sistema del Bene Culturale.

Per questi motivi, tra gli sviluppi futuri possibili, rientrano sicuramente nuove acquisizioni con diverse tecnologie e su diversa scala in cui andare ad applicare la metodologia sviluppata, la creazione di nuovi ambienti di fruizione che implementino diversi canali sensoriali insieme, nuovi test con utenti sia con i questionari già implementati, sia aggiungendone di nuovi per valutare altri aspetti.

Comunque, il lavoro presentato in questa tesi, non si ritiene che possa essere esaustivo e rappresentativo di tutto l'ambito dei Beni Culturali, il quale per la sua vastità offre sempre nuove sfide da studiare attentamente.

Bibliografia

- 3D-COFORM*. (s.d.). Tratto da <http://www.3d-coform.eu/>
- 3D-ICONS*. (s.d.). Tratto da <http://3dicons-project.eu/>
- 3dsMax Autodesk*. (s.d.). Tratto da <https://www.autodesk.it/products/3ds-max/overview>
- Agisoft Metashape*. (s.d.). Tratto da <https://www.agisoft.com/>
- Apollonio, F. I., Rizzo, F., Bertacchi, S., Dall’Osso, G., Corbelli, A., & Grana, C. (2017). SCHER : Smart Architecture for Cultural Heritage in Emilia Romagna. *Italian Research Conference on Digital Libraries*, (p. 142-156).
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A. I., & Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*, *14*(4), 332-345.
- ARIADNE*. (s.d.). Tratto da <https://visual.ariadne-infrastructure.eu/>
- Armesto-González, J., Riveiro-Rodríguez, B., González-Aguilera, D., & Rivas-Brea, M. T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, *37*(12), 3037-3047.
- Asano, T., Ishibashi, Y., Minezawa, S., & Fujimoto, M. (2005). Surveys of exhibition planners and visitors about a distributed haptic museum. *Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology* (p. 246-249). ACM.
- Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. (2008). An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human-Computer Interaction*, *24*(6), 574-594.
- Baracchini, C., Fabiani, F., Grilli, R., & Vecchi, A. (2009). SICaR w/b, un Sistema Informativo per la progettazione, il monitoraggio e la condivisione delle attività di restauro: verso un network della conservazione. *Atti del Convegno di Studi Scienza e Patrimonio Culturale nel Mediterraneo. Diagnostica e conservazione: esperienze e proposte per una Carta del Rischio*, (p. 507-519).

- Barbieri, L., Bruno, F., & Muzzupappa, M. (2017). Virtual museum system evaluation through user studies. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 101-108.
- Barrile, V., & Bilotta, G. (2018). Computer Vision in 3D Modeling of Cultural Heritage: The Riace Bronzes. *Advanced Science Letters*, 24(1), 581-586.
- Basballe, D. A., & Halskov, K. (2010). Projections on museum exhibits: engaging visitors in the museum setting. *Proceedings of the 22nd Conference of the Computer-Human Interaction Special Interest Group of Australia on Computer-Human Interaction* (p. 80-87). ACM.
- Basdogan, C., De, S., Kim, J., Muniyandi, M., Kim, H., & Srinivasan, M. A. (2004). Haptics in minimally invasive surgical simulation and training. *IEEE computer graphics and applications*, 24(2), 56-64.
- Bayram, B., Nemli, G., Özkan, T., Oflaz, O., Kankotan, B., & Çetin, İ. (2015). Comparison of laser scanning and photogrammetry and their use for digital recording of cultural monument case study: byzantine land walls-Istanbul. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2.
- Belhi, A., Foufou, S., Bouras, A., & Sadka, A. H. (2017). Digitization and preservation of cultural heritage products. *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* (p. 241-253). Springer, Cham.
- Bergamasco, M., Brogni, A., Frisoli, A., Salvini, F., & Vignoni, M. (2002). Tactual exploration in cultural heritage. *XIV Round Table Computer-Aided Egyptology, Pisa*.
- Bergamasco, M., Frisoli, A., & Barbagli, F. (2002). Haptics technologies and cultural heritage applications. *Proceedings Of Computer Animation 2002 (CA 2002)* (p. 25-32). IEEE.
- Bernardini, F., & Rushmeier, H. (2002). The 3D model acquisition pipeline. *Computer graphics forum*. 21(2), p. 149-172. Wiley Online Library.
- Berndt, E., & Carlos, J. (2000). Cultural heritage in the mature era of computer graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20 (1), 36-37.
- Bici, M., Campana, F., Colacicchi, O., & D'Ercoli, G. (2018). CAD-CAE methods to support restoration and museum exhibition of bronze statues: the “Principe Ellenistico”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 364(1). IOP Publishing.
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: how much immersion is enough? *Computer*, 40(7), 36-43.

