

NARRAZIONI IMMERSIVE
SCENARI VIRTUALI PER LA VALORIZZAZIONE
DEL PATRIMONIO CULTURALE

Autore **Mirco D'Alessio**

PUBLICA

ISBN 9788899586577

PVBLICA SCIENTIFIC COMMITTEE

PVBLICA

Marcello Balbo

Dino Borri

Paolo Ceccarelli

Enrico Cicalò

Enrico Corti

Nicola Di Battista

Carolina Di Biase

Michele Di Sivo

Domenico D'Orsogna

Maria Linda Falcidieno

Francesca Fatta

Paolo Giandebiaggi

Elisabetta Gola

Riccardo Gulli

Emiliano Ilardi

Francesco Indovina

Elena Ippoliti

Giuseppe Las Casas

Mario Losasso

Giovanni Maciocco

Benedetto Meloni

Vincenzo Melluso

Domenico Moccia

Giulio Mondini

Renato Morganti

Stefano Moroni

Stefano Musso

Zaida Muxi

Joao Nunes

Gian Giacomo Ortu

Rossella Salerno

Enzo Scandurra

Silvano Tagliagambe

All PVBLICA texts are subject to double peer review



NARRAZIONI IMMERSIVE

Scenari virtuali per la valorizzazione del Patrimonio Culturale

Autore: D'Alessio Mirco

© PUBLICA, Alghero, 2025

ISBN: 9788899586577

Pubblicazione: Settembre 2025

Questa pubblicazione è distribuita in modalità Open Access.

Il quaderno è stato pubblicato con il contributo del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche.

INDICE

INTRODUZIONE	8	ESPERIENZE IMMERSIVE PER IL PATRIMONIO CULTURALE	76
		Metodologia per uno sviluppo consapevole di esperienze immersive	76
VERSO UN NUOVO PATRIMONIO CULTURALE	10	Caso studio 1: La Scuola d'Atene'	89
Che cos'è il patrimonio culturale	10	Caso studio 2: la tomba della regina Sirolo-Numana	123
Background Storico e culturale sulla tutela del Cultural Heritage	11	Caso studio 3: le fornaci di Urbisaglia	156
La riproducibilità dell'opera d'arte	14		
Il digital cultural heritage: virtual archaeology e carte internazionali	17	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	191
Il digital cultural heritage: piani europei e documenti programmatici	19		
Il patrimonio culturale e la crisi pandemica Covid-19	23	APPENDICI	195
Prospettive future per il patrimonio culturale	28		
		BIBLIOGRAFIA	198
I QUATTRO CARDINI DEL DIGITAL CULTURAL HERITAGE	31		
La creazione scientifica del dato digitale	33		
La fruizione del patrimonio culturale	56		
Valutazione dell'esperienza dell'utente	69		
La formazione di nuove competenze	75		

INTRODUZIONE

Questo periodo storico, e nello specifico il 2020, verrà ricordato per la prima pandemia vissuta in epoca contemporanea (SARS COV-2). Tale situazione è stata in grado di mettere in crisi e rivoluzionare molti settori, tra cui anche quello della cultura. Abbiamo vissuto un periodo in cui, in tutto il mondo, l'accesso al patrimonio culturale (CH) era completamente interdetto, negando quindi uno dei diritti fondamentali dell'uomo. Come in molti settori anche in quello della cultura la principale risposta a questo periodo di forte crisi fu l'utilizzo di forme digitali di comunicazione e fruizione. A partire dagli anni 2000 è possibile riscontrare numerose carte, documenti programmatici internazionali, europei e nazionali, finalizzati a regolamentare e promuovere l'utilizzo di strumenti e metodiche digitali per la tutela e la fruizione del CH. Nonostante questa attenzione crescente, la crisi pandemica ha evidenziato la totale inadeguatezza nel fronteggiare questo periodo di difficoltà. Il presente lavoro si inserisce in questo scenario, indagando e ricercando metodiche di fruizione digitale e proponendo delle *best practice* per una fruizione consapevole del nostro patrimonio digitale. Il seguente testo è costituito da tre parti principali. Nella prima s'indaga che cos'è e come si definisce il patrimonio culturale. Si analizza il senso filosofico e l'importanza della 'copia' dell'opera d'arte, supportato dalle principali carte internazionali e piani programmatici di digitalizzazione. Alla luce di questi documenti vengono analizzati i dati dei report internazionali e nazionali circa la risposta dei luoghi della cultura alla crisi pandemica, evidenziando diversi punti deboli e proponendo quattro nuclei tematici per il

superamento di tali difficoltà. Nella seconda parte vengono indagati questi quattro temi al fine di comprendere lo stato dell'arte attuale. Nello specifico il primo tema trattato riguarda la creazione scientifica del dato digitale, inteso non solo come acquisizione digitale, ma anche come la validazione scientifica di una qualsiasi produzione digitale. Il secondo tema concerne le metodiche di fruizione del bene digitale, vengono analizzate gli attuali mezzi di fruizione e comunicazione del CH, come AR, MR e soprattutto VR. Il terzo tema riguarda la necessità di verificare le metodiche proposte mediante test d'usabilità e gradimento al fine di ottimizzare e migliorare l'esperienza. Con l'ultima tematica si sottolinea l'importanza di creare nuove competenze, mediante l'individuazione di nuove figure professionali. Nell'ultima parte, attraverso l'esplicazione di tre casi studio, si ricercherà una metodica volta a declinare in chiave operativa le quattro tematiche descritte e indagate nella sezione precedente, al fine di creare nuove esperienze di fruizione immersiva, conferendo grande importanza all'aspetto emozionale. Numerosi studi infatti attestano che ad una maggior coinvolgimento emotivo corrisponde un maggior grado d'apprendimento e gradimento, da cui ne deriva la qualità stessa dell'esperienza. Al fine di massimizzare questo aspetto verrà indagata e messa in pratica una filiera digitale in grado di far coesistere necessità narrative con contenuti e metodi d'indagine scientifica al fine di ottenere un prodotto completo finito e sostenibile. Si cercherà quindi la commistione di tecniche e tematiche di due mondi estremamente differenti, ossia quello scientifico legato all'arte, architettura, archeologia e intrattenimento,

cinema, musica e gaming. Mediante l'utilizzo di visori di realtà virtuale *head mounted display* (HMD), si ricercherà il massimo grado di coinvolgimento immersivo ed emotivo dell'utente, influenzato dal realismo visivo, dallo sviluppo specifico della dimensione sonora e ultima non per importanza dalla dimensione narrativa. Il primo caso di studio riportato riguarda la realizzazione di un'esperienza di realtà immersiva realizzata per la mostra temporanea Raffaello e Angelo Colocci, bellezza e scienza nella costruzione del mito della Roma antica, tenutasi a Jesi nel 2021. Questo lavoro indagherà nuovi modi di studiare e fruire l'arte pittorica. In questa esperienza l'utente potrà entrare virtualmente nell'affresco della Scuola d'Atene di Raffaello, visitare l'architettura e conoscere i filosofi che la popolano. Il secondo caso riguarda l'esperienza virtuale la tomba della regina picena di Sirolo-Numana. Lavoro svolto in collaborazione con il parco del Conero e attualmente fruibile all'archeodromo di Numana. Mediante questo caso studio verranno indagate le possibilità di contestualizzazione storica di alcuni reperti archeologici conservati oggi all'antiquarium di Numana, mostrando come valorizzare e lavorare con le collezioni museali. In questa esperienza l'utente potrà entrare, esplorare e interagire con il corredo funerario digitalizzato. Il terzo lavoro riguarda un'ultima esperienza immersiva: le fornaci romane di Urbisaglia. Questo caso studio permetterà di indagare le potenzialità della fruizione immersiva circa la valorizzazione dei parchi archeologici, oltre alla possibilità di vivere ciò che oggi non è più fruibile. In questo applicativo l'utente esplorerà i luoghi e le fasi lavorative tipiche del ciclo di produ-

zione degli oggetti in ceramica antica, dalla lavorazione dell'argilla alla vendita del vaso. Anche quest'ultima esperienza, conclusa nel dicembre 2022, farà parte del nuovo allestimento del parco archeologico di Urbisaglia. Per le tre esperienze sono stati svolti test sul gradimento, sull'usabilità e in ogni caso sono state pianificate giornate di training per la formazione del personale addetto alla fruizione dell'esperienza. Si cercherà quindi lo sviluppo non di soluzioni meramente tecnologiche, le quali sono mutevoli nel tempo, ma un insieme di principi operativi volti allo sviluppo di soluzioni efficaci. Tale sistema, quindi, cerca di interfacciarsi con alcuni dei punti programmatici del piano triennale per la digitalizzazione dei musei, cercando quindi di mostrare come migliorare la capacità dei musei valorizzare il proprio patrimonio dal punto di vista narrativo e commerciale; cercare quindi nuove forme di fruizione del patrimonio tramite tecnologie innovative e attivare processi collaborativi con imprese locali. In definitiva mediante questo lavoro si cercherà di fare un passo avanti nella ricerca di filiere digitali volte alla fruizione di esperienze immersive, emozionali e interattive per la creazione di *virtual interactive movie* (VIM) per il patrimonio culturale, al fine di ottenere esperienze sempre più coinvolgenti, capaci effettivamente di trasportare l'utente in un'altra dimensione.

VERSO UN NUOVO PATRIMONIO CULTURALE

Il primo passo fondamentale per intraprendere con efficienza questo viaggio consiste nell'andare a indagare e capire cosa si intende per patrimonio culturale o *cultural heritage* (CH). Va compresa la relazione che insiste tra la più antica concezione di patrimonio e le più recenti definizioni e declinazioni anche digitali.

Che cos'è il patrimonio culturale.

Ogni individuo ha diritto di prendere parte liberamente alla vita culturale della comunità, di godere delle arti e di partecipare al progresso scientifico ed ai suoi benefici¹

Recita così l'articolo 27 della dichiarazione universale dei diritti umani, redatta nel 1948. Questo articolo sottolinea come sia fondamentale per una comunità non solo di avere accesso al proprio patrimonio culturale, ma anche di partecipare attivamente alla vita culturale, e ciò viene inteso come diritto fondamentale e inalienabile. Ma che cos'è questo patrimonio e come si definisce? L'UNESCO da una definizione specifica circa il significato dell'espressione patrimonio culturale, ossia:

Cultural heritage includes artefacts, monuments, a group of buildings and sites, museums that have a diversity of values including symbolic, historic, artistic, aesthetic, ethnological or anthropological, scientific and social significance. It includes tangible heritage (movable, immobile and underwater), intangible cultural heritage (ICH) embedded into cultural, and natural heritage artefacts, sites or monuments. The definition excludes ICH related to other cultural domains such as festivals, celebration etc. It covers industrial heritage and cave paintings²

Da questa definizione si evince in modo chiaro come il CH risulta essere tutto ciò che rappresenta l'identità di un popolo di una data area geografica. Esso può essere diviso in tre macrocategorie: i beni culturali, i beni naturalistici e i beni immateriali. La prima categoria comprende ciò che risulta essere fisico e tangibile, comunemente divisi in beni mobili, come opere d'arte, manufatti, reperti archeologici; e beni immobili come edifici, monumenti e siti archeologici. La seconda categoria, i beni am-

bientali, è anch'essa caratterizzata dalla fisicità del bene, ma si discosta dalla prima poiché la sua natura non è antropica ma, appunto, naturale. Rientrano in questa categoria il paesaggio e l'ambiente naturale, compresa la flora e la fauna, appartenenti alla biodiversità; ed elementi geologici, mineralogici, geomorfologici e paleontologici, ossia la geo diversità. Infine, la terza categoria, i beni immateriali risultano essere di più difficile interpretazione, la cui definizione è stata ufficializzata nel 2003 in seguito alla redazione del *text of the convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage*³ dall'UNESCO. Essi si intendono come:

L'insieme delle pratiche, le rappresentazioni, le espressioni, i saperi, le competenze che le comunità, i gruppi e, in alcuni casi, gli individui riconoscano come parte del proprio patrimonio culturale ed eredità. Questo patrimonio, viene trasmesso di generazione in generazione, è costantemente ricreato da comunità e gruppi in risposta al loro ambiente, alla loro interazione con la natura e alla loro storia, e fornisce loro un senso di identità e continuità, promuovendo così il rispetto della diversità culturale e creatività umana

Per comprendere appieno il significato di queste definizioni e perché è importante per una civiltà salvaguardarle bisogna indagare come mai delle istituzioni internazionali si siano riunite al fine di redigere dei documenti ufficiali di valenza internazionale. Un suggerimento ci può essere fornito dal termine inglese con cui si identifica il patrimonio culturale, ossia il *Cultural Heritage* (CH) e in particolare nella parola 'heritage', eredità, quindi una successione nel possesso a titolo universale del patrimonio. La necessità di succedere nella proprietà, quindi di tramandare la cultura porta in sé delle necessità imprescindibili: la conoscenza, la salvaguardia, la tutela e la difesa di questo patrimonio, la cui regolamentazione implica una complessa speculazione di diritto in senso giuridico. Proprio a tale scopo negli ultimi 200 anni si è cercato di regolamentare questo aspetto grazie alla formazione di enti sovranazionali e la redazione di carte e documenti fondamentali.

Background storico e culturale sulla tutela del cultural heritage

Sin dall'antichità si è posta una speciale attenzione ai beni culturali in caso di conflitto bellico, intesi come beni di valore, di-

1
https://ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR_Translations/itn.pdf

2
<http://uis.unesco.org/en/glossary-term/cultural-heritage>

3
<https://ich.unesco.org/en/convention>

ventando oggetto di predazione e distruzione, questo tema risulta ancora centrale e purtroppo attualissimo a causa del vicino conflitto tra Ucraina e Russia. Nella ventiseiesima conferenza internazionale ICOM tenutasi a Praga dal 20 al 28 Agosto 2022, il viceministro della cultura e della politica dell'informazione ucraina Katerina Chuyeva ha espresso tutta la sua preoccupazione per la situazione bellica legata al patrimonio culturale dichiarando:

The scale of destruction is massive and thousands of buildings and also archaeological sites have been damaged – aggiungendo – we have documented 468 cases of damage and destruction of cultural sites, 35 of which directly concern museums

proponendo così una collaborazione internazionale per registrare e stimare i crimini di guerra effettuati dalle truppe Russe⁴. Questi avvenimenti sono importantissimi e molto preoccupanti, infatti, proprio nell'ambito bellico che possiamo riscontrare le radici dell'attuale situazione giuridica in materia di protezione del patrimonio culturale. Una delle prime testimonianze è riscontrabile nel congresso dell'Aia⁵ del 1899 e del 1907 in cui furono fatti notevoli passi avanti nel diritto internazionale stabilendo il principio dell'immunità dei beni culturali. Con l'articolo 27 della convenzione⁶ si enunciava l'obbligo di risparmiare in caso di bombardamento e assedio edifici dedicati alla religione, arte, scienza o monumenti, inoltre è dovere degli assediati indicare questi edifici e luoghi d'interesse culturale. Un altro passo fondamentale venne mosso nel 1931 con la redazione della carta di Atene redatta in seguito alla conferenza di Atene dal 21 al 31 ottobre 1931, tenuta dall' *international museum office*. In questo documento si pongono le basi operative e metodologiche per il restauro dei beni culturali, riportando nuovamente l'attenzione internazionale alla necessità di tutelare il patrimonio artistico e archeologico dell'umanità (Niglio, 2009). Nello stesso periodo venne redatto il *Roerich pact* (1935) con il quale si ribadiva il riconoscimento da un punto di vista legale dell'importanza del patrimonio culturale per qualsiasi popolo e che la sua difesa deve avere la precedenza su qualsiasi necessità militare (*Schipper & Enrich Frank*, 2013). In seguito agli avvenimenti distruttivi e drammatici della Seconda Guerra Mondiale venne eseguito il primo trattato internazionale incentrato prevalentemente sulla protezione del patrimonio culturale in un conflitto armato, il *Hague convention for the protection of cultural property in the event of armed conflict* (1954). Proprio in questo trattato, tenendo in considerazione tutti i passi fondamentali fatti in precedenza, venne redatta per la prima volta una definizione ufficiale e rico-

4
https://www.lemonde.fr/en/culture/article/2022/08/31/how-ukraine-is-reacting-to-the-destruction-of-its-cultural-heritage_5995410_30.html.

5
<https://en.unesco.org/courier/2017nien-di-3qi/historic-resolution-protect-cultural-heritage>

6
<https://ihl-databases.icrc.org/applic/ihl/ihl.nsf/Article.xsp?action=openDocument&documentId=C50B4E-E486305FF5C-12563CD00515E60>

nosciuta internazionalmente di patrimonio culturale. Nel 1964 venne redatta la carta di Venezia, in seguito al secondo congresso internazionale degli architetti e tecnici dei monumenti storici, tenutosi a Venezia dal 25 al 31 maggio del 1964. Questo documento prevede di continuare i lavori iniziati con la stesura della carta di Atene, considerata inadeguata nel fronteggiare i disastri della Seconda Guerra Mondiale. Una delle innovazioni più rilevanti che possiamo riscontrare risulta essere proprio il concetto di 'monumento storico' precedentemente individuato come elemento singolo, adesso esteso alle intere aree urbane. Inoltre, con questo documento si enfatizzò l'importanza dell'integrità architettonica dell'apparato urbano, sottolineando la necessità di rispettarne l'integrità storica (Jokilehto, 1998). In quegli anni l'UNESCO si trovò ad affrontare anche nuove sfide, non più solo legate alla distruzione dovuta agli scenari bellici; Infatti, era in atto in quegli anni la costruzione della diga di Assuan, che avrebbe inondato l'alta valle del Nilo, mettendo in pericolo moltissimi monumenti. Su richiesta dell'Egitto e del Sudan l'UNESCO intraprese una campagna di protezione durata circa 20 anni. Con questa iniziativa nacque la necessità di censire e stilare una lista del patrimonio mondiale in pericolo (convenzione del 1972), utilizzando i principi della carta di Venezia del 1964 come base per la sua stesura. Nel secondo dopoguerra ci fu una sempre più stretta collaborazione tra istituzioni internazionali, come le nazioni unite, l'UNESCO, la Croce Rossa e la Blue Shield International, ponendo attenzione non solo alla tutela del patrimonio nei confronti di atti bellici, ma difendendola nei confronti di danni, distruzione, furto, saccheggio o atti vandalici, arrivando a stilare una nuova convenzione (1999) a sostituzione di quella del 1954. Ciò ha introdotto un nuovo sistema, di maggior protezione per i beni culturali, auspicando adeguate legislazioni nazionali in grado di punire le violazioni. Grazie a queste legislazioni nel 2004 per la prima volta venne condannato l'ex ufficiale di marina Miodrag Jokic a sette anni di reclusione, per aver ordinato, tra l'ottobre e il dicembre 1991, l'esplosione di centinaia di colpi di mortaio sulla città di Dubrovnik, città già presente nella lista UNESCO del Patrimonio Mondiale in Pericolo. Mentre più recentemente nel 2016 venne condannato Ahmad Al Faqi Al Mahdi a nove anni di reclusione per la distruzione di una decina di siti religiosi a Timbuktù, questa condanna fu storica poiché per la prima volta la distruzione del patrimonio culturale venne considerata come crimine di guerra. Questo excursus storico ci fa comprendere quanto sia importante tutelare, difendere e valorizzare il patrimonio culturale, inteso non soltanto come singolo monumento, oggetto,

reperto, ma individuato come un sistema complesso composto da oggetti fisici e da elementi immateriali, contestualizzati all'interno di uno scenario territoriale antropico e naturale, ciò ci conduce alla definizione più estesa e complessa di paesaggio culturale o *cultural landscape*. Questo ideale di salvaguardia e diffusione del patrimonio culturale si pone alla base di questo testo, nel quale si indagheranno nuovi modi di fruire e disporre del patrimonio culturale attraverso l'enorme potenziale fornitoci dal digitale, ciò introduce nel nostro discorso uno dei binomi fondanti di questo lavoro, ossia patrimonio culturale-digitale.

La riproducibilità dell'opera d'arte

Negli ultimi decenni stiamo assistendo a una rivoluzione in campo tecnologico e scientifico, grazie all'introduzione e utilizzo generalizzato dei sistemi e tecnologie informatici. È importante capire come questi strumenti possano essere utilizzati per la salvaguardia e diffusione del nostro patrimonio. Nello specifico le *information and communication technologies* (ICT) sono strumenti utilissimi per eseguire l'acquisizione digitale, l'archiviazione, la conservazione e la ricostruzione del patrimonio materiale e immateriale (Portalés et al., 2018). Per esempio, l'utilizzo delle nuove tecnologie di realtà virtuale (VR) o realtà aumentata (AR), combinate con rappresentazioni multimodali, rappresentano una grande innovazione nella fruizione (Portalés et al., 2017), conferendo la possibilità di restituire il patrimonio nella sua complessità di relazioni, legando presente e passato, tradizione e innovazione, materiale e immateriale. Il rapporto tra arte e tecnologia è stato ampiamente dibattuto già dalla prima metà dello scorso secolo da pensatori e filosofi come Paul Valéry e Walter Benjamin.

Sicuramente saranno dapprima solo la riproduzione e la trasmissione delle opere a vedersi coinvolte. Saremo in grado di trasportare o ricostruire in qualsiasi luogo il sistema di sensazioni [...] che emana in un luogo qualunque un oggetto o un avvenimento qualunque. Le opere acquisteranno una sorta di ubiquità (Valéry, 1996, p.107).

Con queste parole Paul Valéry nel 1928 descrive la possibilità, nel prossimo futuro, di poter riprodurre in qualsiasi momento e luogo quel sistema di sensazioni ed emozioni che si provano fruendo un'opera d'arte. Questa intuizione, all'interno del sag-

gio *La conquista dell'ubiquità*, sottolinea due aspetti fondamentali ancora attualissimi. Il primo si caratterizza per una spiccata attenzione positivista rivolta al potenziale comunicativo della tecnologia moderna. Questo aspetto è quanto più attuale in un'epoca come la nostra, in cui la società è profondamente influenzata dallo sviluppo tecnologico; basti pensare all'uso quotidiano di strumenti come smartphone, tablet o l'utilizzo di sistemi di comunicazione sempre più diretti ed efficienti come i social network. Il secondo aspetto che emerge da questo pionieristico saggio riguarda l'importanza dell'aspetto emotivo scaturito dalla fruizione dell'opera artistica. Questa suggestione fu suggerita dalla larga diffusione di strumenti di riproduzione sonora. Infatti, Valéry si mostra stupefatto dalla possibilità di ascoltare una registrazione musicale, una composizione o un'opera e di provare le medesime emozioni che si proverebbero nell'ascoltarle dal vivo, ma con la differenza di poter decidere, cosa, come e quando ascoltarla. Valéry quindi tramite un parallelismo estende a tutta l'arte questa possibilità giungendo alla sua concezione di 'ubiquità' dell'opera d'arte. Il concetto di 'ubiquità' si lega in modo inscindibile a un'altra tematica attualissima, ossia la riproducibilità dell'opera d'arte. Questo tema è stato ampiamente dibattuto nel saggio *L'opera d'arte al tempo della sua riproducibilità tecnica* di Walter Benjamin del 1939. In questo saggio Benjamin esplora in modo attento cosa vuol dire riprodurre un'opera d'arte in epoca moderna, analizzandone sia il rapporto tra opera d'arte e tecnica, sia il valore della fruizione dell'arte nella società di massa, in relazione alla situazione politica europea della prima metà del secolo scorso. Nello specifico Benjamin afferma che l'opera d'arte è stata sempre riproducibile e riprodotta attraverso tecniche artigianali, di portata limitata come la silografia, la stampa o la litografia. Nella società di massa con la fotografia e il cinema è possibile avere un infinito numero di copie perfette, la velocità di riproduzione ha raggiunto una nuova dimensione legata direttamente alla visione e all'azione stessa, modificandone notevolmente anche la fruizione. Per comprendere a fondo il pensiero di Benjamin va analizzato il concetto di autenticità e 'aura':

L'autenticità di una cosa è la quintessenza di tutto ciò che di essa, a partire dalla sua origine, è tramandabile, dalla sua durata materiale fino alla sua testimonianza storica (Benjamin, 2017, p.21)

L'intreccio specifico di spazio e tempo va a costruire la singolarità dell'opera nonché la sua unicità e 'aura'. Per meglio comprendere questo concetto possiamo compiere un parallelismo

tra un'opera pittorica, un disegno e una sua perfetta riproduzione, come può essere una fotografia o anche una sua riproduzione fotogrammetrica 3D digitale. L'opera pittorica è direttamente collegata all'azione della mano dell'artista risultando direttamente un'opera autografa e autentica e acquisendo l'insieme di valori costituenti la sua 'aura'. Una sua copia manuale non è in grado di riprodurla fedelmente, azzerando il proprio valore e implementando il valore stesso dell'originale in quanto essa è altro. Riguardo l'ultimo caso, nella riproduzione tecnica, si ha la percezione di possedere l'opera originale, almeno da un punto di vista fisico, poiché essa la riproduce in modo estremamente fedele fin nei suoi minimi dettagli (Sdegno, 2018). Ciò che manca alla copia, quindi, è proprio quell'intreccio di valori che costituisce la sua 'aura', è per questa ragione che Benjamin parla della sua scomparsa dal mondo dell'arte. Questo concetto ci porta ad affermare che l'arte non deve essere banalizzata dall'utilizzo del mezzo tecnologico, non dobbiamo pensare che la sua riproduzione perfetta, fisica o digitale possa donarci lo stesso sistema di emozioni e sensazione che la fruizione di un'opera originale può far scaturire. Per questo motivo è essenziale utilizzare il mezzo tecnologico per creare intorno all'opera un nuovo sistema di sensazioni ed emozioni, come già detto da una copia non è possibile recuperare l'aura dell'originale, quello a cui bisogna tendere quindi è crearne una nuova. Le considerazioni mosse da Benjamin sono calate nel suo periodo storico e mosse dalle possibilità offerte dalla tecnica del secolo scorso, la fotografia e il cinema, per quanto rivoluzionarie, non sono paragonabili alle potenzialità dei mezzi tecnologici odierni. Benjamin afferma:

Colui che si raccoglie davanti all'opera d'arte, vi si immerge; penetra in quest'opera [...] per contro la massa distratta, da parte sua, immerge dentro sé l'opera d'arte (Benjamin, 2017, p.147)

Attualmente questo paradigma può essere nuovamente ribaltato, basti pensare alle nuove tecnologie immersive, capaci di far immergere il fruitore all'interno dell'opera, ristabilendo nuovamente, ma in modo diverso, questo rapporto di unione intima ed emozionale.

Il digital cultural heritage: virtual archaeology e carte internazionali

Da un punto di vista tecnico e tecnologico ci troviamo di fronte a un mondo totalmente diverso da quello di Benjamin. A par-

tire dagli anni 70 dello scorso secolo abbiamo assistito a una esponenziale crescita della potenza di calcolo dei sistemi digitali, accompagnate da una diminuzione dei costi, favorendone sempre più un utilizzo generalizzato (Card & Mackinlay, 1999). Questa potenzialità si concretizzò soprattutto nelle nuove modalità di rappresentazione, visualizzazione e simulazione. Infatti, risalgono proprio in quegli anni le prime sperimentazioni nel campo dei beni culturali, accolte specialmente in campo archeologico. Esso risulta essere un ottimo caso d'applicazione di queste tecnologie, non solo è possibile documentare in modo agile lo stato di fatto del sito archeologico, ma soprattutto è possibile simulare ciò che non c'è più dando una dimensione visuale realistica della ricostruzione archeologica, favorendo non solo lo studio da parte della comunità scientifica, ma anche la diffusione e comprensione da parte del grande pubblico. La prima definizione di *virtual archaeology* risale al 1990:

What does the term virtual archaeology mean here? The key concept is virtual, an allusion to a model, a replica, the notion that something can act as a surrogate or replacement for an original (Reilly, 1990, P.113)

Reilly si esprime con queste parole in riferimento alle prime esperienze di simulazioni virtuali di scavi archeologici a fini didattici. Nel 1997 venne pubblicato, a scopo divulgativo, *Virtual archaeology: Re-Creating Ancient World*, una collezione di ricostruzioni virtuali di siti archeologici di tutto il mondo. Questo testo contiene 660 illustrazioni generate tramite computer grafica (Broucke et al., 1999), mostrando in modo sorprendente le potenzialità in campo archeologico. Grazie a queste e altre sperimentazioni sul finire dello scorso secolo venne data una prima definizione di *virtual cultural heritage*, nel *world heritage magazine* dell'UNESCO, sottolineando l'importanza della salvaguardia e studio del patrimonio attraverso le potenzialità conferite dal digitale e dal virtuale (Stone, 1990). L'utilizzo di tali tecnologie risulta molto versatile, capace sicuramente di stupire e meravigliare il fruitore, rivoluzionando totalmente il modo di rapportarsi con il CH, ciò però non deve avvenire trascurando la rigiosità scientifica del dato. Le prime sperimentazioni citate sembrano essere più interessate alle potenzialità del mezzo tecnico che alla rigiosità scientifica del lavoro svolto, ad esempio nel pionieristico *Virtual Archaeology: Re-Creating Ancient World* Maurizio Forte afferma che la ricostruzione virtuale deve andare oltre la semplice visualizzazione, ma nel testo non c'è nessun riferimento al dato scientifico relativo alla ricostruzione archeologica, o come queste ricostruzioni abbiano effettivamente

aiutato gli archeologi nel loro lavoro di ricerca (Stone, 1999). Al fine di diffondere una regolamentazione metodologica per la digitalizzazione e divulgazione del patrimonio, nel 2009 venne redatta la 'carta di Londra'⁷. Con questo documento per la prima volta l'attenzione venne volta verso le tecnologie digitali e nello specifico verso le visualizzazioni virtuali (Brusaporci & Trizio, 2013). In questa carta si presentano sei obiettivi utili alla costituzione dei principi fondamentali per l'utilizzo dei metodi e delle visualizzazioni digitali nella ricerca e nella divulgazione del CH, nello specifico: Fornire un caposaldo, ossia fare in modo che il documento sia il più universale possibile al fine di uniformare l'operatività di tutti quei settori che si occupano di CH, dall'accademico al turistico-commerciale; promuovere il rigore tecnico e intellettuale; assicurare che i metodi e i risultati delle visualizzazioni siano chiari e valutabili dagli utenti; fornire autorevolezza scientifica alla visualizzazione digitale nello studio, nell'interpretazione e nella gestione del CH; fare in modo che siano garantite strategie di accessibilità e sostenibilità; infine, fornire una solida base volta a una futura implementazione di linee guida più dettagliate. Di notevole importanza riscontriamo il quarto punto, volto alla trasparenza della documentazione; infatti, si afferma la necessità di rendere il più chiaro possibile cosa si sta visualizzando in accordo con i procedimenti filologici adottati; quindi, devono essere esplicitate le fonti consultate, il metodo adottato e i procedimenti seguiti (paradati). Come può essere facilmente intuibile la carta di Londra venne da subito accolta e fatta propria dalla comunità scientifica internazionale, ma proprio in campo archeologico riscontriamo un maggior interessamento verso questi temi attraverso la stesura di un ulteriore documento, la 'carta di Siviglia 2011'. Tramite i suoi principi, obiettivi e definizioni si cercò di rendere maggiormente applicabili i punti della carta di Londra al fine di una gestione completa del patrimonio archeologico (Lopez-Mencherro & Grande, 2011). Viene fornita una nuova definizione di *virtual archaeology* individuata come disciplina scientifica:

The scientific discipline that seeks to research and develop ways of using computer-based visualisation for the comprehensive management of archaeological heritage

In aggiunta vengono fornite anche altre interessanti definizioni legate più ad aspetti operativi propri dell'archeologia, a sottolineare le potenzialità del nuovo mezzo tecnologico, come: il restauro, l'anastilosi e la ricostruzione virtuale. Infine, vengono espressi otto principi fondamentali: interdisciplinarietà, finalità,

⁷
<http://www.london-charter.org/downloads.html>

complementarità, autenticità, rigore storico, efficienza, trasparenza scientifica, formazione e valutazione. Questi principi, dal taglio tendenzialmente pratico, cercano di superare molte delle criticità sorte negli anni nel rapporto tra nuove tecnologie e l'archeologia, con particolare riguardo nei confronti dell'interdisciplinarietà. Non a caso il primo principio esprime la necessità di favorire la nascita di gruppi di lavoro multidisciplinari, caratterizzati dalla presenza di un gran numero di esperti come: l'archeologo, l'informatico, lo storico, l'architetto e l'ingegnere. Questa commistione di figure scientifiche è fondamentale per ottimizzare le fasi di lavoro, garantire la scientificità del prodotto finale e favorire lo scambio di idee tra mondi completamente diversi tra loro. Un altro punto di notevole importanza è l'ottavo, in esso, essendo chiara la definizione di *virtual archaeology*, si afferma la necessità di creare programmi di formazione e valutazione, come per ogni altra disciplina scientifica. Per cui si dichiara la necessità da un lato di formare personale altamente specializzato in grado di saper gestire e coordinare l'intero processo dialogando con i diversi settori disciplinari coinvolti; dall'altro creare sistemi di valutazione scientifica sull'efficacia, l'efficienza e il gradimento dei prodotti di fruizione sia dedicati a un pubblico specialistico, che rivolti ai non addetti ai lavori.

Il digital cultural heritage: piani europei e documenti programmatici

Il costante avanzamento tecnologico, alla luce anche dei documenti appena descritti, porta i temi della digitalizzazione e fruizione digitale del patrimonio culturale ad avere un ruolo sempre più centrale anche da un punto di vista politico e programmatico. Questa specifica tendenza fu evidente fin dal 2005 con la stesura della convenzione quadro del consiglio d'Europa sul valore del patrimonio culturale per la società (convenzione Faro). Con questo documento l'Unione Europea, riprendendo l'articolo 27 della dichiarazione universale dei diritti umani (1948), sottolinea la necessità di salvaguardare e vivere il CH, riconoscendo tale diritto come naturale (Zagato et al., 2015), focalizzandosi inoltre sulla sostenibilità, sull'accesso e uso delle tecnologie digitali al servizio del patrimonio (art.14) (*Europe council treaty office, 2005*). Ciò che traspare dalla convenzione Faro è l'intenzione di utilizzare il patrimonio culturale europeo come mezzo di unione tra i popoli, sottolineando le somiglianze al fine di rafforzare il senso d'appartenenza alla comunità europea. Per tale ragione si auspicava il fiorire di tutte quelle

attività e strumenti volti alla diffusione e accesso, e quindi alla democratizzazione del patrimonio, evidenziando come queste iniziative possano essere anche un utile motore economico. Seguendo questa linea politica volta all'accessibilità, nel 2008 venne inaugurata Europeana, una piattaforma online o biblioteca digitale volta alla condivisione del patrimonio culturale europeo. Nata seguendo il modello delle prime biblioteche digitali online (Francia, Portogallo, Ungheria) (Purday, 2009), attualmente non contiene solo testi digitalizzati, ma anche altri oggetti multimediali come immagini, audio, video e modelli 3D, provenienti dalle principali Istituzioni Culturali europee⁸. Grazie proprio allo sviluppo di queste iniziative la commissione europea è stata in grado di redigere un piano quinquennale (2020-2025) per il potenziamento della trasformazione digitale. Questo piano strategico si basa nello specifico sulla *Relazione della commissione al parlamento europeo e al consiglio sulla valutazione di Europeana e i suoi sviluppi futuri*⁹ e sulle considerazioni suggerite dal *Expert group on digital cultural heritage and Europeana* (DCHE)¹⁰. Analizzando questo piano quinquennale risulta evidente come l'Unione Europea riponga grande fiducia nelle possibilità offerte della conversione digitale nel campo dei beni culturali, da un punto di vista economico, sociale e culturale, affermando:

Un'Europa alimentata dalla cultura è un'Europa caratterizzata da una crescita economica resiliente, dell'occupazione, del benessere e del senso d'appartenenza all'identità europea (Europeana Foundation, 2020)

Con questo documento si cerca di proporre delle soluzioni relative alle criticità sorte in quasi dieci anni di utilizzo della piattaforma, cartina tornasole del *digital cultural heritage* europeo, e tramite la sua implementazione, utilizzarla come strumento utile al cambiamento digitale delle istituzioni territoriali. Questo è un processo importantissimo, poiché la digitalizzazione del patrimonio è a tutti gli effetti un ottimo strumento per documentare e salvaguardare il patrimonio a rischio, infatti, proprio in questo documento si fa riferimento al rischio dovuto agli effetti del cambiamento climatico. È importante che il settore del patrimonio culturale inizi ad articolare una risposta a questa crisi climatica, ma ciò è possibile solo tramite una forte campagna di sensibilizzazione al digitale rivolta alle istituzioni territoriali, considerando che, contestualizzato al 2017, solo il 10% circa del patrimonio culturale europeo era stato digitalizzato, di cui solo un terzo è disponibile online e di questo, poco più di un terzo è disponibile per il riutilizzo (Nauta & van den Heuvel, 2017). Per

⁸
<https://www.europeana.eu/it>.

⁹
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2018:0612:-FIN>

¹⁰
<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/expert-group-digital-cultural-heritage-and-europeana-dche>

la realizzazione di questi obiettivi vengono enunciate tre priorità: rafforzare le infrastrutture; migliorare la qualità del dato; costruire capacità. Di particolare interesse evidenziamo la seconda priorità, come possiamo notare, a distanza di più di dieci anni dalla stesura della Carta di Londra, il nodo cruciale della digitalizzazione del CH è ancora la validazione scientifica e qualità del dato digitale. Infatti, una delle criticità principali emerse dall'analisi della piattaforma Europeana è proprio la mancanza di dati e soprattutto metadati di alta qualità, ciò limita fortemente l'esperienza e l'usabilità del dato. La risoluzione di questa criticità viene proposta da un lato supportando le istituzioni ad accrescere il proprio livello di consapevolezza nel produrre contenuti digitali di qualità, dall'altro fornendo nuovi strumenti per la produzione, inserimento e validazione del metadato attraverso anche l'utilizzo innovativo di intelligenza artificiale e *machine learning*, metodiche di *crowdsourcing* e *gamification*. Il terzo principio ci fa comprendere come per l'unione europea la conversione digitale del patrimonio debba avvenire partendo dalle istituzioni del territorio. Risulta molto difficile proporre soluzioni efficaci universali poiché gli enti disseminati nel territorio sono molto diversi a causa delle differenti dimensioni, scopi, esperienze del personale, possibilità economica, e soprattutto sono legate alle politiche nazionali. Per queste ragioni è necessario creare delle politiche volte alla creazione di standard d'interoperabilità e buone pratiche. Lo strumento individuato è sempre Europeana, diventando a tutti gli effetti una piattaforma di training e networking tra i diversi membri. È chiaro ora come per l'UE il digitale sia uno strumento imprescindibile per lo sviluppo e salvaguardia del territorio. Alla luce delle politiche europee, risulta doveroso capire come tali indicazioni siano state recepite a livello nazionale. Già dal 2014 lo stato italiano si è mostrato fortemente interessato alle tematiche legate al digitale in tutti i settori e in particolare in quello turistico, attraverso la stesura del *piano strategico per la digitalizzazione del turismo italiano*. In questo documento si delineano delle buone pratiche volte alla conversione digitale di questo settore in tutti i suoi aspetti dall'accessibilità all'e-commerce. Queste azioni sono raggruppabili in tre macro ambiti: interoperabilità e big data; sviluppo digitale; promozione e digitalizzazione. Di particolare interesse troviamo il secondo ambito nel quale si afferma la necessità di creare strategie e linee guida per la comunicazione digitale del CH, adeguate non solo per grandi musei, o siti archeologici, ma anche per le piccole realtà territoriali (Laboratorio per il turismo digitale TDLab, 2014). Quest'ultima insieme ad altre iniziative ha portato allo sviluppo del 'Piano triennale per

la digitalizzazione e l'innovazione dei musei' (Direzione generale musei - MIBACT, 2019), allo scopo di migliorare il livello di efficienza sia all'interno che all'esterno delle istituzioni museali. Esso si sviluppa intorno a cinque obiettivi cardine:

- 1
Migliorare l'efficienza dei sistemi di tutela attraverso l'adozione di nuovi standard, utilizzando processi di catalogazione informativi e stimolare nuovi percorsi di valorizzazione.
- 2
Migliorare la capacità dei musei di proporre il proprio patrimonio culturale, sia da un punto di vista narrativo che commerciale.
- 3
Migliorare l'interoperabilità e condivisione di dati tra diverse istituzioni museali, visitatori e studiosi.
- 4
Attivare nuove forme di fruizione del patrimonio tramite soluzioni tecnologiche innovative.
- 5
Attivare nuovi processi di collaborazione con le imprese locali private.