- Bradley, C., & Currie, B. (2005). Advances in the field of reverse engineering. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(5), 697-706.
- Brewster, S. A. (2001). The Impact of Haptic 'Touching' Technology on Cultural Applications. In *Proceedings of EVA 2001*, 1-14.
- Brewster, S. A. (2005). Impact of haptic 'touching' technology on cultural applications. *Ashgate*.
- Brogni, B., Avizzano, C., Evangelista, C., & Bergamasco, M. (1999). Technological approach for cultural heritage: augmented reality. *8th IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction. RO-MAN'99* (p. 206-212). IEEE.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4-7.
- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). *Virtual reality technology*. John Wiley & Sons.
- Butler, M., & Neave, P. (2008). Object appreciation through haptic interaction. *Hello! Where are you in the landscape of educational technology? Proceedings ascilite Melbourne 2008*, 133-141.
- Cabrera, J. S., Frutos, H. M., Stoica, A. G., Avouris, N., Dimitriadis, Y., Fiotakis, G., & Liveri, K. D. (2005). Mystery in the museum: collaborative learning activities using handheld devices. *Proceedings of the 7th international conference on Human computer interaction with mobile devices & services* (p. 315-318). ACM.
- Carrozzino, M., & Bergamasco, M. (2010). Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums. *Journal of Cultural Heritage*, 11(4), 452-458.
- Carrozzino, M., Colombo, M., Tecchia, F., Evangelista, C., & Bergamasco, M. (2018). Comparing Different Storytelling Approaches for Virtual Guides in Digital Immersive Museums. In L. T. De Paolis, & P. Bourdot (A cura di), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (p. 292-302). Springer International Publishing.
- Carrubba, A. (s.d.). Il restauro del reperto archeologico. Museo Salinas. Palermo: Assessorato dei beni Culturali.
- Ceccacci, S., Generosi, A., Giraldi, L., & Mengoni, M. (2018). Tool to Make Shopping Experience Responsive to Customer Emotions. *International Journal of Automation Technology*, 12(3), 319-326.

- Ch'ng, E., Cai, S., Leow, F.-T., & Zhang, T. E. (2019). Adoption and use of emerging cultural technologies in China's museums. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 170-180.
- Cipriani, L., Fantini, F., & Bertacchi, S. (2017). 3D digital models for scientific purpose: between archaeological heritage and reverse modelling. In *Handbook of Research on Emerging Technologies for Architectural and Archaeological Heritage* (p. 291-321).
- Clini, P., El Mehtedi, M., Nespeca, R., Ruggeri, L., & Raffaelli, E. (2018). A digital reconstruction procedure from laser scanner survey to 3d printing: the theoretical model of the Arch of Trajan (Ancona). *SCIRES-IT-SCIENTIFIC RESEARCH and Information Technology*, 7(2), 1-12.
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2016). Sfm Technique and Focus Stacking for Digital Documentation of Archaeological Artifacts. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Clini, P., Quattrini, R., Bonvini, P., Nespeca, R., Angeloni, R., Mammoli, R., . . . Gallegati. (2020). Digit(al)isation in Museums: Civitas Project—AR, VR, Multisensorial and Multiuser Experiences at the Urbino's Ducal Palace. In *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums* (p. 194-228). IGI Global.
- Colombi, R., Meucci, C., Scichilone, G., M. C., D. P., Fiorentino, P., . . . Federici, C. (2002). *La conservazione e il restauro dei manufatti archeologici*. Il Mondo dell'Archeologia.
- Comes, R. (2016). Haptic Devices and Tactile Experiences in Museum Exhibitions. *Journal of Ancient History and Archaeology*, 3(4).
- Dettori, A., Avizzano, C. A., Marcheschi, S., Angerilli, M., Bergamasco, M., Loscos, C., & Guerraz, A. (2003). Art Touch with CREATE haptic interface. *ICAR Proceedings*. IEEE International Conference on Advanced Robotics.
- Escobar-Castillejos, D., Noguez, J., Neri, L., Magana, A., & Benes, B. (2016). A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training. *Journal of Medical Systems*, 40(4).
- Evgenikou, V., & Georgopoulos, A. (2015). Investigating 3D reconstruction methods for small artifacts. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Fineschi, A., & Pozzebon, A. (2015). A 3D virtual tour of the Santa Maria della Scala Museum Complex in Siena, Italy, based on the use of Oculus Rift HMD. *2015 International Conference on 3D Imaging (IC3D)* (p. 1-5). IEEE.

- Force Dimension*. (s.d.). Tratto da <https://www.forcedimension.com/>
- Gallery Invasion*. (s.d.). Tratto da <https://skullmapping.com/project/gallery-invasion/>
- Generosi, A., Altieri, A., Ceccacci, S., Foresi, G., Talipu, A., Turri, G., . . . Giraldi, L. (2019). MoBeTrack: A Toolkit to Analyze User Experience of Mobile Apps in the Wild. *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* (p. 1-2). IEEE.
- Generosi, A., Ceccacci, S., & Mengoni, M. (2018). A deep learning-based system to track and analyze customer behavior in retail storev. *2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)* (p. 1-6). IEEE.
- Google Art & Culture*. (s.d.). Tratto da <https://artsandculture.google.com/>
- Govers, C. P. (1996). What and how about quality function deployment (QFD). *International Journal of Production Economics*, *95*, 46-47, 575-585. doi:10.1016/0925-5273(95)00113-1
- Graham, C., Akoglu, K., Lassen, A., & Simon, S. (2017). Epic dimensions: a comparative analysis of 3D acquisition methods. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, *42*.
- Gregory, A. D., Ehmann, S. A., & Lin, M. C. (2000). intouch: Interactive multiresolution modeling and 3d painting with a haptic interface. *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000* (p. 45-52). IEEE.
- Grow, D. I., Verner, L. N., & Okamura, A. M. (2007). Educational Haptics. *AAAI Spring Symposium: Semantic Scientific Knowledge Integration*, (p. 53-58).
- Guidi, G., Russo, M., & Anghelddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *1(2)*, 55-69.
- Hammady, R., Ma, M., & Temple, N. (2016). Augmented reality and gamification in heritage museums. *Joint International Conference on Serious Games* (p. 181-187). Springer.
- He, Z., Wu, L., & Li, X. R. (2018). When art meets tech: the role of augmented reality in enhancing museum experiences and purchase intentions. *Tourism Management*, *68*, 127-139.
- Hogg, R. V., Tanis, E. A., & Zimmerman, D. L. (1977). *Probability and statistical inference* (Vol. 993). Macmillan New York.

- Iachini, T., Maffei, L., Masullo, M., Senese, V. P., Rapuano, M., Pascale, A., . . . Ruggiero, G. (2019). The experience of virtual reality: are individual differences in mental imagery associated with sense of presence? *Cognitive processing*, 20(3), 291-298.
- Jamil, M. H., Annor, P. S., Sharfman, J., Parthesius, R., Garachon, I., & Eid, M. (2018). The Role of Haptics in Digital Archaeology and Heritage Recording Processes. *2018 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)* (p. 1-6). IEEE.
- Jung, T., Chung, N., & Leue, M. C. (2015). The determinants of recommendations to use augmented reality technologies: The case of a Korean theme park. *Tourism management*, 49, 75-86.
- Jung, T., Tom Dieck, M. C., Lee, H., & Chung, N. (2016). Effects of virtual reality and augmented reality on visitor experiences in museum. In *Information and communication technologies in tourism 2016* (p. 621-635). Springer.
- Koska, B., & Kremen, T. (2013). The combination of laser scanning and structure from motion technology for creation of accurate exterior and interior orthophotos of St. Nicholas Baroque church. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 40, 133-138.
- Kosmopoulos, D., & Styliaras, G. (2018). A survey on developing personalized content services in museums. *Pervasive and Mobile Computing*, 47, 54-77.
- Lee, K. M. (2004). Presence, explicated. *14(1)*, 27-50.
- Leopardi, A., Ceccacci, S., & Mengoni, M. (2019). Dynamic Projection for the Design of an Adaptive Museum Guide. *International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (p. 85-94). Springer.
- Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., & Shade, J. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (p. 131-144). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- LINKED HERITAGE project*. (s.d.). Tratto da <http://www.linkedheritage.eu/>
- Loizides, F., El Kater, A., Terlikas, C., Lanitis, A., & Michael, D. (2014). Presenting cypriot cultural heritage in virtual reality: A user evaluation. *Euro-Mediterranean Conference* (p. 572-579). Springer.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of computer-mediated communication*, 3 (2).

- Marconi, P. (s.d.). L'Augusto di Ancona. *Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo - Bollettino d'Arte*, 149-159.
- Marshall, M., Johnson, A., Summerskill, S., Baird, Q., & Esteban, E. (2019). Automating photogrammetry for the 3D digitisation of small artefact collections. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Mason, M. (2016). The MIT museum glassware prototype: visitor experience exploration for designing smart glasses. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 9(3).
- Matterport. (s.d.). Tratto da <https://matterport.com/>
- Maya Autodesk. (s.d.). Tratto da <https://www.autodesk.it/products/maya/overview>
- McCall, V., & Gray, C. (2014). Museums and the 'new museology': theory, practice and organisational change. *Museum Management and Curatorship*, 29(1), 19-35.
- Mengoni, M., & Leopardi, A. (2019). An Exploratory Study on the Application of Reverse Engineering in the Field of Small Archaeological Artefacts. *Computer-Aided Design and Applications*, 16(6), 1209-1226.
- Mengoni, M., Ceccacci, S., Generosi, A., & Leopardi, A. (2018). Spatial Augmented Reality: an application for human work in smart manufacturing environment. *Procedia Manufacturing*, 476-483.
- Mengoni, M., Raponi, D., & Ceccacci, S. (2016). A method to identify VR-based set-up to foster elderly in design evaluation. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, 4 (1), 46-70.
- MiBAC. (s.d.). *Il reperto Archeologico dallo scavo all'esposizione*. Ministero per i beni e le attività culturali soprintendenza per i beni archeologici della toscana - Sezione Didattica.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telematic and telepresence technologies*. 2351, p. 282-292. International Society for Optics and Photonics.
- Moore, S. G. (2011). Some things are better left unsaid: How word of mouth influences the storyteller. *Journal of Consumer Research*, 38(6), 1140-1154.
- Moro, S., Rita, P., Ramos, P., & Esmerado, J. (2019). Analysing recent augmented and virtual reality developments in tourism. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*.