Tra gli strumenti attuativi riportati grande importanza viene conferita al sito web, poiché rappresenta il principale mezzo in grado di creare un legame con i potenziali clienti. Esso però non deve essere un mero mezzo informatico-gestionale, per avere info relative a orari prezzi e attività, ma, secondo questo piano, deve essere accompagnato da una specifica strategia di *content curation* e narrazione condivisa, introducendo esperienze progettate sull'esigenze del visitatore; quindi, introducendo valore aggiunto alla visita reale tramite il contenuto digitale. Tra gli strumenti vengono inoltre annoverati metodiche e regolamenti per la digitalizzazione del patrimonio al fine di realizzare modelli 3D. Di particolare rilevanza risulta l'attenzione al metodo e non alla tecnologia stessa poiché essa è soggetta a repentini cambiamenti. Da ciò nasce l'opportunità di sperimentare nuovi scenari di interazione e di narrazione, come realtà virtuale, aumentata o anche esperienze di gaming, fondamentali, secondo questo documento, per potenziare notevolmente la portata di coinvolgimento tra istituzione culturale e i propri interlocutori. Le esperienze fin qui analizzate mostrano uno spiccato interesse verso le tematiche della digitalizzazione, ma ancora legate al singolo settore, ad esempio sul turismo o sulle azioni attuabili in

ambito museale e non considerando quindi il patrimonio culturale come sistema complesso. Questi piani si inseriscono in un panorama europeo lievemente consapevole ma non del tutto pronto, caratterizzato da fragilità emerse nel periodo di forte crisi scaturito dalla pandemia di COVID-19, meglio analizzata nel prossimo capitolo.

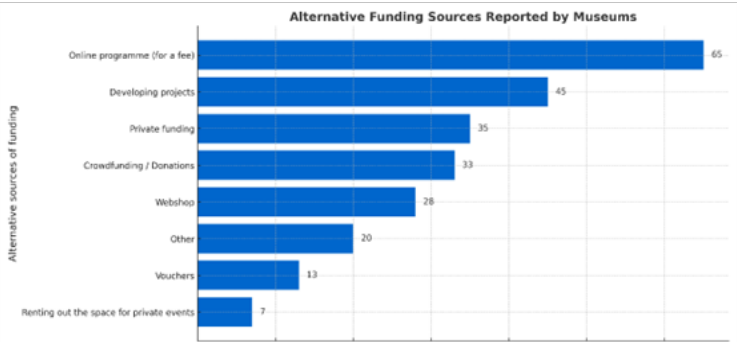
Il patrimonio culturale e la crisi pandemica covid-19

La pandemia da SARS COV-2 senza dubbio risulta essere uno degli eventi più caratterizzanti e impattanti del primo ventennio del XXI sec. Per la prima volta nella storia contemporanea l'intera umanità si è trovata ad affrontare gli effetti della diffusione repentina di un virus all'interno di un sistema fortemente globalizzato, capace di mostrare e sottolineare tutte le sue debolezze e criticità (Madhok, 2021). I singoli stati si sono dovuti interfacciare con una realtà nuova e attuare, soprattutto nei primi mesi del diffondersi della malattia, manovre restrittive al fine di limitare il contagio, limitando l'accesso fisico a tutti i luoghi pubblici, inclusi i luoghi della cultura. Tra marzo e aprile del 2020 le principali gallerie, biblioteche, archivi, siti archeologici e istituzioni museali di tutto il mondo erano inaccessibili con conseguente rinvio o cancellazione di progetti e servizi (Samaroudi et al., 2020), costringendo la popolazione a rinunciare al proprio diritto fondamentale di partecipazione e fruizione del proprio patrimonio culturale. In questa situazione di chiusura generale, il digitale si è rivelato strumento utilissimo per far fronte all'emergenza imponendosi in tutti i settori non solo in quello dei beni culturali, basti pensare all'istruzione (Perla et al., 2020) o a come l'utilizzo di video call e smart working hanno rivoluzionato il lavoro d'ufficio (Savić, 2020). Nonostante i numerosi piani programmatici e documenti redatti a livello nazionale e internazionale, gran parte delle istituzioni culturali si sono trovate impreparate nel fronteggiare questa emergenza, (Clini et al., 2022b). In un periodo di crisi come questo gli strumenti digitali di condivisione, come i social network, costituiscono una grande risorsa di resilienza sociale, facendo sentire le persone più vicine e unite (Udwan et al., 2020), in altre parole sono in grado di unire e creare un legame diretto con l'utente; inoltre sono di facile utilizzo, non necessitano di conoscenze informatiche avanzate e sono gratuiti. Per queste motivazioni, come in altri settori, anche in quello della cultura, la principale reazione delle istituzioni fu quella di potenziare e incrementare l'uso

delle piattaforme social attraverso la pubblicazione di post e il lancio degli *hashtag* come ad esempio *#ShareOurheritage* o *#ShareCulture* proposti dall'UNESCO per favorire l'accesso al patrimonio durante il periodo di confinamento (Ginzarly & Jordan Srou, 2022). A conferma di questa tendenza possiamo citare il report internazionale di ICOM: *Museum, museum professionals and COVID-19*, secondo il quale, su di un campione di 1600 istituzioni intervistate, si è registrato un incremento generale dell'offerta digitale relative al primo periodo pandemico (aprile-maggio 2020) pari al 47,49% per i social media; 17,97% per le collezioni on-line; 16,16% per le mostre on-line; 18,80% per gli eventi dal vivo; 13,36% per le newsletter; 10,39% per i podcast (ICOM - International Council of museums, 2020). Questi dati confermano come a livello globale le istituzioni culturali non siano state in grado di sfruttare appieno le potenzialità del digitale almeno nel breve periodo, sia per mancanza di personale esperto, fondi, o per assenza di campagne di digitalizzazione pregresse (Samaroudi et al., 2020) (UNESCO, 2020); escludendo, nella maggior parte dei casi, modalità più complesse e coinvolgenti di fruizione e riducendo l'accesso al CH al semplice post, o hashtag. A livello Europeo, un'importante fotografia di come i luoghi della cultura hanno reagito alla crisi pandemica viene fornita dal report del NEMO-Network of european museum organisation. Questo report mostra dati relativi alla digitalizzazione nei musei in linea con le tendenze mondiali già descritte, ma di notevole interesse risulta l'indagine mossa sull'impatto economico della pandemia. Stando a questo report è stata stimata una perdita del reddito pari al 75-80%, inoltre a causa dei blocchi del settore turistico 3 musei su 5 hanno riferito di aver perso una media di 20.300 euro a settimana. Tale scenario denota la necessità di trovare sistemi di diversificazione degli incassi e questo studio mostra un rinnovato interesse nello sfruttare proprio il potenziamento dell'offerta online come strategia operativa al fine di trovare fondi aggiuntivi. (NEMO Network of European Museum Organisations, 2020) (Figura 1). Queste tendenze sono confermate anche a livello nazionale come mostrato nei vari report sull'innovazione digitale nei musei italiani realizzati dal Politecnico di Milano e disponibili sulla piattaforma online¹¹. A causa delle chiusure e alle manovre di distanziamento sociale è stata registrata una diminuzione del 52% delle entrate dovuta alla vendita di biglietti per l'anno 2019 e il 2020 (Figura 2). Ciò risulta essere un dato estremamente rilevante dato che l'incasso legato alla vendita dei biglietti costituisce circa il 30% delle entrate. In questi anni tale condizione ha innescato un fenomeno di compensazione tramite finanziamenti pubblici e privati, e in

11
<https://www.osservatori.net/it/home>

minima parte tramite l'allargamento dell'offerta online e digitale (Figura 3).



La pandemia, quindi, ha dato una grande accelerazione ai processi di digitalizzazione del patrimonio, o quanto meno ha fatto in modo di portare in primo piano questo aspetto. Non tutti i settori della digitalizzazione sono stati effettivamente toccati da questa spinta, come visto già a livello mondiale ed europeo, c'è stato un grosso sviluppo di canali di comunicazione come *social network* (Figura 4) e siti internet (Figura 5), ma lo sviluppo di servizi online o integrativi dell'esperienza *on-site* hanno ricevuto una risposta meno strutturata. Questa particolare condizione nasce dal fenomeno più preoccupante emerso da questi report, ossia l'assenza dell'adozione di piani strategici riguardanti la digitalizzazione.

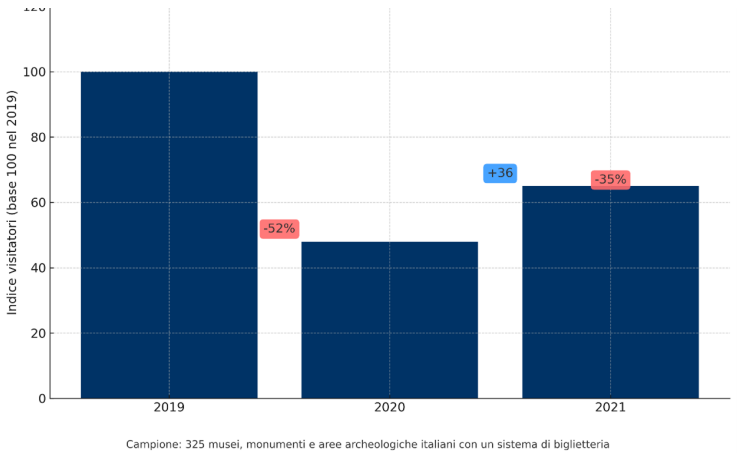
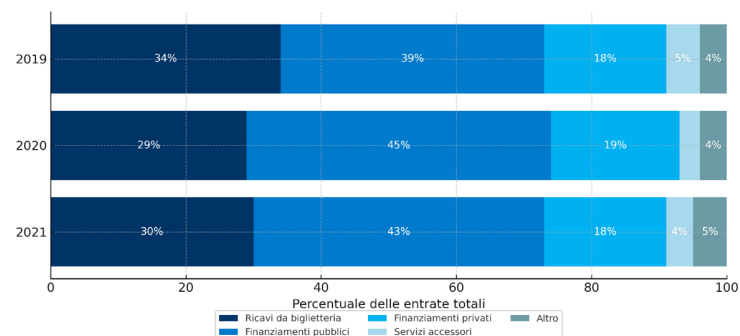


Fig.1
Numero di musei in cerca di nuovi fondi (elaborazione da: NEMO Network of European Museum Organisations, 2020).

Fig.2
Variazione delle entrate da biglietteria su anno (elaborazione da: POLIMI-2021).



Un piano strategico consente definire degli obiettivi a medio e lungo termine, ripensare o riprogrammare prodotti servizi e attività al fine di raggiungere gli obiettivi, stabilire le risorse necessarie e progettare una comunicazione ottimale. Quindi il piano strategico è lo strumento imprescindibile per guidare lo sviluppo digitale in modo concreto anche in funzione del futuro prossimo non emergenziale, ma ponendo le basi necessarie per affrontare le sfide di un futuro sempre più incerto. Il report del Politecnico di Milano mostra che tra il 2019 e il 2021 il 76% dei musei e istituzioni culturali non sono dotate di piani programmatici, interessante notare come del 24% dotato di un piano, proprio o facente parte di un altro documento quasi la totalità ha ammesso di rivedere il proprio piano alla luce dell'emergenza sanitaria (Figura 6). I dati del 2022 mostrano anche un lieve peggioramento portando questo dato al 79%, a dimostrazione di come la spinta legata alla pandemia si stia affievolendo.

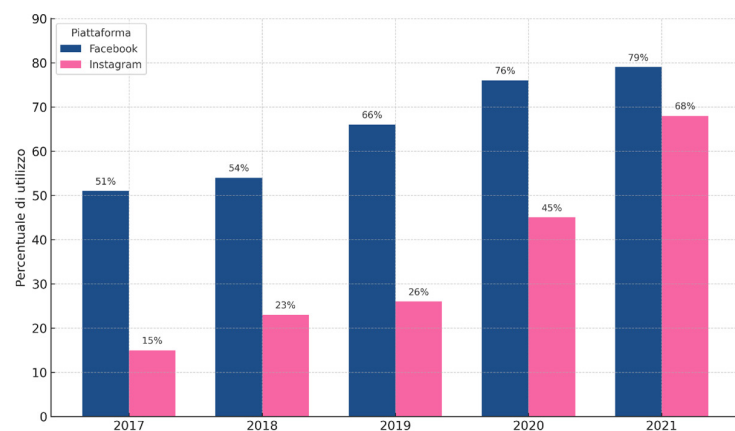
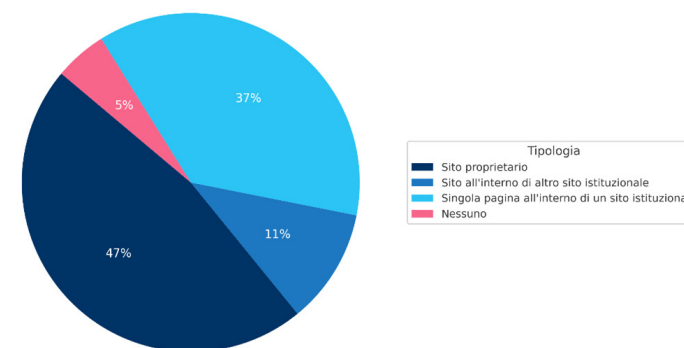


Fig.3
Distribuzione delle entrate totali per fonte, (elaborazione da: POLIMI-2021).

Fig.4
Presenza sui Social Network (elaborazione da: POLIMI-2021).

Tale tendenza è confermata anche da un altro dato, ossia nel 2022 il 55% delle istituzioni intervistate presentano offerte culturali online, rispetto all'80% dell'anno precedente, questo trend è sicuramente legato alle riaperture e quindi alla riprogrammazione delle attività in presenza, ma in ogni caso senza la presenza di un piano strategico risulta molto difficile avviare un processo di consolidazione dell'offerta migliorandone la qualità e rendendola un prodotto adatto alla consueta distribuzione digitale, integrata con l'offerta in presenza.



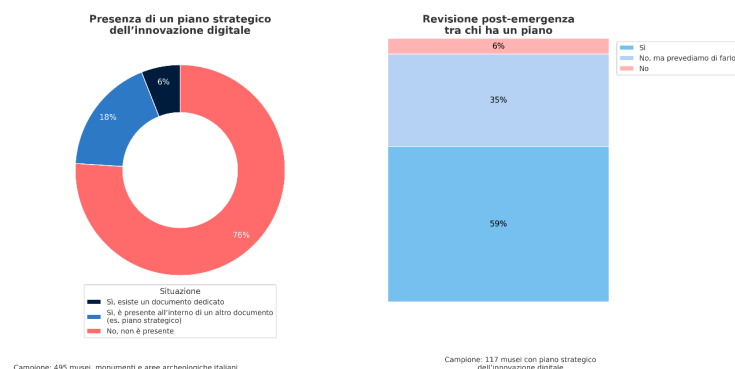
Prospettive future per il patrimonio culturale

La Pandemia, come abbiamo già visto, evidenziando le criticità del nostro periodo storico ha fortunatamente innescato meccanismi virtuosi volti alla ripresa economica e al progresso. In questo scenario l'unione europea ha redatto il proprio *recovery plan*, ossia 'Nextgeneration EU' (NGEU), al fine di fronteggiare il post-pandemia e innescare processi di sviluppo e ripresa economica. A tale scopo l'UE ha stanziato ingenti risorse economiche ponendo come obiettivi principali la sostenibilità energetica, la transizione digitale e la resilienza¹². L'Italia partecipa al raggiungimento di questi obiettivi mediante il piano nazionale di ripresa e resilienza¹³ (PNRR). Grazie alle grandi risorse messe a disposizione per la cultura e il turismo, 6.7 miliardi su 191.5 totali, il PNRR mira alla creazione di un ecosistema culturale in grado di implementare la domanda turistico-culturale e potenziare l'accessibilità per diversi segmenti di pubblico. In accordo con questi obiettivi è essenziale un cambio di visione e un'innovazione dei processi, per cui risulta vitale ricercare soluzioni in

¹² https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_en

¹³ <https://italiadomani.gov.it/it/home.html>

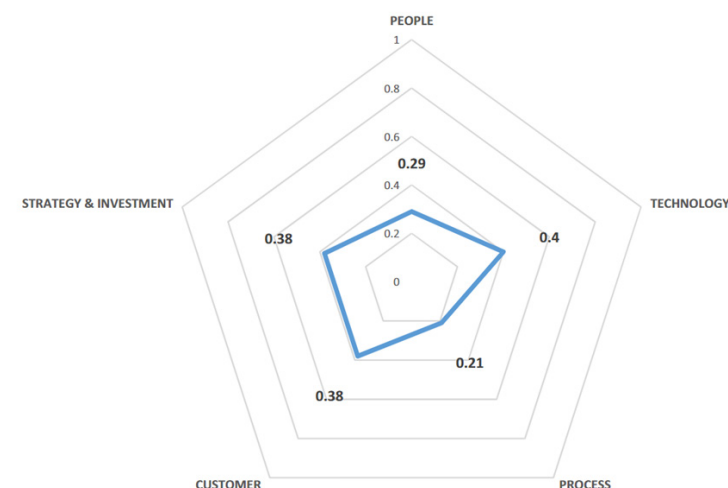
Fig.5
Presenza di un sito o di una pagina web (elaborazione da: POLIMI-2021).



grado di armonizzare la dimensione culturale con quella manageriale e tecnologica. Per perseguire tali finalità è stato costituito l'istituto centrale per la digitalizzazione del patrimonio culturale – *digital library*, con lo scopo di coordinare i programmi di digitalizzazione del patrimonio culturale del ministero della cultura, espressi nel PNRR, e attuati mediante il Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale (PND) valido per il quinquennio 2022-2026. Questo documento si caratterizza per tre macro-argomenti: 'la visione', nel quale vengono espresse i principali obiettivi a lungo termine; 'la strategia', ossia i principali percorsi da implementare per raggiungere gli obiettivi e infine 'le linee guida' con le quali fornire strumenti operativi volti all'esecuzione delle attività di digitalizzazione e trasformazione dei luoghi della cultura. Va specificato che questi punti programmatici forniscono degli approcci e delle procedure di carattere informativo e non prescrittivo, inoltre tali strumenti si caratterizzano per una marcata caratterizzazione tecnica e tecnologica in grado di conferire indicazioni concrete da un punto di vista operativo. Un interessante aspetto emerso dal PND è proprio la necessità di creare un sistema oggettivo di valutazione della prontezza digitale delle istituzioni museali e culturali. Per ottenere questo strumento sono state individuate cinque dimensioni che attestano quanto una istituzione è in linea con gli obiettivi della transizione digitale. Esse sono: Il personale, ossia la presenza di personale con specifiche abilità e conoscenze nel campo del digitale. Ciò risulta fondamentale poiché da questo indicatore ne deriva la possibilità di gestire internamente tutti i processi digitali, non solo quindi utilizzarli, ma anche farne manutenzione; la tecnologia, questo parametro si riferisce all'uso di tecnologie digitali, all'adozione di metodiche digitali per

Fig.6
Presenza e revisione di un piano strategico (elaborazione da: POLIMI-2021).

la raccolta e analisi di dati e anche alla presenza di reti wifi disponibili per il visitatore; i processi, con questo indicatore viene evidenziata la presenza di processi digitali, come ad esempio servizi di vendita on line dei biglietti e interfaccia con il cliente; i consumatori, tale parametro esprime la capacità del museo di relazionarsi con il cliente attraverso canali digitali sia prima che dopo la vendita del biglietto o dell'esperienza; strategie e investimento, ossia la capacità da parte dell'istituzione nel perseguire strategie di digitalizzazione a lungo termine, e la possibilità di investire in progetti di trasformazione digitale. Queste dimensioni riassumono molto bene cosa vuol dire transizione digitale. Infatti, in essi non sono solo compresi i processi di digitalizzazione interni, ma anche di interfaccia con il visitatore, di vendita e gestione delle esperienze e visite, fornendo così una fotografia chiara dello stato di fatto. Una prima analisi condotta a livello nazionale, su di un campione di 400 istituzioni culturali, attesta che le due dimensioni più carenti siano proprio personale e processi (Figura 7) (Agostino & Costantini, 2022).



Questi due aspetti costituiscono un grosso limite alle possibilità di sviluppo digitale. Da un lato l'assenza di personale specializzato limita fortemente l'autonomia delle istituzioni culturali nello sviluppare e utilizzare sistemi digitali, tale condizione evidenzia una mancanza d'investimenti nell'assunzione o formazione di personale specializzato. D'altra parte, la mancanza

Fig.7
Risultati digital readiness (AGOSTINO, COSTANTINI, 2022).

di processi limita la capacità dell'istituzione di attrarre e includere pubblico, e in un sistema in cui introiti sono fortemente legati agli incassi derivanti dalla vendita dei biglietti costituisce un grande problema. In conclusione, possiamo affermare che, nonostante da anni si parli di patrimonio digitale, e nonostante i molteplici piani europei e nazionali, dallo scenario di crisi pandemica è risultato evidente come sia stata fatta molta propaganda sul digitale ma concretamente è stato fatto molto poco. Siamo consapevoli che la digitalizzazione del nostro patrimonio non avviene tramite procedure scientifiche, che non vengono utilizzati i mezzi più attuali per la fruizione del patrimonio digitale, e anche che non si hanno ancora le giuste competenze per la gestione della transizione digitale (Clini & Quattrini, 2020). In questo scenario, complesso e in continuo mutamento si inserisce la nostra indagine, con la consapevolezza di quanto sia problematico e delicato lavorare con le istituzioni culturali e più in generale con il patrimonio tangibile e intangibile. Per tali ragioni questo testo cerca di inserirsi in quel substrato culturale che aspira al raggiungimento di un nuovo umanesimo digitale capace di rimettere l'uomo al centro dei processi artistico-creativi attraverso un uso sapiente delle tecniche. Quest'ultime risultano essenziali alla riproduzione in modo sempre più fedele del patrimonio, arricchendolo di valenze emozionali e artistiche aggiunte, ma allo stesso tempo utilizzando mezzi, le cui potenzialità diffusive sono praticamente illimitate, capaci di superare qualsiasi barriera spaziale favorendone così una diffusione totale e democratica, arrivando sempre più vicino a ciò che Paul Valéry aveva intuito un secolo fa.

I QUATTRO CARDINI DEL DIGITAL CULTURAL HERITAGE

Il periodo di crisi pandemica ha notevolmente accelerato i processi di digitalizzazione del patrimonio, rinnovando in modo preponderante l'interesse verso queste tematiche, evidenziando potenzialità ed enormi criticità. Da un punto di vista operativo e in accordo con i più recenti piani programmatici è possibile individuare quattro temi cardine da dover tenere a mente nel momento in cui ci si relaziona con il patrimonio culturale digitale, queste tematiche sono: la digitalizzazione scientifica; lo sviluppo di nuove modalità di fruizione; la creazione di nuove competenze; i test di gradimento ed esperienza utente (Clini & Quattrini, 2020). Questi quattro punti cardine non devono essere considerati come elementi separati l'uno dall'altro, ma bisogna concepirli come facce dello stesso prisma. Essi verranno meglio trattati nei paragrafi seguenti, ma, in ottica prettamente introduttiva, è bene individuarli al fine di comprendere in modo efficace il loro valore reciproco, anche per lo sviluppo dei casi studio riportati. Il primo punto concerne la digitalizzazione scientifica dell'oggetto culturale; con questo termine intendiamo l'utilizzo di tecniche scientificamente verificate, volte all'ottenimento di una copia digitale dell'oggetto reale; quindi, caratterizzate da determinati standard qualitativi oggettivamente misurabili. Con il solo termine 'digitalizzazione', secondo l'enciclopedia Treccani, s'intende la trasposizione di un qualcosa di reale, come un oggetto, un suono o un'immagine in un segnale digitale archiviabile o fruibile tramite un computer (digitalizzazione nell'Enciclopedia Treccani). Questo concetto necessita di un'ulteriore specificazione: la scientificità del dato non deve essere richiesto solo nell'ottica della digitalizzazione del 'vero', ma deve essere ricercata anche laddove si vada a operare con ciò che non esiste più o addirittura con ciò che non è mai esistito, ossia nelle modellazioni virtuali 3D. In questo caso la validazione scientifica deve passare attraverso logiche di studio e ricerca, meglio se operate e validate in collaborazione con esperti del settore. Così facendo si può giungere a una definizione più ampia, ossia la creazione scientifica del dato digitale. Il secondo punto riguarda la ricerca di nuovi modi di fruire il patrimonio digitalizzato. Come è facilmente intuibile la digitalizzazione non è foriera di un messaggio innovativo universalmente valido e accessibile, per questo è bene prevedere e progettare come quest'ultimo venga fruito, in relazione agli scopi che si vogliono ottenere e all'audience che si vuole raggiungere. Ovviamente una strada viene scelta ma molte sono

quelle possibili e percorribili, proprio in questo che possiamo rintracciare la novità artistica celata dietro l'innovazione tecnologica. Il terzo punto, ossia la valutazione del gradimento e dell'esperienza utente, è fondamentale per capire effettivamente l'efficienza dell'esperienza di fruizione creata, soprattutto se vengono utilizzate nuove tecnologie. Ciò risulta importante non solo per correggere eventualmente il funzionamento stesso del mezzo di fruizione, ma capire come l'utente finale vada a utilizzare tali strumenti e se gli obiettivi programmatici posti in fase di progetto siano rispettati. L'ultimo punto, la creazione di nuove competenze, risulta senza dubbio uno dei punti più evidenti e critici emersi dalle indagini svolte nel post-pandemia, ossia l'assenza di personale specializzato. Per risolvere questo problema è necessario prevedere in fase progettuale giornate di training grazie alle quali formare il personale museale non solo riguardo l'utilizzo del nuovo strumento ma, laddove sia possibile farlo, renderli partecipi e consapevoli dell'intero processo realizzativo. All'interno di questo testo quindi si cerca di indagare come, nella progettazione e realizzazione di nuovi mezzi di fruizione digitale del patrimonio culturale, si possano sviluppare tutte queste azioni al fine di una gestione consapevole del patrimonio in modo olistico. Anche se il cuore della trattazione riguarda l'esperienza della realtà virtuale immersiva, è impensabile operare con il patrimonio culturale, come l'archeologia, senza passare attraverso la digitalizzazione scientifica del dato, oppure non prevedere la realizzazione di *user test* in grado di capire l'efficacia degli strumenti realizzati, infine non è possibile progettare un'esperienza senza programmare un uso agile da parte dell'operatore museale e la sua formazione. Lo sviluppo di queste tematiche forniscono quindi gli elementi base con cui operare con il patrimonio culturale, ma la volontà di esplorare nuove modalità di fruizione non basta. In quest'opera si è voluto andare oltre ricercando nuove possibilità emozionali, al fine di questo obiettivo si è voluto superare questi paradigmi ricercando quindi la possibilità di unire linguaggi differenti, prendendo procedure, tecniche e soprattutto competenze direttamente dal mondo dell'intrattenimento, come cinema, musica o gaming.

La creazione scientifica del dato digitale

Per dato digitale s'intende un sistema o un dispositivo in cui le grandezze sono descritte attraverso valori numerici discreti, ossia una qualsiasi informazione è rappresentata da una sequenza binaria di valori (0-1), perciò generato e interpretato tramite

l'utilizzo di calcolatore. Nello specifico risulta di fondamentale importanza lo studio e l'utilizzo di dati visivi grafici, i quali, a prescindere dalla loro generazione e validazione presentano come tratto comune la loro visualizzazione mediante sistemi informatici e digitali. Alla luce di questa premessa risulta di fondamentale importanza introdurre una delle principali discipline informatiche, ossia *Computer Graphic* (CG). Questo termine, coniato nel 1960 da Verne Hudson e William Fetter, ha un significato molto ampio e lo si può utilizzare per riferirsi a: rappresentazione e modifica di dati immagine attraverso un computer; varie tecnologie usate per creare e manipolare immagini digitali; il sottocampo dell'informatica che studia i metodi per sintetizzare e manipolare digitalmente i contenuti visivi (Sarva-de et al., 2019). In accordo con questa definizione, per computer grafica, s'intende quasi tutto ciò che un computer riproduce che non sia testo e audio. Le prime sperimentazioni risalenti proprio agli anni '50 del Novecento riguardano la semplice rappresentazione 2D di funzioni matematiche mediante macchine elettroniche (Salomon, 2011). Da allora sono stati fatti notevolissimi passi in avanti grazie al rivoluzionario aumento della potenza di calcolo delle macchine e alla seguente diminuzione dei costi, facendo uscire sempre più l'utilizzo di queste tecnologie dal mondo della ricerca, favorendone un utilizzo sempre più comune. A partire dall'ultimo decennio del Novecento la computer grafica segna la sua consacrazione all'interno della società di massa a seguito della produzione di lungometraggi animati, videogiochi, grafiche 3D ed effetti speciali all'interno dell'industria del cinema e dell'intrattenimento (Sawicki & Moody, 2020). Questa branca dell'informatica può essere suddivisa ulteriormente in macro ambiti d'interesse:

1
Modellazione 3D, essa riguarda tutto ciò che ha a che fare con la descrizione matematica di forme e proprietà geometriche processabili e interpretabili da un computer.

2
Rendering, con questo termine s'intendono quei processi atti alla creazione di immagini realistiche, quindi con luci e ombre a partire da modelli 3D geometrici.

3
Animazione, è una tecnica volta a dare l'impressione di movimento, inteso come sequenza d'immagini generate tramite la renderizzazione di modelli 3D (Shirley, 2009).

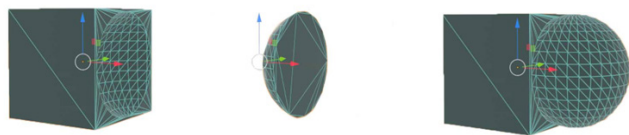
La CG non bisogna confonderla con la *computer vision* (CV), con questo termine s'intende l'insieme di processi volti a ricreare in modo artificiale la vista umana, non s'intende la semplice acquisizione di un'immagine, ma anche l'interpretazione automatica del suo contenuto, come ad esempio il riconoscimento di *features* (Huang, 1996). Questa definizione tornerà utile nei paragrafi successivi nell'ambito delle tecniche di digitalizzazione *image-based*. Come già anticipato è di nostro interesse indagare le principali tecniche volte alla creazione del dato digitale, con particolare attenzione a ciò che concerne la modellazione 3D e in seconda battuta il *rendering*. La prima e fondamentale distinzione risulta essere la differenza tra *direct 3D modelling* e *reality-based modelling*. La prima concerne la creazione di un dato digitale senza la necessaria presenza di un dato fisico esistente, mentre la seconda risulta legata alla digitalizzazione del reale.

La modellazione diretta

Per modellazione diretta del dato possiamo intendere tutto ciò che concerne la generazione diretta di forme, immagini e geometrie attraverso l'utilizzo di strumentazioni informatiche e digitali; quindi, rappresentazioni matematiche di oggetti 2D-3D. In questo caso la generazione del dato visivo può avvenire in modo indipendente dal reale, legato all'estro artistico e alle capacità effettive dell'operatore. La modellazione diretta 3D può essere associata al disegno, non 2D ma 3D, dove metodologie e mezzi sono totalmente digitali ed eseguiti mediante calcolatore (CAD, software di modellazione etc.) Per modellazione tridimensionale s'intende la possibilità di operare con superfici o solidi. Una superficie tridimensionale è una rappresentazione geometrica spaziale diffusa in tre dimensioni, non per forza caratterizzata da un volume proprio. Da un punto di vista teorico, possiamo identificare 3 principali e più comuni tipologie di modelli 3D, ossia i CSG, B-REP e *mesh*. I CSG (*constructive solid geometry*) sono modelli solidi, vengono descritti come volumi pieni, ossia viene individuato un dentro, un bordo e un fuori dell'oggetto. È importante che il solido sia chiuso, ciò vuol dire che ogni punto di frontiera sia adiacente a un punto interno, al fine di poter operare correttamente con tale tipologia di modello. Da queste considerazioni è chiaro che tutti i punti dello spazio interno sono da intendersi pieni, ciò vuol dire che non è possibile avere superfici bidimensionali con questa categoria. Un esempio tipico di modellazione CSG è, per esempio, la giustapposizione di forme geometriche semplici come cubi, sfere,

cilindri, coni, etc. I modelli B-REP, ossia *boudary representation*, sono modelli 2D o 3D rappresentati mediante delle curve o superfici che chiudendosi vanno a individuare un volume. La caratteristica di questi oggetti è legata alla possibilità di avere una rappresentazione matematica mediante funzioni direttamente modificabili tramite parametri numerici, utili soprattutto alla rappresentazione di curve o oggetti curvi. Un caso comune e 2D sono ad esempio le curve NURBS o *B-Spline*, in questo caso, mediante la modifica manuale di manici è possibile andare a cambiare in modo libero i parametri all'interno delle funzioni che le descrivono, decretando così una variazione nell'andamento della curvatura. Molto utili per il disegno meccanico, questa tipologia pecca di interoperabilità tra software di natura diversa, dato che la descrizione matematica è legata principalmente all'ambiente di modellazione. Per esempio, l'importazione di un oggetto *B-Spline* all'interno di una *game engine* per la visualizzazione non è direttamente possibile se non mediante la conversione dell'oggetto in un altro formato, producendo una discretizzazione dell'elemento curvo in segmenti o superfici rettilinee. L'ultima tipologia, la *mesh*, è un modello poligonale descritto da vertici, bordi e facce: i vertici sono singole entità descritte solo dalle 3 coordinate spaziali x,y,z; i bordi rappresentano la linea di collegamento tra collega due vertici; le facce sono piani delimitati da un minimo di 3 bordi. Essa risulta, ai fini delle nostre indagini, la tipologia di modello più versatile dato che è in grado di rappresentare superfici bidimensionali, che volumetriche comportandosi come un modello CSG, inoltre aumentando il numero di poligoni della maglia è possibile simulare bene superfici curve. Da un punto di vista matematico però è descritto come un insieme di elementi piani (ossia poligoni), quindi matematicamente semplici, connessi a rete. Un altro motivo per il quale è importante lavorare con i modelli *mesh* è il fatto che il risultato 3D dei processi di digitalizzazione *reality based*, i quali verranno trattati nei paragrafi successivi, producono modelli *mesh*. Quindi saper lavorare con modelli *mesh* è importante per completare, o modificare modelli *reality based*. Vediamo ora come possiamo operare con questi modelli al fine di ottenere l'oggetto desiderato. Tale processo di modellazione effettiva è molto legato al software scelto per eseguirla, ma al di là di esso i principi che sono alla base di queste operazioni sono gli stessi. Facendo riferimento al software *Blender* possiamo compiere una prima distinzione tra modificatori e generatori. I primi permettono effettivamente di modificare l'intero oggetto o alcune parti andando ad agire sugli elementi singoli che lo costituiscono (nel caso della modellazione *mesh* vertici, spigoli e facce). I

principali modificatori sono: traslazione, rotazione, scala, inserimento di facce, arrotondamento di bordi o estrusioni. Come possiamo notare queste operazioni non aggiungono o creano nulla di effettivamente nuovo o 'altro' in confronto all'oggetto di partenza, ma effettivamente lo modifica. Caso diverso è per i generatori, eseguibili sono sull'oggetto intero e non sulla singola parte, permette di andare a generare qualcosa di nuovo a partire dal modello selezionato. I principali generatori sono: specchio, *array*, operazioni booleane o funzioni in grado di riformulare/decimare la topologia (conformazione e disposizione delle singole *mesh* di un modello 3D). (Figura 8)



Queste operazioni agiscono quindi sulla totalità del modello e, nel caso specifico del software di modellazione *Blender*, devono essere confermate, ossia convertita da funzione matematica a conformazione *mesh*, al fine di poter eseguire una corretta interoperabilità tra software. Recentemente grazie all'incremento della potenza di calcolo dei dispositivi digitali, a fronte di costi minori, stiamo assistendo alla diffusione di tecniche di modellazione *mesh* sempre più complesse, capaci di moltiplicare le potenzialità artistiche, facilitare la resa realistica dell'oggetto creato e potenziare la versatilità delle operazioni stesse di cui le più rilevanti sono: *sculpting*; modellazione parametrica a nodi, e simulazioni fisiche. La prima modalità permette di modellare l'oggetto 3D come se fosse un oggetto di argilla malleabile, mediante l'utilizzo di differenti *brushes*, ossia di pennelli che, al click sull'oggetto, permettono di modificare le coordinate dei vertici al movimento del mouse. Questa possibilità simula sempre più le modalità operative effettuate nella scultura reale. Le caratteristiche fondamentali alla base di questa metodica risulta essere la necessità di avere un modello *high poly*, caratterizzato da numerosissimi poligoni, poiché a esso è direttamente legata la possibilità di inserire dettaglio. La seconda tecnica riguarda la possibilità di utilizzare simulazioni fisiche di forze al fine di ot-

tenere visualizzazioni realistiche in modo sempre più speditivo e automatico. In particolare, per attuare questa modalità bisogna inserire un sistema di forze attive importanti per far avvenire la trasformazione; oggetti attivi che sono soggetti a tali forze, ai quali è associata una massa; e oggetti passivi, non influenzabili. A quest'ultimi devono essere associati dei *collider* al fine di poter interagire tra loro. Questa tecnica è molto utilizzata per la generazione di tessuti, oppure può essere utile alla disposizione casuale di elementi nello spazio. Una volta impostati i parametri relativi ai tre elementi sopra descritti viene lanciata la simulazione, raggiunto l'effetto desiderato è possibile interromperla salvando la posizione. L'ultima modalità indagata concerne la possibilità di generare modifiche sostanziali a entità 3D mediante l'utilizzo di un'interfaccia costituita da una serie di nodi connessi. Ogni nodo rappresenta una data funzione governata da parametri variabili (anch'essi gestiti mediante nodi d'input) capace quindi di modificare ciò che riceve in input, ottenendo un output. È chiaro come, collegando più nodi l'output del precedente diventi l'input del successivo, arrivando così a una concatenazione di funzioni. Questa struttura permette di ottenere in modo speditivo grande varietà nella scena semplicemente variando parametri della medesima struttura di nodi. La versatilità di questo sistema è confermata dalla possibilità di lavorare con *mesh*, curve e nuvole di punti. Un aspetto negativo di questo sistema è l'interoperabilità tra diversi programmi di modellazione, poiché uscendo dal sistema nativo, difficilmente altri sistemi saranno in grado di gestire queste modalità di modifica e generazione, necessitando così una conversione. Un ulteriore aspetto rilevante dell'operare con i modelli 3D sono i formati file. È importante conoscerli perché da essi dipende la possibilità di interscambio tra diversi ambienti lavorativi software. Ad esempio; passare da un sistema che ammette modelli parametrici, a uno che ammette solo modelli poligonali *mesh*, necessita un'esportazione in un formato specifico ammesso, mediante il quale avviene una riformulazione della geometria (Mchenry and Bajcsy, 2008). I formati disponibili per operare con geometrie 3D sono moltissimi, capaci di portare con sé diverse informazioni non soltanto geometriche ma anche relative alla scena come luci, camere, materiali o animazioni. Tra tutti i formati possiamo analizzarne tre di essi: stl, obj, FBX. Il formato stl descrive un solido caratterizzato da superficie discretizzata in triangoli. Per ogni vertice vengono scritte le coordinate spaziali (x,y,z) e per ogni triangolo un vettore normale che ne indica la direzione. Il file è binario ASCII. Esso può contenere solo informazioni relative alla descrizione geometrica dell'oggetto, è un

Fig.8
Operazioni booleane
tra un cubo e una sfera,
in ordine da sinistra
a destra: sottrazione,
intersezione, differenza.