- Mortara, M., Catalano, C. E., Bellotti, F., Fiucci, G., Houry-Panchetti, M., & Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), 318-325.
- Museo Archeologico Nazionale delle Marche. (s.d.). Tratto da <http://www.musei.marche.beniculturali.it/musei/?mid=200&nome=museo-archeologico-nazionale-delle-marche>
- Napolitano, R. K., Scherer, G., & Glisic, B. (2018). Virtual tours and informational modeling for conservation of cultural heritage sites. *Journal of Cultural Heritage*, 29, 123-129.
- Nespeca, R. (2019). Towards a 3D digital model for management and fruition of Ducal Palace at Urbino. An integrated survey with mobile mapping. *SCIRES-IT-SCientific RESearch and Information Technology*, 8(2), 1-14.
- Neuburger, L., & Egger, R. (2017). An afternoon at the museum: Through the lens of augmented reality. In *Information and communication technologies in tourism 2017* (p. 241-254). Springer.
- Niglio, O. (2012). *Le Carte del Restauro. Documenti e Norme per la Conservazione dei Beni Architettonici ed Ambientali* (Vol. 11). Aracne Editrice, Roma.
- Nikonova, A. A., & Biryukova, M. V. (2017). The Role of Digital Technologies in the Preservation of Cultural Heritage. *Museology & Cultural Heritage/Muzeologia a Kulturne Dedicstvo*, (1).
- Nilsson, N. C., Nordahl, R., & Serafin, S. (2016). Immersion revisited: A review of existing definitions of immersion and their relation to different theories of presence. *Human Technology*, 12.
- Noh, Z., Sunar, M. S., & Pan, Z. (2009). A review on augmented reality for virtual heritage system. *International conference on technologies for E-learning and digital entertainment* (p. 50-61). Springer.
- Nyaupane, G. P., & Andereck, K. L. (2014). Visitors to cultural heritage attractions: An activity-based integrated typology. *Tourism Culture & Communication*, 14(1), 17-26.
- Osorio, M. F., Figueroa, P., Prieto, F., Boulanger, P., & Londoño, E. (2011). A novel approach to documenting artifacts at the Gold Museum in Bogota. *Computers & Graphics*, 35(4), 894-903.
- Pallud, J. (2017). Impact of interactive technologies on stimulating learning experiences in a museum. *Information & Management*, 54(4), 465-478.

- Palombini, A. (2017). Storytelling and telling history. Towards a grammar of narratives for Cultural Heritage dissemination in the Digital Era. *Journal of cultural heritage*, 24, 134-139.
- Patrucco, G., Rinaudo, F., & Spreafico, A. (2019). A new handheld scanner for 3D survey of small artifacts: the stonex F6. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Pattee, A., Höfle, B., & Seitz, C. (2015). Integrative 3D recording methods of historic architecture Burg Hohenecken castle from southwest Germany. *2015 Digital Heritage. 1*, p. 95-98. IEEE.
- Pedeli, C., & Pulga, S. (2002). Pratiche conservative sullo scavo archeologico. Principi e metodi.
- Perret, J. (2019). Haptic device integration. In *DHM and Posturography* (p. 709-717). Elsevier.
- Pieraccini, M., Guidi, G., & Atzeni, C. (2001). 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2(1), 63-70.
- Pietroni, E., & Adami, A. (2014). Interacting with virtual reconstructions in museums: The Etruscanning Project. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 7(2).
- Pine, B. J., & Gilmore, J. H. (1998). Welcome to the experience economy. *Harvard business review*, 76, 97-105.
- Pocheville, A., Kheddar, A., & Yokoi, K. (2004). I-TOUCH: a generic multimodal framework for industry virtual prototyping. *IEEE Conference on Robotics and Automation, 2004. TExCRA Technical Exhibition Based.*, (p. 65-66).
- PolyWorks*. (s.d.). Tratto da InnovMetric Software: <https://www.innovmetric.com/it>
- Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52, 129-141.
- Radder, L., & Han, X. (2015). An examination of the museum experience based on Pine and Gilmore's experience economy realms. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 31(2), 455-470.
- Raponi, D. (2016). Trends in virtuality: experiments.
- Rasztovits, S., & Dorninger, P. (2013). Comparison of 3D reconstruction services and terrestrial laser scanning for cultural heritage documentation. *International*

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 5.

- Regenbrecht, H., & Schubert, T. (2002). Measuring presence in augmented reality environments: design and a first test of a questionnaire. *Porto, Portugal*.
- Regenbrecht, H., Lum, T., Kohler, P., Ott, C., Wagner, M., Wilke, W., & Mueller, E. (2004). Using augmented virtuality for remote collaboration. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 13 (3), 338-354.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote sensing*, 3(6), 1104-1138.
- Remondino, F., & Stylianidis, E. (2016). 3D recording, documentation and management of cultural heritage. 2. Whittles Publishing.
- Ridel, B., Reuter, P., Laviolle, J., Mellado, N., Couture, N., & Granier, X. (2014). The revealing flashlight: Interactive spatial augmented reality for detail exploration of cultural heritage artifacts. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 7(2).
- Rua, H., & Alvito, P. (2011). Living the past: 3D models, virtual reality and game engines as tools for supporting archaeology and the reconstruction of cultural heritage—the case-study of the Roman villa of Casal de Freiria. *Journal of Archaeological Science*, 38(12), 3296-3308.
- Russo, M., Remondino, F., & Guidi, G. (2011). Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e calcolatori*, 169-198.
- Schuemie, M. J., Van Der Straaten, P., Krijn, M., & Van Der Mast, C. A. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 183-201.
- Scopigno, R., Cignoni, P., Callieri, M., Ganovelli, F., Impoco, G., Pingi, P., & Ponchio, F. (2003). Using optically scanned 3D data in the restoration of Michelangelo's David. *Optical metrology for arts and multimedia*. 5146, p. 44-53. International Society for Optics and Photonics.
- Shirai, A., Kose, Y., Minobe, K., & Kimura, T. (2015). Gamification and construction of virtual field museum by using augmented reality game Ingress. *Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference*. ACM.
- Sketchfab*. (s.d.). Tratto da <https://sketchfab.com/>
- Stanney, K. M. (2003). Virtual environments. In J. A. Jacko, & A. Sears, *The human-computer interaction handbook* (p. 621-634). L. Erlbaum Associates Inc.

- SteamVR Plugin*. (s.d.). Tratto da <https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/steamvr-plugin-32647>
- Stevens, B., Jerrams-Smith, J., Heathcote, D., & Callear, D. (2002). Putting the virtual into reality: Assessing object-presence with projection-augmented models. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 11(1), 79-92.
- Stratasys. (s.d.). Tratto da <https://support.stratasys.com/products/fdm-platforms/fortus-250mc>
- Stutely, R. (1991). *The Economist guide to business numeracy*. John Wiley & Sons Inc.
- Sundén, E., Lundgren, I., & Ynnerman, A. (2017). Hybrid Virtual Reality Touch Table: An immersive collaborative platform for public explanatory use of cultural objects and sites. *15th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Graz, Austria, September 27-29, 2017*. Eurographics-European Association for Computer Graphics.
- Sylaiou, S., Karoulis, A., Stavropoulos, Y., & Patias, P. (2008). Presence-centered assessment of virtual museums' technologies. 28(4), 55-62.
- Sylaiou, S., Mania, K., Karoulis, A., & White, M. (2010). Exploring the relationship between presence and enjoyment in a virtual museum. *International journal of human-computer studies*, 68(5), 243-253.
- Tan, B.-K., & Rahaman, H. (2009). Virtual heritage: Reality and criticism. *CAAD futures* (p. 143-156). Les Presses de l'Université de Montréal.
- Tecchia, F., Ruffaldi, E., Frisoli, A., Bergamasco, M., & Carrozzino, M. (2007). Multimodal interaction for the web. *Museums and the Web 2007: Proceedings*. Tratto da <http://www.archimuse.com/mw2007/papers>
- tom Dieck, M. C., Jung, T. H., & tom Dieck, D. (2018). Enhancing art gallery visitors' learning experience using wearable augmented reality: generic learning outcomes perspective. *Current Issues in Tourism*, 21(17), 2014-2034.
- tom Dieck, M. C., Jung, T., & Han, D.-I. (2016). Mapping requirements for the wearable smart glasses augmented reality museum application. 7(3), 230-253.
- Tucci, G., Cini, D., & Nobile, A. (2011). Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum. *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011*.
- Ullrich, S., & Kuhlen, T. (2012). Haptic palpation for medical simulation in virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4), 617-625.

- Unity Technologies*. (s.d.). Tratto da <https://unity.com>
- Varady, T., Martin, R. R., & Cox, J. (1997). Special issue: reverse engineering of geometric models. *Computer-Aided Design*, 29(4), p. 253-254.
- Vergo, P. (1997). *New museology*. Reaktion books.
- Viacava, A. (1994). *L'atleta di Fano*. L'Erma di Bretschneider.
- Vuforia Engine*. (s.d.). Tratto da <https://library.vuforia.com/getting-started/overview.html>
- Walsh, K., Enz, C. A., & Canina, L. (2008). The impact of strategic orientation on intellectual capital investments in customer service firms. *Journal of Service Research*, 10(4), 300-317.
- Wang, Z., Shi, W., Akoglu, K., Kotoula, E. Y., & Rushmeier, H. (2018). Cher-ob: A tool for shared analysis and video dissemination. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(4), 18.
- Wei, W., Qi, R., & Zhang, L. (2019). Effects of virtual reality on theme park visitors' experience and behaviors: A presence perspective. *Tourism Management*, 71, 282-293.
- Wetzlinger, W., Auinger, A., & Dörflinger, M. (2014). Comparing effectiveness, efficiency, ease of use, usability and user experience when using tablets and laptops. *International Conference of Design, User Experience, and Usability* (p. 402-412). Springer.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7(3), 225-240.
- Wojciechowski, R., Walczak, K., White, M., & Cellary, W. (2004). Building virtual and augmented reality museum exhibitions. *Proceedings of the ninth international conference on 3D Web technology* (p. 135-144). ACM.
- Yastikli, N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 423-427.
- Yim, M. Y.-C., Cicchirillo, V. J., & Drumwright, M. E. (2012). The impact of stereoscopic three-dimensional (3-D) advertising. *Journal of advertising*, 41(2), 113-128.
- Zinßer, T., Schmidt, J., & Niemann, H. (2005). Point set registration with integrated scale estimation. *International conference on pattern recognition and image processing*, (p. 116-119).