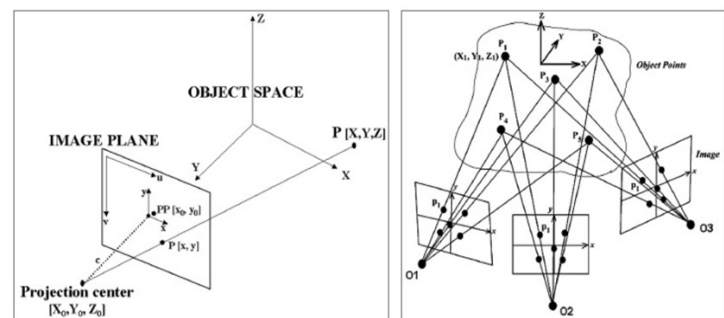
formato molto semplice e facile da leggere, per cui versatile. Pur risalendo al 1986, recentemente è stato riscoperto e attualmente viene usato molto nella generazione di file per la stampa 3D (Bourke, 1999a). Il file obj rappresenta senza dubbio uno dei formati più utilizzati e versatili (Mchenry & Bajcsy, 2008), espresso mediante formato ASCII, o binario consente di rappresentare la geometria unita alle informazioni relative alle texture applicate su di essa. Nello specifico vengono descritte le coordinate dei vertici, le coordinate di proiezione delle texture, le normali delle facce che costituiscono l'oggetto. Le informazioni relative al materiale del modello 3D vengono salvate all'interno di un file esterno mtl (*material template library*) portando con sé informazioni utili alla renderizzazione (Bourke, 1999b). La tipologia fbx è stata creata da Autodesk, nasce con l'intento di rendere completamente interoperabile il lavoro tra diversi programmi, con questo file è possibile memorizzare in un'unica soluzione informazioni relative all'intera scena 3D, ossia geometrie diverse, luci, camere, animazioni, materiali, texture. Uno dei problemi dell'utilizzo di questo file consiste nel trovare la giusta compatibilità nel caso d'interscambio con software non *Autodesk*, molto spesso ci si trova a dover creare estensioni per renderli compatibili (Autodesk, 2006). Tutte queste modalità di modellazione appena descritte costituiranno la base operativa all'interno dei casi studio riportati nel terzo capitolo. La modellazione diretta non è altro che un mezzo molto attuale di rappresentazione, il quale può avere molteplici scopi soprattutto applicabili al patrimonio culturale. Come già anticipato nel primo capitolo già a partire dagli anni 90 del Novecento vennero fatte le primissime sperimentazioni in campo archeologico e artistico (Forte, 1997). Potenzialmente la modellazione diretta consente di ricreare qualsiasi cosa, dal singolo oggetto o utensile all'intero edificio, panorama o essere vivente. Per questo motivo nel momento in cui si va a operare con il patrimonio culturale è sempre d'obbligo porsi come primo obiettivo la validazione scientifica di ciò che si sta realizzando (Carrozzino et al., 2014). In quest'ottica la modellazione non deve essere considerata come semplice processo grafico, ma come percorso conoscitivo e iterativo in modo tale che essa stessa diventi uno strumento fondamentale per la ricerca. Alla luce di queste considerazioni nei casi studio descritti, ogni modellazione, ogni lavoro grafico è stato effettuato in collaborazione con esperti del settore, quali archeologi, storici o esperti d'arte. L'utilizzo della modellazione diretta nel campo dei beni culturali può essere suddiviso in due macrocategorie: la modellazione di ciò che non c'è più, la modellazione di ciò che non è mai esistito. Il pri-

mo caso risulta fortemente legato all'ambiente archeologico, moltissimi sono i casi di ricostruzione di siti archeologici, nel tentativo di mostrare nel modo più esplicito possibile come quel sito potesse essere nel momento di massimo splendore, ricontestualizzandolo nella sua epoca. (De Paolis et al., 2011; Gabello et al., 2017; Guidi et al., 2007; Malfitana et al., 2016; Manzetti & Nikos T. Papadopoulos, 2021). Uno degli aspetti più importanti in questo macro-ambito risulta essere la citazione dei documenti storico-scientifici consultati e la descrizione dei processi logici che guidano la ricostruzione. Un metodo utile a gestire tutto il processo ricostruttivo tenendo traccia delle fonti consultate e del loro grado d'attendibilità è *l'extended matrix*, sviluppato dal CNR-Ispc. Questo metodo sfrutta la logica stratigrafica delle matrici di Harris (Demetrescu, 2015) per guidare la ricostruzione virtuale, la quale avviene mediante un sistema integrato di mappe concettuali, database e sistemi di modellazione 3D (Demetrescu & Ferdani, 2021). Una piccola applicazione di questa metodologia è stata indagata anche in uno dei casi studio svolti. Il secondo caso, la modellazione di ciò che non è mai esistito, non presenta dati reali o fisici realmente esistenti. Un esempio applicativo può essere lo studio e modellazione 3D di scene rappresentate in opere d'arte, come bassorilievi, incisioni, disegni o dipinti. Questa possibilità offre nuove modalità di studio e d'interpretazione nonché nuove forme di visualizzazione, le quali verranno esplorate nel paragrafo inerente la fruizione del CH (Ciammaichella, 2019; Clini et al., 2019a; Lourakis et al., 2007; Merlo & Bartoli, 2021). Un terzo caso può essere citato, il quale non presenta grande valenza da un punto di vista scientifico, ma che risulta essenziale per ricercare il realismo nella digitalizzazione, ossia la modellazione di oggetti comuni essenziali ad aggiungere dettagli alla scena. Anche in questo caso, molto spesso non si hanno dati rilevabili o strettamente connessi con la contingenza del soggetto, ma in ogni caso è doveroso cercare la collaborazione interdisciplinare per vagliare le scelte.

La modellazione reality-based

Questa tipologia di modellazione si può considerare a tutti gli effetti il rilievo digitale. Grazie allo sviluppo della sensoristica è possibile acquisire, in modo sempre più speditivo, una grande quantità di dati e di estrapolarne informazioni 3D misurabili, evitando di perseguire metodologie invasive o a diretto contatto con l'oggetto d'interesse. Tale metodologia consente quindi di

ottenere modelli 3D estremamente precisi e accurati, in grado di restituire i dettagli della scena reale nei suoi minimi particolari (Remondino et al., 2011). In accordo con le possibilità offerte dalle tecnologie attuali è possibile individuare due macrocategorie: tecniche *image-based* e tecniche *range-based*. Le tecniche *image-based* si caratterizzano per l'utilizzo di 'sensori passivi' in grado di catturare l'energia elettromagnetica-luminosa presente nell'ambiente (El-Hakim et al., 2007). Questo primo insieme di tecniche si fonda sulla scienza fotogrammetrica, grazie alla quale è possibile ottenere misure molto accurate da una (foto raddrizzamento), due (stereo) o più immagini fotografiche (*bundle-block*) realizzate mediante sensori terrestri, satellitari o aerei (Mikhail et al., 2001). Alla base di questa scienza riscontra il concetto di collinearità, in accordo con questo principio il centro di proiezione di un'immagine prospettica, il punto P dell'oggetto reale e la sua proiezione P' sul piano di proiezione dell'immagine devono giacere sulla medesima retta. Questa peculiarità ci consente di calcolare, mediante triangolazione, le coordinate spaziali di un punto reale nel momento in cui tale punto P venga individuato su di un minimo di due immagini. Su questo principio si basa la triangolazione fotogrammetrica o *bundle adjustment* (Russo et al., 2011) (Figura 9).



immagini; e l'ultimo, come abbiamo visto, converte le coordinate 2D (lastra) dei punti estratti, in coordinate spaziali 3D, arrivando alla generazione di una nuvola sparsa dell'oggetto 3D.

3
Creazione della nuvola densa: una volta ottenuto il corretto allineamento delle camere, si utilizzano algoritmi in grado di aggiungere un grandissimo numero di punti alla già determinata nuvola sparsa, arrivando a descrivere l'oggetto in maniera completa.

4
Orientamento: l'oggetto così creato non presenta una scala reale o delle coordinate spaziali riconoscibili, per questo motivo va inserito il *ground control point* (GCP), ossia le coordinate o misure di punti noti della scena reale, sulle immagini o sulla nuvola di punti.

5
Creazione della *mesh*: in questa fase i punti della nuvola densa vengono interpolati al fine di ottenere un modello poligonale *mesh* completo. È importante questo passaggio poiché, come abbiamo già indagato questo formato ci permette di operare con un modello geometrico solido a maglie e di mantenere anche le informazioni relative al colore, ampliando la versatilità dell'oggetto digitalizzato.

6
Texturing: partendo dalle camere allineate con l'oggetto *mesh* viene mappato utilizzando le informazioni relative al colore derivanti dalle camere allineate.

particolari in cui il riconoscimento di features comuni non è facilmente percorribile, questo è il caso di oggetti trasparenti, o fortemente riflettenti, la risoluzione di questo problema viene affidata all'utilizzo di specifiche luci, o filtri polarizzatori in grado di ridurre la riflessione della luce per determinate angolazioni di incidenza (Clini et al., 2020). Passando ora alla seconda categoria, i 'sensori attivi' o *range-based*, essi si caratterizzano per l'emissione attiva di energia elettromagnetica-luminosa, differente da quella presente nell'ambiente, necessaria all'acquisizione del dato metrico. Queste tecnologie, quindi, sono in grado di emettere un fascio luminoso ad alta velocità, il segnale luminoso viaggia, impatta la superficie e viene riflesso, a questo punto lo strumento, catturando la riflessione e riuscendo a stabilirne la distanza, 'batte' il punto, registrando la coordinata spaziale relativa. Esistono due differenti tipologie di strumentazioni in accordo al loro modo di misurare la distanza: i distanziometrici e a triangolazione. Per quanto riguarda la prima famiglia detta anche *light detection & ranging* (LiDAR) sono due le principali tipologie tecnologiche, a tempo di volo *time of flight* (TOF) e a variazione di fase *phase shifting*. Nel *Time of flight*: gli scanner di questa tipo basano la misurazione sul calcolo del tempo di volo della radiazione emessa. Nello specifico lo strumento emette un fascio di luce laser in direzione dell'oggetto da rilevare, viene riflesso e torna verso lo scanner, il sensore cattura la radiazione calcolandone l'intervallo di tempo tra l'emissione e la ricezione. Ponendo fissa la velocità della luce è possibile conoscere lo spazio percorso e ottenere delle coordinate spaziali. Questa tipologia consente di ottenere precisioni millimetriche anche a distanza di molti metri, per questo risulta particolarmente adeguato al rilievo architettonico, topografico e archeologico. Nel *Phase shifting*: questi sistemi basano la misurazione sulla differenza di fase tra l'onda emessa e l'onda captata dopo la riflessione, calcolando così distanza e coordinate spaziali. Questi strumenti hanno una precisione inferiore all'aumentare della distanza, ma tempi più rapidi d'acquisizione rendendoli particolarmente utili se montati su dispositivi mobili. Nel caso degli strumenti a triangolazione viene generato da un emettitore laser un sottile fascio di luce che impatta la superficie da misurare. Attraverso un sensore come ad esempio una videocamera digitale, spostato lateralmente rispetto alla sorgente di luce, viene captata la riflessione laser, in maniera che la sorgente, il centro di proiezione sul sensore e il punto luminoso riflesso dalla superficie vengano a formare un triangolo. Attraverso relazioni trigonometriche (Guidi et al., 2010) è possibile calcolare la distanza dal punto e ottenere le coordinate geometriche del punto

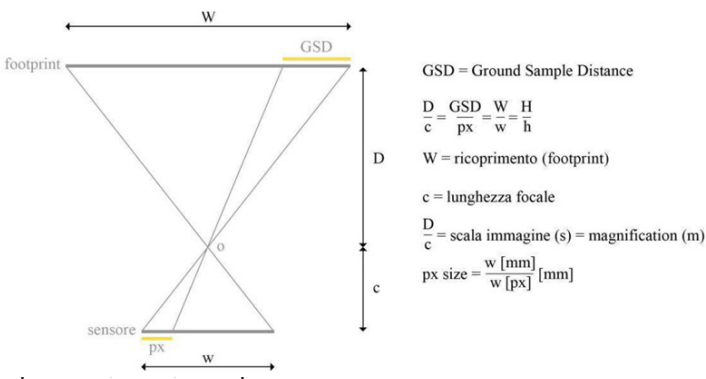


Fig.10
Schema rappresentativo del sistema di presa fotografico (Nespeca, 2018)

da rilevare (Russo et al., 2011). Questa tipologia viene impiegata soprattutto per la realizzazione di digitalizzazioni di oggetti molto piccoli raggiungendo precisioni della decina del micron (Remondino, 2011). A prescindere dalla tecnologia scelta, il loro funzionamento può essere ricondotto a tre parametri: risoluzione, accuratezza e precisione, aspetti centrali per la stima dell'incertezza delle coordinate spaziali rilevate. La risoluzione indica la distanza tra un punto battuto e l'altro, ovviamente minore è la distanza maggiore sarà la risoluzione, e quindi la possibilità di descrivere dettagli sempre più minuti, a fronte di un aumento dei tempi di acquisizione e della grandezza dei file generati. Il secondo elemento, l'accuratezza è dato dal reale funzionamento dello strumento in relazione con il funzionamento ideale dello stesso, può essere migliorato eseguendo procedimenti di taratura. La precisione invece dipende dall'incidenza dell'errore casuale derivante da componenti aleatorie dovute sia alle condizioni ambientali che all'esperienza dell'operatore. Il risultato ultimo della digitalizzazione risulta essere una nuvola di punti contenente le informazioni geometriche della scena digitalizzata. Molti scanner permettono di ottenere anche altre tipologie di dato, come i dati di riflettanza, ottenuti misurando, in rapporto con la nota intensità luminosa emessa, quella ricevuta dal sensore a seguito della sua riflessione sull'oggetto. Anche il dato radiometrico può essere associato all'output finale, infatti tramite camere integrate o esterne è possibile mappare ogni punto con il proprio valore RGB ottenendo così una nuvola di punti colorata realisticamente, arrivando così ad associare a ogni punto dieci valori, (tre coordinate spaziali x,y,z ; tre vettori normali N_x, N_y, N_z ; tre valori RGB, e un valore per la riflettanza) ciò moltiplicato per milioni e milioni di punti porta a produrre file di notevole dimensione. Questo risulta essere uno dei limiti nell'utilizzo di queste tecnologie. Se da un lato troviamo una notevole riduzione dei tempi d'acquisizione in rapporto alla qualità del dato prodotto, dall'altro abbiamo un aumento delle risorse necessarie per processarlo (Clini et al., 2015). Al fine di una gestione ottimale di tutto il processo è bene aver ben chiara quali siano i punti cruciali della *pipeline* di lavoro per effettuare una digitalizzazione consapevole tramite queste tecnologie. Essa si divide in tre passi: progetto di presa, acquisizione, gestione del dato e post-produzione. Durante la progettazione come primo passo va individuata la corretta tipologia di strumento a seconda delle caratteristiche morfologiche e del grado di dettaglio che si vuole ottenere dalla digitalizzazione. Il secondo aspetto essenziale risulta essere lo schema di acquisizione, in generale un oggetto complesso, come un'architettura o un sito

archeologico necessitano di diverse scansioni per coprire l'intera geometria, per questa ragione è bene predisporre un piano d'acquisizione tenendo conto di posizionare lo scanner in maniera che si vadano a ottenere meno punti ciechi, ridurre il numero di prese pur mantenendo una buona sovrapposizione tra una nuvola e l'altra. In questa fase si può prevedere anche la pianificazione di acquisizioni ibride, utilizzando diverse strumentazioni, al fine di avere diversi gradi di risoluzioni in accordo con i diversi livelli di dettaglio richiesti. Nella fase di acquisizione si procede con l'acquisizione del dato, a seconda dello strumento è possibile procedere con delle acquisizioni di carattere dinamico o statico. Le prime, *mobile mapping system* (MMS) avvengono seguendo un flusso continuo, disegnando un percorso. Questi sistemi sono dotati di piattaforma mobile e sensori di misura, grazie ai quali è possibile restituire dati metrici e posizione. Per acquisizioni outdoor è possibile montarli anche su veicoli, mentre per digitalizzazioni indoor vengono montati su carrelli o zaini. Per le acquisizioni statiche invece si procede punto di presa per punto di presa, ossia si individua il punto, si posiziona lo strumento, si acquisisce, e ci si sposta nel punto successivo. Nel caso in cui si debbano fare delle acquisizioni con camere fotografiche esterne esse devono essere posizionate in modo tale da far coincidere il punto di presa con il centro ottico della camera, risulta fondamentale posizionare la camera nell'esatto punto d'acquisizione dello scanner. Nella fase di gestione del dato il nodo cruciale è occupato dall'allineamento delle nuvole di punti. Ogni singola scansione prevede un suo sistema di riferimento relativo a sei gradi di libertà; quindi, ogni singola presa deve essere allineata alle altre al fine di avere un oggetto completo, e se necessario il tutto va allineato a un sistema di coordinate esterno con coordinate GPS per avere una referenziazione completa. Le principali tre modalità di allineamento sono: *coordinate system machine* (CMM); allineamento mediante *features*; allineamento semi-automatico mediante algoritmi. La prima tipologia può essere contestualizzata solo in relazione all'utilizzo di strumentazione CMM, ossia al sensore laser viene sostituita una sonda di misura in grado di calcolare gli spostamenti della strumentazione, grazie alla quale ottenere le coordinate necessarie all'orientamento delle nuvole. La seconda tipologia prevede il riconoscimento di punti notevoli, ciò può essere realizzato mediante l'utilizzo di target, ossia elementi esterni riconoscibili stampati su supporti adesivi, carta, cartone o materiale altamente riflettente. In questo caso è comune che i software proprietari dello strumento siano in grado di riconoscere automaticamente i target e allineare le scansioni a fronte di un corretto

posizionamento; infatti, due scansioni devono condividere almeno tre target comuni per essere allineate correttamente. Non utilizzando i target è possibile andare a selezionare manualmente *feature* altamente riconoscibili, ma essendo un procedimento manuale risulta maggiormente soggetto a errori. L'ultimo metodo d'allineamento, sempre in ambiente software; avviene mediante algoritmi IPC, *iterative closest point*, in questo caso le *features* comuni essenziali all'allineamento vengono estratte automaticamente sfruttando la ridondanza del dato derivante dalla percentuale di sovrapposizione delle nuvole. L'ultimo punto del processo prevede la post-produzione del dato digitale. Questa fase si caratterizza per l'esecuzione di tutto un insieme di operazioni volte al miglioramento della nuvola, come pulizia della nuvola di punti o la riduzione del rumore. Nel primo caso si va a eliminare tutte le parti che non sono necessarie, acquisite per errore, come ad esempio sagome di passanti. Nel secondo caso attraverso processi automatizzati si procede alla riduzione dei punti ridondanti, eliminazione di errori dovuti a parti trasparenti o parecchio riflettenti. Conclusa questa fase, come è per le tecniche *image-based* è doveroso convertire la nuvola di punti in modello 3D *mesh*, attuando, se necessarie, procedure atte alla generazione delle texture. In definitiva non è sempre evidente quale strada intraprendere nel momento in cui ci si accinge alla digitalizzazione poiché sia le tecniche *image-based* che le *range-based* presentano i loro punti di forza (Figura 11) e debolezza, per cui è doveroso studiare il soggetto da digitalizzare, avendo ben chiaro lo scopo finale della digitalizzazione e le risorse disponibili in termini di tempo, risorse umane e monetarie.

Caratteristiche	Fotogrammetria (Image-Based Modeling)	Laser scanner (Range-Based Modeling)
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Maggiori	Minori
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	In parte/del tutto Indipendente
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala/metricità	Assente/da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona/ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente/bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative/statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale
Software open-source	Molto pochi	Molto pochi

Fig.11
Sintesi delle
caratteristiche di
funzionamento
relative alla tecnica
fotogrammetrica e laser
scanner 3D (Russo et
al. 2011)

Un'ultima considerazione relativa alle tecniche di digitalizzazione appena descritte riguarda la possibilità di integrare le metodologie *range-based* e *image-based*, coinvolgendo prevalentemente tre diversi temi: la rappresentazione dell'informazione; la descrizione dell'incertezza e l'ottimizzazione del metodo. Dal punto di vista operativo essi si possono riassumere nell'aumentare le informazioni geometriche o colorimetriche del modello, o aumentare il livello globale di accuratezza. Nel primo caso semplicemente si possono effettuare acquisizioni successive additive, appunto utilizzando ulteriori metodologie, al fine di migliorare il modello e la sua leggibilità. Nel secondo, invece, è possibile verificare il livello globale di accuratezza derivante da più prese grazie all'utilizzo di altri strumenti che garantiscono una data accuratezza a livello globale. Lavorando con oggetti artistici un altro importante vantaggio nell'eseguire un procedimento ibrido consiste nello sfruttare l'accuratezza di strumenti laser per la generazione delle geometrie e sfruttare le procedure d'acquisizione fotogrammetriche per mappare l'oggetto 3D e generare le texture dalle immagini ad alta risoluzione. È chiaro quindi come l'utilizzo integrato delle metodologie sia in grado di massimizzare l'efficacia del sistema di digitalizzazione minimizzando i limiti del singolo strumento (Russo et al., 2011). È evidente come queste metodologie unite a un utilizzo sempre più consapevole delle tecnologie permettano di digitalizzare il patrimonio in modo scientifico, quindi in modo controllato e riproducibile. Inoltre, è importante sottolineare come nel già citato piano nazionale di digitalizzazione (PND) tra gli allegati sono state redatte anche delle specifiche linee guida circa le risoluzioni minime richieste a seconda delle caratteristiche del bene da digitalizzare e della tecnologia scelta¹⁴.

La modellazione integrata per il cultural heritage

L'ultimo passo, per completare lo scenario relativo alla creazione del dato 3D per il patrimonio culturale, consiste nell'indagare le possibilità derivanti dall'integrazione tra modellazione *reality-based* e modellazione diretta. In prima battuta è evidente che la modellazione *reality-based* è strettamente legata a quella diretta, tutti gli elementi aleatori legati alle condizioni d'acquisizione dell'oggetto e all'esperienza dell'operatore producono errori, per cui è molto difficile ottenere un oggetto 3D finito, chiuso e regolare. Per risolvere queste problematiche si può procedere tramite tecniche di modellazione manuale, con l'accortezza di non snaturare dal punto di vista metrico l'oggetto. Da un punto

14
<https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/appendici/parametri-di-acquisizione-digitale.html>

di vista concettuale l'integrazione tra modellazione *reality-based* e modellazione diretta rappresenta l'iter migliore in campo archeologico o artistico architettonico (Fabrizio Agnello & Laura Barrale, 2021). Il resto rinvenuto in sito viene digitalizzato, producendo una sua copia digitale perfetta, questa può essere utilizzata come base per gli studi successivi, nonché come traccia metricamente accurata per eseguire ragionamenti ricostruttivi elevando la modellazione, nel senso più generale del termine, a strumento d'indagine per eccellenza (Guidi et al., 2014). Un'altra strada è l'anastilosi virtuale, ossia andare a modellare parti mancanti di reperti incompleti (Stanco et al., 2017), o anche ricostruire digitalmente oggetti partendo da reperti frammentati (Ferdani et al., 2020). Un altro campo d'applicazione tipico della modellazione integrata è quello dell'HBIM (*heritage building information*). Tradizionalmente i processi BIM nascono in ambito edile e industriale e si caratterizzano per la creazione di modelli informati capaci di gestire e contenere al loro interno tutte i dati e metadati relativi a qualsiasi parte dell'edificio, dagli elementi strutturali alle finiture (Azhar, 2011). Recentemente si sta cercando di applicare le medesime metodologie anche al patrimonio culturale in particolare in relazione a musei o siti archeologici (Carpentiero, 2020; Ferretti et al., 2022; Moreira et al., 2018). In questo scenario ci si trova a lavorare con oggetti già esistenti quindi, le metodologie seguite sono più assimilabili alla *reverse engineering* (Stober et al., 2018), in cui partendo da un modello *reality-based* si passa a un modello discretizzato o segmentato, ottenuto mediante modellazione diretta o tramite procedimenti automatizzati (Dore & Murphy, 2012). L'HBIM, una volta ottenuto un modello adeguato, rappresenta un nuovo strumento utile a tenere traccia, all'interno dello stesso sistema, tutte le informazioni legate a quel bene culturale venendo incontro alla necessità di esplicitare il valore scientifico dietro la modellazione o la ricerca che si sta eseguendo.

Dal modello geometrico alla visualizzazione realistica

L'ultimo passo necessario per chiudere la descrizione della generazione del dato scientifico riguarda il modo di visualizzarli al fine di darne una rappresentazione realistica. Un modello 3D, se generato secondo una modellazione manuale o *reality-based*, presenta di per sé informazioni di carattere geometrico, ma ciò non implica una visualizzazione reale caratterizzata da luci, ombre e riflessi, questo passaggio avviene mediante i processi di renderizzazione, in cui l'oggetto 3D viene convertito in un'im-

agine *raster* visualizzata a schermo. L'insieme delle procedure eseguite per effettuare un *rendering* viene definita *rendering-pipeline* e si basa su tre elementi fondamentali: oggetti; luci; osservatore. Gli oggetti sono tutto ciò che deve essere rappresentato nella visualizzazione, ossia modelli, sfondi, grafiche e scritte. Le luci gestiscono il sistema d'illuminazione della scena, e di conseguenza la tipologia di ombra. L'osservatore, rappresentato generalmente da una camera, costituisce il punto di vista, e gestisce gli algoritmi di proiezione atti alla trasformazione delle informazioni geometriche 3D degli oggetti in rappresentazione 2D. Il primo passo consiste nell'andare a creare la scena, ossia vanno inseriti nello stesso sistema di coordinate oggetti, luci e camera. La creazione degli oggetti 3D è già stata ampiamente trattata, nell'implementazione dei tre casi studio sono stati utilizzati prevalentemente oggetti *mesh*. Per il loro posizionamento vanno quindi effettuate trasformazioni semplici come traslazione, rotazione ed eventualmente scalare il soggetto. Per quanto riguarda le luci esistono diverse tipologie di luci utilizzabili a seconda della modalità di rappresentazione richiesta. Le tipologie di luci più diffuse sono: *spot*, simulano la luce proveniente da un faretto; *omni*, luce omnidirezionale ossia un punto luce che emette luce in tutte le direzioni con intensità inferiore man mano che ci si allontana dalla sorgente; luci a raggi paralleli simulano l'utilizzo della luce solare ponendo la sorgente luminosa all'infinito. Un sistema che sfrutta la peculiarità di quest'ultima tipologia è l'utilizzo di foto panoramiche *digh dynamic range image* (Happa & Artusi, 2020), ossia una foto scattata secondo diversi gradi d'esposizione e unificate in un unico file (Figura 12). Con questo tipo d'immagine si può simulare l'illuminazione realistica di un dato ambiente, variarne l'intensità e aggiungere dettagli alla scena, dato che gli oggetti riflettenti potranno riflettere direttamente ciò che vi è rappresentato.



Fig.12
Immagine HDRI di un esterno.

e *rendering* permettono di poter scegliere numerosissimi parametri tanto da poterla utilizzare proprio come una macchina fotografica reale. Ciò consente quindi di gestire lunghezza focale, diaframma, profondità di campo, esposizione, e anche decidere se renderizzare in formato panoramico, prospettico o ortografico. Una volta composta la scena possiamo analizzare quali sono le principali fasi di un processo di *rendering*. Esistono diversi algoritmi che possono essere utilizzati, schematizzabili in tre elementi: *geometry transformer*, *view transformer* e *rasterizer* (He & Zhao, 2012). Nella fase di *geometry transformer* tutte le entità geometriche della scena, in coordinate locali, vengono portate nel sistema di riferimento geometrico della scena o *world space*. La fase di *view transformer* si compone di due operazioni. *Clipping* in cui vengono eliminate tutte le primitive che non appartengono al volume di vista, in modo tale da alleggerire il calcolo. La seconda invece *projection* applica delle trasformazioni prospettiche agli oggetti inquadrati dalla camera, al fine di avere una rappresentazione 2D della scena sul piano di vista. Durante la fase *rasterizer* avviene la rasterizzazione, ossia vengono individuati tutti i pixel corrispondenti ai vertici delle primitive; in seguito, vengono colorati anche gli altri punti appartenenti alla primitiva individuata, secondo gli algoritmi e i procedimenti di *shading* adottati. Questo non costituisce il colore finale poiché possono entrare in gioco e influire nel calcolo la relazione reciproca di altri oggetti o primitive oppure altri effetti. Visto lo schema generale una delle principali distinzioni riguardanti i procedimenti di *rendering* finalizzati a ottenere risultati realistici riguarda l'adozione di metodiche *non-realtime* o metodiche *real-time*. Le prime permettono di ottenere un'immagine molto realistica a fronte di un tempo di calcolo ampio. Le seconde invece sono molto rapide e l'ottenimento di risultati realistici passa attraverso diversi procedimenti e ottimizzazioni per cui risulta più difficile ottenere i medesimi risultati. Il primo caso può essere descritto mediante i processi di *rendering ray-tracing*, introdotti per la prima volta da (Foley & Whitted, 1980). Questo procedimento simula in modo realistico il comportamento della luce considerando le relazioni reciproche tra oggetti. Dato che non è possibile seguire i raggi luminosi emessi dalla sorgente poiché essi sono infiniti, si procede in modo inverso, partendo dal punto di vista e procedendo verso le sorgenti luminose. Viene proiettato un raggio dall'origine di proiezione visiva passante per ogni pixel, avendo così x raggi pari al numero di pixel della nostra immagine. Questo raggio, detto primario, può incontrare un oggetto, un punto luminoso o lo sfondo. Nel caso esso incontri un punto luminoso o lo sfondo viene assegnato diretta-

mente il colore prestabilito. Nel caso in cui il raggio incontri un oggetto, vengono generati dei raggi secondari diretti verso le sorgenti luminose, detti raggi ombra. In questo caso se il raggio ombra arriva direttamente alla sorgente luminosa allora si calcolerà l'influenza della luce in quel punto, se il raggio ombra incontrerà un altro oggetto vuol dire che il primo oggetto sarà in ombra poiché coperto dal secondo. A questo punto il raggio secondario diventa primario e si reitera il processo a seconda di quanto gli oggetti siano in grado di riflettere la luce. Questo processo termina quando tutti i raggi incontrano una fonte luminosa o lo sfondo; oppure fissando un numero massimo di iterazioni del processo, più alto sarà il numero di iterazioni più precisa sarà la simulazione e di conseguenza la qualità dell'immagine. Per ogni punto si tengono in considerazione, le componenti della luce ambientale, riflessione diffusa e speculare andando ad aggiungere i termini relativi alla riflessione speculare e globale dovuti ai raggi secondari generati da altri oggetti riflettenti. In questo caso il calcolo viene fatto in base ai coefficienti di trasmissione assegnati ai materiali. Come possiamo facilmente intuire i tempi di calcolo aumentano all'aumentare delle sorgenti luminose, del numero di materiali riflettenti e della grandezza in pixel dell'immagine, tutti fattori da tenere in considerazione nel momento in cui si va a impostare una scena soprattutto nella realizzazione di video, in cui è previsto il calcolo di centinaia di frame. Il secondo caso, ossia il *rendering realtime*, consente di abbattere notevolmente i tempi di calcolo per ciascun frame o immagine. In questo caso il cuore del processo riguarda il modo in cui viene decodificata la scena al fine di ottenere il colore realistico degli oggetti. Nello specifico vengono impiegate tecniche *Z-buffer* e la rasterizzazione triangolare. Il primo serve a comprendere la profondità degli oggetti, viene registrata la coordinata 'z' di ogni pixel al fine di comprenderne la distanza dall'osservatore e quindi capire se ci sono sovrapposizioni di oggetti. Il secondo elemento consente di discretizzare la visualizzazione in triangoli e in seguito rasterizzarli, ossia accendere il pixel solo se il centro del pixel giace nel triangolo o proprio sul bordo dello stesso. Il nodo cruciale consiste nel definire in che modo il pixel viene colorato. A differenza dei metodi *non real-time* le informazioni vengono prese dalle texture assegnate all'oggetto, o da elementi precalcolati che possono contenere informazioni utili alla visualizzazione realistica, come riflessi o luci e ombre. Per ottenere questi risultati si fa riferimento ai processi di *baking* e all'impiego dei *reflection probe*. I processi di *baking* permettono, secondo metodiche di *rendering non real-time* di calcolare l'influenza della luce

diretta e riflessa su di un oggetto 3D, ma di salvare queste informazioni sulla texture dello stesso, così facendo nel momento in cui si riproiettano le mappe 2D sull'oggetto 3D mediante il sistema di coordinate uv l'oggetto risulterà come se fosse già illuminato. Ovviamente questo metodo può essere utilizzato per oggetti statici dato che cambiando la posizione cambia l'incidenza delle luci e di conseguenza anche le ombre. Lo stesso procedimento può essere riconvertito in relazione alle riflessioni della scena mediante l'utilizzo dei *reflection probe*. Questo oggetto permette di individuare un'area e di andarne a calcolare all'interno di mappe le riflessioni reciproche di oggetti statici presenti al loro interno. In questo caso l'immagine riflessa viene calcolata in relazione alle informazioni precalcolate e salvate. Queste tecniche, quindi, permettono di effettuare solo una volta il calcolo e in seguito richiamarne all'occorrenza il contenuto necessario riducendo notevolmente i tempi. Il processo di *baking* è un passaggio fondamentale di un'altra tecnica molto utilizzata in ambito gaming, la *retopology*. Lo scopo di questo procedimento consiste nel ridurre il numero di poligoni di un oggetto complesso (*high poly*) per ottenerne uno nuovo caratterizzato da un numero inferiore di poligoni (*low poly*) salvando memoria sia in fase di archiviazione che di visualizzazione. Oltre al gaming questa tecnica da qualche anno è entrata a far parte anche dei processi volti alla visualizzazione di modelli fotogrammetrici legati al CH, utilissimo in chiave di visualizzazione VR o WEB (Gonizzi Barsanti et al., 2022). Questo procedimento può essere scomposto in tre fasi principali: *remeshing*, *unwrapping* e *baking*. La fase di *remeshing* prevede la riformulazione automatica o manuale del modello. In genere da un modello *mesh* organico a poligoni triangolari, si ottiene un modello *mesh* a poligoni quadrati, *quadmesh*. L'utilizzo di *mesh* quadrate favorisce un funzionamento ottimale nella maggior parte dei procedimenti di *rendering*, ne riduce il peso di archiviazione a fronte di una perdita di dettaglio (Bommes et al., 2012). Ottenuto il modello *low poly* si procede all'*unwrapping*, in italiano, scartare o srotolare. Nello specifico, mediante procedimenti, anche in questo caso automatici o manuali si va a creare un sistema di coordinate 2D (uv), letteralmente appiattendolo il modello 3D su di un piano. Seguendo procedimenti automatizzati va verificato se più poligoni si sovrappongono, e in caso, intervenire manualmente. È importante che non ci siano sovrapposizioni dato che a ogni punto della *mesh* debba corrispondere un pixel della texture in coordinate (uv) al fine di evitare errori di visualizzazione. Nell'ultima fase si esegue il *baking*, come già anticipato viene effettuato un *rendering* il cui risultato finale è una texture. In questo caso è

importante che il modello *high poly* e il *low poly* siano perfettamente sovrapposti. Viene stabilito un livello di estrusione del modello *low poly* al fine di ingabbiare il modello *high poly*. Nel momento della renderizzazione vengono impresse nel sistema di coordinate uv dell'oggetto *low poly* informazioni estrapolate dal modello *high poly*. Generalmente da questo processo si ottengono le mappe del *diffuse*, ossia il colore dell'oggetto; le *normal map*, che in fase di *rendering* modificano il calcolo dell'incidenza della luce simulando micro-dettagli. Proprio grazie a questa mappa è possibile recuperare quel micro-dettaglio geometrico perso in fase di *remeshing*. In caso di materiali complessi è possibile generare altre tipologie di mappe per gestire, ad esempio, quanto l'oggetto è riflettente liscio o rugoso. La scelta di queste mappe dipende dalla tipologia di *rendering* e *shading*. La scelta e l'utilizzo di altre mappe può essere correlata alla tipologia di algoritmi di *rendering* adottati. Una delle metodologie più diffusa in ambito gaming al fine di ottenere risultati realistici è la PBR o *physical based rendering pipeline*. Questo metodo di *rendering* e *shading* è finalizzato a ottenere accuratissime rappresentazioni di come la luce interagisce fisicamente con le superfici (McDermott, 2018). I principali vantaggi per un artista digitale nell'utilizzo di questa metodica sono: rimozione della necessità di definire gli attributi fisici di un materiale, già definiti e basati su formule fisicamente corrette; data la solida base di simulazione fisica è facile avere ottimi risultati in qualsiasi situazione d'illuminazione; un flusso di lavoro unificato e interscambiabile tra autori e artisti differenti. Tutte le caratteristiche di un materiale sono gestite da mappe, quindi da immagini lineari 2D, per cui aggiungere dettagli, quindi realismo, all'oggetto può avvenire in modo molto semplice mediante sia procedimenti grafici manuali, come il *texture painting*, sia mediante procedimenti automatici e parametrici. I due software di riferimento per la creazione di queste mappe sono Adobe Substance Designer¹⁵ per il procedurale e Adobe Substance Painter¹⁶ per il *texture painting*, ma attualmente anche software open source come Blender¹⁷ permettono di eseguire i medesimi procedimenti. I procedimenti PBR si fondano su due workflow possibili, il *metal/roughness* e lo *specular/glossiness*. Questi procedimenti sono sostanzialmente equivalenti e la loro scelta può dipendere dal motore di *rendering* scelto. Per capire meglio il loro funzionamento prendiamo ad esempio il primo, *metal/roughness*, basato appunto su tre mappe di base, le quali descrivono la risposta fisica del materiale all'incidere della luce, queste mappe sono: *base color*, *metallic* e *roughness*. Il *base color* è una mappa RGB o SRGB, contenente due tipi di dati sia i valori di colore riflesso per

¹⁵ <https://www.adobe.com/products/substance3d-designer.html>

¹⁶ <https://www.adobe.com/products/substance3d-painter.html>

¹⁷ <https://www.blender.org/>

i materiali dielettrici sia i valori di riflettanza per i materiali metallici. Il *metallic* è una mappa in scala di grigio lineare può essere considerata simile a una maschera, dove più il dato è scuro più lo *shader* leggerà il materiale come non-metallico, mentre più è chiaro, come materiale metallico e riflettente. La *roughness* è una mappa sempre su scala di grigi lineare, che però permette di inserire irregolarità nella superficie del materiale, più è scuro più il materiale risulterà liscio, più è chiaro più risulterà rugoso. Nell'utilizzo di queste metodiche è possibile includere anche altre mappe come quella delle normali. Per concludere è possibile generare le mappe appena descritte mediante procedimenti di *retopology* e *baking*. La modellazione 3D diretta, *reality-based* e quella integrata, nonché i procedimenti di *rendering* appena descritti costituiscono quindi gli elementi base, i primi tasselli essenziali nello sviluppo e studio delle buone pratiche per una fruizione innovativa del patrimonio culturale, mettendo in collegamento mondi apparentemente molto distanti tra loro come gaming, *computer graphics* e *computer vision* con l'arte l'architettura e l'archeologia. Queste tecniche verranno successivamente contestualizzate in chiave operativa nella trattazione dei casi studio proposti. In relazione alla creazione di visualizzazioni realistiche un aspetto rilevante al fine di questo lavoro è la conoscenza delle metodiche utili alla creazione di visualizzazioni in grado di unire mondi, oggetti e ambientazioni virtuali con riprese reali dinamiche. Tali tecniche oggi sono entrate di diritto nella consuetudine della produzione cinematografica. Una delle tecniche più diffuse è il *chroma key* (Kathryn Ramey, 2016), ossia riprese su schermo verde, più comunemente nota come *green screen*, capace di estrapolare un oggetto animato, ed eliminando il resto montarlo sopra un'altra immagine di sfondo. Questo principio di sovraimpressione ha origini quasi riconducibili agli albori della storia del cinema, dove i processi erano svolti interamente mediante l'utilizzo di pellicole e sovraimpressioni. Il concetto base è quello di escogitare un metodo di ripresa cinematografica, al fine solo di impressionare la pellicola solo con ciò che si vuol estrapolare nel contesto. Le prime tecniche hanno visto la copertura diretta di porzioni dell'obiettivo, da cui il concetto di maschera, e poi girare con nuovamente scoprendo ciò che era coperto in principio e coprendo il resto. Dato che questa tecnica comportava un alto grado d'errore senza conferire la possibilità di effettuare riprese in movimento, si passò a utilizzare sfondo omogeneo per ottenere l'impressione di una pellicola solo del soggetto in movimento, e tramite processi chimici contrastare all'estremo la pellicola al fine di ottenere una maschera animata da utilizzare in fase di

proiezione. Si passò quindi a schermi neri, per la pellicola in bianco e nero (*black screen*) al *blue screen* per la pellicola a colori. Negli anni 90 con l'avvento dei processi di digitalizzazione di montaggio e ripresa cinematografici si è passati così all'utilizzo del *green screen*. Mentre in passato la scelta del colore di sfondo era legata alle tecniche e processi chimici di sviluppo, in questo caso lavorando in ottica digitale qualsiasi colore può essere usato come sfondo, campionando un determinato valore RGB, impostata la tolleranza, il software è in grado di selezionare ed eliminare i pixel contenuti in quel range. L'utilizzo del verde è stato dettato dalla possibilità di illuminarlo facilmente, la bassa probabilità di riscontrare quella tonalità in costumi oppure oggetti di scena, e la sensibilità del sensore digitale, il quale è particolarmente sensibile a tale colore registrandolo meglio. Queste tecniche consentono quindi di estrapolare un girato cinematografico e inserirlo non solo sopra un altro girato, ma anche al di sopra di una produzione totalmente virtuale. L'utilizzo di queste tecniche nonché di questi principi ha portato allo sviluppo anche di altre tecniche, fondendo ed entrando nel mondo della *computer vision*, ossia il *motion capture*. Questa tecnica, vestendo l'attore con una tuta verde con punti riflettenti visibili, permette di discretizzare il movimento dell'attore in nodi base, usati a loro volta per animare la versione virtuale dell'attore stesso. Questa tecnica permette la creazione di ambienti virtuali molto realistici, permettendo una riposizione in chiave virtuale e sempre più fedele e reale della performance attoriale. Recentemente si sta abbandonando la tecnica *green screen* a favore del volume led, ossia un set, le cui pareti, e copertura sono completamente costituite da pannelli led. Tale sistema è costituito da una camera referenziata a un ambiente virtuale, renderizzato in *real-time*, il quale viene proiettato sullo schermo e variato in tempo reale in relazione al punto di vista e al movimento delle camere¹⁸.

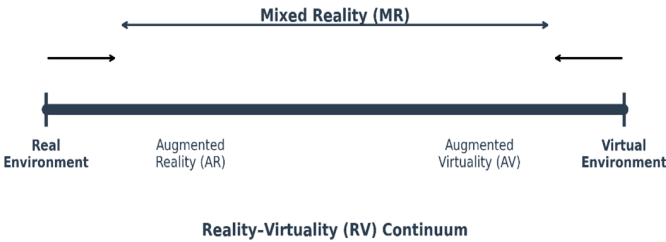
La fruizione del patrimonio culturale

Una volta visti i principali metodi di generazione del dato digitale, il passo successivo consiste nell'indagare i diversi modi di fruirlo. Tale tematica costituisce il secondo cardine fondamentale per una gestione consapevole del *digital cultural heritage*. La tecnologia oggi ci consente di ottenere delle copie digitali perfette del reale, o di giungere a visualizzazioni virtuali sempre più realistiche, ma tutto ciò è irrilevante senza un adeguato piano di fruizione. Le nuove tecnologie permettono di ribaltare il rapporto tra uomo e cultura. Pensando in chiave museale, ad

esempio, l'utente può osservare l'opera d'arte, passeggiare tra le sale, leggere le didascalie delle opere o ascoltare audioguide. Ma quanto può essere più efficace se la comunicazione di quell'opera avvenisse in modo totalmente diverso e dinamico? Se fosse la stessa opera a dare informazioni? A guidare l'utente nella visita museale raccontando la propria storia? e se la si osservasse ricontestualizzata nel suo ambiente (spazio-tempo) d'origine? Le tecnologie di fruizione digitale permettono tutto ciò, quindi è possibile rivoluzionare il rapporto stesso tra uomo e patrimonio culturale, passando da una concezione prettamente passiva o statica, a una nuova dinamica e interattiva (Antinucci, 2014). L'utilizzo delle nuove forme di fruizione digitale porta con sé due scopi principali: da un lato, favorisce un miglioramento della comunicazione, agevola la comprensione, chiarisce aspetti di complessità, rende i concetti più chiari e sintetici, garantendo sempre la scientificità dei contenuti (Luigini & Panciroli, 2018); dall'altra parte il digitale consente di moltiplicare le possibilità comunicative, proprio in termini di quantità, aumentando il numero di persone che possono avere accesso alla cultura. La diffusione del dato può avvenire secondo canali digitali, quindi svincolati da contingenze o barriere fisiche, potendo raggiungere qualsiasi individuo dotato di un dispositivo e una connessione. Ad esempio, per una data opera, mostra, o intero museo si potrebbe prevedere nel medesimo applicativo, un duplice percorso, uno dedicato alla fruizione digitale, l'altro dedicato alla fruizione da casa o da remoto (Clini et al., 2022a). A partire dalla generazione millennials o nativa digitale, i bambini sono portati a rapportarsi con sistemi cognitivi estremamente complessi e in continuo mutamento. Ciò comporta, come nel caso del gaming, allo sviluppo di grandi abilità visive, di movimento corporeo e di ragionamento rapido e strategico. Si tratta quindi di abilità cognitive nuove e quasi totalmente sconosciute alle generazioni precedenti, ma senza dubbio utili alla comprensione delle simbologie del patrimonio artistico, se supportate da un linguaggio comunicativo adeguato e attuale (Ferri, 2011). Date queste premesse si è osservato che gli ambienti digitali si siano rivelati fortemente attrattivi nei confronti delle nuove generazioni (Lampis, 2018) e che i luoghi della cultura che non presentano installazioni multimediali vengano considerati meno attraenti (Gervai & Le Rue, 2015). Non va tralasciato che negli ultimi anni la recente crisi pandemica ha spinto tutte le generazioni, anche le più anziane, a dover affrontare quotidianamente le sfide di un mondo sempre più digitale, trovandosi a dover rimodulare i propri processi cognitivi, attualizzando il linguaggio comunicativo rendendolo sicuramente più aperto nei confronti

18
<https://www.wired.it/article/led-wall-cinema-italiano-onextra-i-personnia/>

delle nuove tecnologie. Al giorno d'oggi numerosissime sono le possibilità tecnologiche disponibili, dall'utilizzo di tablet e smartphone all'utilizzo di visori di realtà virtuale stereoscopici, ma risulta molto difficile trovare il giusto equilibrio al fine di massimizzare la comunicazione, non snaturare il rapporto con l'opera d'arte reale e soprattutto evitare che il cuore della fruizione sia l'utilizzo della nuova tecnologia. In questo scenario risulta essenziale cercare di comprendere in che modo la dimensione virtuale possa legarsi a quella reale-fisica. Una delle primissime definizioni di realtà virtuale risale al 1983 quando Myron Krueger definì la realtà virtuale quanto realtà artificiale, ossia un'esperienza digitale talmente immersiva al punto da poter essere considerata vera. Questo concetto fu utilizzato da Krueger al fine di studiare il rapporto uomo-macchina, sia da un punto di vista d'interfaccia, sia da un punto di vista sociale (Krueger, 1991). Questa definizione di realtà artificiale fu superata negli anni '90 del Novecento da Paul Milgram tramite l'introduzione del concetto di continuum reale-virtuale, ossia uno schema lineare del rapporto reciproco tra dimensione reale e quella virtuale (Figura 13). Questo continuum si concretizza mediante diverse soluzioni tecnologiche, capaci di far passare da una dimensione totalmente virtuale a una totalmente reale (Milgram et al., 1995).



Tale schema presenta all'estremo di sinistra la dimensione reale, in quello di destra quella virtuale, intervallato dalla realtà mista, intesa in termini di commistione tra elementi virtuali e reali (MR). L'estremo di sinistra della MR sfuma verso la realtà aumentata (AR), mentre quello di destra in virtualità Aumentata (VA). Analizzando da un punto di vista concettuale le diverse peculiarità relative alla tipologia di fruizione si può individuare:

Fig.13
Continuum Reale-Virtuale (elaborazione da: Milgram et al. 1995).

1

AR: la comprensione e percezione del mondo viene migliorata grazie alla sovraimpressione di dati virtuali sul reale, senza che ci sia una reale interazione tra dimensione reale e virtuale

2

MR: unire elementi virtuali nell'ambiente reale conferendo un certo grado d'interazione tra le due dimensioni.

3

VA: aggiungere a una scena totalmente virtuale elementi o scene dell'ambiente reale.

4

VR: in questo caso l'utente si rapporta con un mondo totalmente artificiale in cui può interagire solo con elementi virtuali, escludendo ogni possibilità di interazione con la dimensione reale.

Queste modalità di fruizione, applicate nel campo del CH, consentono di creare ambienti capaci di reagire all'interazione umana, modificandosi in maniera dinamica, non solo rendendo il percorso più interattivo e attrattivo (Manovich, 2006), ma anche più vario e potenzialmente spendibile per diversi scopi comunicativi. A prescindere della tecnologia utilizzata, questi sistemi si prestano quindi a una grande varietà di applicazioni, raggruppabili in cinque macro ambiti (Bekele et al., 2018): *educational*: questo scopo mira a educare gli utenti circa gli aspetti storici del patrimonio materiale e immateriale; *exhibition enhancement*: volto a migliorare l'esperienza in sito, museo o luogo culturale che sia; *exploration*: questo ambito supporta gli utenti, prevalentemente specializzati, nella visualizzazione ed esplorazione del patrimonio culturale al fine di scoprire, interpretare e acquisire nuove conoscenze; *reconstruction*: in questo caso la visualizzazione ha come suo soggetto principale la ricostruzione storica del patrimonio, mostrando il 'com'era'. A differenza dell'ambito precedente, non per forza l'utente è specializzato, quindi non ha come scopo centrale la ricerca di nuova conoscenza, anzi molto spesso è il risultato finale di un processo ricostruttivo di ricerca; *virtual museum*: esso presenta come scopo la riproposizione di collezioni e mostre in formato digitale. È facile intuire come questi ambiti siano sovrapponibili o in ogni caso non si ha quasi mai la presenza di un unico campo. Ad esempio, visualizzare una ricostruzione può avere scopi prettamente didattici ed educativi, oppure può essere implementata all'interno di museo virtuale, sia come contenuto fruibile, sia come contenitore digitale

di opere. Nei paragrafi successivi si analizzeranno le principali declinazioni tecnologiche relative al AR-MR e VR, nonché casi notevoli applicati al CH.

La realtà aumentata e mista

La definizione più accreditata di realtà aumentata (AR) risale al 1997:

"A system that combines real and virtual content, provides a real-time interactive environment, and registers in 3D".

Da questa definizione (Azuma, 1997) si può evincere come l'AR possa completare la dimensione reale senza sostituirla (Milgram & Kishino, 1994), ma aggiungendo informazioni virtuali generate al computer in tempo reale. Le caratteristiche tipiche dell'AR possono essere sintetizzate in tre punti (Liarokapis, 2007): Il primo è la combinazione di elementi virtuali, come scritte, grafiche, schemi, anche modelli 3D, con oggetti reali. Il secondo è il funzionamento in tempo reale dell'applicazione. Il terzo è l'interazione tra oggetto virtuale e utente. Come spesso avviene molte delle tecnologie nascono in campo militare, anche in questo caso le primissime applicazioni vennero introdotte in campo aeronautico. Questi primi dispositivi, ossia caschi aumentati *head-up display* e *helmet-mounted sights* (HUD e HMS), erano in grado di sovrapporre grafiche vettoriali sulla vista del reale del pilota mostrando informazioni utili al volo e al combattimento (Wanstall, 1989). Con il tempo i campi d'applicazione divennero sempre più ampi, riscontrando applicativi in campo industriale; per riparazioni e manutenzione (Gimeno et al., 2018; Henderson & Feiner, 2011); nella progettazione urbanistico-architettonica (Wagner et al., 2009; Wang, 2009); in campo medico (Eliahu et al., 2022; Haouchine et al., 2013); dell'istruzione (Christopoulos et al., 2022; Yuen et al., 2011) e dell'intrattenimento (Pucihar & Coulton, 2014; Tanprasert & Yoon, 2022). Questo grande sviluppo senza dubbio può essere ricondotto all'evoluzione tecnologica seguita da una diminuzione generalizzata dei costi. Infatti, le primissime applicazioni di AR erano divise in due principali categorie: i dispositivi ottici e i dispositivi a monitor. I primi erano veri e propri visori o caschi, come quelli utilizzati in campo militare; i secondi invece erano sistemi complessi costituiti da una camera, un generatore di immagini, un mixer e uno schermo su cui mandare le immagini (Azuma, 1997). Questi dispositivi erano quindi molto ingom-

branti, scomodi da usare e soprattutto molto costosi; quindi, non adatti a un utilizzo comune e diffuso. La svolta è avvenuta a seguito della grandissima diffusione dei dispositivi mobile come smartphone e tablet. Questi dispositivi hanno il grandissimo vantaggio di essere estremamente portatili e *stand-alone*, quindi non necessitano di computer esterni per il loro funzionamento. La fruizione stessa avviene in modo molto semplice e intuitivo, ma se utilizzata per molto tempo può risultare alquanto macchinosa, o in grado di introdurre elementi di forte disturbo tra l'utente e l'oggetto reale, dato che il dispositivo va tenuto in mano, a volte anche in due mani, e di dover osservare la realtà attraverso le camere del dispositivo, non sempre ad alta risoluzione. Recentemente si sta iniziando a utilizzare dispositivi indossabili, molto avanzati, ricalcando quasi le prime sperimentazioni sopracitate. Questi dispositivi, occhiali smart, o visori olografici come *Microsoft HoloLens* o *Meta Quest 2*, *Meta Quest 3* e *Meta Quest Pro* consentono di osservare la realtà e aggiungere contenuti virtuali nel modo meno impattante possibile. L'utente deve solo indossarli e osservare in modo naturale la scena per richiamare i contenuti e l'utilizzo di controller o delle mani viene impiegato solo per l'interazione, riducendo quanto più possibile la distrazione prodotta dall'uso del dispositivo (Litvak & Kuflik, 2020). Nel campo dei beni culturali la realtà aumentata sta assumendo un ruolo sempre più centrale, grazie alla possibilità di creare esperienze interattive e coinvolgenti, in grado di aumentare il grado d'apprendimento e concentrazione (Morhouse et al., 2019; Yoon et al., 2012). Molti sono i possibili usi di sistemi AR, una prima distinzione può essere eseguita in relazione all'ambiente di utilizzo, se indoor come mostre, esposizioni, collezioni museali e outdoor ambienti urbani o siti archeologici. Nel primo caso gli applicativi permettono di andare ad aggiungere contenuti digitali sulle opere della collezione (Clini et al., 2019b; Quattrini et al., 2019), fornendo informazioni testuali o schemi 2D, oppure richiamando modelli 3D anche interattivi (Clini et al., 2021b). Nelle applicazioni più complesse è possibile creare un intero sistema di guida in realtà aumentata e richiamare contenuti fino a giungere a soluzioni tendenti alla *gamification* (Miyashita et al., 2008; Quattrini et al., 2015). Nel secondo caso d'utilizzo, l'outdoor, specialmente nei siti archeologici è possibile riposizionare nel sito stesso oggetti, reperti, o anche ricostruzioni di interi edifici, facilitando notevolmente la comprensione del sito (Dragoni et al., 2019). In ambiente urbano o territoriale invece è possibile sfruttare le potenzialità dell'AR per generare itinerari di carattere turistico e dare informazioni di diverso genere attraverso testi immagini o modelli

3D. Da un punto di vista operativo e di sviluppo il nodo cruciale su cui si sviluppano tutte queste tipologie d'applicazione, sia se progettate per smartphone, sia se pianificate per dispositivi più complessi come visori o *smart glasses* è il tracciamento o *tracking*. Questo aspetto gestisce in che modo il dispositivo è in grado di riconoscere lo spazio reale e di conseguenza vincolare a esso i contenuti generati digitalmente in tempo reale. La verifica dello spazio inquadrato può avvenire in due modi prettamente diversi: il metodo *marker-based* e il metodo *location-based*. In accordo con il primo metodo, il tracciamento spaziale del dispositivo viene effettuato mediante il riconoscimento di punti noti o *features* appartenenti a un oggetto noto al sistema. Le prime sperimentazioni in tal senso riguardano proprio l'utilizzo di immagini bidimensionali, *Image-target*, affinché l'applicazione funzioni correttamente è necessario utilizzare immagini caratterizzate da un alto contrasto, dalla presenza di spigoli o punti caratterizzate da un passaggio netto di colore. Questi vincoli sono necessari per facilitare l'estrazione di questi punti e in seguito il loro riconoscimento automatico nell'ambiente reale. Ad esempio, i QR-Code rappresentano un target di facile utilizzo dato il passaggio netto tra elementi neri e sfondo bianco. Recentemente si stanno diffondendo sempre più applicativi in grado di utilizzare come target un modello 3D, il funzionamento è molto simile al caso precedente, con la differenza che i punti notevoli vengo estratti dalle informazioni geometriche. L'utilizzo di questo sistema necessita che il modello 3D e l'oggetto reale siano quanto più possibile simili tra loro. Una volta avvenuto il riconoscimento dell'oggetto il software posiziona i contenuti digitali in relazione alla posizione del target associato. Il secondo metodo, ossia il *location-based*, prevede l'utilizzo di dispositivi di georeferenziazione spaziale oramai di comune impiego in smartphone come GPS, giroscopi, bussole digitali e accelerometri. In questo caso il tracciamento avviene mediante il calcolo della posizione del dispositivo. Questa tipologia di tracciamento è possibile solo outdoor, e presenta una precisione dell'ordine del metro, per questo applicabile solo su scala architettonica o paesaggistica. Nel caso si voglia migliorare la precisione di tracciamento spaziale o utilizzare questo metodo indoor è necessario utilizzare dispositivi esterni installati nell'ambiente come *bluetooth beacon*. Questi dispositivi facilitano il tracciamento del dispositivo rendendo possibile una sua triangolazione. Non hanno un costo elevato, ma risulta in ogni caso complesso gestire e progettare gli ambienti evitando punti ciechi (Braud et al., 2022). Solo recentemente, invece, si sta iniziando a utilizzare metodi tracciamento SLAM (*simultaneous localization & map-*

ping), in questo caso il tracciamento avviene mediante l'utilizzo combinato di camere ottiche e specifici algoritmi, il device così è in grado di creare un modello 3D dell'ambiente e di conseguenza tracciare la posizione dell'utente, di oggetti fisici e calcolare la posizione in coordinate relative dei contenuti virtuali. Questa tecnologia sta prendendo sempre più piede ma in dispositivi ancora molto costosi come *Microsoft Hololens 2*. Per quanto riguarda le possibilità di applicazione di questi due metodiche di tracciamento nel CH, le applicazioni *marker-based* su riconoscimento bidimensionale risultano perfettamente contestualizzate quando il target 2D è l'opera stessa come un dipinto, un affresco o un disegno. In questo caso l'informazione aggiunta è perfettamente contestualizzata e permette di facilitare notevolmente chiavi di lettura, studi compositivi o evidenziare dettagli poco visibili come in (Quattrini et al., 2015). L'utilizzo delle metodologie *location-based* invece risulta utile in campo archeologico al fine di riposizionare ricostruzioni virtuali di edifici non più esistenti. Passando ora alla realtà mista non è sempre decifrabile, o individuabile una linea di confine netta tra realtà aumentata e realtà mista. Come abbiamo intuito in letteratura la sua definizione più accreditata la definisce come coesistenza di elementi reali e virtuali che interagiscono in tempo reale. Secondo questa definizione però non c'è molta differenza con l'AR dato anche in quel caso abbiamo coesistenza di reale e virtuale, ma ciò che fa pendere l'ago della bilancia verso una realtà mista in questo caso è il grado di interazione e fusione tra ambiente reale e virtuale. Quindi la MR fonde caratteristiche dell'AR con altre della VR, nello specifico aumenta il mondo reale, dando la possibilità all'utente di interagire con il dato digitale esattamente nello stesso modo in cui gli è dato di interagire con l'oggetto reale (Zikas et al., 2016). Un esempio di realtà mista può essere un oggetto fisico parziale, ma completato digitalmente, inserito in un ambiente reale-virtuale in cui l'utente sia in grado di interagire nello stesso modo sia sulla parte reale che sulla parte virtuale; oppure, in modo più semplice, lanciare un oggetto virtuale facendolo rimbalzare sul muro reale. Data la complessità nel fondere in modo interattivo reale e virtuale i dispositivi utilizzati attualmente sono tecnologicamente molto avanzati come *Microsoft Hololens 2*, *Meta Quest Pro* o *Meta Quest 3*. Questi dispositivi, come abbiamo già accennato, permettono di far coincidere un ambiente reale con uno virtuale consentendo di visualizzare e interagire con entrambi. Da un punto di vista hardware questi strumenti si basano su due modalità di funzionamento differenti. L' *Hololens*, essendo un visore olografico, permette di osservare direttamente la realtà, presentando una visiera traslucida

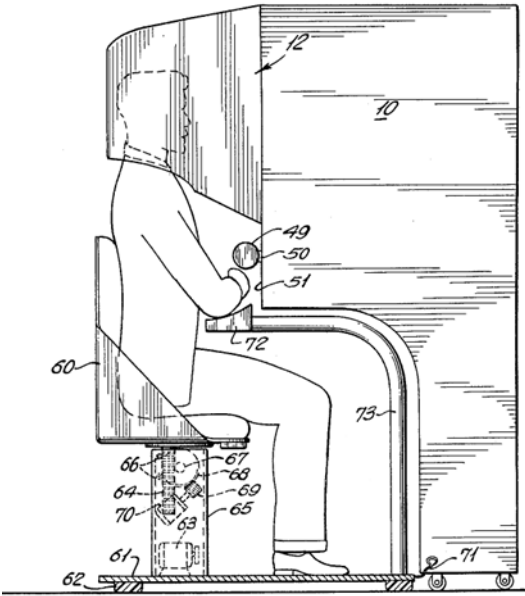
con all'interno un sistema di specchi e schermi al fine di porre all'interno di essa l'immagine realizzando un ologramma stereoscopico. I due visori *Meta* citati, invece, si basano unicamente sulla presenza di uno schermo, l'utente non osserva direttamente la realtà ma attraverso una sua rappresentazione video ripresa tramite camere montate sul visore. In questo caso la visualizzazione totale è vincolata alla risoluzione delle camere e degli schermi, data la possibilità di oscurare completamente la vista reale questo visore permette anche un utilizzo totalmente VR. Riguardo il tracciamento questi dispositivi sono in grado di funzionare in due modi differenti: mediante riconoscimento di *marker*, ossia immagini o elementi 3D caratterizzati da punti notevoli; o senza riconoscimento di *marker* o *markerless*, in questo caso lo strumento riferisce sé stesso mediante la generazione automatica del modello 3D dell'ambiente in cui si trova. Questi strumenti funzionano mediante l'impiego di videocamere e necessitano di una buona illuminazione degli ambienti d'uso per acquisire correttamente. Contestualizzato in applicativi legati al CH ciò introduce vincoli nella progettazione degli allestimenti indoor e limitando l'utilizzo outdoor in caso di luce solare diretta. Analizzando gli applicativi nel campo dei beni culturali, ad esempio, in (Bekele, 2019) viene presentato un sistema di mappe interattive tramite le quali fruire differenti contenuti in ambito museale e archeologico. In (Rahaman et al., 2019) viene presentato un workflow finalizzato alla generazione di modelli 3D *reality-based*, e alla successiva visualizzazione mediante sistemi collaborativi MR. In (Ferretti et al., 2022) vengono sperimentate due app, una volta alla fruizione del CH, grazie alla quale è possibile richiamare su dipinto la ricostruzione 3D della scena rappresentata e tramite l'interazione si è in grado richiamare audio, o prendere oggetti virtuali. Il secondo applicativo è rivolto all'utente specializzato, indossando un visore di realtà mista è possibile controllare i parametri termo-igrometrici standard e verificarli con quelli in sito. In definitiva l'utilizzo dell'AR-MR ha mostrato un'ottima resa riguardo le applicazioni su *image target* e con contenuti bidimensionali, considerando anche in rapporto il costo dei dispositivi mobile. Per quanto riguarda l'utilizzo di altre modalità di tracciamento o anche l'utilizzo di contenuti digitali 3D siamo ancora lontani da un utilizzo ottimale ed efficace. Da un lato le soluzioni di tracciamento alternative all'*image target* risultano non molto stabili e precise; dall'altro, l'utilizzo di dispositivi avanzati risolvono i problemi di tracciamento a fronte di un notevole aumento dei costi, il che li rende inadeguati a un utilizzo massivo in ottica museale e di fruizione. Inoltre, l'utilizzo di contenuti 3D presenta diverse li-

mitazioni relative alla resa grafica, sia per soluzione AR che per soluzioni MR le possibilità computazionali dei dispositivi sono molto ridotte; quindi, non è possibile ricorrere a modelli molto complessi o con molti poligoni. Questo problema può essere risolto mediante tecniche d'ottimizzazione impiegate nel mondo del gaming come la *retopology* o il *baking* delle luci. Rimane in ogni caso il problema del sistema d'illuminazione, dato che non tutti i dispositivi hanno la capacità computazionale di riprodurre le medesime condizioni d'illuminazione della scena reale in quella virtuale, proponendo: stessa luce, stesse ombre, o addirittura i riflessi dell'ambiente fisico sull'oggetto virtuale e le ombre dell'oggetto virtuale sull'ambiente reale. Da queste considerazioni ne deriva una visualizzazione piatta, o evidentemente sovraimpressa. Infine, un altro elemento critico e influente sulla resa realistica della visualizzazione è l'*occlusion*, ossia far in modo che l'ambiente reale vada a coprire l'oggetto virtuale qualora un oggetto reale venga posto fra l'osservatore e l'oggetto virtuale. Strumentazioni in grado di generare modelli 3D in tempo reale hanno la capacità di gestire questo tipo di visualizzazione avendo come base di tracciamento il modello 3D dell'ambiente usato per mascherare i contenuti digitali, ma come è facilmente intuibile ciò è possibile solo mediante strumentazioni dal costo alto. Un primo passo verso la risoluzione di tutte queste problematiche, anche su dispositivi mobile, è stato mosso dalla NIAN-TIC Software House, famosa per lo sviluppo dell'app *Pokémon Go*, proponendo *lightship ARDK* (*augmented reality development kit*), approdando a una nuova esperienza, maggiormente realistica e immersiva¹⁹.

La realtà virtuale

Analizzate le principali e più attuali modalità di interconnessione tra reale e virtuale e valutati pro e contro di queste metodologie possiamo passare all'analisi della condizione totalmente virtuale, ossia la realtà virtuale o VR. La *virtual reality* quindi si può definire come una tecnologia complessa in grado di creare un ambiente digitale, con cui l'utente può interagire²⁰. Da questa definizione si possono individuare già le due principali caratteristiche con cui poter categorizzare le esperienze VR, ossia quanto l'utente si sente immerso all'interno dell'ambiente virtuale e in che modo può interagire con esso. L'uomo è in grado di percepire un ambiente mediante i cinque sensi, ossia vista, udito, tatto, olfatto e gusto. Una riproduzione di un ambiente, per essere simulata in modo totalmente realistico, dovrebbe es-

sere in grado di simularli tutti (Burdea & Coiffet, 2003). Una delle prime esperienze applicative di realtà virtuale fu il Sensorama (1960) (Figura 14), un dispositivo multisensoriale, stereoscopico. Questo strumento riproduceva la sensazione di guidare una moto per le strade di New York, simulando sensazioni come le vibrazioni del motore, il vento, il suono stereofonico della città e anche gli odori, come odore di benzina o pizza. Tale tecnologia fu solo prodotta come prototipo e il suo inventore Morton Leonard Heilig non riuscì a ottenere i fondi necessari per brevettare e produrre questa invenzione, causando la fine del progetto (Martirosov & Kopecek, 2017).



Ovviamente, siamo ancora molto lontani dal poter generare un'esperienza in grado di ricreare la realtà in tutti i suoi aspetti percettivi su base digitale e non di carattere sperimentale, ma commerciale. Da un punto di vista tecnologico sicuramente risulta molto facile stimolare la vista e l'udito, mentre simulare il tatto come gli altri sensi risulta ancora molto complesso. Riguardo la stimolazione visiva, in decenni di sviluppo tecnologico, si è riusciti a ottenere simulazioni digitali sempre più realistiche, caratterizzate da una risposta fisica dei materiali, luci, ombre, riflessi, e di simulare visioni prospettiche stereoscopi-

Fig.14
Schema progettuale del
Sensorama

che. Inoltre, questi sistemi sono in grado di modificare questi aspetti in relazione al movimento e quindi al mutare dinamico del punto di vista (Dorsey et al., 2008). Anche la stimolazione uditiva è molto semplice da un punto di vista tecnologico, sistemi attuali permettono una riproduzione stereofonica, mediante cuffie o impianti dolby surround inoltre è possibile riprodurre la direzione sferica a 360° del suono. Per quanto riguarda la percezione simulata degli altri sensi è ancora molto complessa la loro realizzazione. A differenza della sfera visiva e sonora, nei rimanenti casi non si hanno delle tecnologie sviluppate a livello commerciale, come schermi o un comune riproduttore sonoro, ma solo soluzioni sperimentali, ancora in fase di ricerca. Sicuramente la dimensione più vicina a diventare d'uso comune è il tatto, già da tempo si stanno sviluppando e testando, soluzioni in grado di restituire la sensazione tattile a partire da un dato digitale o modello 3D, attraverso l'utilizzo di guanti o penne aptiche (Comes, 2016). Recentemente *Meta*, società fondata da Mark Zuckerberg, sta sviluppando il suo guanto compatibile con i propri dispositivi, al fine di darne una dimensione commerciale. La sfera olfattiva e il gusto, sono le dimensioni meno sviluppate, possono essere simulate mediante rilascio di essenza, anche in questo caso sono soluzioni sperimentali e non facilmente applicabili per un uso commerciale. Analizzando da un punto di vista tecnologico le principali soluzioni esse possono essere classificate in relazione al grado d'immersione e coinvolgimento dell'utente, ossia in relazione a quanto l'utente si possa sentire fisicamente all'interno dell'ambiente virtuale. Nello specifico è possibile classificare soluzioni non immersive, semi immersive e immersive. La prima forma di fruizione nonché la più semplice in assoluto è attraverso l'utilizzo di monitor o schermi. Questa soluzione presenta il livello di coinvolgimento più basso, non consentendo di sfruttare pienamente le potenzialità della VR. Questa prima tipologia tecnologica è senza dubbio la più economica dato che la sua installazione non prevede altro che uno schermo o proiettore, e ha il vantaggio di essere facilmente condivisa e fruita ovunque ci sia uno schermo. La seconda tipologia prevede l'utilizzo di strumenti che possano immergere in qualche modo l'utente all'interno dello spazio virtuale. Nello specifico ciò viene realizzato mediante l'utilizzo di schermi curvi, *ledwall* o sistemi *cave*, ossia stanze cubiche in cui su ogni parete viene proiettata una porzione dello spazio virtuale. Questi sistemi sono leggermente più complessi rispetto a quelli precedentemente descritti poiché vincolano l'esperienza a un'installazione fissa e con caratteristiche specifiche, basti pensare al sistema sincrono di proiezione per il *cave*. Il grado più alto

d'immersione è previsto mediante l'utilizzo di visori di realtà virtuale *head mounted display* (HMD). A differenza delle soluzioni già trattate, con i dispositivi HMD l'utente perde qualsiasi contatto di carattere visivo con la dimensione reale, scendendo totalmente in una virtuale. Un altro vantaggio risiede nella stereoscopia, avendo due schermi, uno per ogni occhio, è possibile simulare la vista reale facendo percepire i diversi piani di profondità. Esistono soluzioni a schermo singolo che permettono una visione stereoscopica, ma o sono estremamente costose; oppure, come nel caso della vista all'anaglifo, presentano un'alterazione dei colori (rosso, blu) facendo perdere il senso di realismo. Analizzando le prospettive d'interazione possiamo riscontrare diverse possibilità, le quali sono valide sia per le soluzioni non-immersive, semi-immersive e immersive. Il grado più basso prevede l'assenza totale d'interazione. In questo caso la produzione dell'esperienza è di tipo video o cinematografico. Il secondo livello d'interazione prevede l'utilizzo di strumenti esterni come joystick o controller, con i quali dare un input in grado di navigare l'ambiente 3D, oppure eseguire diversi task, come selezionare oggetti, fare scelte, richiamare contenuti. In questo caso la produzione delle esperienze è assimilabile al gaming. Il terzo livello d'interazione prevede l'utilizzo diretto delle mani senza passare attraverso l'utilizzo di oggetti esterni. In questo caso si possono utilizzare sistemi touch, o mediante il riconoscimento di *gesture*, rendendo l'esperienza sicuramente più immersiva e immediata, ma vincola, nella maggior parte dei casi, l'esperienza a un unico utente. Date queste considerazioni, anche una semplice visualizzazione 2D può essere considerata realtà virtuale, per cui oggi può quasi risultare privo di senso discutere dei campi d'applicazione poiché, come già anticipato, la si può riscontrare ovunque e in ogni settore. Risulta di maggior interesse trattare casi relativi alla tutela e fruizione del patrimonio culturale. In (Forte et al., 2002), viene sviluppata un'applicazione navigabile da desktop, relativa alla cappella degli Scrovegni a Padova. In quest'App è stato dato un modo alternativo di visita della cappella dato che l'accesso a essa è limitato a un numero esiguo di persone (25 visitatori), con la possibilità di interagire con lo spazio e richiamare contenuti. Questo lavoro introduce un'altra importante tematica legata alla VR, ossia la possibilità di visitare luoghi di difficile accesso o addirittura non più accessibili. In (Pietroni et al., 2015) viene creata un'esperienza multiutente all'interno del museo della Via Flaminia Antica, grazie alla quale entrare all'interno della ricostruzione archeologica di Villa Livia. L'esperienza, nella sua prima forma, prevedeva un'installazione con monitor e joystick

(2008), successivamente sostituita da un sistema di riconoscimento di *gesture* (2014). In (Huyzendveld et al., 2012) viene mostrato un progetto di ricostruzione del paesaggio archeologico, e la possibilità di accedere a questi dati mediante l'utilizzo di una piattaforma web. In (Katsouri et al., 2015) vengono indagate le potenzialità dell'impiego della tecnologia immersiva *cave*, per lo studio e fruizione dell'archeologia marina. In (Taccola et al., 2021) viene mostrata la realizzazione di app per HMD e schermo interattivo con cui navigare la ricostruzione SFM del sito funerario etrusco di Volterra, proponendo anche una contestualizzazione dei reperti appartenenti a questo sito. In (Ferrari & Medici, 2017) si descrive una metodologia volta alla realizzazione di esperienze immersive (HMD) mediante l'utilizzo di panoramiche sferiche 360°. In (Ferdani et al., 2020) viene proposta un'esperienza di *gamification* per Playstation VR. L'utente può esplorare la ricostruzione del foro di Augusto, mediante logica di *'learning by doing'* lo scopo del gioco è quello di far comprendere la complessità dell'amministrare la Roma imperiale. Tale lavoro dimostra come la dimensione gaming sia una delle più fiorenti degli ultimi anni (Baradaran Rahimi et al., 2022; Battistini & di Stefano, 2018; Curlee et al., 2021; Kusajima et al., 2018; Liu et al., 2021, 2022; Qiu et al., 2021; Theodoropoulos & Antoniou, 2022). Un altro aspetto interessante relativo alle potenzialità di questi strumenti è quello di svincolare effettivamente la fruizione della cultura della fisicità del luogo di fruizione, offrendo un'esperienza immersiva e fruibile da remoto, un qualcosa di nuovo, diverso e in ogni caso non sostitutiva dell'esperienza reale. Diverse sono le esperienze capaci di simulare la visita museale, visitare luoghi storici, o scoprire ed esplorare edifici (Cecotti, 2022), disponibili sui principali store online di gaming. Tale caratterizzazione non solo può dare visibilità all'istituzione museale, ma ne costituisce un modo nuovo potenziale di differenziarne le entrate economiche, uno degli aspetti critici emersi dall'analisi della situazione di crisi pandemica. Queste esperienze seppur molto differenti tra loro mostrano come l'innovazione tecnologica possa apportare un miglioramento non solo alla comprensione del CH per il pubblico non specializzato, ma anche offrire strumenti utili alla ricerca.

Valutazione dell'esperienza utente

Per troppo tempo si sono proposte tipologie d'installazione multimediali mediante l'uso di ICT nei luoghi della cultura come musei o parchi archeologici senza un'attenta analisi della rispo-

sta del visitatore all'offerta proposta. Molto spesso quindi gli operatori museali hanno abbandonato l'utilizzo delle tecnologie bollandole come inefficaci, inutili e anche complesse da usare, escludendo la possibilità di consultare dei dati scientificamente validi per comprenderne il gradimento da parte del pubblico. Eseguire dei test di usabilità e gradimento è importante non solo per capire come il pubblico possa percepirle (*user experience* ed *usability*), ma sono fondamentali per apportare modifiche all'esperienza stessa e aumentarne di conseguenza l'efficienza. Ma come può essere individuata o definita un'esperienza? Una delle definizioni più accreditate è quella data da Pine e Gilmore in ambito economico e più in particolare del marketing, finalizzate alla creazione e vendita di esperienze come se fosse un prodotto o un bene di consumo (Pine & Gilmore, 1998). In questa teorizzazione si vanno a individuare *the four realms of an experience*, ossia i quattro aspetti chiave con annesse le loro relazioni e interconnessioni (Figura 15).