Appendice

Ciclo di Vita del Reperto

R I T R O V A M E N T O	SCAVO							TRASFERIMENTO	
	studio preliminare delle condizioni prima dell'estrazione dal terreno	consolidamento con sostanze pro estrazione (se necessario e come ultima possibilità)	recupero dal sito	pulitura	lavaggio (se possibile)	siglatura/ catalogazione	incollaggio preliminare		deposito temporaneo
	effettuare disegni, fotografie del reperto e del sito per facilitare archiviazione e studi successivi. Analizzare le condizioni climatiche in termini di temperatura e umidità del sito di scavo, che devono poi essere ripristinate per la conservazione dei reperti, per evitare il loro danneggiamento.	fase molto delicata e irreversibile, che deve essere eseguita solo se strettamente necessaria	nel caso di reperti interi contenenti terra è bene estrarli dal terreno senza asportare la terra all'interno perché funge da consolidante. Nel caso di reperti frammentari o con incrinature è bene estrarli con un supporto che favorisce la tenuta dell'insieme. ci sono altri metodi di prelievo, ma comunque si prevede un uso di supporti ricoperti da materiale gommoso o altro.	serve per eliminare residui di terra. fase da svolgere a secco, si usano pennelli o strumenti in legno, a volte si usano acidi o piccole gocce d'acqua. Non viene mai effettuata in questa fase se il manufatto presenta pitture, sfaldature	mai una immersione completa, solitamente localizzati e con spugne, dipende dalla classe del materiale (lavabile, lavabile con moderazione, no lavabile)	viene eseguita con inchiostro di china, dopo aver passato una resina trasparente sulla zona, solitamente sul retro, se non è dipint. Nel caso di materiali come vetro, avorio, piume, legnosi associa un cartellino. Compilazione della scheda di catalogazione in base al tipo di ritrovamento (sito, reperto, monumento...). Si dovrebbe compilare una scheda apposita detta scheda di sito archeologico (SI), questa contiene altre schede a seconda di cosa si tratta: saggi stratigrafici (SAS), complessi archeologici (CA), monumenti archeologici (MA), reperti archeologici (RA), beni numismatici (NU), reperti antropologici (TMA), tabella materiali archeologici (AT). A tali schede è allegata documentazione di vario genere, registrata in altre schede collegate alle precedenti, definite schede per "allegati multimediali".	effettuato con nastro adesivo (carta) da effettuare direttamente durante il recupero, ma comunque per un breve periodo per evitare che l'adesivo rimanga attaccato. Fase preliminare al restauro. Utile realizzare fotografie e disegni per facilitare assemblaggio. Si effettua per non avere troppi frammenti	ultima fase della campagna di scavo. il luogo deve essere ben controllato e in condizioni climatiche specifiche. Si utilizzano buste di plastica, no carta, cartone o legno. Attenzione ai cartellini e agli inchiostri. Nel disporre i reperti evitare che si passano danneggiare a causa di sfregamento con altri	fase molto delicata, deve essere ridotta al minimo. Si utilizzano materiali come gomma piuma, schiuma di poliuretano, plastica, ovatta, cotone. Oppure si procede alla copertura temporanea del sito, in caso di pavimentazioni non trasportabili

Figura 85 - Dal Ritrovamento al Trasferimento

Figura 86 – Dalla Conservazione Passiva o Restauro alla Pubblicazione

CONSERVAZIONE O RESTAURO										STUDIO	PUBBLICAZIONE
scelta: CONSERVAZIONE PASSIVA oppure RESTAURO	RESTAURO <i>ceramica</i> (vero e proprio del reperto, carta del restauro)										
	esami diagnostici (autoptico, al microscopio, radiografia, TAC, analisi a luce ultravioletta)	documentazione	pulitura/stabilizzazione	consolidamento	ricomposizione	ricostruzione forma e struttura o integrazione	pittura	protezione			
per conservazione passiva si intende il mantenimento del reperto fino al suo restauro definitivo (prevede la rifinitura della ripulitura, consolidamento, smistamento per dimensione e tipo). Oppure si procede al restauro vero e proprio	L'esame diagnostico, che può andare da un semplice esame a occhio nudo ad analisi effettuate nel momento dello scavo e che va dettagliare ogni passaggio che viene eseguito sul reperto. Le modalità sono le stesse di quelle esposte precedentemente	ulteriore fase di documentazione che prosegue da quella effettuata nel momento dello scavo e che va dettagliare ogni passaggio che viene eseguito sul reperto. Le modalità sono le stesse di quelle esposte precedentemente	fase molto delicata, perché irreversibile, comprende l'eliminazione di tutto il materiale estraneo all'oggetto da restaurare, può essere di tipo chimico o meccanico. Per quella chimica si usa un batuffolo di ovatta, oppure si lascia a bagno per qualche ora. Per eliminare residui di sostanze grasse si usano solventi, mentre per residui di incollaggi precedenti si usa l'acetone puro. La pulitura meccanica (quand richiesta) prevede l'uso di bisturi rigido per l'asportazione di concrezioni e per stabilizzazione si intende la rimozione di agenti inquinanti come per esempio sali che possono portare al degrado del manufatto.	per permettere il recupero dello smalto decorato che per trauma da interramento e da successivo rinvenimento si può essere distaccato dal supporto. Intrapreso solo in casi di assoluta necessità e mai come prassi generalizzata, perché oltre a interferire spesso con l'aspetto del manufatto, può presentare problemi di completa reversibilità. Il consolidamento di un materiale che ha perduto la propria coesione microstrutturale, consiste nella sua impregnazione con una sostanza ausiliaria liquida che una volta penetrata possa passare allo stato solido e riempire quindi i vuoti che sono alla base della fragilità del manufatto.	fase molto delicata. Prevede l'assemblaggio di frammenti riferiti ad un determinato oggetto. Prima bisogna effettuare una accurata scelta dei componenti da assemblare. Viene effettuata con sostanze adesive come resine sintetiche. Molta attenzione va posta nella scelta del tipo di adesivo da usare e questo dipende principalmente dal tipo di materiale di cui è composto il reperto. In questa fase il reperto dovrà mantenere una posizione adeguata per permettere il corretto incollaggio durante la presa dell'adesivo.	si ricorre a questa fase per esigenze statiche/strutturali e di leggibilità/valorizzazione dell'oggetto. riempire o chiudere lacune nel reperto. La tecnica che viene utilizzata prevede l'uso di calchi della parte esistente impiegabili per la ricostruzione del mancante. Il materiale utilizzato è l'argilla, il gesso, lo stucco. attenzione deve essere sempre distinguibile rispetto la parte originale. Una volta solidificato si procede alla levigatura con carte abrasive. deve rispondere a diversi requisiti	facoltativo, la ricostruzione pittorica del reperto, oppure semplicemente la stessa di una toolità omogenea che distingue accuratamente la parte ricostruita dall'originale.	applicazione di una vernice protettiva sulla parte ricostruita. Questa fase si esegue soprattutto nei metalli	ulteriore fase di studio a seguito del restauro, eseguita da parte di archeologi e studiosi. Viene effettuato su qualsiasi tipo di reperto, anche di modesta entità perché può comunque portare informazioni aggiunte.	Momento finale di questo processo di completo utilizzo dei dati desunti dallo scavo, effettuato dall'archeologo che si è occupato fino a quel momento del reperto	
CONSERVAZIONE PREVENTIVA (*)											
	ispezione luoghi e oggetti contenuti	esaminare metodi per spostamento opere e personale	raccolta dati	analisi e sintesi dei dati	identificazione dei rischi e cause di danno	elaborazione piano interventi	esecuzione interventi	controllo, valutazione e verifica dell'efficacia e utilità degli interventi	modifica strategia se necessario	diffusione dei risultati	
			documenti, cartine, piani, foto, ricerche scientifiche precedenti			dare la precedenza ai tempi nei costi					

(*) meno impattante sia sull'opera che sulla parte finanziaria, gestione dell'ambiente, fondamentale è la programmazione degli interventi, da effettuare con regolarità ed efficacia, per questo motivo è necessario un inventario dettagliato e una documentazione completa dei reperti

Figura 87 – Esposizione in un Museo

scelta: CONSERVAZIONE A LUNGO TERMINE o ESPOSIZIONE IN MUSEO	ESPOSIZIONE IN MUSEO (**)					
	smantellamento della collezione storica precedente	inventariazione del reperto	catalogazione	ricostruzione del contesto storico/ archeologico nell'allestimento	esposizione vera e propria	controllo periodico del reperto
<p><i>una volta effettuato il restauro si può scegliere se riporre il reperto in un museo, oppure se destinarlo a un deposito permanente o temporaneo. Inoltre si deve scegliere quali reperti rinvenuti durante lo scavo esporre e quali no</i></p>	<p><i>fase che non sempre è necessaria. Attualmente si perde completamente la collezione storica, senza andare a fare una documentazione, errore molto grave.</i></p>	<p><i>dare un numero progressivo sul registro d'inventario, con una descrizione sintetica, provenienza e collocazione nel museo. Corredare documentazione fotografica e teorica, serve a creare un archivio complementare a quello delle schede di catalogo.</i></p>	<p><i>schedatura scientifica per la definizione cronologica, tipologica e stilistica dei reperti.</i></p>	<p><i>utile per la fruizione del reperto al pubblico, consiste nel permettere la comprensione del periodo storico</i></p>	<p><i>esposizione del reperto facendo molta attenzione a due aspetti: luce (causa di degrado dei reperti) e umidità a livelli accettabili per il reperto</i></p>	<p><i>controllo periodico del reperto per la verifica del suo stato di conservazione</i></p>