Secondo questo schema la prima dimensione che può essere individuata è il senso di partecipazione, in un estremo troviamo una partecipazione passiva in cui l'utente è spettatore, può solo osservare ciò che accade, mentre nell'esperienza attiva l'utente può con le proprie azioni modificarla. La seconda dimensione riguarda il senso di immersione, ossia quanto l'utente è immerso nell'esperienza, può trovarsi completamente all'esterno come nel caso della lettura di un libro, oppure immerso come nel caso di vedere un film al cinema. Tra queste due dimensioni si in-

Fig.15
The Four Realms of an
Experience

seriscono tutte le esperienze, le quali sono divise in 4 tipologie fondamentali:

- 1
Esperienza d'intrattenimento: generalmente passive ed esterne; ma se si pensa al mondo del gaming, magari anche con caratterizzazioni VR mediante l'utilizzo di soluzioni tecnologiche come HMD, può diventare attiva e immersiva. Lo scopo di tale tipologia di esperienza è stimolare l'interesse e divertire
- 2
Esperienza didattica: volta nel trasmettere un messaggio, insegnare una nozione arricchire da un punto di vista culturale chi ne fa parte.
- 3
Esperienza d'evasione: permette di porre l'utente in una particolare condizione, portando con sé la possibilità di trasmettere un messaggio, simile all'esperienza didattica ma rendendosi più immersiva e divertente.
- 4
Esperienza estetica: essa è simile all'esperienza d'evasione ma rendendosi meno attiva, diventando simile a un'esperienza contemplativa. Ad esempio, gli autori del contributo definiscono una visita a una galleria d'arte come un'esperienza estetica.

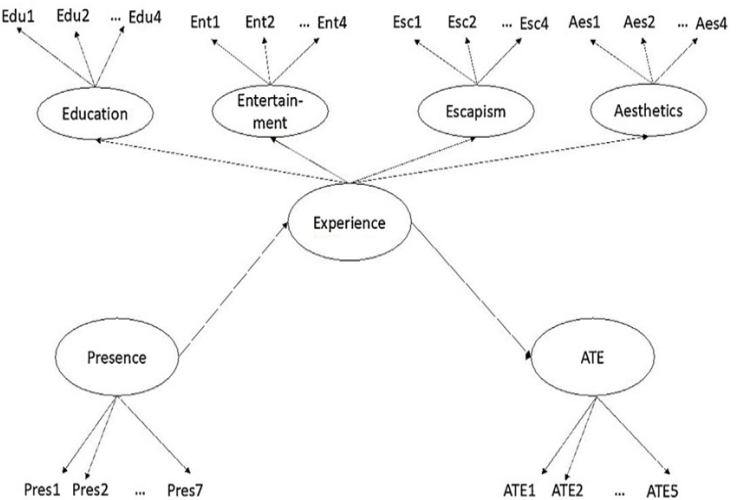
Nel contributo si afferma inoltre che le esperienze più ricercate nonché quelle più 'fruttuose' da un punto di vista economico sono quelle che riescono a racchiudere nel loro interno tutti i 'realms'. Contestualizzando quindi quanto affermato è facile comprendere come un'esperienza museale o legata al CH, mediante l'utilizzo delle ICT possa uscire dalla dimensione prettamente estetica inglobandone altre. Attualmente non si hanno standard universalmente codificati e accettati per testare un'esperienza culturale e ancora poco è stato fatto in questo campo. Alcuni come in (Radder & Han, 2015) utilizzano proprio queste quattro dimensioni per valutare l'esperienza culturale. Definita cos'è un'esperienza si può ricercare una definizione di *user experience* negli standard ISO [9241-210:2010]²¹ Essa viene definita come le percezioni e le risposte della persona risultanti dall'uso e/o dall'uso previsto di un prodotto, sistema o servizio. Inoltre, l'esperienza dell'utente include tutte le emozioni, le convinzioni, le preferenze, le percezioni, le risposte fisiche e psicologiche, i

21
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-210:ed-1:v1:en>

comportamenti e le realizzazioni degli utenti che si verificano prima, durante e dopo l'uso. L'usabilità, se interpretata dal punto di vista degli obiettivi personali degli utenti, può includere aspetti percettivi ed emotivi tipicamente associati all'esperienza dell'utente. I criteri di tale campo possono essere utilizzati per valutare gli aspetti dell'esperienza dell'utente. Da questa definizione si evince come sia importante non solo valutare tutti gli aspetti di un'esperienza, prima, durante e dopo la sua fruizione; ma anche considerare gli aspetti di percezione fisica, emozionale e cognitiva. L'usabilità è indice dell'efficienza dell'esperienza proposta, comunicando come e quanto vengono rispettati gli obiettivi preposti. Questi standard, come la definizione stessa di esperienza, possono essere applicati in qualsiasi campo e in ogni settore. Scendendo più nel dettaglio dei beni culturali si possono fare delle specifiche distinzioni in relazione a una discesa di scala sempre a seconda di qual è l'obiettivo. Si può quindi indagare l'intero ambiente culturale come un museo, una mostra o anche un museo virtuale, nella totalità delle sue caratteristiche e offerte; oppure si può valutare la singola installazione nel suo contesto museale o la singola esperienza anche al di là della sua installazione. Questa distinzione è importante poiché può suggerire la tipologia di strumento da utilizzare o la metodologia da seguire. Molti sono gli strumenti e le metodiche applicabili, le quali spaziano dalla semplice osservazione del comportamento umano da parte di operatori, all'utilizzo di questionari cartacei o digitali, fino all'impiego di tecnologie estremamente avanzate appartenenti al mondo del *retail intelligence* e *neuromarketing*. Per quanto riguarda le prime citate il CNR ITABC, nel corso degli ultimi anni ha sviluppato una metodica d'indagine specifica per il CH, volta prevalentemente allo studio delle potenzialità pedagogiche e cognitive degli strumenti proposti. Questa metodica, come mostrato in (Bozzelli et al., 2019), si costituisce in tre fasi principali. La prima è un'analisi preliminare, antecedente l'esperienza stessa, legata all'ambiente espositivo. In questa fase si va a testare la qualità dello spazio, la visibilità delle installazioni e come l'utente viene attratto o si avvicina all'esperienza. La seconda fase avviene nel mentre dell'esperienza attraverso osservazioni. Nello specifico si valuta la praticabilità delle soluzioni adottate, andando a verificare se l'utente chiede aiuto, spiegazioni, chiarimenti oppure se ha particolari difficoltà nell'uso di specifici strumenti. La terza fase avviene dopo l'esperienza, attraverso questionari cercando di indagare determinati aspetti fondamentali come: le nozioni apprese, l'usabilità e l'interfaccia eventuale dell'installazione, specialmente se coinvolgono l'utilizzo di ICT. Queste indagini,

quindi, possono essere svolte anche in momenti differenti e anche quando l'istallazione proposta non è completa o prettamente operativa, al fine di effettuare verifiche e modifiche in corso d'opera, o modificare l'offerta. Riguardo l'utilizzo di metodiche avanzate d'indagine è possibile citare il progetto C.O.ME (*change your museum-analysis of behavior, emotion and reaction of museum visitors*) dal quale è stato realizzato il sistema MeMus²² al fine di migliorare l'esperienza di visita dei musei tramite lo sviluppo e la sperimentazione di un nuovo sistema automatico di monitoraggio dei pubblici museali, attualmente in sperimentazione a Palazzo Bonaccorsi a Macerata e al museo Omero di Ancona. Questo sistema fa riferimento all'impiego automatizzato di flussi video e procedimenti tipici della *computer vision* ed è in grado di riconoscere il comportamento di utenti e visitatori (Angeloni et al., 2021). Un altro interessante caso di studio del comportamento utente all'interno dei luoghi della cultura riguarda l'utilizzo di tecnologie *eye-tracking* capaci di tracciare lo sguardo del visitatore per comprendere cosa viene maggiormente osservato dando informazioni utili in relazione a quali sono i punti di maggior interesse, utili per capire sia l'efficienza di una data esposizione, che per individuare elementi rilevanti finalizzati al marketing (Mandolesi et al., 2022). L'utilizzo del tracciamento oculare può essere riproposto anche in chiave d'istallazione multimediale mediante l'impiego di appositi dispositivi di realtà virtuale HMD (Clay et al., 2019; Zhou et al., 2019). Viste le principali metodiche utili a valutare la *user experience* e *user behaviour* all'interno dei luoghi della cultura e installazioni multimediali è importante citare un interessante studio finalizzato a effettuare una valutazione comparata di varie soluzioni tecnologiche volte alla fruizione del patrimonio culturale (Mandolesi et al., 2022). Questo studio s'impegna nell'individuazione della miglior tecnologia digitale per la fruizione del patrimonio culturale (HMD, AR, MR, soluzioni desktop 2D, schermi stereoscopici e ologrammi). Per eseguire un'analisi comparata è stato scelto il medesimo soggetto, ossia i reperti digitalizzati del museo archeologico nazionale delle Marche al fine di non influenzare il dato dall'interesse personale dell'utente esaminato. Lo studio è stato condotto mediante l'utilizzo di questionari e mediando tre aspetti: il *sense of presence*, l'esperienza e l'attitudine verso l'esperienza. L'esperienza (vx) è stata valutata secondo lo schema di (Pine & Gilmore, 1998), già descritto in precedenza. Il *sense of presence* (PR), invece, mira ad analizzare quanto l'utente si sente immerso e partecipe dell'esperienza mediante l'utilizzo della tecnologia, ossia quanto l'utente percepisce di essere all'interno di un ambiente virtuale, quando fisicamente si trova all'interno di un

altro reale. Il terzo fattore, l'attitudine verso l'esperienza (ATE), indica quanto l'utente abbia apprezzato o meno l'esperienza e quindi quanto l'utente è emozionalmente coinvolto all'interno dell'esperienza. Questo lavoro indaga come a un maggior *sense of presence* corrisponda un maggior coinvolgimento emotivo e quindi una maggior qualità dell'esperienza. Dato che in qualsiasi tipologia d'esperienza entrano in gioco fattori psicologici e soggettivi è importante mediare l'effetto del *sense of presence* sull'attitudine mediante lo studio e le risposte date in relazione ai 'four realms' dell'esperienza (Figura 16).



Dall'indagine viene confermata che l'ATE è direttamente influenzata sia dal PR che dal vx e tale rapporto varia da tecnologia a tecnologia. Questa concezione porta con sé importanti implicazioni in fase di scelta della tecnologia da utilizzare. Ad esempio, qualora non ci siano particolari vincoli di risorse e spazi, la soluzione migliore risulta essere l'HMD. Invece, nel caso sia rilevante l'aspetto economico, risulta preferibile impiegare proiezioni o AR basate su mobile. È evidente come prevedere l'utilizzo di sistemi di valutazione del gradimento e del comportamento utente possa portare a una nuova consapevolezza nell'utilizzo di determinati linguaggi, ottimizzando e migliorando l'esperienza stessa del patrimonio aprendo nuovi orizzonti espressivi e comunicativi.

Fig.16
Schematizzazione dei rapporti reciproci tra Presence, Experience e Attitudine (Mandolesi et al., 2022)

La formazione di nuove competenze

La formazione di nuove competenze costituisce l'ultimo tassello in relazione alla filiera operativa di fruizione e gestione del patrimonio culturale. Dall'analisi emersa dalla situazione pandemica, l'assenza di personale specializzato è emerso come uno dei principali aspetti problematici. Come si può prevedere una rivoluzione tecnologica se chi lavora in prima linea nel settore non ha le competenze e la formazione necessaria? Ciò che si auspica nel prossimo futuro può essere individuato in due elementi principali, quali: la formazione di figure professionali ibride; un ringiovanimento degli organici e potenziamento degli organici. Come abbiamo intuito in questo capitolo, e che risulterà ancora più evidente nella trattazione dei casi studio, queste nuove figure professionali devono saper spaziare dall'arte all'archeologia, dalla computer grafica al cinema. Ciò non vuol dire che ogni curatore o operatore deve aver la possibilità di operare in questi settori, ma deve avere una conoscenza adeguata, atta al coordinamento del processo creativo e collaborativo tra professionisti del settore, quindi conoscere pregi e difetti, necessità e caratteristiche di una data tecnologia o esposizione. Questa figura professionale deve suggerire e incoraggiare processi decisionali volti alla scelta tecnologica più idonea al tipo di oggetto culturale in esame, fino ad arrivare a supportare e suggerire le decisioni relative alle scelte di gestione e sostenibilità a lungo termine degli strumenti. In quest'ottica è possibile citare il progetto *massive open line course* (MOOC) in *digital cultural heritage*, in collaborazione con *DiCultHer*, rivolto alle insegnanti delle scuole secondarie. Un'altra esperienza interessante è stata mossa dal gruppo di ricerca Distori Heritage dell'Università Politecnica delle Marche con il progetto V.I.T.A. Nello specifico è stato eseguito un percorso di affiancamento alle cooperative attive nella pinacoteca civica di Ascoli, al fine di progettare e gestire la nuova fruizione mediante anche la creazione di applicativi digitali (Clini et al., 2022c). Un altro aspetto importante nel formare nuove competenze, nel caso di sviluppo di una nuova installazione, consiste nel prevedere sempre delle giornate di training in cui istruire gli operatori museali al fine di saper utilizzare lo strumento e risolvere le principali problematiche che possono incomberne. Questi momenti di training sono fondamentali a rendere l'operatore il più autonomo possibile, facilitando e migliorando l'esperienza generale dell'utente.

ESPERIENZE IMMERSIVE PER IL PATRIMONIO CULTURALE

Dopo aver descritto nel dettaglio i quattro capisaldi per una gestione e fruizione del patrimonio culturale digitale consapevole, è doveroso descrivere e valutare il loro utilizzo operativo e finalizzato alla creazione di esperienze multimediali.

Metodologia per uno sviluppo consapevole di esperienze immersive

I quattro cardini principali del DCH descritti nel capitolo precedente costituiscono i mattoni base su cui fondare tutto il processo creativo e realizzativo di una nuova esperienza. Essi sono stati presentati singolarmente come elementi sconnessi, ma in realtà devono essere concepiti e realizzati in modo fortemente interconnesso. Ad esempio, la creazione scientifica del dato non solo rappresenta ciò che nella fruizione verrà visualizzato, la stessa realizzazione e modellazione va eseguita in relazione al tipo di fruizione prevista, mentre la validazione filologica va a influire sulla narrazione proposta. Ugualmente l'esecuzione di test sugli utenti è finalizzata a modificare l'esperienza e quindi il modo di fruire per meglio ottimizzarne l'utilizzo. Dato che il tema centrale di questo lavoro riguarda l'indagine di *best-practice* per la fruizione del patrimonio è corretto porre al centro del ragionamento metodologico il secondo caposaldo descritto nel capitolo precedente, ossia i nuovi metodi di fruizione, a cui gli altri temi si collegano rappresentandone l'input. Inoltre, è importante porre particolare attenzione anche agli aspetti emozionali, volendo indagare a fondo tale possibilità, è importante che all'interno dello sviluppo di questa filiera operativa sia possibile fare collegamenti, prendere temi, elementi e modalità di sviluppo proprie del mondo dell'intrattenimento (cinema, musica e gaming), sottolineando così la rilevanza della sfera narrativa.

Scelte tecnologiche e comunicative

Il focus principale di questo percorso mira a indagare il fruire del CH in modo emozionale. Il primo passo è stato quello di scegliere di sperimentare la realtà virtuale, mediante l'utilizzo di visori di realtà virtuale HMD, validata dalle seguenti motivazioni:

- Sperimentare il massimo grado d'immersione (*sense of presence*), come è stato già descritto in (Leopardi et al., 2021). Creare esperienze multisensoriali, caratterizzate da partecipazione e interazione, in accordo con il '*cone of experience*' di Edgar Dale (Wagner, 1970), secondo il quale, a queste caratteristiche corrisponda una miglior memorizzazione delle informazioni trasmesse.
- Indagare esperienze che abbiano la possibilità di suscitare una risposta emozionale da parte dell'utente, utile a incrementare l'attenzione, l'interesse e il grado di soddisfazione, ma anche l'apprendimento dell'utente (Bontchev & Vassileva, 2016; Goleman, 1996). Come abbiamo visto, la risposta emotiva è suscitata maggiormente laddove è presente una narrazione o drammatizzazione delle informazioni date.
- Creare un'esperienza in grado di essere fruita in diversi luoghi.
- Utilizzare soluzioni commerciali a basso costo, capaci non solo di aumentare la sostenibilità in termini economici per l'istituzione culturale promotrice dell'esperienza; ma anche semplificarne l'utilizzo poiché l'utilizzo di *tool* commerciali prevede un grado d'usabilità adeguato e ampiamente testato per un pubblico *consumer* non esperto. Inoltre, soluzioni economiche commerciali permettono non solo l'acquisto di più dispositivi per l'istituzione museale, ma rende possibile anche una maggior diffusione a livello privato grazie alla pubblicazione sugli store ufficiali dei principali visori.

La soluzione che meglio risponde a queste esigenze risulta essere l'utilizzo di soluzioni immersive (HMD) di realtà virtuale. Analizzando punto per punto:

- La realtà virtuale immersiva, eliminando completamente la dimensione reale e coinvolgendo pienamente la sensazione visiva dell'utente, permette il più alto grado d'immersione e di *sense of presence*.
- Queste tecnologie permettono il potenziamento della sfera narrativa, la contestualizzazione realistica e completa delle performance attoriali, di musiche e animazioni. Basti pensare all'utilizzo di effetti visivi, riprese in *green-screen* etc.
- L'utilizzo di soluzioni AR ed MR, che per definizione aumentano o si fondono con la realtà, acquistano senso solo se contingentate in un determinato spazio fisico, nel caso del

CH musei, parchi archeologici etc. L'esperienza VR, invece, può essere fruita sia in sito, se adeguatamente contestualizzata, sia da remoto qualora si abbia a disposizione un dispositivo VR.

- Infine, in questo periodo storico, stiamo assistendo a una crescita sempre maggiore del mercato dei dispositivi immersivi di realtà virtuale, proponendo device sempre più presentanti a costi inferiori.

Comprese le motivazioni relative alla scelta della tipologia d'esperienza è bene conoscere quali strumentazioni sono attualmente disponibili sul mercato. I visori HMD possono essere suddivisi in PCVR e *standalone*. I primi come, ad esempio, l'Htc Vive pro <https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/specs/>, si definiscono così dato che il calcolo viene svolto da un PC esterno, sfruttando le solide potenzialità hardware a disposizione. Esso consente di camminare fisicamente all'interno dello spazio VR dato che la posizione del visore è tracciata mediante camere esterne, mentre il sistema di input è gestito mediante controller. Il visore si caratterizza per la presenza di due schermi da 2448x2448, giungendo a risoluzioni anche di 5K a fronte di un grande costo computazionale; un *refresh rate* di 90/120 Hz, ossia la frequenza con la quale gli schermi aggiornano ciò che viene visualizzato e un campo visivo di 120 gradi (Figura 17). Questo è stato uno dei primi prodotti destinati al consumo ad avere un grandissimo successo e diffusione. Esso sicuramente può essere la soluzione migliore quando si vuole avere un'esperienza caratterizzata da alte risoluzioni, a discapito dell'usabilità e i costi, infatti, per utilizzare questo dispositivo è necessario collegarlo a un computer tramite cavo, sia per passare informazioni video che per alimentarlo. Esiste la possibilità di utilizzarlo wireless mediante ripetitore wifi, ma in questo caso si perde prestazione (nel *refresh rate*) e in ogni caso va utilizzata una batteria esterna come alimentazione. Per quanto riguarda il costo invece c'è da sottolineare che solo l'apparato VR costa circa 800 €, in più va aggiunto il costo del PC ad alte prestazioni (circa 1500-2000€) raggiungendo un costo totale sopra i 2000€. La seconda tipologia di visore, ossia lo *standalone*, è caratterizzata dall'integrazione di processore grafico e batteria in un unico dispositivo. Uno dei visori più diffusi di questa tipologia è sicuramente il *Meta Quest 2* (Figura 18) o il più recente *Meta Quest 3* (Figura 19), questo dispositivo si caratterizza per una risoluzione di 1832x1920 px per occhio, risoluzione massima 4k; *refresh rate* fino a 90Hz, campo visivo 100 gradi. Anche con questo visore è possibile camminare direttamente nell'ambiente virtuale, ma

il tracciamento del visore nello spazio reale avviene mediante la tecnologia 6Dof, ossia a sei gradi di libertà. Tramite delle camere ottiche, o *sensori lidar* per il Quest 3, poste nella parte frontale del visore viene letto lo spazio circostante, mediante il riconoscimento di determinati punti 'notevoli' dello spazio e in base alla loro posizione vengono tracciati i movimenti relativi del visore e riportati nell'ambiente virtuale. Questa tecnologia consente di riconoscere anche le mani dell'utente e di tracciarne i movimenti rendendo così possibile usare le mani nell'ambiente virtuale per dare input e interagire; ovviamente è possibile anche utilizzare dei controller. È facilmente intuibile come tale dispositivo sia in grado di funzionare senza l'ausilio di un computer esterno, ciò rende l'utilizzo, la gestione e fruizione dell'hardware particolarmente agile. Volendo espandere le possibilità di questo strumento è possibile collegarlo a un PC e farlo funzionare come un PCVR, ovviamente mantenendo i vincoli fisici dell'ottica hardware. Anche questa tipologia di dispositivo ha i suoi limiti, il primo e più evidente tra i punti a sfavore risultano essere le limitate capacità computazionali, le quali devono essere supportate da un attento lavoro di ottimizzazione dei modelli 3D e delle scene. Il secondo motivo riguarda l'usabilità del dispositivo, è più leggero e piccolo del Vive, ma ciò comporta uno sbilanciamento del peso, dato che tutta la componentistica inclusa la batteria si trova frontalmente, rende il visore scomodo da indossare per lunghi periodi di tempo. L'autonomia d'utilizzo è pari a 2-3 ore, in allestimento museale va gestito in modo adeguato per avere dei cicli di fruizione continuativi come ad esempio la rotazione di dispositivi o sistemi di carica costanti. Una soluzione in grado di migliorare la gestione delle cariche e anche la vestibilità del dispositivo può essere ottenuta mediante l'utilizzo di elementi d'allaccio esterno in grado di distribuire meglio il peso e alloggiare batterie esterne ricaricabili, così da ricaricare solo l'elemento esterno e mantenere il visore sempre in funzione. L'ultimo elemento da analizzare è il costo circa 450-500 €, senza la necessità di dover comprare dispositivi esterni costosi o addirittura computer. Come già anticipato il settore degli HMD sta vivendo un periodo di grande sviluppo, recentemente le due principali aziende, HTC e Meta, stanno rilasciando nuovi modelli anche con potenzialità MR, come Oculus Quest Pro, oppure VIVE XR Elite, VIVE Flow e VIVE Flo con costi tendenti al migliaio di euro. Iniziano anche a essere sul mercato altri competitor come Pico VR, che ha rilasciato da poco il Pico VR 4, con caratteristiche e costi molto simili al Meta Quest 2, migliorando anche alcuni tratti come risoluzione e bilanciamento del peso. Sicuramente un evento importantissimo

all'interno di questo panorama è l'entrata nel mercato dei HMD di Apple con il suo Apple Vision Pro. Dispositivo sperimentale e a tratti prototipale, pensato però per un utilizzo privato personale introducendo il concetto di *spatial computing*, non adatto a un utilizzo pubblico per costi (svariate migliaia di euro) e funzionamento, basti pensare all'impossibilità di usare gli occhiali con il visore e di conseguenza alla richiesta di una dispendiosa personalizzazione per utenti con difetti visivi. Tale evento risulta fondamentale poiché dimostra la grande attenzione presente su questo settore poiché un'azienda leader in campo tecnologico come Apple abbia realizzato e proposto un proprio prodotto. Attualmente, considerando caratteristiche hardware, prestazioni e usabilità, la scelta migliore ricade sulla tipologia standalone e in particolare sul Meta Quest 2 o Meta Quest 3.



Anche se per determinati tratti il suo diretto competitor, il Pico VR 4 presenta caratteristiche migliori nella scelta entrano anche in gioco questioni di carattere software, e la possibilità di utilizzare *asset* e *sdk* utili a sviluppare nuovi applicativi molto più avanzate e disponibili per l'hardware Meta. Compresa le potenzialità dello strumento è possibile capire quali sono le caratteristiche generali degli applicativi che s'intende realizzare. Come già descritto il cuore dell'esperienza VR immersiva che si vuole indagare è la sfera narrativo-emotiva, ciò suggerisce che il prodotto finale non sarà molto dissimile da un prodotto audiovisivo tradizionale, come un video o un film. L'unico elemento differente dal cinema tradizionale è la componente immersiva, quindi non c'è la fotografia, intesa in modo cinematografico, ma è l'utente a decidere cosa guardare. Un elemento fondamentale, quindi, è trovare un sistema per catturare l'attenzione dell'osservatore, come una luce o un'animazione oppure la presenza di

Fig.17
Htc Vive Pro (<https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/overview/>)

un attore in scena capace di guidare l'esperienza. Queste esperienze si possono categorizzare in relazione ai gradi di libertà del movimento, ossia a tre o sei gradi di libertà. In questa prima tipologia l'utente è in grado di eseguire solo le rotazioni della testa, quindi guardarsi intorno, ma senza esplorare direttamente l'ambiente.



Fig.18
Meta Quest Due

Fig.19
Meta Quest Tre

Tale tipologia d'esperienza in genere può essere realizzata mediante ambiente 3D o l'utilizzo di video panoramici monoscopici o stereoscopici. La seconda tipologia prevede applicativi a sei gradi di libertà in cui l'utente è in grado sia di poter eseguire le rotazioni della testa, sia eseguire delle traslazioni nello spazio. In questo caso non è possibile utilizzare un sistema basato su panoramiche, ma si necessita l'utilizzo di ambienti 3D, quindi approdando a una dimensione molto più vicina al gaming per fruizione e modalità di sviluppo. Uno dei punti chiave riguardo la progettazione di quest'ultima tipologia d'esperienza riguarda il sistema di locomozione. L'utente si trova spesso immerso all'interno di spazi molto ampi, in cui non è possibile camminare fisicamente per l'intera estensione dello spazio virtuale, per cui è necessario utilizzare altri metodi per effettuare gli spostamenti. I due metodi più comuni prevedono l'utilizzo di controller, nel primo si esegue uno spostamento o traslazione continua; nel secondo si utilizza il *teleport*, ossia puntando con il controller una determinata zona dello spazio ci si sposta in quel punto in modo netto o mediato tramite una transizione. Entrambe queste metodiche introducono uno dei principali problemi relativi all'utilizzo di questi devices, la *motion sickness*, un disturbo legato alla sensazione di movimento visivo slegato dal movimento fisico (Chardonnet et al., 2017). Questa specifica condizione produce effetti lievi come malessere, mal di testa fino ad arrivare ad avere sensazione di nausea (Chattha et al., 2020) da cui ne deriva anche la qualità dell'esperienza e come viene percepita dall'utente. In aggiunta a questi sintomi si può anche manifestare come un ondeggiamento involontario del corpo, simile alla sensazione di perdita d'equilibrio, il che può diventare anche pericoloso, in chiave di installazione museale, se l'utente non esperto viene lasciato senza operatore in grado di dare supporto. La pianificazione di un'esperienza di realtà virtuale per un'installazione museale prevede un grado d'attenzione maggiore a questi fenomeni proprio perché l'utente medio non sarà esperto o non avrà la possibilità di abituarsi ripetendo l'esperienza più e più volte. Dall'analisi di questo fenomeno è stato possibile estrapolare delle logiche progettuali specifiche relative alla locomozione dell'utente:

- Favorire lo spostamento fisico mediante camminata evitando traslazioni artificiose tramite l'utilizzo di controller.
- Effettuare spostamenti *teleport* temporizzati o transizione lenta, esattamente come se fosse un cambio di scena.
- Preferire, soprattutto nel caso di esperienze caratterizzate dall'utilizzo di panoramiche sferiche monoscopiche, la frui-

zione utilizzando una seduta, per evitare problemi di sicurezza dovuti all'eventuale perdita d'equilibrio.

Comprese le caratteristiche generali che hanno guidato la scelta della tipologia d'esperienza e di hardware utilizzabile, è possibile quindi procedere alle metodiche di pianificazione e progettazione dell'esperienza.

Pianificazione preliminare

Prima di procedere verso la definizione dei passi finalizzati alla realizzazione dell'applicativo è sempre bene eseguire una progettazione preliminare in cui si vanno a definire i principali aspetti narrativi dell'esperienza. È importante definire in questo caso gli aspetti della sfera narrativa poiché essa guiderà la realizzazione effettiva dei contenuti. Sono stati individuati cinque passaggi chiave, presi in prestito dal mondo della narrazione audiovisiva, essi sono:

- *Script*: questo strumento è funzionale a comprendere cosa si vuol raccontare. Serve per individuare le tematiche generali, i punti d'interesse maggiormente rilevanti, al fine di mediare tra la dimensione nozionistica e quella narrativa. Esso può essere svolto, preliminarmente mediante schemi, e successivamente può essere convertito in forma scritta come se fosse una vera e propria sceneggiatura.
- *Storytelling*: indica la strategia narrativa da intraprendere, quindi come viene narrata la storia al fine di catturare l'attenzione del pubblico. In questa fase si decide la tipologia di linguaggio, il tipo di narrazione (prima, terza persona). Le decisioni da prendere sono legate agli scopi comunicativi e al target di pubblico che si vuole raggiungere.
- *Storyboard*: mediante la realizzazione dello storyboard viene conferita dimensione visiva a ciò che è stato evidenziato e stabilito nella fase precedente. Esso può essere realizzato mediante schemi visivi o un susseguirsi di vignette in cui vengono evidenziati i caratteri principali delle scene da realizzare.
- *Animatic*: molto simile allo *storyboard*, ma viene realizzato mediante animazione. Serve appunto per avere uno schema chiaro delle animazioni da svolgere. Il processo d'animazio-

ne può essere molto lungo sia per realizzare i movimenti che poi per renderizzare i frame, è molto utile quindi avere un documento su cui ragionare e pianificare le animazioni da compiere.

- *Colonna sonora*: ossia le musiche che andranno ad accompagnare la narrazione, in questa fase preliminare si va a stabilire lo stile musicale e in che modo la musica accompagnerà la narrazione.

L'insieme di questi aspetti, unito alla programmazione effettiva delle fasi realizzative può essere direttamente ricollegabile alla fase di pre-produzione cinematografica.

La realizzazione

Conclusa la fase di progettazione narrativa, si può procedere con la realizzazione dei contenuti. In questa sezione viene chiamato in causa un altro dei temi fondamentali per una gestione consapevole del CH, ossia la creazione scientifica del dato. In questa fase si vanno a definire e realizzare tutti gli elementi appartenenti alla dimensione visiva e uditiva, per cui è necessario che ciò avvenga attraverso metodiche scientificamente validate tramite la collaborazione con esperti del settore. La realizzazione operativa può essere divisa in due fasi principali: la generazione dei contenuti audiovisivi e in seguito la realizzazione effettiva dell'applicativo. Riguardo la prima fase si procede alla realizzazione della scena virtuale, mediante tecniche *reality-based* e/o modellazione diretta si genera la base geometrica, successivamente si procede con la generazione del sistema d'illuminazione e materico. La logica seguita per eseguire queste fasi può essere individuata mediante la ricerca di realismo visivo. Nella modellazione *reality-based* il realismo viene facilmente ottenuto grazie alla diretta riproposizione digitale della realtà, ad esempio con tecniche *SFM* è possibile riprodurre geometricamente dettagli millimetrici e le texture si caratterizzano di tutti i dettagli presenti nell'oggetto reale dato che sono generate da fotografie reali. Nella modellazione diretta il realismo è dato molto spesso dalla bravura dell'operatore ed entrano in gioco capacità pratiche e artistiche, ciò che risulta fondamentale è avere sempre una *reference* visiva su cui basare la realizzazione. Le logiche relative alla modellazione devono sempre essere mediate tramite la generazione dei materiali virtuali o *shader* e di conseguenza delle texture. Ciò risulta fondamentale proprio nell'aggiunta di

quei dettagli che rendono l'oggetto realistico come microrilievi, graffi, sporco. Questi elementi possono essere realizzati tramite modellazione, andando ad aumentare costi computazionali, oppure tramite materiali e texture rendendo il calcolo più snello, ma in questo caso risulta più difficile giungere a risultati realistici. Operativamente, dovendo avere come output finale la visualizzazione, la scelta migliore da percorrere quindi è quella di modellare gli oggetti 3D *high poly*, inserendo la maggior parte di microdettagli mediante modellazione, e in seguito eseguire la *retopology* al fine di ottimizzare i modelli. Spesso è possibile ricorrere a una particolare tipologia di modellazione diretta, lo *sculpting*, ossia manipolare e 'sculpire' il modello mediante l'utilizzo di pennelli o *brush* virtuali simili agli strumenti utilizzati nella scultura reale. Un altro aspetto legato alla modellazione finalizzata al realismo consiste nell'andare ad aggiungere tutti gli oggetti utili a completare la scena e non far sembrare l'ambiente vuoto e artefatto. L'aggiunta di questi elementi viene veicolata dal punto di vista, non è necessario andare ad aggiungere elementi in tutta la scena, ma grazie allo *storyboard* realizzato precedentemente conosciamo il susseguirsi delle scene e di conseguenza la posizione dei punti di vista all'interno della scena 3D. A differenza di un prodotto audiovisivo tradizionale 2D, la gestione della scena relazionata al punto di vista deve essere realizzata in modo completo a 360 gradi, in modo tale da rendere reale la vista dell'utente in qualsiasi direzione. La credibilità della scena, quindi, avviene più facilmente in spazi chiusi o interni, in cui la vista dell'utente non raggiunge in modo continuativo l'orizzonte. Nel caso della realizzazione di spazi aperti per evitare che la vista finisca all'orizzonte in maniera non naturale è importante cercare d'inserire oggetti che possano fare da schermo, come vegetazione o rilievi. Riguardo la generazione dei contenuti audio, un aspetto chiave riguarda la realizzazione del *sound design*, quindi tutti gli elementi sonori presenti nella scena, come rumori di fondo, vocio, passi, vento etc. rientrano nel *sound design* anche tutti quegli elementi sonori utili a sottolineare una determinata azione, animazione o avvenimento. In questa fase realizzativa si procede anche alla realizzazione di registrazioni audiovisive di voci fuori campo, recitato degli attori e colonna sonora. La seconda fase, ossia la realizzazione dell'applicativo, viene svolta mediante *game engine* come *Unity* o *Unreal Engine*, ossia un ambiente di sviluppo multi-piattaforma finalizzato alla realizzazione di contenuti interattivi, visualizzazioni e animazioni. Il *workflow* realizzativo prevede quattro fasi fondamentali. La prima è la creazione dell'ambiente virtuale, in questa fase si esportano dal software di modellazione e *textu-*

ring tutti gli elementi ottimizzati e precedentemente realizzati, e si importano all'interno della *game engine*. Per completare il sistema della scena virtuale va ripristinato anche il sistema d'illuminazione mediante l'utilizzo di HDRI, sempre relazionato al tipo di *baking* delle luci eseguito in fase d'ottimizzazione. Il secondo passaggio consiste nell'andare a generare il sistema di navigazione base inserendo la camera virtuale, composto da una doppia camera stereoscopica, e un sistema di controller virtuali per programmare interazioni semplici. In questa fase si gestisce anche il tipo di sistema di locomozione, già ampiamente trattato nel paragrafo precedente. La terza parte consiste nella realizzazione di *script* o *scripting*. Si definisce script²³ in informatica un file contenente delle istruzioni, scritte in un determinato linguaggio di programmazione, che viene in seguito interpretato e portato a compimento da un programma. Nello specifico *Unity* (software utilizzato nello sviluppo dei casi studio riportati nei capitoli successivi) utilizza come linguaggio di programmazione il C# (*c-sharp*). In *Unity* qualsiasi elemento statico o dinamico viene gestito mediante interpretazione di questi file. La scrittura diretta di *script* è utile per temporizzare eventi, animazioni o audio. Il quarto passaggio riguarda la realizzazione dell'interfaccia utente *user interface* (UI), ossia l'interfaccia utilizzata dagli utenti o operatori per eseguire comandi semplici come selezionare la lingua o far iniziare l'esperienza. Può essere realizzata attraverso un sistema di pulsanti virtuali oppure, nel caso dell'utilizzo del riconoscimento delle mani o *hand tracking*, attraverso il semplice riconoscimento di *gesture*. La semplicità di tale sistema è un elemento centrale per la gestione museale. Vanno preferiti sistemi automatizzati al fine di limitare l'intervento dell'operatore. Questa fase operativa, caratterizzata dalla realizzazione di tutti i contenuti può essere assimilata alla fase di produzione cinematografica; mentre la fase di realizzazione dell'applicativo dovendo processare i contenuti già creati è paragonabile alla fase di post-produzione. Data questa caratterizzazione, questa particolare tipologia d'esperienza immersiva, caratterizzata da elementi di carattere narrativo e interazioni con l'ambiente virtuale, può essere definita come *virtual interactive movie* (V.I.M).

Perfezionamento e utilizzo

L'ultima parte del processo operativo riguarda il perfezionamento e utilizzo effettivo dell'applicativo realizzato. La fase di perfezionamento si lega direttamente alla terza tematica cardine per la gestione consapevole del patrimonio culturale, ossia

23
<https://www.treccani.it/enciclopedia/script/>

i test d'usabilità e gradimento. Questi vanno effettuati in due momenti distinti, durante lo sviluppo dell'applicazione e a conclusione del processo realizzativo. La prima fase di verifiche viene utilizzata prevalentemente per testare la singola interazione o azione, per valutarne non solo l'effettivo funzionamento (*debugging*), ma anche la resa grafica di determinate scelte stilistiche. La seconda fase di test, viene programmata una volta che l'applicativo è concluso e totalmente funzionante, in questo caso si eseguono test su di un campione più vario, non per forza specializzato, finalizzato al miglioramento del funzionamento dell'UI e alla valutazione effettiva di gradimento, evidenziando punti di forza o debolezza della comunicazione, fino ad arrivare al suggerimento e interpretazione di eventuali sviluppi futuri. Nell'ottica dei casi studio proposti e descritti nel capitolo successivo sono stati effettuati, oltre al consueto *testing* in fase di *debugging*, in generale dei test pilota a esperienza ultimata. Sono stati eseguiti dei test utilizzando come campione un gruppo di 20 studenti provenienti dal corso di laurea di edile-architettura dell'università politecnica delle Marche, uniformando le domande proposte al fine di indagare i medesimi aspetti nelle tre esperienze. È stata proposta una scala di gradimento (1-7) indagando: il gradimento dell'atmosfera; il senso d'immersione; la ricostruzione virtuale; la resa visiva dei colori; il senso d'esplorazione dell'ambiente VR; il lessico della narrazione. Mediante risposta aperta è stato indagato l'aspetto piaciuto più e quello piaciuto meno. Come ultimo punto d'indagine è stato chiesto se fosse disposto a pagare all'interno di un museo per fare quella specifica esperienza. L'utilizzo dell'applicazione realizzata in ottica d'esperienza o installazione museale è strettamente correlato alla formazione di nuove competenze, ricollegandoci quindi all'ultimo tema fondamentale per una gestione consapevole del CH. Dato che una delle finalità cardine di questi applicativi è la fruizione in ambiente museale è d'obbligo prevedere giornate di formazione al fine di istruire l'operatore museale all'utilizzo dello strumento e dell'applicativo. Più l'applicativo sarà semplice e automatizzato meno problematico e snello sarà il suo utilizzo e la sua fruizione. Nel caso di applicazioni di realtà virtuale è importante spiegare il funzionamento base del visore, accensione, spegnimento, come resettare il dispositivo, le modalità di gestione dell'area di gioco, trovare e lanciare l'applicazione. È fondamentale quindi che l'operatore stesso sia il primo a provare l'esperienza per capirne caratteristiche ed eventuali punti di difficoltà. Inoltre, è importante istruire l'operatore su come maneggiare, igienizzare, caricare e mantenere lo strumento e come farlo indossare all'utente. Per semplificare la fase di spie-

gazione dell'applicazione all'utente si è deciso di optare sempre per l'utilizzo delle mani (*hand tracking*) a discapito dell'utilizzo dei controller per evitare di dover spiegare pulsanti e interazioni magari poco intuitive, e lasciare la sfera interattiva a semplici gesti o toccare elementi virtuali con la propria mano. Questo aspetto semplifica ulteriormente la gestione museale evitando di dover considerare manutenzione e carica di quest'ultimi, dovendosi unicamente occupare del visore. Questo intero processo, come è facilmente intuibile, prevede la collaborazione e la commistione di mondi molto differenti tra loro come arte, archeologia, architettura e computer grafica importanti per la realizzazione e validazione scientifica dei contenuti; cinema, musica, gaming fondamentali per la realizzazione della sfera emozionale. Va sottolineato che non è necessario saper realizzare queste parti in modo autonomo, ma vanno conosciute al fine di poter coordinare il lavoro realizzativo tra professionisti di settori diversi, come sceneggiatori, *storyteller*, compositori, archeologi ed esperti d'arte. Questo *workflow* appena descritto nel suo intero si inserisce e si collega con la necessità di definire nuove professionalità e competenze, andando a definire il ruolo del nuovo curatore digitale. Esso deve saper coordinare le diverse professionalità necessarie, facendo un paragone cinematografico, potrebbe essere considerato il regista dell'esperienza. Nei casi studio che verranno mostrati infatti questi passaggi sono stati eseguiti e coordinati mediante proficue collaborazioni con professionisti del settore, al fine di realizzare un prodotto quanto più professionale e di alta qualità. In ogni caso, nei lavori svolti non è stata mai una semplice esecuzione di consegne, ma una proficua e formativa collaborazione, capace di contaminare le professionalità e imparare sempre il nuovo.

Caso studio 1: 'La Scuola d'Atene'

Il primo caso studio da prendere in esame riguarda un'esperienza di realtà immersiva strettamente collegata con il mondo dell'arte. Questo V.I.M. presenta come principale protagonista il celebre affresco 'La Scuola d'Atene' realizzato da Raffaello Sanzio tra il 1509 e il 1511, a Roma, alla corte di Papa Giulio II (Figura 20). L'affresco, commissionato originariamente da Papa Giulio II per adornare la propria biblioteca e studio privato rappresenta un'architettura ideale, un tempio a pianta centrale caratterizzato da, presumibilmente, quattro navate coperte da volte a botte cassettonate confluenti verso l'ambiente centrale.



è caratterizzato da vele adornate da nicchie ovali e un alto tamburo. Un ambiente perfetto, permeato dall'ideale senso di simmetria e rimandi all'architettura classica. Quest'architettura fa da quinta scenica a un evento ideale nel quale i più celebri filosofi dell'antichità vengono rappresentati nell'intento di discutere, conversare e insegnare. Al centro vengono rappresentati Platone, che punta il dito verso l'alto, e Aristotele che indica la terra. In primo piano viene raffigurato Pitagora in ginocchio intento a spiegare il suo teso il Diatesseron; davanti a lui, appoggiato a un blocco di marmo, venne raffigurato Eraclito; in secondo piano, dietro questa scena è possibile riscontrare Socrate che gesticola animosamente; nell'estrema sinistra del dipinto si trova Epicuro, raffigurato nell'atto di scrivere appoggiato a un basamento parziale di una colonna; nel gruppo di destra viene raffigurato Euclide nell'atto di tracciare i suoi insegnamenti su di una tavola, seguito da un nutrito manipolo di discepoli. Questi sono solo alcune delle menti rappresentate nell'opera, le quali però sono state raffigurate riportando i lineamenti di alcuni dei pensatori e artisti più influenti all'interno della corte di Papa Giulio Secondo e del panorama rinascimentale italiano. Platone, ad esempio, venne rappresentato con le sembianze di Leonardo Da Vinci; Aristotele come Bastiano da San Gallo; Euclide come Bramante; Epicuro come Tommaso Inghirami ed Eraclito come Michelangelo Buonarroti. Questo affresco, assie-

Fig.20
Stanza della Segnatura, La Scuola D'Atene, Raffaello Sanzio, Musei Vaticani

me alla 'disputa del SS. Sacramento' e al 'Parnasso con Apollo e le Muse', costituisce il ciclo di affreschi della 'stanza della segnatura'; ossia il luogo in cui presiedeva il tribunale della Santa Sede '*segnatura gratie et iustitie*'. L'insieme di queste opere rappresenta le tre massime categorie dell'animo umano: il vero; il buono e Il bello. Attualmente la stanza della segnatura costituisce una delle aree più affollate dei musei Vaticani richiamando migliaia di turisti ogni anno (Figura 21). Il lavoro svolto riguardante l'esperienza virtuale è stato realizzato in occasione delle celebrazioni del cinquecentenario della morte del pittore Urbinate e nell'ambito della mostra temporanea 'Raffaello e Angelo Colocci, bellezza e scienza nella costruzione del mito della Roma antica'. Questa esposizione prevedeva l'indagine e l'analisi della figura dell'intellettuale e politico jesino Angelo Colocci, nonché alto funzionario dell'amministrazione pontificia nella Roma del primo trentennio del '500. Angelo Colocci, quindi, fu una delle figure chiave circa la creazione dello scenario politico-culturale rinascimentale, volto alla riscoperta della cultura e tradizione dell'antichità greco-romana. In questo scenario è stato una figura essenziale nella progettazione iconografica del ciclo d'affreschi della 'stanza della segnatura' e quindi anche del famosissimo affresco 'la scuola d'Atene'. L'esposizione si caratterizzava per la presenza di elementi tecnologici, come ologrammi e stampe 3D; documenti originali, quali libri, oggetti di pregio e statue. L'obiettivo di questo evento espositivo, quindi, era l'esplorazione di tematiche complesse come idee cosmologiche del Cinquecento, le teorie architettoniche di armonia e simmetria, dottrine astrologiche e la riscoperta dell'antico. Questi temi vennero meglio contestualizzati, senza mai banalizzarli, mediante la descrizione del rapporto intellettuale e personale tra il pensatore Jesino e l'artista Urbinate, i quali condivisero idee e interessi (Mangani et al., 2021). Nell'ambito di questa mostra quindi si volle realizzare un'esperienza di realtà virtuale immersiva, tramite la quale esplorare, in modo completamente nuovo, l'architettura rappresentata al fine di comprendere concetti complessi legati all'architettura rinascimentale quali armonia e perfezione della centralità, il tutto esposto mediante l'espedito narrativo di un dialogo ipotetico tra Raffaello e Colocci. Questa scelta ricalca le più recenti ricerche interpretative relative alle scelte iconografiche dell'opera. Nel gruppo dei filosofi di destra troviamo Zoroastro con in mano un globo celeste, storicamente legato alla figura di Baldassarre Castiglione, ma recentemente riconosciuto come Angelo Colocci (Mangani, 2018). Non a caso nel medesimo gruppo e proprio affianco a quest'ultimo troviamo Apelle ritratto con le sembianze di Raffaello (Figura 22).

Da un punto di vista operativo, questo lavoro si presenta come esempio perfetto nel quale iniziare a ricercare questa ibridazione di linguaggi facendo collimare contenuti culturali e artistici, ovviamente a seguito di una scrupolosa validazione scientifica, con i linguaggi del mondo dell'intrattenimento come cinema, animazione e musica.



La descrizione delle fasi operative circa questo lavoro può essere quindi discretizzata secondo i passi tipici della realizzazione cinematografica ossia: pre-produzione; produzione; post-produzione. Ponendo come conclusione dell'iter realizzativo test d'usabilità-gradimento e il training degli operatori museali.

Pre-produzione

Prima di descrivere i passi operativi necessari alla realizzazione dell'applicativo finale è bene comprendere in modo specifico le necessità narrative, legate ai temi da veicolare, i quali influenzeranno anche la produzione dei contenuti, sottolineando necessità e vincoli. Tutto il lavoro svolto in questa fase preliminare a sua volta è stato effettuato mediante una divisione logica di passaggi decisionali e operativi, come visto nel capitolo precedente, ossia: *script*, *storytelling*, *storyboard* e *animatic*:

Fig.21
Stanza della Segnatura-Musei Vaticani

- *Script*: in questa fase si sono individuati i temi principali da trattare a partire dalle peculiarità tematiche della mostra, ossia: l'architettura ideale, la convivialità dei filosofi rappresentati, il rapporto tra Raffaello e Colocci e una contestualizzazione con la 'stanza della segnatura'.
- *Storytelling*: decisi i temi principali è stata individuata la strategia narrativa, scegliendo l'espedito narrativo del dialogo, rappresentando un ipotetico incontro tra Colocci e Raffaello, inserito all'interno dell'architettura ideale rappresentata nell'affresco. È stato scelto un lessico colloquiale, a sottolineare lo stretto legame tra i due personaggi. Come già accennato, questa scelta è stata facilitata dalla presenza dei due personaggi all'interno dell'affresco. Ragionando anche da un punto di vista visivo e considerando che Raffaello e Colocci si erano già resi protagonisti di altre installazioni della medesima mostra mediante performance attoriali; si è deciso quindi di coinvolgere gli stessi attori all'interno dell'esperienza immersiva. Questo dettaglio è necessario al fine di migliorare la contestualizzazione di questa esperienza con il resto della mostra.
- *Storyboard*: individuate le principali strategie narrative è stato possibile iniziare a dividere i temi da esporre in sequenze narrative, ben definite anche da un punto di vista visivo, ossia le scene. Sono stati individuati tre momenti, introduzione, corpo centrale e conclusione. Nell'introduzione si è deciso di contestualizzare l'affresco all'interno della 'stanza della segnatura', volendo appunto introdurre il tema e soprattutto l'opera pittorica. La seconda scena, la prima del corpo centrale, si svolge all'interno dell'architettura ideale, nello specifico al di sotto dell'ipotetica cupola, questa scena è dedicata alla descrizione dei principi teorici alla base del pensiero architettonico rinascimentale. La seconda parte del corpo centrale prevede invece un cambio di posizione e in questo caso il punto di vista risulta esterno all'architettura. In questa parte vengono descritti i filosofi che popolano la scena, arrivando ad avere una visione completa simile alla scena rappresentata nell'affresco. La scena si conclude con i due personaggi di Raffaello e Colocci che congedandosi riprendono il loro posto ricreando perfettamente la scena rappresentata nell'affresco. L'ultima scena, in cui ci si congeda dal visitatore/utente, è ambientata all'interno della 'stanza

della segnatura' ma in definitiva non si ha l'affresco originario, ma una visione ottenuta mediante l'utilizzo della ricostruzione virtuale.

- *L'animatic*: quest'ultima fase è servita a progettare, in via preliminare, le animazioni necessarie a completare l'esperienza. All'inizio della prima parte della scena 2 si è andato a individuare una generazione graduale dell'architettura al fine di passare da un luogo vuoto, indefinito e senza tempo all'architettura. Mentre nella seconda parte è stata individuata una sequenza specifica con cui far comparire i filosofi, prevedendo la possibilità di animare alcuni di essi facendoli compiere gesti semplici al fine di rendere la scena meno piatta ma viva.



Da un punto di vista programmatico altrettanto importante risulta la progettazione dell'altro senso stimolato dell'esperienza immersiva ossia l'udito. Nello specifico di questo progetto non è stata composta una colonna sonora dedicata e originale, ma sono state seguite scelte specifiche relative al *sound design*, prevedendo suoni finalizzati al passaggio di scena, come dalla 'stanza della segnatura' all'interno dell'architettura e viceversa, oppure nella seconda parte della scena due, al fine di rendere l'ambiente vivo e maggiormente coinvolgente. Questa sequenza di azioni di carattere programmatico permette quindi di individuare uno specifico elenco di vincoli tecnici realizzativi, legati non solo alle possibilità narrative, ma anche di budget disponibile

Fig.22
 Dettagli dell'affresco
 "La Scuola d'Atene",
 Raffaello-Apelle e
 Colocci-Zoroastro

per la realizzazione del progetto. L'ultima fase della pre-produzione, quindi, riguarda la scelta e programmazione di tutti gli strumenti necessari alla realizzazione dei contenuti multimediali. Riguardo la sfera visiva il primo punto critico riguarda la possibilità di esplorare l'architettura ideale; quindi, passare da una condizione bidimensionale a una tridimensionale digitale, in questo caso il punto cruciale non riguarda la realizzazione pratica della scena, ma la sua validazione scientifica. Il secondo punto strettamente vincolante risulta essere la presenza di performance attoriali, ossia l'inserimento di riprese reali nell'ambiente virtuale ricostruttivo. In questo caso la difficoltà consiste nell'individuare una procedura efficace, speditiva e sostenibile al fine di unire riprese 2D, con ambienti virtuali 3D immersivi. Se da un punto di vista bidimensionale o del cinema tradizionale non immersivo questo non risulta un ingente problema, grazie alle possibilità offerte dagli attuali software di *editing* e *compositing*, mediante l'utilizzo di *chroma keying* o *green screen*, molto più complessa e vincolante risulta essere una produzione immersiva. Non avendo a disposizione risorse per la realizzazione di modelli 3D animati dei personaggi, *motion capture*, la scelta migliore risulta essere la realizzazione di panoramiche sferiche monoscopiche. La stereoscopia nelle panoramiche di certo avrebbe aiutato notevolmente la percezione spaziale, ma l'utilizzo di camere 360° stereoscopiche ad alta risoluzione (maggiore di 4k) presentano costi proibitivi d'affitto o d'acquisto. Per la medesima motivazione è stata scartata l'opzione di eseguire le riprese mediante camere 4K panoramiche. Quindi la scelta finale è stata quella di realizzare riprese monoscopiche non panoramiche e renderle tali mediante renderizzazione successiva. Da tale ragionamento, quindi, deriva la necessità di programmare due giornate di ripresa cinematografica in teatro di posa al termine della realizzazione della ricostruzione virtuale della scena fondamentale per avere una *reference* visiva per la performance attoriale. Nello specifico di queste riprese sono stati ingaggiati: gli stessi attori protagonisti delle altre installazioni della mostra, un operatore video per eseguire le riprese, un tecnico delle luci per realizzare l'illuminazione di presa delle scene, truccatrice, costumi e oggetti di scena. Riguardo la sfera sonora non sono state composte musiche o suoni, ma data la sua semplicità, nell'economia dell'intero progetto si è deciso di procedere mediante l'utilizzo di librerie sonore gratuite. Prevedendo la realizzazione dell'esperienza in doppia lingua italiana e inglese, nello schema necessario delle competenze da coinvolgere sono stati coinvolti due doppiatori per realizzare l'audio inglese. L'ultimo aspetto legato alla programmazione pre-produt-

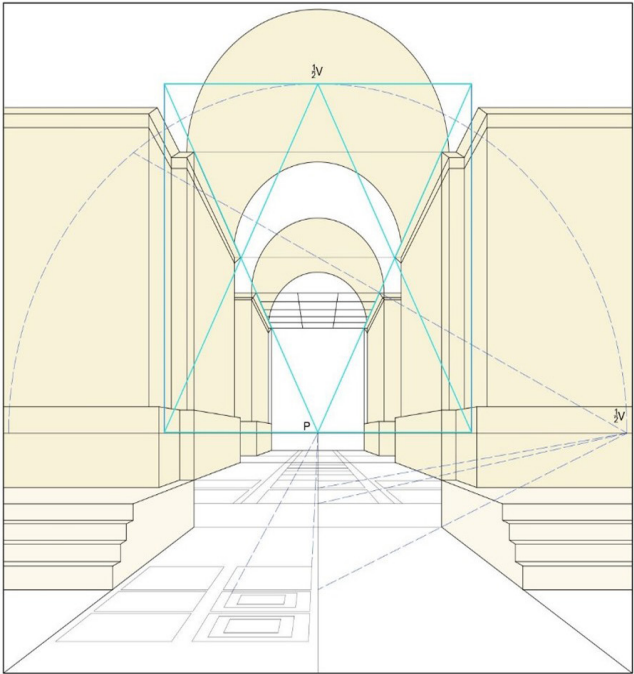
tiva riguarda la stesura del copione degli attori, in questo caso si è prevista la collaborazione con uno sceneggiatore al fine di arrivare a una stesura professionale del recitato.

Produzione

La seconda fase prevista concerne la realizzazione speditiva di tutti i materiali virtuali o reali necessari alla realizzazione dell'esperienza finale. Sulla base di quanto pianificato in fase di pre-produzione possiamo individuare due grandi macro ambiti di produzione, il primo riguarda la realizzazione della componente virtuale dell'ambiente scenico, ossia costruzione virtuale dell'architettura ideale rappresentata nell'affresco. Il secondo macro ambito coinvolge la produzione di tutti gli elementi relativi alla registrazione di elementi reali, come testi e riprese attoriali. Il primo ambito produttivo, ossia la modellazione dell'architettura ideale, porta con sé numerosi problemi legati soprattutto alla necessità di trasporre in chiave tridimensionale una visione prospettica bidimensionale. Queste difficoltà nascono dalla necessità d'interpretare lo spazio di rappresentazione bidimensionale; da un lato ipotizzare e interpretare ciò che non risulta visibile dal punto di vista prospettico, dall'altro dare una dimensione metrica alla rappresentazione 3D, sia del dettaglio visibile che delle parti nascoste. La risoluzione di questi nodi è strettamente legata alla volontà di realizzare, anche da un punto di vista architettonico, una struttura reale in tutti i suoi aspetti. Molti sono gli studi incentrati sull'indagine della composizione pittorica, ma rare sono le occasioni in cui ci si è soffermati sull'indagine dell'architettura rappresentata. Alcune ipotesi sui modelli considerati da Raffaello per la progettazione dello spazio, accostano la Scuola di Atene al progetto della nuova Basilica di San Pietro e delle Logge Vaticane proposto dal Bramante (Letarouilly, 1882). Altri considerano le competenze architettoniche di Raffaello tali da non rendere necessari ulteriori spunti o indicazioni, portando a supporto di questa tesi la strutturazione spiccatamente plastica dell'architettura, uno stile proprio e ricorrente all'interno delle opere di questo artista (Frommel et al., 1984). Ulteriori studi sostengono contrariamente l'impossibilità di definire in maniera chiara e univoca la tipologia dell'edificio, data la presenza in primo piano della scalinata che accosterebbero la scena a un tempio aperto su tutti i lati, come l'arco quadrifronte di Giano a Roma, piuttosto che una basilica, come nel caso del San Pietro Bramantesco (Oberhuber, 1982). Al fine di percorrere correttamente l'iter di ricostruzione all'architettura

della scuola di Atene, risulta necessario, in via preliminare, comprendere in che modo Raffaello ne abbia concepito il progetto scenico, architettonico e prospettico. L'artista urbinato non intende rappresentare un'architettura reale, ma una ideale capace di «*ingannar l'occhio, appagar l'intelletto e muovere il cuore*», come scrisse Francesco Algarotti a fine '700, quindi siamo di fronte a uno spazio ideale, finalizzato all'individuazione di una quinta scenica perfetta e allegorica per la vicenda rappresentata. Per questo motivo l'atto ricostruttivo digitale deve essere concepito come un atto d'interpretazione critica, al fine di ottenere non l'esatta rappresentazione dello spazio rappresentato ma una sua interpretazione finalizzata all'ottenimento di una progettualità 'credibile', quindi reale e 'finita' completa in tutte le sue parti. Queste caratteristiche risultano centrali in una visione immersiva di uno spazio 3D al fine di non disorientare l'osservatore e rendere l'esperienza più realistica possibile ed emozionalmente coinvolgente. L'iter realizzativo messo in atto si costituisce quindi di 5 fasi operative: la prima prevede lo studio della composizione prospettica dell'affresco al fine di ottenere un primo sviluppo in pianta e in alzato dell'edificio; il secondo consiste nell'andare a regolarizzare e completare il risultato ottenuto nella prima fase, ottenendo un edificio completo, realistico e staticamente completo; la terza fase prevede l'individuazione di tutti gli elementi di dettaglio necessari a decorare la scena e avere così una visione quanto più simile possibile all'architettura rappresentata dall'artista Urbinate, la quarta fase prevede la realizzazione 3D dell'architettura; e l'ultima fase riguarda l'esecuzione di determinate verifiche compositive eseguibili sul modello 3D. Il punto di partenza, come già accennato, concerne lo studio degli elementi prospettici. Tale indagine, ha ripercorso la tecnica di rappresentazione prospettica presumibilmente prossima a quella utilizzata da Raffaello, come in (Spagnesi et al., 1984), portando all'individuazione di un sistema geometrico basato sulla figura di un triangolo isoscele, avente base pari all'altezza, corrispondente allo spazio cubico sopra la linea dell'orizzonte e definendo l'impianto prospettico. Su tale triangolo giacciono tutte le informazioni utili per riportare le grandezze principali: la posizione dei punti di misura, la distanza del punto di vista, l'ampiezza del cono ottico. Questo schema è stato utilizzato per ottenere uno schema reticolare a maglie quadrate essenziale per il dimensionamento delle singole parti sceniche. Si è così giunti a un sistema a griglia piana caratterizzato da nodi su cui cadono i punti più importanti della struttura prospettica, conferendo così la possibilità di ottenere uno schema spaziale realizzando una maglia tridimensionale la cui unità minima è base delle

proporzioni architettoniche raffigurate (Figura 23) (Clini et al., 2021a). Come è facilmente intuibile dall'utilizzo di questi schemi, è stato possibile ottenere una prima dimensione metrica dei macro-elementi costruttivi potendo rapportare la griglia creata alle dimensioni delle figure umane rappresentate. Ovviamente questo assunto non permette di avere una misura univoca o oggettivamente certa, ma consente di mantenere i rapporti proporzionali tra architettura e uomo, importanti per la percezione immersiva. Questa schematizzazione, inoltre, è stata fondamentale per la realizzazione di un primo sviluppo planimetrico dell'architettura, basata sull'osservazione diretta dell'opera mediante l'utilizzo di un'immagine digitale dell'affresco, fornitaci dai Musei Vaticani (Figura 24).



Lavorare sull'affresco implica l'interpretazione di irregolarità evidenti, imputabili all'errore di graficismo del tratto pittorico o a scelte compositive. Le più rilevanti al fine dell'ottenimento di un'idea progettuale 'completa' e 'finita' riguardano le dimensioni del sistema paraste-nicchie delle navate laterali e soprattutto l'imposta dell'alto tamburo dell'ambiente centrale. Conclusa la prima fase d'indagine, la seconda fase operativa ha visto come

Fig.23
Schema quadrato-triangolo utilizzato per la costruzione dell'affresco.

punto di partenza lo schema planimetrico parziale e come punto d'arrivo uno sviluppo planimetrico completo, mediante una regolarizzazione della planimetria. La risoluzione in chiave architettonica dell'ambiente centrale del sistema architettonico e infine il completamento mediante ipotesi delle parti non visibili poiché coperte da personaggi ed elementi architettonici. Riguardo il primo punto, come già descritto, non è stato possibile ottenere una misura univoca delle dimensioni delle paraste, e della loro distanza reciproca. Inizialmente si è tentato di indagare l'elemento mediante le proporzioni canoniche degli ordini architettonici vitruviani (probabilmente noti a Raffaello), ma tali proporzioni comportavano una sostanziale modifica delle proporzioni dei macro-elementi individuati dal sistema a griglia. Per realizzare un susseguirsi regolare degli elementi è stata semplicemente compiuta una media delle grandezze ottenute dall'affresco. Regolarizzato il susseguirsi di questi elementi, per completare la normalizzazione di ciò che è visibile e rappresentato nell'affresco, è stato necessario risolvere uno, se non addirittura il principale problema 'statico' dell'edificio rappresentato da Raffaello, ossia il sistema pennacchi-tamburo-cupola. Partendo dal basso, infatti, è possibile notare come nell'affresco, l'innesto tra navata longitudinale e trasversale avvenga con un angolo retto di 90°. Questa disposizione spaziale e geometrica non è confermata staticamente dal livello superiore, ossia dai pennacchi d'imposta dell'alto tamburo, che per essere corretta dovrebbe presentare una conformazione triangolare e invece presentano una larga conformazione trapezoidale (Figura 25).

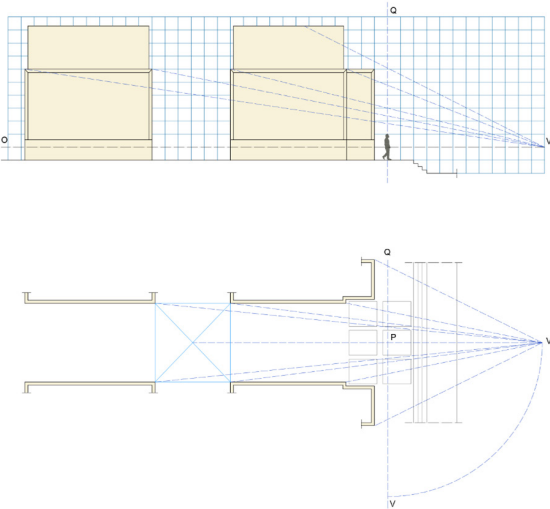
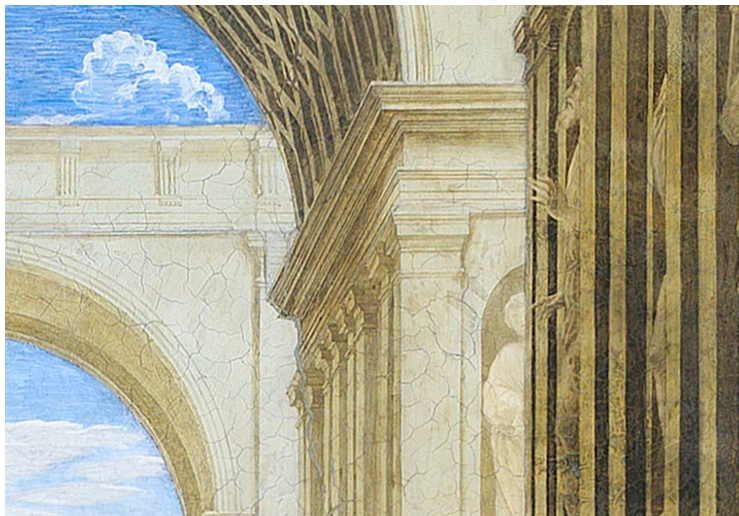


Fig.24
Sviluppo spaziale della maglia quadrata utilizzata per definire le proporzioni degli elementi architettonici, alzato e pianta.

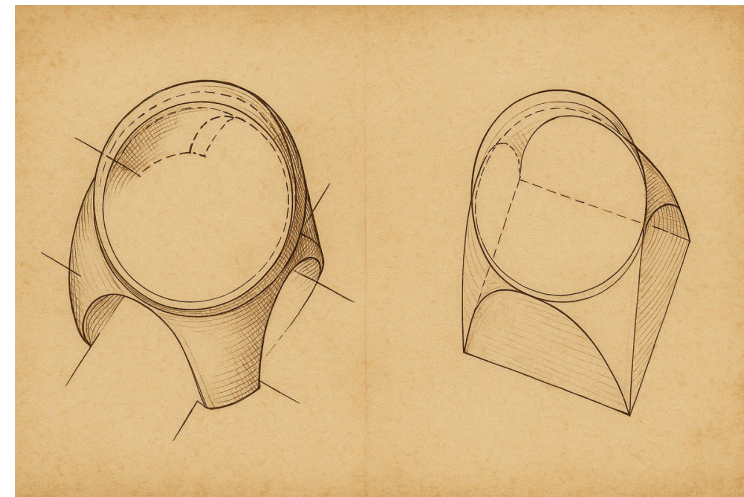
Al fine di superare questa problematica sono state individuate due strategie risolutive. La prima prevede l'inserimento di un pilastro di collegamento inclinato di 45° tra le due navate in modo tale da conferire un elemento d'imposta corretto per i pennacchi trapezoidali, come ad esempio avviene nell'attuale basilica di San Pietro a Roma. La seconda strada prevede di mantenere l'incontro delle navate in modo perpendicolare, ma modificando i pennacchi in modo tale da avere l'appoggio nei vertici di un quadrato, come avviene ad esempio nel caso della chiesa di Santa Maria delle Carceri a Prato (Figura 26). Tra le due soluzioni è stato deciso di percorrere la prima ipotesi ricostruttiva, facilitando il mantenimento delle proporzioni compositive circa l'utilizzo del sistema d'imposta della cupola tra modello ricostruttivo e affresco, permettendo anche un più facile inserimento dei tondi decorativi.



Questa ipotesi è stata ulteriormente verificata grazie all'analisi di un cartone preparatorio, custodito oggi nella pinacoteca Ambrosiana, in esso sono presenti dei tratti a matita sanguigna raffiguranti una planimetria, molto probabilmente utilizzata per eseguire il disegno prospettico dell'architettura. Questo schema planimetrico presenta una specifica conformazione caratterizzata dall'accento di pilastro d'appoggio inclinato di 45° (Zanchettin, 2018). È facile ipotizzare che Raffaello fosse a conoscenza dei progetti Bramanteschi per la nuova basilica di San Pietro, la quale presentava una conformazione molto simile alla solu-

Fig.25
Dettaglio d'innesto perpendicolare tra navata longitudinale e trasversale.

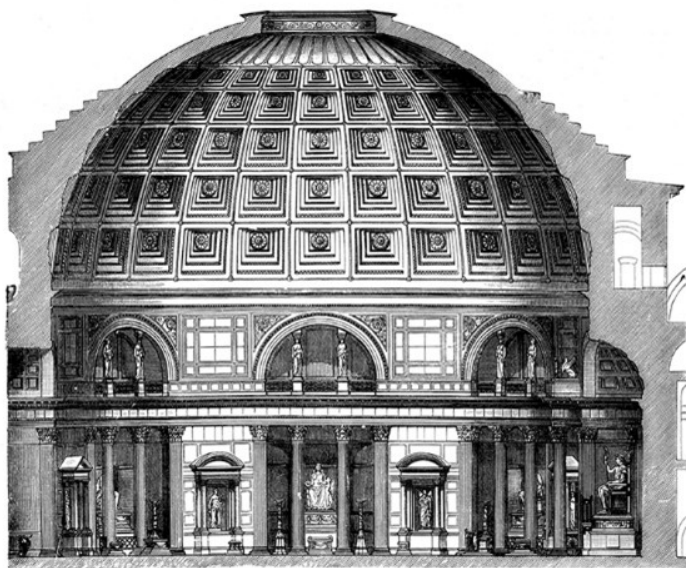
zione adottata, e che abbia voluto riportare quello stesso effetto visivo nei pennacchi, ma per ragioni compositive venne lasciato perpendicolare l'innesto tra le navate. Decretato lo sviluppo in pianta e in alzato delle parti visibili si è potuto procedere con la costruzione delle parti non visibili, nello specifico delle coperture e chiusure esterne dell'edificio. Si è dunque operata un'accurata analisi delle fonti che ispirarono Raffaello nella definizione dei caratteri formali e decorativi della sua architettura: il suo studio dell'antico, evidente nell'uso di volte cassettonate tipiche dell'architettura romana, Pantheon (Figura 27), Basilica di Massenzio (Figura 28) e il suo interesse per i temi contemporanei. Si è dunque completato l'impianto a croce greca con cupola al centro, molto vicino al progetto bramantesco per San Pietro a Roma (Figura 29), proponendo una volta cassettonata simile a quella presente nel Pantheon.



La connessione con le architetture bramantesche è servita anche a definire le caratteristiche del tamburo, con l'inserimento di una serliana, come nello schema utilizzato per l'arcone del coro della chiesa di Santa Maria del Popolo a Roma. Riguardo i paramenti esterni non visibili dell'edificio si è deciso di chiudere le facciate nel modo più semplice e regolare possibile, ricorrendo ai principi di simmetria e centralità basati sulla forma del quadrato, facendo in modo che l'intero corpo di fabbrica sia contenuto all'interno di esso. Sono state individuate le caratteristiche morfologiche generali di una navata, incluso di pilone inclinato a 45° per sorreggere i pennacchi, è stata specchiata in

Fig.26
Sulla destra pennacchi con appoggio su pilastri angolari orientati a 45°; sulla sinistra pennacchi con appoggio sui vertici di un quadrato.

modo tale da ottenere la navata a essa perpendicolare. Le due sezioni così ottenute sono state chiuse mediante l'inserimento di paramenti murari caratterizzati dalla presenza di paraste binate e nicchie, ma sempre mantenendo le medesime caratteristiche proporzionali tra gli elementi. Ottenuto uno dei quattro corpi, esso è stato specchiato al fine di ottenere la planimetria finale e completa (Figura 30). L'ultimo elemento architettonico da decretare riguarda la chiusura in alzato delle facciate esterne, al fine di comprendere come le volte a botte cassettonate si potessero innestare nel secondo livello architettonico, su cui poggiare l'alto tamburo e la cupola. Anche in questo caso è stata percorsa la strada più semplice duplicando il sistema di paraste binate proposte per il livello inferiore, con la differenza di non inserire nicchie. L'altezza di questo secondo livello è decretata dall'intradosso, compreso di cornice, della volta a botte della navata centrale, ipotizzata tangente all'estremo inferiore della trabeazione del sistema decorativo.



Stabilite le caratteristiche formali e proporzionali dei macro-elementi costruttivi, si è potuto procedere con la fase successiva, ossia lo studio degli elementi decorativi di dettaglio. Sempre in relazione all'interpretazione grafica, in considerazione dell'accuratezza visiva del tratto pittorico, è stata riscontrata una notevole difficoltà nell'esatta interpretazione delle caratteristiche

Fig.27
Sezione Pantheon

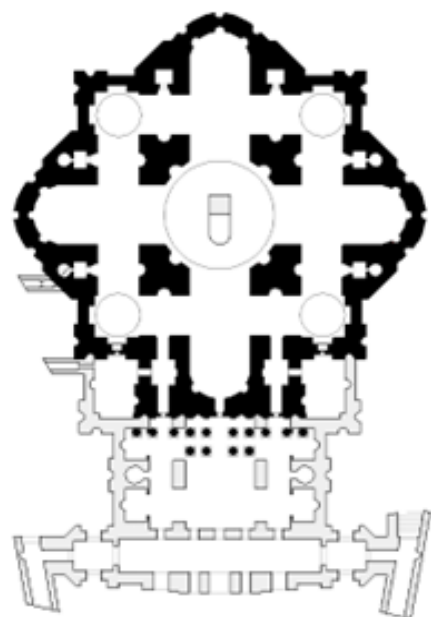
decorative: piedistallo, base di parasta, capitello e trabeazione. In questo caso sull'affresco è stato individuato, per ogni decorazione architettonica, un elemento campione, generalmente il migliore dal punto di vista della chiarezza rappresentativa, che è stato scomposto nelle sue singole parti come, toro, gola rovescia, scozia, ovulo, echino, abaco, collarino etc., e in seguito ne è stata ricercata una concordanza con le descrizioni presenti in trattatistica e le opere realizzate probabilmente note a Raffaello. Come è facilmente intuibile non sono state riscontrate corrispondenze dirette con la trattatistica, ma questo confronto ci ha consentito di conferire un ordine proporzionale alla ricostruzione, ricercando il modello più simile per successione compositiva degli elementi, e di modificarlo, rendendolo corrispondente con la rappresentazione dell'artista Urbinate. Riguardo i confronti architettonici è stata riscontrata una grande somiglianza compositiva con l'impianto decorativo del cortile del Belvedere Vaticano (Figura 31).



Fig.28
Litografia Basilica di Massenzio, Roma.

Arrivati a questo punto il passo successivo, ossia la quarta fase dell'iter realizzativo, è stato la modellazione 3D degli elementi architettonici, avendo come base uno schema planimetrico completo e tutti i profili delle decorazioni di dettaglio. La modellazione è stata eseguita interamente all'interno dell'ambiente di modellazione del software *Blender 2.83*. Anche per la modellazione 3D si è seguito il principio generale di simmetria, per cui si è modellato un unico quarto dell'intero corpo di fabbrica

procedendo in seguito ad applicare modificatori di *mirroring* al fine di ottenere l'edificio completo.



Riguardo la modellazione 3D è possibile dividere le metodiche adottate in due gruppi: la modellazione degli elementi verticali e delle coperture:

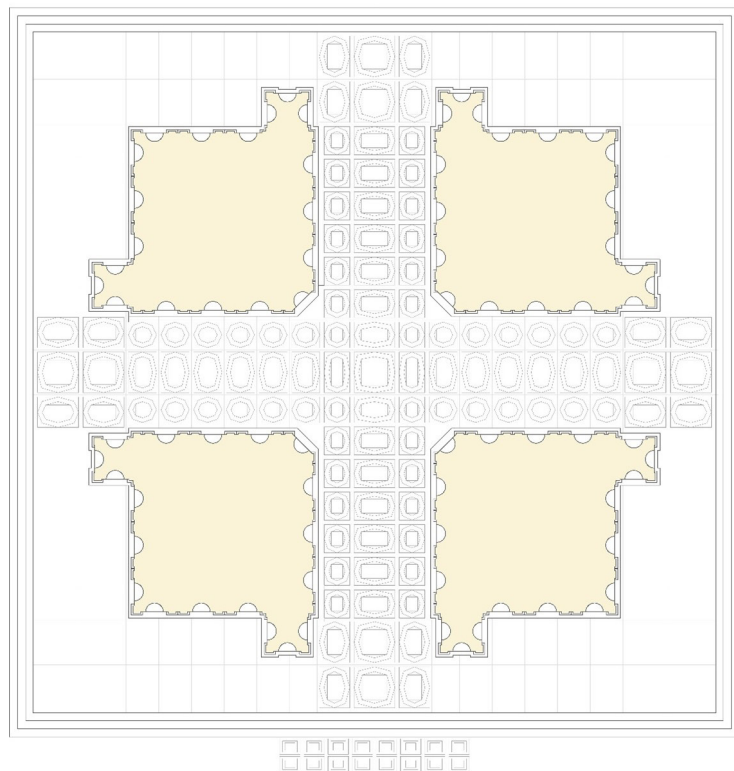
- Al primo gruppo appartengono i paramenti murari, ossia l'insieme alternato del sistema paraste e nicchie. La modellazione di questi elementi ha visto l'utilizzo dell'estrusione di un profilo lungo una curva direttrice, entrambe curve di Bézier; per tutti quegli elementi appartenenti alla famiglia dei microelementi di dettaglio, ossia basamento, base di colonna, capitello e trabeazione. Per quanto riguarda le nicchie esse sono state realizzate mediante l'utilizzo di sezioni unite di cilindro e sfera, e in seguito invertite le normali al fine di avere un profilo concavo; infine il fusto delle paraste e le superfici murarie piane sono state unite mediante interpolazione dei punti di bordo delle decorazioni precedentemente realizzate. La scelta di procedere mediante l'utilizzo di curve di Bezier, e quindi superfici di Bezier, ha facilitato la possibi-

lità di modifica in fase di verifica, poiché cambiando il dato nel profilo è possibile modificare l'intero corpo di fabbrica.