(**) con museo oggi si deve intendere anche il deposito, che non assume più un connotato dispregiativo, ma anzi sta assumendo una forma di collaborazione con il museo stesso. Il deposito può essere molto utile anche per permettere un ricambio delle opere esposte, permettendo una più vasta fruizione di tutti i beni. il museo è un'unione di compromessi tra fruizione e conservazione, è la struttura permanente che acquisisce, cataloga, conserva, ordina ed espone beni culturali per finalità di educazione e di studio

Confronto tra i Modelli 3D: il Caso delle Venere di Frasassi

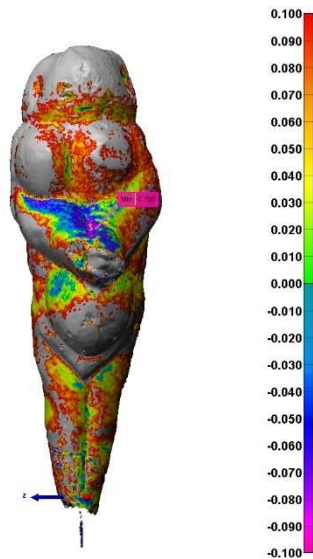


Figura 88 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.1mm)

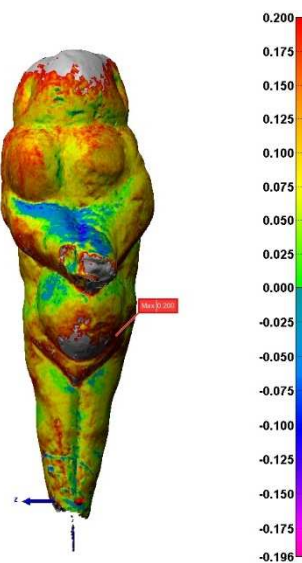


Figura 89 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.2mm)

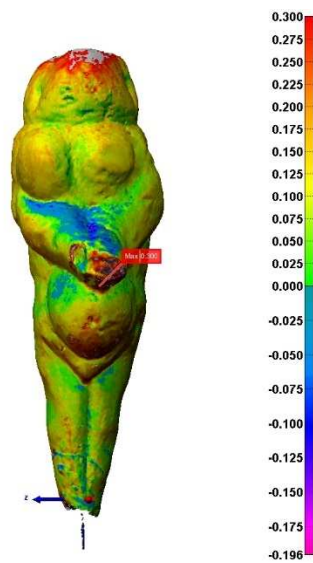


Figura 90 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.3mm)

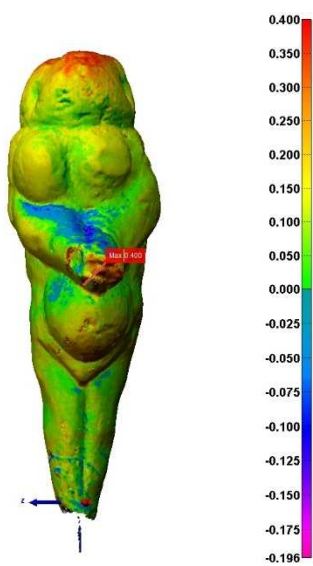


Figura 91 - Differenza tra i Modelli: Laser Scanner-SfM (Deviazione Massima 0.4mm)

Modelli 3D per il Caso Studio: SAR nello Studiolo del Duca Federico a Urbino

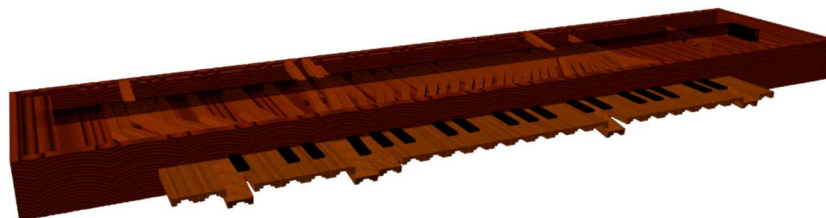


Figura 92 - Modello 3D del Clavicordo



Figura 93 - Modello 3D dell'Ermellino



Figura 94 - Modello 3D dello Scoiattolo

Haptic Device per Esplorare i Manufatti Storici



Figura 95 - Interfaccia Utente con Istruzioni per l'Uso dell'Haptic Device al Museo



Figura 96 - Interfaccia Utente con Istruzioni per Applicazione di Sculpturing