- Al secondo gruppo appartengono invece le volte a botte, i pennacchi e la cupola. Riguardo la volta a botte è stato eseguito il disegno piano di un'unica fila di cassettoni, estrusa, moltiplicata mediante modificatore *array* lungo il suo asse longitudinale e infine curvato mediante modificate *bend*, ottenendo la curvatura richiesta. La cupola, anch'essa cassettonata, è stata modellata un'unica fila di cassettoni e in seguito moltiplicata mediante un modificatore di rivoluzione al fine di ottenere l'intera superficie sferica. Anche in questo caso il procedere mediante modificatori parametrici ha consentito un certo grado di libertà e facilità di modifica e verifica, dovendo modellare effettivamente un unico elemento. I pennacchi invece, semplicemente sono stati realizzati mediante sottrazione booleana, partendo da una semisfera sono stati sottratti volumi corrispondenti all'ingombro delle volte delle quattro navate (Figura 32).

Per concludere la realizzazione del modello 3D sono stati realizzati i materiali da assegnare alla geometria (*PBR Material*) mediante il software *Substance Painter*. È stato quindi realizzato un materiale procedurale (*smart material*), ossia in grado di leggere le informazioni geometriche di ogni singolo oggetto 3D e modificarne dettagli cromatici e imperfezioni (sporco o graffi) a seconda della conformazione individuata. Questa caratteristica consente di conferire grande varietà e realismo alla resa finale del modello, in modo assolutamente rapido e speditivo. In totale sono stati realizzati: un materiale per il marmo dell'edificio e due diverse varianti per la pavimentazione (Figura 33). Dall'ambiente di lavoro di *Substance Painter*, sono state esportate delle texture specifiche per la *pipeline* di *Blender* (*basecolor*; *displacement*; *metallic*; *normal*; *roughness*) (Figura 34), assegnate all'ambiente e verificate utilizzando un sistema d'illuminazione globale basato su HDRI, facendo attenzione nel ricreare le medesime ombre riportate sul dipinto. L'ultima fase relativa alla generazione del modello 3D ricostruttivo riguarda la verifica del modello in base al sistema di illuminazione della scena e in rapporto alla visione pittorica dell'affresco. Osservando l'opera originale è possibile notare come le tonalità di giallo-ocra dei paramenti murari della zona della cupola siano più chiari in confronto a quelle relativi alle navate, cosa che invece non avviene nel caso della renderizzazione virtuale, dove la zona co-

Fig.29
*Pianta del progetto
della Basilica di San
Pietro del Bramante*



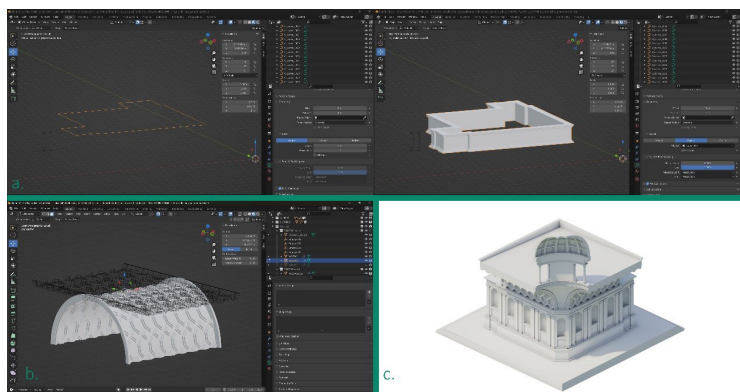
perta dalla cupola presenta una tonalità più scura in relazione alla presenza di ombre. Al fine di indagare questo aspetto sono state effettuate diverse ipotesi. Raffaello, negli anni in cui si dedicò alla realizzazione di questo affresco, trovandosi a Roma, sicuramente ebbe la possibilità di osservare l'ampliamento di San Pietro durante la sua costruzione, ovviamente privo di cupola, quindi, una prima ipotesi vede la Fabbrica parziale della Basilica di San Pietro come fonte d'ispirazione o modello compositivo. Posizionando la camera in posizione frontale, sono stati simulati diversi scenari di costruzione parziale dell'edificio: con la cupola, senza cupola, senza volte laterali, ma in nessun caso si è riuscito a ottenere la medesima visualizzazione. L'unico caso

Fig.30
Schema planimetrico conclusivo.

in cui è stato possibile ottenere la stessa resa visiva è stato quello in cui troviamo una luce artificiale nello spazio voltato (Figura 35). Ancora una volta, quindi è stato verificato come Raffaello non volle realizzare una architettura reale, ma una quinta scenica ricca di elementi artefatti e finalizzati all'armonia compositiva. Anche in questo caso si è scelto di percorrere la strada della visualizzazione basata sull'interpretazione realistica, scegliendo l'ipotesi con la cupola ricostruita e l'edificio completo.



Fig.31
Dettaglio del basamento del Cortile del Belvedere Vaticano, Roma



È stata eseguita anche un'ulteriore verifica in relazione alla presenza dell'arco trionfale presente sullo sfondo dell'affresco. In questo caso dal primo studio planimetrico è stato possibile dedurre posizione, dimensioni ed elementi decorativi, verificando anche grazie alla modellazione 3D dell'intero impianto i rapporti dimensionali tra tempio e arco, ricercando i medesimi rapporti in visione prospettica. Nello specifico di questo caso d'indagine è stata simulata l'ipotesi di un intero porticato sviluppato lungo tutto il perimetro del tempio centrale. Questa ipotesi è stata scartata poiché nel suo complesso, anche se particolare ed evocativo, sminuiva l'importanza dell'edificio centrale mostrando l'impianto porticato più grande, in volume, in confronto al tempio (Figura 36), per cui è stato deciso di scartare questa ipotesi lasciando un unico arco trionfale sullo sfondo.

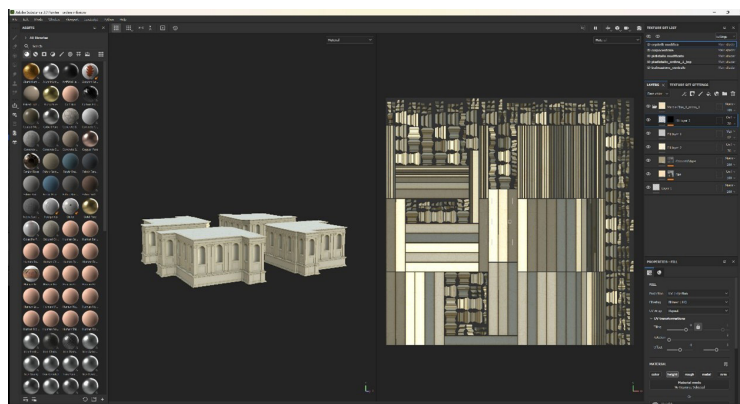
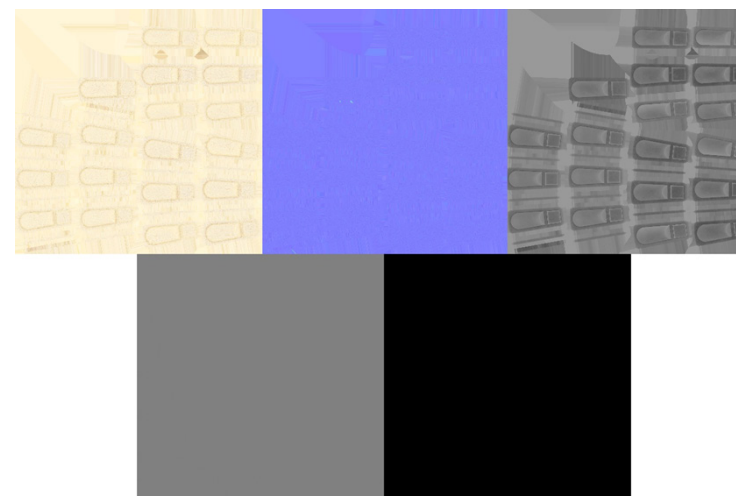


Fig.32
*a. Modellazione decorazione secondo estrusione di profilo su Bézier;
 b. Modellazione volta a botte mediante modellazione bend;
 c. Quarto d'edificio completo.*

Fig.33
Ambiente di Lavoro Adobe Substance Painter, texturizzazione ordine inferiore dei paramenti murari.

Tutte le ipotesi e verifiche sulla ricostruzione dell'edificio sono state eseguite seguendo un *workflow* iterativo caratterizzato da ipotesi, verifiche e scelte suggerite ed eseguite in collaborazione con il professor Francesco Di Teodoro, docente di storia dell'architettura del politecnico di Torino. Per concludere la realizzazione dell'ambiente virtuale sono stati inseriti tutti gli elementi decorativi non architettonici, quali bassorilievi e statue. Al fine di ottenere la medesima resa visiva, e non avendo la possibilità di comprendere la totale spazialità e tridimensionalità di queste ultime, sono state inserite delle immagini 2D delle sculture rappresentate, estrapolate direttamente dall'affresco (Figura 37). La medesima operazione è stata eseguita al fine di rappresentare i filosofi presenti nella scena. Questa peculiarità, oltre a semplificare e abbattere i costi realizzativi, è stata compiuta anche come scelta stilistica per differenziare i personaggi di Raffaello e Colocci dal resto dei filosofi.



Parallelamente alla realizzazione del modello 3D, in collaborazione con l'attrice e sceneggiatrice Lucia Palozzi di ATGP Teatro Pirata e lo storico Giorgio Mangani, professore del dipartimento di beni culturali dell'Università di Bologna, sono stati realizzati i testi relativi alla sceneggiatura dell'intera esperienza. I principali temi trattati nella prima parte, sono dedicati alla stanza della segnatura e al senso metaforico e filosofico dell'ambiente rappresentato. Nella seconda fase, invece, vengono descritti i personaggi presenti nella scena, concludendo l'esperienza presentandosi reciprocamente e riprendendo la loro posizione

Fig.34
Esempio di texture prodotte.

nell'affresco. In relazione anche alle decisioni prese in ambito narrativo sono stati modellati anche gli ambienti necessari all'introduzione e alla conclusione. Da sceneggiatura l'esperienza si apre e chiude all'interno della stanza della segnatura al fine di ricontestualizzare l'affresco alla stanza d'appartenenza. Non avendo né i permessi per andare a fare delle acquisizioni, né delle immagini panoramiche ad alta risoluzione della stanza non è stato possibile riprodurre fedelmente questo ambiente, per cui ne è stato proposto una sua interpretazione virtuale. È stato realizzato un ambiente delle medesime dimensioni, ma con paramenti murari indefiniti, e decorati unicamente con gli affreschi del pittore Urbinate appartenenti a tale luogo.



Dal punto di vista operativo, la stanza è stata realizzata in modo molto semplice e leggero mediante l'utilizzo di giustapposizione di piani, replicati in altezza 35 volte, al fine d'ottenere l'effetto di un luogo senza copertura e senza confini (Figura 38). Avendo realizzato la versione definitiva della sceneggiatura ed essendo giunti alla versione finale dell'ambiente virtuale è stato possibile realizzare le riprese video affittando il set per due giorni di ripresa, presso grafiche Ricciarelli, Monsano (AN) (Figura 39). In relazione alla sceneggiatura sono stati valutati i movimenti degli

Fig.35
Simulazioni luce. a. Modello completo; b. Modello senza Cupola; c. Modello senza cupola e senza volte; d. Modello con luce aggiunta.

Fig.36
Ipotesi ricostruttiva con porticato esterno.

attori in scena, per la prima scena era prevista una posizione centrale, mentre per la seconda scena si prevedeva un movimento maggiore dato che da una posizione quasi centrata, in asse con la camera, gli attori dovevano riprendere la posizione originaria nell'affresco, movendosi così dal centro della scena all'estremo destro. Facendo delle prove di presa e di montaggio, nonché misurando nell'ambiente virtuale dello spazio da percorrere è stato possibile decretare la grandezza minima del set di 6 metri. Non avendo un *green screen* sufficientemente largo è stata dipinta una parete e la pavimentazione adiacente al fine di avere un set di tali dimensioni. Il primo giorno sono state effettuate delle prove di luce del set, mentre il secondo giorno sono state effettuate le riprese effettive dal videomaker Alessandro Pacci, utilizzando i costumi realizzati dalla sartoria Tul.Ma di Massimo Eleonori, il trucco di Margherita Angeloni e l'oggetto di scena, ossia il globo celeste di Angelo Colocci, realizzato da Ilaria Sebastianelli. È stato molto importante in questo caso portare sul set il modello 3D dell'ambiente virtuale in modo tale da fornire una *reference* visiva dell'ambiente, per far capire agli attori dove guardare e in che luogo è ambientata la scena, quindi guidare la performance attoriale (Figura 40).



Fig.37
Versione finale vista frontale, con statue e bassorilievi.



Per concludere la fase di produzione sono state effettuate le renderizzazioni relative alle scene e alle animazioni. Riguardo le prime sono state renderizzate 4 immagini, in ordine: Introduzione; al centro del tempio; davanti al tempio e le conclusioni. L'immagine d'introduzione è stata realizzata all'interno della stanza della segnatura virtuale, posizionando il punto di vista al centro e rivolto verso l'affresco 'La Scuola d'Atene'. La seconda scena è stata realizzata al di sotto della cupola all'interno del tempio. In questo caso la camera è stata posta rivolta verso l'ingresso. Questa scelta è stata guidata dalla necessità di far comparire di spalle i due personaggi di Platone e Aristotele, al fine di creare un collegamento visivo con la scena successiva. La terza scena è stata realizzata al di fuori dell'edificio appena davanti alla scalinata a simulare il punto di vista dell'affresco. Nell'ultima scena la renderizzazione è stata eseguita all'interno della stanza della segnatura virtuale, a differenza della prima è stato rimosso l'affresco e visualizzato il modello 3D ricostruito. Per tutte le renderizzazioni effettuate il punto di vista è stato posto a un'altezza adeguata alla fruizione dell'esperienza da seduti, scelta eseguita al fine di rendere l'esperienza più sicura per l'utente, dato che l'utilizzo di panoramiche monoscopiche e il passaggio da un ambiente a un altro, come è stato ampiamente descritto nei capitoli precedenti, potrebbe generare *motion sickness*. Tutti i calcoli sono stati realizzati mediante il motore di *render ray-tracing* Cycles di *Blender* capace di renderizzare direttamente in formato panoramico equirettangolare monoscopico. Ogni immagine prodotta presenta una risoluzione di 16384x8192, impiegando circa 45 minuti per immagine al fine di mantenere la massima qualità visiva. Riguardo le animazioni, seguendo la traccia narrativa e la sceneggiatura, è stata animata la generazione graduale dell'architettura e le figure dei filosofi. Il calcolo delle animazioni deve essere progettato in modo speci-

Fig.38
Stanza della
Segnatura Virtuale.

fico al fine di non avere tempi di computazione eccessivamente alti, dovendo renderizzare ad altissima risoluzione migliaia e migliaia di frame. Per abbattere notevolmente i tempi di calcolo una delle strategie possibili è l'utilizzo del motore di *render realtime*, ma Eevee, la *render engine realtime* di *Blender*, non permette di effettuare immagini panoramiche, per questo motivo è stato effettuato un doppio calcolo. il primo mediante motore *realtime* e il secondo utilizzando Cycles.

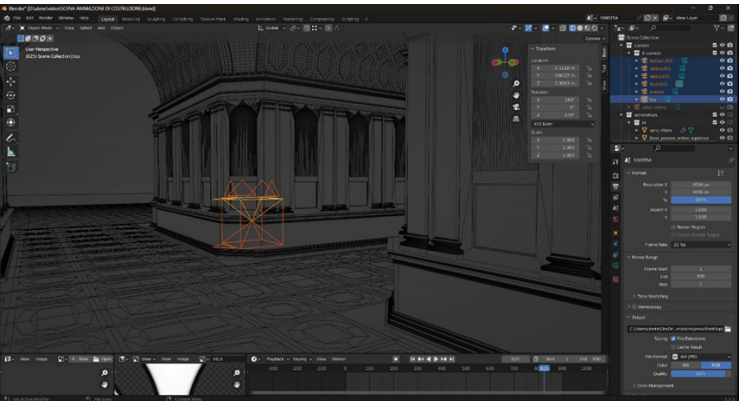


Fig.39
Set di ripresa
cinematografica.

Fig.40
Ripresa su green
screen.

Per effettuare una renderizzazione a 360 gradi sono state impiegate 6 camere virtuali posizionate nel medesimo punto ma ruotate al fine di ottenere un cubo perfetto (Figura 41), ossia avere il limite dell'inquadratura di ogni camera perfettamente adiacente ad altre 4. Effettuati i calcoli di tutte le camere i video

ottenuti sono stati riposizionati all'interno dell'ambiente virtuale costituendo un cubo di proiezione, al cui centro è stata posta una camera panoramica. A questo punto mediante Cycles è stato possibile calcolare il video panoramico con tempi molto brevi, poiché la geometria presente in scena era costituita solo da piani, e soprattutto non erano presenti luci in tempo reale, poiché tutto era già precalcolato all'interno dei video realizzati precedentemente.



Le figure dei filosofi della seconda scena invece sono state animate in *Adobe After Effects*, nello specifico sono state estrapolate le figure di ogni filosofo dall'immagine HD dell'affresco, in seguito sono state separate le parti da animare di ogni personaggio, come braccia, mani o testa e animate mediante *Pre-Compose* e *Puppet-tool*, grazie al quale è stato possibile andare a inserire dei punti notevoli, ossia i perni attorno i quali far avvenire il movimento. Per concludere la fase di produzione, sulla base delle riprese cinematografiche è stato effettuato il doppiaggio in lingua inglese.

Post-produzione

Ottenuti tutti i contenuti multimediali, la fase di post-produzione ha visto la loro messa a sistema al fine di realizzare effettivamente l'esperienza di fruizione virtuale. Tutte le riprese, le immagini virtuali e le animazioni sono state fatte confluire in un unico video panoramico equirettangolare monoscopico,

Fig.41
Sistema a 6 camere cubico.

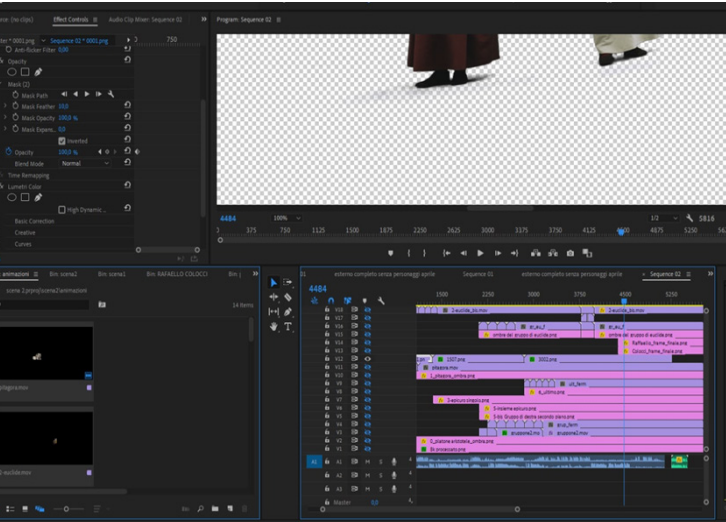
eseguendo quindi un montaggio. Realizzato il video è stata generata l'app di fruizione per Oculus inserendo interazioni basilari necessarie al funzionamento dell'applicazione. Il problema principale relativo alla realizzazione del video finale riguarda l'editing di clip video prospettiche con immagini panoramiche equirettangolari facendo coincidere correttamente i personaggi con l'architettura e generando anche le medesime distorsioni ottiche panoramiche. Per risolvere queste problematiche si è proceduto inserendo all'interno dell'ambiente virtuale 3D (*Blender*) i vari personaggi animati mediante l'utilizzo di piani texturizzati con le clip video animate corrispondenti al personaggio da rappresentare. Infine per ogni gruppo di personaggi è stata renderizzata nuovamente l'animazione, ma mediante la camera panoramica al fine di ottenere l'esatta distorsione ottica e posizione relativa, necessaria all'inserimento corretto all'interno della panoramica. Nel caso delle riprese cinematografiche esse sono state prima processate all'interno di *Adobe Premiere*, al fine di rimuovere lo sfondo verde mediante la tecnica *chroma key*, esportato al massimo della qualità in formato .MOV, con canale alfa incluso, e importato all'interno dell'ambiente di lavoro 3D di *Blender*, posizionato in relazione al punto di vista scelto e renderizzato nuovamente ma in formato panoramico equirettangolare (Figura 42).



Ottenute tutte le clip in formato equirettangolare si è proceduto con il montaggio vero e proprio di tutte le clip all'interno del software di editing video *Adobe Premiere* (Figura 43). Sono stati quindi effettuati tutti i missaggi sonori e le transizioni video da scena a scena, nello specifico si è deciso di utilizzare un *fade in*, *fade out* a nero, una soluzione molto semplice ma funzionale alla

Fig.42
Inserimento clip video all'interno dell'ambiente virtuale.

fruizione VR. In seguito al test di varie soluzioni è stato notato che transizioni sul chiaro o sfumate potrebbero causare un abbagliamento o un disorientamento dell'utente.



Il montaggio della componente visiva è stato ultimato mediante il missaggio sonoro, inserendo le tracce sonore e il doppiaggio in lingua inglese. Per concludere la realizzazione del video sono stati generati e inseriti i sottotitoli in lingua inglese e italiana, arrivando così alla stesura finale di quattro versioni: audio italiano; audio italiano con sottotitolo italiano; audio inglese e audio inglese con sottotitolo inglese (Figura 44).



Ottenute le quattro versioni del video, si è proceduto con la realizzazione finale dell'applicazione per *Meta Quest 2* e *Meta Quest 3*. Tutto il lavoro relativo alla realizzazione dell'applicazione è stato eseguito all'interno della *game engine Unity*. Lo schema

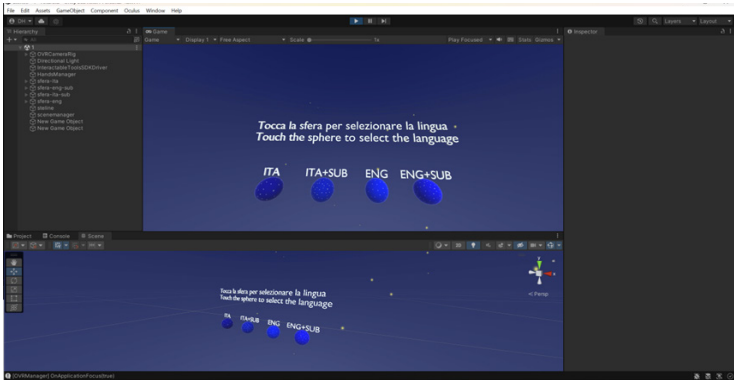
Fig.43
Schermata time-line d'editing video finale.

Fig.44
Frame del video finale.

logico di funzionamento di tale applicativo è molto semplice poiché l'intera esperienza è gestita mediante l'utilizzo di video. Sono state predisposte sei scene (*Unity scene Unity - Manual: Scenes* (unity3d.com)) una scena iniziale *home* (scena 0) per la selezione della lingua o del sottotitolo; quattro *scenes* una per ogni video precedentemente descritto (Figura 45). Analizzando i collegamenti dalla scena 0 mediante selezione si passa a una delle scene 2-3-4 per poi tornare automaticamente all'inizio finita l'esperienza. Per semplificare il funzionamento nonché la fruizione museale dell'esperienza si è scelto di far resettare il visore nel momento in cui l'utente si vada a togliere il dispositivo tornando alla scena 0 per effettuare nuovamente la scelta della lingua e ricominciare l'esperienza. Anche la scelta della tipologia d'interazione è stata dettata dalla ricerca di semplicità nell'utilizzo museale, scegliendo di non utilizzare controller, ma di sfruttare le possibilità fornite dallo strumento, ossia l'*hand tracking* (Figura 46). Lo strumento è in grado di tracciare le mani dell'utente e di riprodurle nell'ambiente virtuale, mediante una corrispondenza diretta tra movimento reale e virtuale l'utente è in grado di eseguire interazioni in modo intuitivo e naturale. Analizzando la composizione delle scene è possibile riscontrare come elemento comune gli oggetti virtuali o *prefab* per il funzionamento del visore, ossia l'*OVR camera rig*, che simula la vista virtuale del visore e l'*interactable tools SDK driver* per effettuare interazioni con l'ambiente virtuale. Questi elementi sono stati estrapolati dall'asset standard Oculus XR *plugin* fornito gratuitamente da *Meta* Get started developing Oculus VR Apps with *Unity* | Oculus Developers. Nel dettaglio è possibile riscontrare:

- Scena 0, in questo caso nella scena sono presenti le scritte sia in italiano che in inglese per indicare all'utente di selezionare la lingua. Quattro sfere, in rotazione sul loro asse verticale, caratterizzate da una grafica molto simile alla sfera celeste tenuta in mano da Colocci nell'affresco. All'interno di queste sfere sono stati inseriti degli *sphere collider*, al fine di intercettare la presenza della mano virtuale per attivare l'interazione ed eseguire il cambio di scena per iniziare l'esperienza. Lo sfondo utilizzato in background è un semplice sfondo blu e per rendere l'ambiente più vivo e coinvolgente è stato aggiunto un sistema particellare, come a simulare, ancora una volta il globo celeste di Angelo Colocci.
- Scena 1-2-3-4-, queste scene sono molto più semplici, non presentano oggetti 3D al loro interno, ma unicamente il sistema di riproduzione video settato al fine di proiettare in

background i video. Tale sistema si costituisce di *videoplayer*, *rendertexture* e *material* (*skybox*). Il *videoplayer*, specifica cosa deve esser riprodotto (video) e dove riprodurlo (*rendertexture*); il *rendertexture* è stato utilizzato come texture del *material* (*skybox*) utilizzato come sfondo dell'ambiente virtuale, così il video è stato utilizzato effettivamente come sfondo. In queste scene è stato realizzato uno script C# (*c-sharp*) per temporizzare il ritorno alla scena 'home'.



Una volta costruita tutta la struttura software dell'applicazione è stata eseguita la *build* generando l'*apk* utilizzando gli *sdk*, *ndk* e *jdk* Android. Arrivando ad avere un'applicazione finale dal peso complessivo di 2 GB.

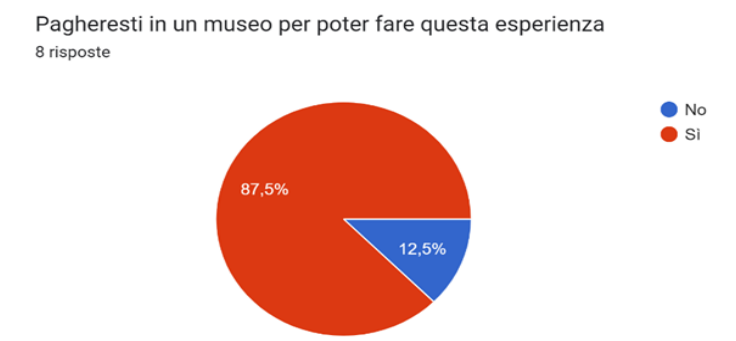
Fig.45
Scheramta Unity
scena 1.

Fig.46
Utilizzo hand
tracking.

Training e test

Ottenuta la stesura finale dell'applicativo sono stati eseguiti una serie di test d'utilizzo interni al gruppo di lavoro al fine di arrivare a una prima versione funzionante e completa dell'applicazione. Non sono stati riscontrati grossi problemi a livello di funzionamento, data anche la semplicità della struttura, ma sono emerse diverse problematiche in relazione all'utilizzo dello strumento, soprattutto in relazione al tracciamento generale del dispositivo andando in sofferenza in determinate condizioni d'illuminazione o se, manovrando il dispositivo, vengono coperte le camere facendo azzerare il tracciamento. Da queste prime esperienze, quindi, è stato possibile apprendere cosa insegnare all'operatore museale al fine di adoperare correttamente lo strumento. La semplicità d'utilizzo pensata appositamente per una fruizione museale ha facilitato notevolmente il lavoro degli operatori, riuscendo a gestire agilmente tre sedute contemporanee. Dalla giornata di test pilota eseguiti con gli studenti del corso di laurea, sono stati estrapolati i seguenti dati: la narrazione e senso di immersione sono stati gli aspetti maggiormente apprezzati, al contrario, l'interazione è stata considerata basilare. Il 12,5% ha ammesso che non pagherebbe per effettuare questa esperienza, mentre il restante 87,5 pagherebbe (Figura 47). Conclusi i lavori di allestimento della mostra è stato predisposto un giorno di training degli operatori museali, in questa giornata è stato insegnato loro come funziona il dispositivo immersivo, come accenderlo, maneggiarlo, indossarlo e farlo indossare, come creare l'area di gioco e infine come trovare e attivare l'applicazione creata. L'esperienza è stata valutata grazie a osservazioni dirette degli utenti nel museo. Un'alta percentuale di visitatori (91%) ha visto il film digitale in modalità vr. Dalle osservazioni è risultato che solo il 6% ha avuto bisogno dell'aiuto dell'operatore. Un problema che era principalmente legato alla scarsa illuminazione della stanza che colpisce il rilevamento della mano da parte delle telecamere del visore, suggerendo così la necessità di una maggior collaborazione tra chi sviluppa l'applicativo e il progettista dell'allestimento. Questa prima esperienza è stata in grado di mostrare un primo lavoro di ibridazione dei linguaggi, collegando il mondo della pittura e dell'architettura con il linguaggio del cinema fino ad arrivare a toccare modi nativamente digitali come quello del gaming. Il modello 3D realizzato è stato utilizzato anche per completare l'allestimento museale mediante la realizzazione di una stampa 3D del modello, dimostrando così anche la versatilità di tale processo arrivando a conferire nuovamente dimensione fisica, ma mantenendo la tridimensionalità

(Figura 48). Il digitale è stato utilizzato anche come pretesto, ma soprattutto come strumento d'indagine, arrivando così a rinnovare e innovare il rapporto intimo tra individuo e arte, dando nuova vita a una delle opere più famose del rinascimento italiano e forse più famose al mondo e cercando di ricreare, in chiave contemporanea e digitale quell'aura di cui parlava Benjamin.



Caso studio 2: la tomba della regina di sirolo-numana

Il secondo caso sviluppato riguarda la realizzazione di un'esperienza di fruizione virtuale circa un complesso funerario Piceno, situato nell'attuale località di Sirolo e Numana in provincia di Ancona (Figura 49). Questo lavoro mostra un peculiare approccio alla valorizzazione del patrimonio culturale e nello specifico del patrimonio archeologico. La realizzazione di questo V.I.M si inserisce in un progetto più ampio 'Archeopaesaggio

Fig.47
Risposte al pagamento per effettuare l'esperienza.

Fig.48
Allestimento, con dettaglio sulla stampa 3D della Ricostruzione della Scuola d'Atene.

al Conero', nuovi spazi e nuove pratiche per scoprire, conservare il territorio del parco'. Promosso dall'ente regionale Parco del Conero e finalizzato allo sviluppo del turismo sostenibile, patrocinato da Cariverona, volto alla valorizzazione territoriale del parco del Conero e delle sue risorse archeologiche (Clini et al, 2024).



In località "I Pini" a Sirolo, nel 1980, furono individuati per la prima volta dalla soprintendenza i resti di questa necropoli Picena (Finocchi, 2018). Nel 1989 un ampio settore di quest'area fu indagato sistematicamente dal funzionario dott. Maurizio Landolfi (Landolfi, 2000), che mise in luce la superficie di tre circoli funerari. Nel corso di quella campagna di scavo fu esplorato il circolo centrale, delimitato da un fossato del diametro di oltre 40 m, il più grande mai rinvenuto nelle necropoli dell'antica Numana. All'interno del circolo furono scoperte quattro fosse (A-D), contenenti rispettivamente la ricchissima sepoltura di una donna, deposta al di sotto di due carri (fossa A); un imponente set da banchetto con ceramiche e bronzi (fossa B); i resti di due mule (fossa C) e di un individuo deceduto in età infantile (fossa D). I dati stratigrafici e i materiali contenuti nelle fosse hanno indotto a considerare le fosse A-C come il risultato di un'unica azione di deposizione, riferibile ai decenni finali del VI secolo a.C. Meno chiaro è invece il rapporto con la fossa D, il cui corredo sembra indicare un momento cronologico leggermente successivo. L'enorme sfarzo esibito attraverso i materiali delle fosse A e B ha suggerito per la defunta un ruolo di prim'ordine all'interno della propria comunità, simbolicamente indicato con il titolo di 'regina' (Landolfi, 2012). L'esperienza virtuale realizzata si concentra unicamente sulle prime due tombe (A-B), volendo indagare la figura della regina Picena. All'interno della tomba

Fig.49
Vista dall'alto del sito archeologico più referenziazione geografica.

A, di circa 5 x 2 m, furono scoperti i rivestimenti metallici di due carri, in parte smontati e collocati alle estremità della sepoltura. Il restauro e lo studio approfondito dei rivestimenti e della loro posizione all'interno della fossa hanno permesso di identificare nei due veicoli un calesse (carro A) e una biga (carro B), le cui caratteristiche tecnologiche sembrano indicarne una fabbricazione di molti decenni precedente alla loro deposizione. Sotto i due carri, adagiati verosimilmente su un ripiano ligneo, fu individuata la sepoltura di un individuo di genere femminile, il cui corpo era letteralmente ricoperto e circondato da ornamenti. Circa un migliaio di fibule, la maggior parte delle quali con rivestimenti in osso, erano disposte oltre il capo e sul corpo della defunta. Nella zona al di sotto della vita e al di là dei piedi giacevano invece numerosi pendenti e pettorali, realizzati con elementi in bronzo, ferro, ambra, avorio, osso e pasta vitrea. La defunta era accompagnata da oggetti di prestigio, come un ventaglio, due paia di sandali e soprattutto un recipiente in argento (*phiale*) con ombelicatura interna rivestita in lamina dorata. Attrezzi per la filatura (un fuso, una fusaiola e molti rocchetti) e per la tessitura (resti di un probabile telaio) ne caratterizzavano ulteriormente il ruolo (Bardelli, 2021; Bardelli et al., 2019). A fianco della sepoltura della Regina fu rinvenuta una fossa di dimensioni leggermente inferiori (ca. 4 x 3 m), rinforzata da una struttura con pali e copertura in legno. Al suo interno erano collocati circa 200 oggetti, in parte accatastati e sovrapposti. A essi appartengono un centinaio di ceramiche di fabbricazione locale, con varie forme per diverse funzioni (brocche, coppe, olle, vasi multipli, grandi giare). Il nucleo di ceramiche più pregiate è costituito da una trentina di vasi greci (crateri, kylikes, coppe, olpai, lekythoi), molti dei quali con decorazione a figure nere. Si tratta del più antico set di ceramiche di questo tipo rinvenuto nella Regione Marche, ciò permette una datazione dell'intero complesso funerario agli anni compresi tra il 520 e il 500 a.C. Insieme al vasellame ceramico erano deposti nella fossa oltre trenta contenitori e strumenti da banchetto in bronzo, tra i quali 12 ciste, 10 brocche per il vino di vari tipi, bacili e soprattutto un tripode e un colino (*infundibulum*) di produzione etrusca. Oltre allo strumentario per la preparazione e la cottura della carne (coltelli, alari e spiedi) era presente un sofisticato arredo in ferro con probabile funzione di incensiere. L'assoluto prestigio del set da banchetto era impreziosito dalla presenza di un letto ligneo con intarsi in avorio e ambra (*kline*), anch'esso importato dalla Grecia (Bardelli, 2022; Landolfi, 1998) (Figura 50). Tornando ora allo sviluppo operativo dell'esperienza, anche questo secondo caso può essere discretizzato seguendo le fasi di creazione di

un prodotto audiovisivo, dividendo il lavoro in pre-produzione; produzione, post-produzione, test e training.



Pre-produzione

In questo lavoro si è voluto indagare le possibilità di fruizione emozionale mediante esperienze di realtà immersiva al fine di valorizzare e vivere il patrimonio archeologico. Nello specifico questo caso presenta diversi elementi narrativamente adatti a questo obiettivo, trattandosi di un sito funerario caratterizzato dalla presenza della sepoltura di una figura misteriosa, ma allo stesso tempo di notevole rilevanza dato il suo ricco corredo funerario. Esso rappresenta un altro elemento di grande importanza per estrapolare spunti narrativi, infatti, molti di questi oggetti attualmente sono conservati all'interno dell'antiquarium di Numana (AN), quindi è stato possibile progettare l'acquisizione digitale di tali reperti finalizzata non solo a una loro fruizione virtuale, ma anche alla realizzazione di una documentazione 3D ad alta risoluzione della collezione. In fase di pre-produzione quindi sono state messe a sistema tutte le scelte di carattere narrativo e programmata la realizzazione di tutti i contenuti secondo i seguenti passi:

- *Script*: analizzando le tematiche generali e i punti d'interesse maggiormente rilevanti, sono stati individuati quattro temi, ossia: il sito archeologico, la sepoltura, la regina e i reperti archeologici. Lo scopo primario della struttura narrativa riguarda una nuova contestualizzazione storica archeologica degli oggetti presenti oggi all'antiquarium di Numana, mediante un'operazione virtuale di ricostruzione del sito originario ricollegando non solo alla figura della regina Picena, ma anche al sistema territoriale del parco del Conero.
- *Storytelling*: individuate le tematiche principali è stato pos-

Fig.50
La fossa A (a sinistra) e la fossa B (a destra) della "Tomba della Regina" in corso di scavo (Clini et al, 2024).

sibile progettare la strategia narrativa. In questo caso si è deciso di mettere in scena un ipotetico incontro tra l'utente e lo spirito della regina. Al fine di rendere più coinvolgente e immersiva l'esperienza la regina si rivolge direttamente all'utente sollecitandolo a seguirla alla scoperta della propria sepoltura.

- *Storyboard*: fissati i temi e la strategia narrativa si è proceduto con l'individuazione di sequenze narrative. L'esperienza è stata divisa in cinque scene, volte alla creazione di un'atmosfera emozionale ed evocativa. L'esperienza si apre in un ambiente completamente buio dove è presente unicamente il suo spirito, rappresentato da un globo luminoso e animato, introducendo il tema della sepoltura. La scena successiva è ambientata all'interno della prima tomba, sempre in compagnia del globo luminoso (fossa A). Nello specifico viene descritta la sepoltura della protagonista, descrivendo i ricchi oggetti personali, il calesse e uno dei due carri da guerra rinvenuti. La terza scena riprende la prima, ugualmente scura e caratterizzata dalla presenza dello spirito della Regina. Questa scena funge proprio da congiunzione tra le due introducendo la fossa B, ossia il banchetto. Nella scena successiva, la quarta, il tema principale è la descrizione degli oggetti ceramici e bronzei rinvenuti, anche in questo caso lo spirito è presente e descrive gli oggetti presenti facendo riferimento al mito greco poiché molti degli oggetti presenti risultano decorati con scene mitologiche. In questa scena, nell'incedere dei reperti, è stata prevista anche una piccola interazione permettendo all'utente di poter prendere con mano l'ultimo reperto descritto. Nell'ultima parte l'utente si trova al difuori delle due tombe e le osserva dall'alto, in questo caso l'utente, trovandosi fuori dalla tomba, non è più accompagnato visivamente dallo spirito della regina, ma solo dalla voce. Con l'incedere della narrazione l'utente viene fatto salire in cielo contestualizzando dapprima il sito della sepoltura con l'intera area archeologica e in seguito con il sistema esteso del parco del Conero.

- *Animatic*: in seguito alla definizione delle scene principali e le tematiche trattate in esse è stato possibile progettare i movimenti e le animazioni presenti nelle varie scene. Analizzando la scena ambientata nella tomba A, oltre all'animazione della luce legata al parlato è stata progettata il movimento

di quest'ultima al fine di guidare lo sguardo dell'utente, partendo dall'alto il globo si avvicina alla sepoltura per poi tornare al suo punto di partenza. A questo punto viene fatto comparire dal basso il calesse e fatto ruotare e avvicinare al visitatore. Nella scena relativa alla fossa B è stato previsto sia il movimento dello spirito della regina che di una selezione di reperti archeologici. Nello specifico la regina si avvicina al reperto, e lo descrive, l'oggetto individuato si avvicina all'osservatore, sempre per facilitarne l'osservazione, e una volta ultimata la descrizione, essa torna al suo posto. In generale gli oggetti sono disposti all'interno della tomba in una conformazione utile alla loro visualizzazione, ma gradualmente e in gruppi, seguendo la narrazione, tornano nella loro posizione di ritrovamento.

L'abbondante presenza di animazioni ha comportato una scelta pratica in termini di fruizione dell'esperienza, considerando l'esiguo spazio delle due fosse, per evitare che nel movimento animato qualche oggetto possa urtare 'virtualmente' l'utente si è deciso di pianificare l'esperienza utente da seduto. Al fine di potenziare il coinvolgimento emozionale è stata conferita grande importanza alla sfera sonora, nello specifico è stata prevista la realizzazione di una colonna sonora originale. Riguardo la programmazione produttiva dei contenuti è importante sottolineare quindi la necessità di pianificare le acquisizioni 3D dei reperti dell'antiquarium; la realizzazione dei testi e della sceneggiatura effettiva; le registrazioni relative al doppiaggio della voce della regina e la composizione, esecuzione e registrazione delle musiche. La scelta di stilizzare la rappresentazione della regina sotto forma di una luce animata è stata dettata sia da motivazioni di carattere pratico-realizzative che filologiche. Ipotizzare una riproposizione in chiave realistica della figura della regina avrebbe comportato un ingente lavoro di ricostruzione archeologica degli indumenti e oggetti personali rinvenuti all'interno della sua sepoltura, come fibule e pendagli di varia forma e genere, che seppur effettivamente interessante e complesso da un punto di vista scientifico, avrebbe comportato un eccessivo costo in termini di produzione di costumi di scena. Per queste motivazioni si è scelto di rappresentarla in modo totalmente virtuale. Per la medesima motivazione, la scelta di ricostruire e animare una figura umana avrebbe comportato l'aumento dei costi di produzione, dovendo utilizzare tecniche avanzate e costose di *motion capture*, o animazione diretta e manuale del personaggio, andando a espandere in modo notevole le risorse richieste. L'as-

senza di riprese cinematografiche, inoltre, conferisce la possibilità di gestire l'intera esperienza di fruizione tramite l'utilizzo di ambiente 3D immersivo, evitando l'utilizzo di panoramiche, avvicinando così di fatto non solo la fase di produzione, ma anche la fruizione stessa al mondo del gaming. Questo aspetto ha permesso di gestire l'esperienza di fruizione di uno spazio immersivo 3D, giungendo così a una fruizione di carattere stereoscopico, la capacità di avere 6 gradi di libertà nel movimento e la possibilità di interagire direttamente con l'ambiente virtuale.

Produzione

Le fasi di produzione riguardano la generazione di tutti i contenuti necessari alla realizzazione del prodotto finale. È possibile in questo caso svolgere una prima divisione tematica dividendo produzione visiva, dalla produzione della sfera sonora, La sfera visiva è stata realizzata direttamente mediante un workflow operativo prettamente digitale volto alla realizzazione di modelli 3D; mentre la sfera uditiva è stata realizzata mediante registrazione dal vero. Anche in questo caso, come nel caso precedentemente descritto, si sono instaurati importanti e proficui rapporti collaborativi con professionalità operanti nel settore dell'intrattenimento audiovisivo. Riguardo la produzione dei contenuti visivi, come è stato precedentemente anticipato, l'output principale, anche in questo caso, è stato la realizzazione di una ricostruzione virtuale 3D del sito funerario. La principale caratteristica che contraddistingue questo lavoro è la presenza di reperti attualmente fruibili e accessibili, mentre il luogo della sepoltura non lo è più, poiché non solo gli scavi, effettuati in sede d'indagine archeologica, sono stati richiusi, ma soprattutto, a causa del deterioramento dovuto al tempo, non sono giunti a noi resti dell'involucro ligneo delle due tombe. Questa duplice condizione ha suggerito una metodica realizzativa ibrida, proponendo modellazione *reality-based* per quanto riguarda i reperti archeologici e la modellazione diretta per ciò che concerne la struttura lignea delle due tombe. L'antiquarium di Numana conserva oggi quasi la totalità dei reperti rinvenuti all'interno delle due tombe, divisi tra oggetti d'uso personale, ceramiche, suppellettili in bronzo e i resti metallici del calesse. Al fine di ottimizzare la fase d'acquisizione digitalizzazione dei reperti è stata compiuta una selezione, scegliendo tra queste tre categorie i pezzi più importanti e meglio conservati. L'acquisizione digitale dei reperti è stata eseguita durante la pandemia di Covid-19, per questo motivo è stato difficoltoso riuscire a otte-

nere le autorizzazioni necessarie per accedere ai locali dell'antiquarium. Sono state concesse tre giornate d'acquisizione per acquisire tutti i reperti selezionati, all'interno delle quali sono stati digitalizzati in totale ventisette reperti di cui cinque ceramiche locali, sedici ceramiche greche, tre suppellettili in bronzo, due ornamenti personali e il calesse. Data la matericità prevalentemente opaca degli oggetti e le dimensioni contenute dei reperti selezionati, all'interno dell'ordine delle decine di centimetri, si è deciso di procedere mediante tecniche Structure from Motion. Le tecniche SfM consentono di acquisire agilmente oggetti reali arrivando anche a precisioni del decimo del millimetro, contenendo i costi relativi alla strumentazione utilizzata, dato l'utilizzo prevalente di sensori fotografici dal costo di poche migliaia di euro. Il *workflow* volto alla realizzazione di modelli 3D mediante SfM può essere discretizzato in tre fasi operative, la progettazione; l'acquisizione e l'elaborazione dei dati. Nella fase di progettazione sono stati studiati gli oggetti da rilevare, e in relazione alle loro caratteristiche è stato realizzato un progetto d'acquisizione. Mettendo a sistema tutte le caratteristiche geometriche degli oggetti con le specifiche della strumentazione (dimensione del sensore e distanza focale) e delle condizioni di presa (distanza di presa e sovrapposizione tra uno scatto e l'altro *overlapping*), valutando il numero di scatti è stata ottenuta la risoluzione dell'acquisizione. Grazie alle ridotte dimensioni fisiche degli oggetti è stato possibile progettare l'acquisizione prevedendo la rotazione del reperto sul proprio asse verticale e mantenendo la camera fissa. Per massimizzare i tempi d'acquisizione e le potenzialità del sensore, la distanza di presa è stata fatta variare al fine di occupare l'intera superficie del sensore dall'oggetto. Per avere un ottimo grado di sovrapposizione (superiore al 70%) è stato fatto ruotare il reperto di 30 gradi tra uno scatto e l'altro eseguendo 4 giri: uno posizionando la camera perpendicolare all'oggetto; altri due giri posizionando la camera a +45 gradi e -45 gradi, rispetto al giro perpendicolare e alzando o abbassando anche il punto di presa di +40 cm e -40 cm. L'ultimo giro è stato effettuato posizionando la camera nella posizione +40 cm e inclinazione -45 gradi, ma con l'oggetto capovolto, qualora possibile, utile all'acquisizione del fondo dell'oggetto. In definitiva sono stati previsti 48 scatti totali, ognuno dei quali caratterizzato da una risoluzione di 6024x4024 (Figura 51). Considerando una distanza media dall'oggetto di un metro è possibile stimare un GSD medio di 0,4 mm. Ottenuto il progetto di presa è stato possibile procedere con la fase d'acquisizione, utilizzando la seguente strumentazione:

- Sony α9, camera digitale *full-frame*, con un'ottica Sony FE F 2,8.
- Due pannelli LED, importante per conferire un'illuminazione omogenea e diffusa.
- Filtro polarizzatore Hoya; essenziale per ridurre al massimo i riflessi causati dal sistema d'illuminazione sugli oggetti.
- Uno *slider* fotografico Photographic Syrp Genie. Questo strumento è stato utilissimo per velocizzare le fasi di presa, automatizzando la rotazione dell'oggetto.
- Tre stativi fotografici per Manfrotto, due per sorreggere i pannelli LED e uno per la camera fotografica.
- Un box fotografico, utile a rendere omogeneo lo sfondo di ogni singolo scatto, importante per ottimizzare il lavoro in fase di elaborazione dati. Inoltre, rende omogenea e diffusa la luce, riducendo i riflessi.
- Un *color checker* per il bilanciamento del colore.
- Un tablet Samsung TAB 3, utilizzato per manovrare dalla distanza il piatto rotante e gli scatti della camera mediante l'applicazione Syrp.



Fig.51
Disposizione dei
punti di presa in
relazione al reperto.

Il set d'acquisizione era quindi costituito da un *softbox* al cui interno è stato inserito il piatto rotante. All'esterno sono poi stati posti i pannelli LED con inclinazione d'illuminazione pari a 45 gradi e la camera fotografica su treppiede. Data la condizione d'illuminazione, la necessità di scattare con ISO bassi (ISO 100), per ridurre l'incidenza del rumore, e diaframma molto chiuso f20, per avere tutto l'oggetto a fuoco, sono stati utilizzati tempi lunghi di scatto in media 3-4 secondi per ogni presa. Questa scelta comporta un tempo minimo d'acquisizione complessivo di 3 minuti circa a cui vanno sommati il tempo di movimentazione del reperto e cambio del punto presa della camera, il tutto ottimizzato dall'automazione della rotazione e dello scatto. Grazie all'utilizzo dell'app Syrp e del tablet Samsung TAB, per ogni giro è stato impostato il grado di rotazione e il tempo di scatto al fine di sincronizzare rotazione e scatto (Figura 52). Tutte le immagini scattate sono state memorizzate in formato RAW (Sony Alpha Raw), file non compressi senza perdita di dati, adatti all'editing progressivo delle immagini. Conclusa la fase d'acquisizione si è passati alla loro elaborazione. Tutti gli scatti sono stati editati mediante l'estensione di *Adobe Photoshop Camera Raw*. Nello specifico è stato eseguito un bilanciamento del colore, aumentato un po' il contrasto, la nitidezza, eliminate le aberrazioni cromatiche e prospettiche della lente, infine esportati in formato JPEG. L'insieme delle immagini editate sono state in seguito importate all'interno del software *Agisoft Metashape* al fine di ottenere i modelli *mesh* ad alta risoluzione.



Fig.52
Set d'acquisizione
SFM, Antiquarium
di Numana.

Il *workflow* eseguito all'interno di questo software è caratterizzato da quattro fasi (Figura 53):

- Allineamento delle foto, vengono utilizzati algoritmi di *feature detection*, al fine di estrarre i punti comuni e risolvere gli allineamenti. Per facilitare questo processo sono state realizzate in modo automatico delle maschere al fine di rimuovere lo sfondo. In alcuni casi sono stati inseriti manualmente dei punti di controllo comuni, mediante *marker*, per allineare delle immagini escluse dall'allineamento automatico. L'output finale dell'allineamento è una nuvola di punti sparsa inserita in un sistema di coordinate locali.
- Generazione della nuvola densa; in questa fase vengono utilizzati algoritmi di *features extraction*. Partendo dai punti individuati nella fase precedente vengono estratti ulteriori punti al fine di rendere la nuvola di punti più densa descrivendo in modo completo l'oggetto.
- Generazione della *mesh*, ottenuta la nuvola densa, i punti individuati sono stati interpolati al fine di ottenere un modello *mesh* completo. Al fine di migliorare la geometria i modelli sono stati importati all'interno del software *Geomagic* per ridurre imprecisioni e rumore mediante procedimenti automatizzati.
- Nell'ultima fase vengono estratte le informazioni relative al colore dell'oggetto dalle immagini allineate. Viene generato un sistema di coordinate uv dell'oggetto digitalizzato sulla base del quale generare la texture. In molti casi la generazione del sistema di coordinate uv è stata eseguita all'interno del software *Blender* al fine di ottenere un sistema regolare e controllato essenziale per avere una risoluzione omogenea nella visualizzazione.

Non per tutti i reperti è stato possibile seguire questo iter al fine di ottenere un modello completo e finito.

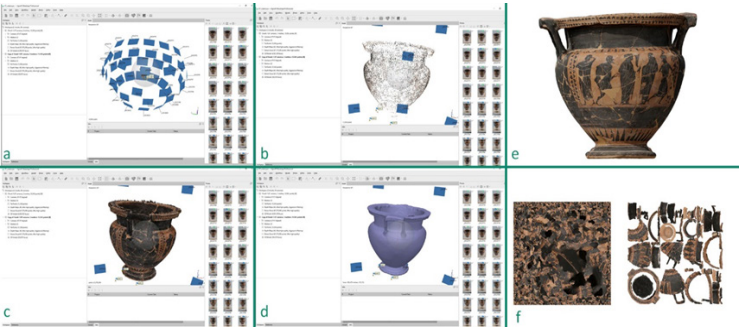


Fig.53
Workflow SFM:
a) allineamento delle foto; B) Nuvola di punti sparsa; c) Nuvola densa; d) modello mesh; e) Modello Texturizzato; f) texture generate in Metashape in modo automatico a sinistra, a destra con UV regolare manuale realizzato in Blender.

Molti oggetti, soprattutto le ceramiche, si sono rivelati particolarmente complesse circa la ricostruzione della parte inferiore del vaso. La laccatura del materiale e l'angolo di riflessione della luce accentuati in confronto al punto di presa, hanno reso difficile il riconoscimento dei punti simili, rendendo la ricostruzione di quelle parti ostica da effettuare con procedure automatizzate. Per risolvere queste problematiche sono stati aggiunti più punti *keypoint*, nel caso di importanti mancanze esse sono state colmate manualmente mediante il software *Geomagic*; mentre, nel caso in cui l'intero basamento è risultato mancante, esso è stato ricostruito manualmente mediante il software *Blender*. Sono stati estratti e ridisegnati i profili delle parti mancanti mediante curve di Bézier, creato un solido di rivoluzione, e unito all'intero modello. Completate le parti mancanti il modello 3D è stato importato nuovamente in *Metashape* al fine di realizzarne le textures (Figura 54). Questo procedimento è stato eseguito per tutti gli oggetti della collezione, l'unico per cui è stato previsto un iter diverso è stato il calesse. Non potendo estrarre i resti metallici delle ruote e del timone dall'allestimento si è deciso di eseguire un'acquisizione SFM.

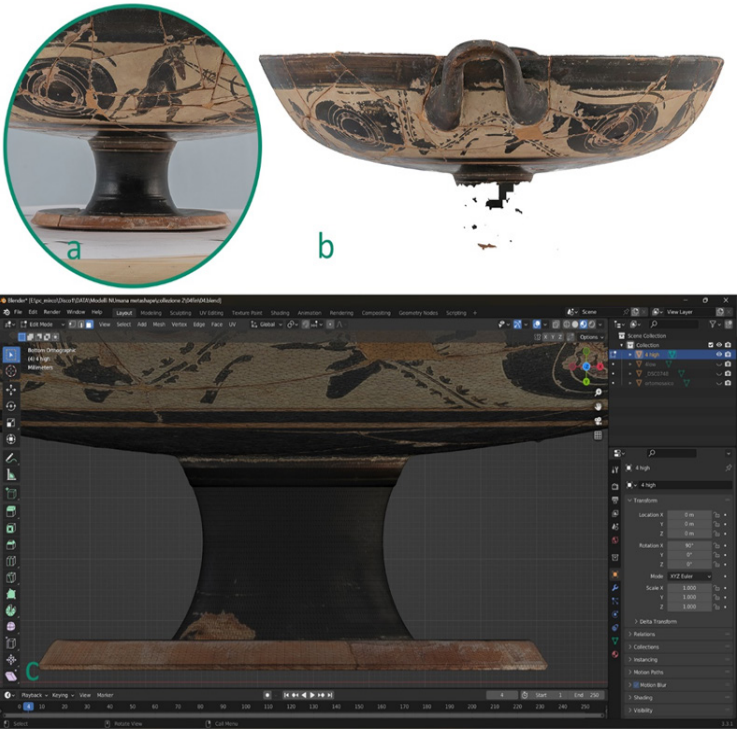
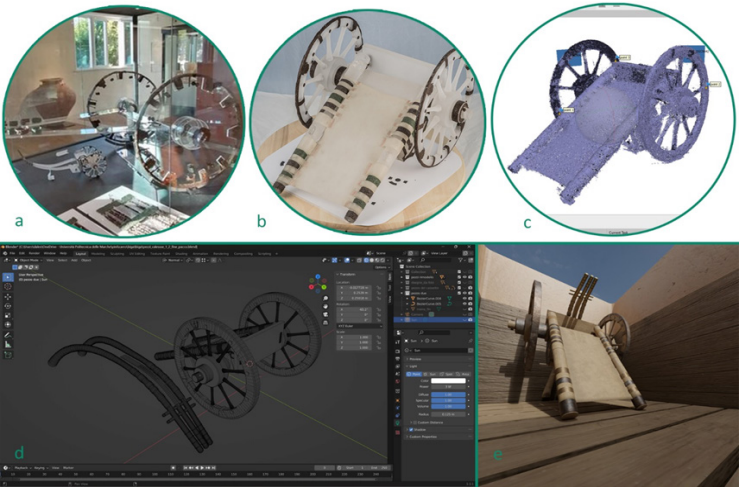


Fig.54
Modellazione manuale del piedistallo: a) foto del reperto, dettaglio sul riflesso; b) modello ricostruito con piedistallo mancante; c) ricostruzione manuale in Blender.

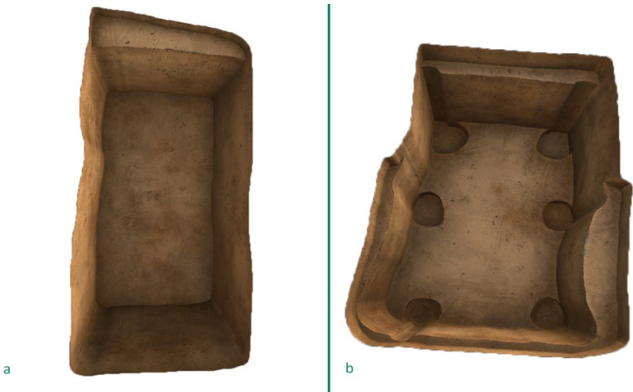
Si è partiti da un modellino fisico realizzato precedentemente e utilizzato nell'antiquarium per finalità didattiche. Tale riproduzione si caratterizzava per la presenza di numerose parti in materiale semitraslucido e altre in ombra; quindi, non è stato possibile ottenerne una digitalizzazione completa e finita. Per questa ragione il modello ottenuto mediante tecnica SFM è stato usato come base per una sua modellazione manuale 3D mediante il software *Blender*, e in seguito texturizzato in *Adobe Substance Painter* (Figura 55).



Riguardo la realizzazione delle due tombe (A e B), come già anticipato, non è stato possibile acquisire il sito archeologico; quindi, si è proceduto mediante modellazione diretta in *Blender*. Il lavoro di modellazione ha visto come dato di partenza le relazioni di scavo eseguite a mano e risalenti alla fine degli anni '90 del '900. Essendo rilievi cartacei essi sono stati dapprima vettorializzati in Autodesk Autocad, e in seguito modellati in 3D, mediante semplice estrusione di volumi e profili. La prima versione realizzata, caratterizzata solo dal negativo della fossa scavata nella terra è stata utilizzata per validarne dimensioni, conformazione e caratteristiche cromatiche. Questa prima fase realizzativa è stata molto utile per la ricostruzione della fossa B, caratterizzata dalla presenza di tracce di sostegni lignei, il modello 3D è stato utile per confermarne l'effettiva presenza e disposizione (Figura 56). Ultimata la ricostruzione delle fosse sono stati realizzati gli involucri lignei. Partendo dalla ricostru-

Fig.55
Modellazione del calesse: a) foto dei resti del calesse nell'allestimento; b) foto del modellino; c) Ricostruzione fotogrammetrica; d) modellazione diretta; e) visualizzazione finale nel suo contesto.

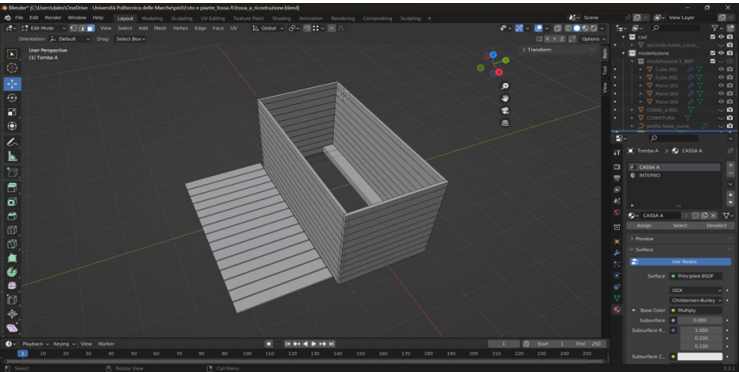
zione già effettuata delle fosse, sono state regolarizzate nelle misure delle singole parti, al fine di avere una struttura ordinata. Questa operazione è risultata fondamentale per eliminare tutti i cedimenti del terreno avvenuti nei secoli, a partire dal collasso della struttura lignea.



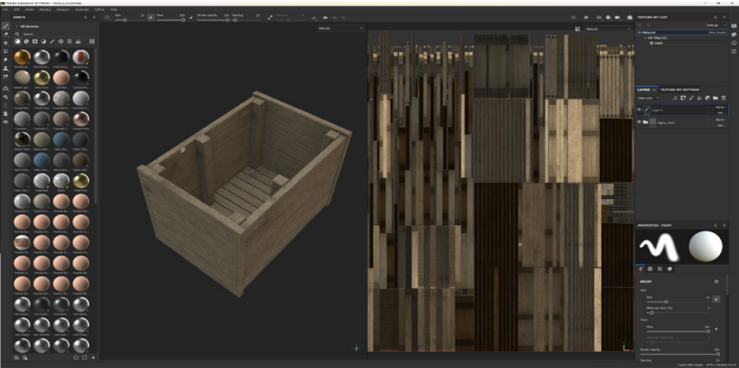
Analizzando la struttura della tomba A essa si caratterizza per la presenza di un doppio fondo, un livello più basso in cui era stata posta la salma della regina con il suo corredo personale e un livello superiore su cui erano stati posti il carro e il calesse. Questa particolare conformazione è stata individuata analizzando la relazione e le foto di scavo, notando una peculiare differenza tra il livello stratigrafico di rinvenimento del carro e del calesse, e quello della sepoltura della regina, rinvenuta nettamente più in profondità. Per dare una dimensione visiva a tale considerazione sono stati inseriti degli elementi lignei di 0.4 metri di spessore e sopra essi è stato realizzato un tavolato ligneo. A contatto con la terra sono stati inseriti degli elementi in legno, costituendo così le pareti perimetrali. Gli elementi lignei sono stati modellati mediante semplice estrusione, arrotondati i bordi tramite comando Bevel per darne un aspetto più naturale e moltiplicate mediante array (Figura 57). Infine è stato texturizzato in Substance Painter. Per quanto riguarda la modellazione della tomba B anche in questo caso è stata effettuata una regolarizzazione degli elementi, soprattutto considerando la disposizione e dimensione dei sostegni lignei. La presenza di oggetti quasi totalmente distrutti altri integri e disposti su livelli stratigrafici differenti rappresenta una delle peculiarità emerse dall'analisi archeologica degli scavi. La presenza di diverse quo-

Fig.56
Ricostruzione 3D delle Fosse: a) fossa A; b) fossa B.

te stratigrafiche ha suggerito la presenza di mensole lignee su cui furono poggiati gli oggetti. Il ritrovamento di reperti completamente distrutti o schiacciati, e altri integri ha suggerito la presenza di un qualche elemento che abbia potuto fungere da protezione per i reperti giunti fino in buono stato conservativo.



In questo caso si è fatto riferimento alla consuetudine etrusca di inserire nelle sepolture anche mobilio come, ad esempio, tavoli per allocare oggetti, seguendo questa considerazione è stato inserito nella ricostruzione un tavolo ligneo. Tutta la modellazione è avvenuta in modo estremamente semplice seguendo lo stesso iter della tomba A utilizzando: estrusioni, *bevel* e *array*, il tutto texturizzato in Substance Painter (Figura 58).



Conclusa la realizzazione della tomba B è stata così ottenuta

Fig.57
Ricostruzione tomba A.

Fig.58
Texturizzazione in Substance Painter della tomba B.

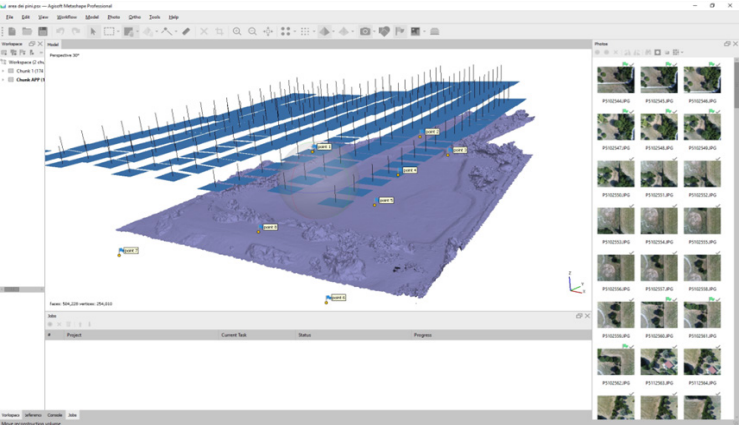
una prima versione ricostruttiva del sito archeologico. Sono stati posizionati i modelli ottenuti mediante tecniche *image-based* nell'ambiente realizzato mediante tecniche di modellazione diretta. Anche in questo caso per estrapolare le prime visualizzazioni sono state inserite una camera virtuale e il sistema d'illuminazione è stato realizzato mediante l'utilizzo d'immagini HDRI panoramiche. Tutto il lavoro d'indagine archeologica è stato eseguito in stretta e proficua collaborazione con l'archeologo Giacomo Bardelli, ricercatore presso il Römisch-Germanisches Museum (Figura 59).



Nonostante l'impossibilità d'indagare direttamente lo scavo archeologico, per concludere l'indagine ricostruttiva legata al sito archeologico, sono state eseguite acquisizioni sia TLS che SFM da drone dell'intera area. È stato utilizzato un laser scanner Leica P40, eseguendo cinque scansioni, una per ogni lato del complesso delle due tombe e una tra le due sepolture. Ogni presa laser è stata accompagnata dalla realizzazione di una foto panoramica, utilizzando una Sony Alpha 9, obiettivo *fish eye* da 14 mm e testa sferica Nodal Ninja. L'obiettivo *fish eye* ha permesso di realizzare immagini panoramiche a 360 gradi effettuando un ridotto numero di scatti (12), unite mediante il software *Pano2VR*. In aggiunta all'acquisizione laser sono state eseguite anche delle acquisizioni fotogrammetriche e panoramiche (Figura 60) mediante l'utilizzo di Droni (Figura 61). Come è facilmente intuibile queste acquisizioni non sono utili direttamente alla ricostruzione archeologica del sito poiché rimangono visibili solo le tracce esterne delle due tombe. Si è deciso quindi di realizzare tali acquisizioni sia per documentare uno stato di fatto, sia per avere una base digitale per contestualizzare la ricostruzio-

Fig.59
Ricostruzione virtuale dell'intero complesso.

ne archeologica delle due tombe con l'intero sito e il territorio. In concomitanza con la realizzazione della sfera visiva si sono avviati i lavori per la composizione della colonna sonora e la stesura della sceneggiatura.



Riguardo la realizzazione delle musiche è stata instaurata un'interessante collaborazione con il musicista, compositore ed etnomusicologo dell'università La Sapienza di Roma Francesco De Melis. Sono state composte in totale 10 tracce sonore, caratterizzate dall'utilizzo, anche contemporaneo, di pianoforte, clavicembalo e organo, al fine di dare un tocco solenne rispecchiando il retaggio nobiliare della protagonista. Per rappresentare e produrre rimandi alla figura della regina, direttamente ispirato al suo corredo, sono stati inseriti numerosi suoni e musicalità

Fig.60
Rilievo SFM da drone dell'intero sito archeologico.

Fig.61
Immagine panoramica da drone del contesto archeologico.

tintinnanti 'ghiribizzi'. Infine per dare un tocco mistico ed evocativo il tutto è stato accompagnato da vocalizzi in proto-latino (antico-piceno), verificato in collaborazione con l'archeologa Valentina Belfiore funzionaria del Polo Museale dell'Abruzzo. Composte le musiche, sono state eseguite dal pianista Enrico Zanisi e la cantante Tiziana Cossignani e registrate in studio professionale. La sceneggiatura è stata scritta in collaborazione con la sceneggiatrice e attrice Lucia Palozzi di ATGP teatro pirata. Seguendo lo schema narrativo realizzato, in fase preliminare sono stati scritti i testi relativi alle 5 scene previste. Anche in questo lavoro i testi sono stati verificati e validati dall'archeologo Giacomo Bardelli. Infine, il monologo della regina è stato registrato in studio, interpretato da Lucia Palozzi.

Post-produzione

Realizzati tutti i contenuti audiovisivi relativi all'esperienza di fruizione si è proceduto con la realizzazione dell'applicativo finale. Come argomentato in precedenza, per la fruizione immersiva dell'esperienza è stato selezionato il dispositivo HMD Meta quest 2 e Meta quest 3. A differenza dell'esperienza precedentemente descritta, in questo caso l'assenza di riprese cinematografiche dal vero ha permesso la realizzazione dell'applicazione immersiva mediante l'esplorazione di un ambiente 3D. Tutto il lavoro che era stato eseguito mediante editing video in questo caso è stato effettuato all'interno della *game engine* Unity 3D, importando lo scenario ricostruito, rendendolo fruibile in maniera immersiva e realizzando direttamente in questo sistema animazioni, transizioni e interazioni. Questa peculiarità conferma quindi che operativamente lo sviluppo dell'applicativo finale è molto più assimilabile alla creazione di videogame 3D che al *video making*. Il primo passo volto verso la realizzazione dell'esperienza completa consiste nell'importare all'interno della *game engine* tutti i modelli 3D realizzati in fase di produzione. Un aspetto fondamentale di questo processo concerne l'ottimizzazione di quest'ultimi al fine ridurre il carico computazionale del dispositivo immersivo, elemento imprescindibile soprattutto quando ci si trova a dover lavorare con oggetti realizzati mediante tecniche fotogrammetriche, la cui descrizione geometrica avviene mediante un numero molto alto di poligoni. Per risolvere questo problema sono state impiegate metodiche nate in ambito gaming, ossia la *retopology*. Essa è stata impiegata unicamente nei modelli derivanti da tecniche fotogrammetriche, ognuno dei quali è stato quindi ottimizzato seguendo tale iter:

remeshing, unwrapping, baking (Figura 62).

- *Remeshing*: in questa fase è stata eseguita una riduzione del numero di poligoni, convertendo modelli descritti mediante maglie triangolari a maglie quadrate ed eseguite mediante il software open source *Instant meshes* Instant Meshes Remesh - Blender (blender-addons.org). In media la conversione ha visto una riduzione del 99% dei poligoni passando da modelli dell'ordine del milione (*high poly*), alle migliaia di poligoni (*low poly*). In generale si è cercato di non superare i 10 mila poligoni, e in alcuni casi sono stati effettuati dei *remeshing* parziali dividendo il modello in modo tale da avere un maggior numero di poligoni in alcuni settori, specialmente quelli caratterizzati da una marcata curvatura, e altri con riduzioni più spinte. La contrazione dei poligoni ovviamente comporta una perdita d'informazione, soprattutto micro-dettagli superficiali.

- *Unwrapping*: in questa fase il modello *low poly* generato in instant Meshes, essendo un modello completamente diverso dal precedente, non presenta ancora un sistema di coordinate uv, necessarie alla proiezione delle texture sulle nuove *mesh*. In questo passaggio viene quindi creato il sistema di coordinate; nello specifico l'oggetto è stato importato nuovamente in *Blender* e in seguito realizzato l'*unwrap* mediante il comando *SmartUVProject*. Questo procedimento automatico consente di ottenere in modo speditivo un primo sistema di coordinate, il quale deve essere poi controllato al fine di evitare sovrapposizioni, caso frequente in oggetti come vasi con manici. Verificate le sovrapposizioni si è potuto procedere con l'ottimizzazione degli spazi rendendo molto più piccole le aree dedicate a parti non visibili recuperando spazio utile per quelle visibili, come nel caso degli interni dei vasi.

- *Baking*: una volta che il modello *low poly* presenta il suo sistema di coordinate è possibile andare a recuperare tutte le informazioni geometriche perse nella prima fase eseguendo il *baking*, una renderizzazione su base di coordinate uv prevalentemente di due caratteristiche, il colore e le normali. Questo processo è stato eseguito in *Blender*, mediante il motore di render Cycles, nello specifico il modello *high poly* e quello *low poly* devono essere perfettamente sovrapposti al fine di proiettare le informazioni dal modello *high poly* su

quello *low poly* intercettando il sistema di coordinate uv al fine di creare la texture.

Il risultato finale, quindi, è un modello molto più leggero da un punto di vista computazionale dato l'esiguo numero di poligoni, ma dalla medesima resa visiva grazie alla renderizzazione di mappa del *diffuse color* e *normal*. Tutte le mappe generate secondo questo sistema presentano una risoluzione di 2048x2048 pixel sufficiente ad avere una buona resa di dettaglio dell'oggetto all'interno dell'applicazione VR.

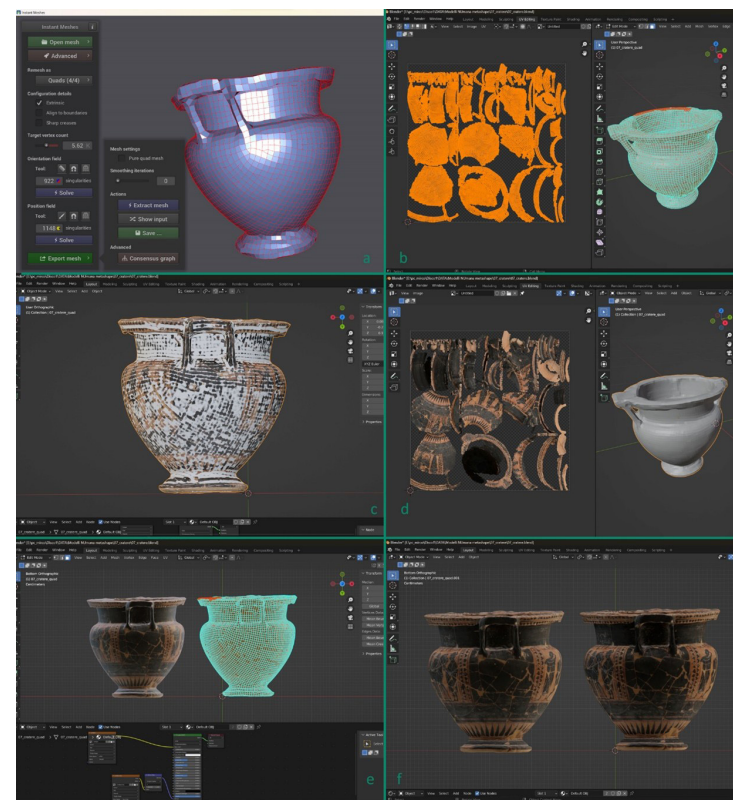


Fig.62
Principali passi
relativi alla
retopology: a)
Remeshing;
b) *Baking*; c)
Sovrapposizione *low*
poly high poly; d)
baking e creazione
di texture del *diffuse*;
e) paragone *low poly*
con texture e senza;
f) paragone *high poly*
(destra) con *low poly*
(sinistra).

Per concludere il processo d'ottimizzazione sono stati modificati e processati anche i modelli relativi alla tomba, ossia terreno ed elementi lignei. In questo caso non sono stati seguiti tutti i passi già indicati; ma, essendo già una geometria molto semplice sono state eliminate tutte quelle facce non visibili dal punto di vista designato per l'esperienza. Riguardo le texture è

stato eseguito in questo caso il *baking* delle luci dirette e indirette, riportando sulla texture delle diffuse luci e ombre derivanti dal sistema d'illuminazione impiegato (Figura 63). Questo processo è fondamentale al fine di alleggerire il carico computazionale del visore, il quale non deve calcolare luci poiché sono già integrate nella texture. La scelta di eseguire questo *baking* in *Blender* e non in *Unity* è stata dettata dalla volontà di mantenere, in modo agile, la stessa tipologia di visualizzazione tra i due ambienti. Conclusa la fase d'ottimizzazione è stato possibile importare tutti i materiali così prodotti all'interno della *game engine* ricostruendo in modo fedele la scena. Il sistema d'illuminazione ambientale nella *game engine* è stato realizzato mediante l'utilizzo della stessa immagine HDRI utilizzata, ma applicando un sistema *baked*, in modo tale da non far calcolare nuovamente le luci al sistema (Figura 64).

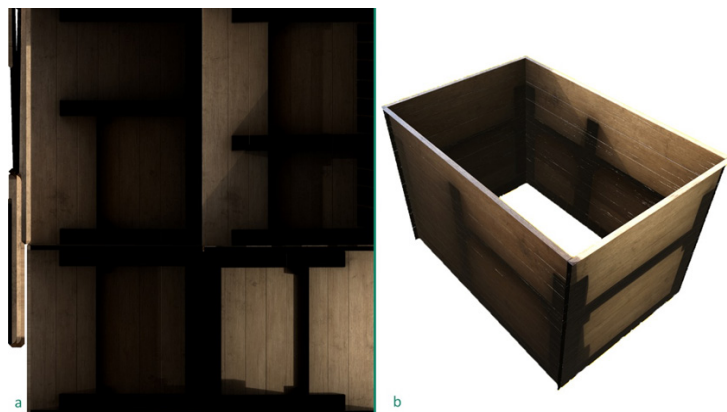
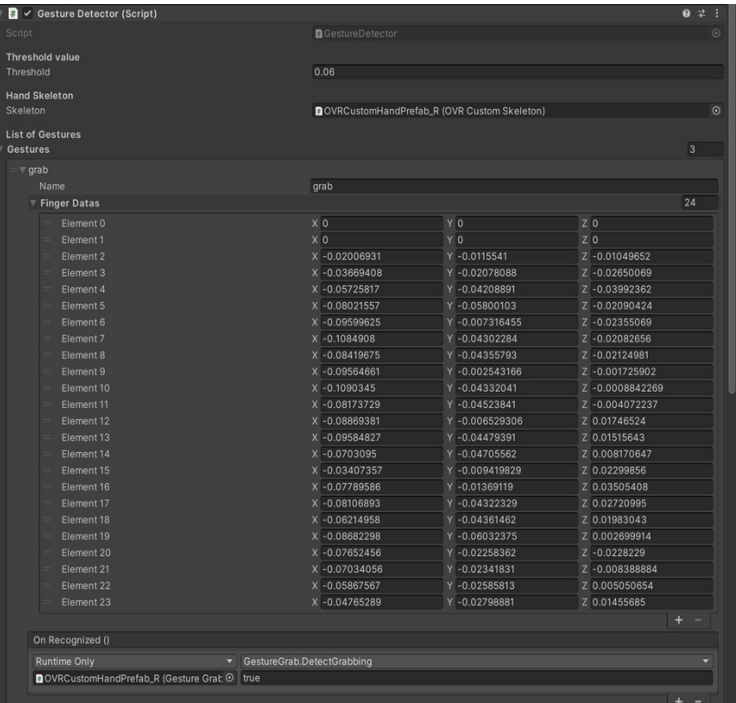


Fig.63
Baking delle luci su
Texture diffuse; b)
Visualizzazione del
modello con Texture
applicata.

Fig.64
Ricostruzione in
Unity: a) Tomba A;
b) Tomba B.

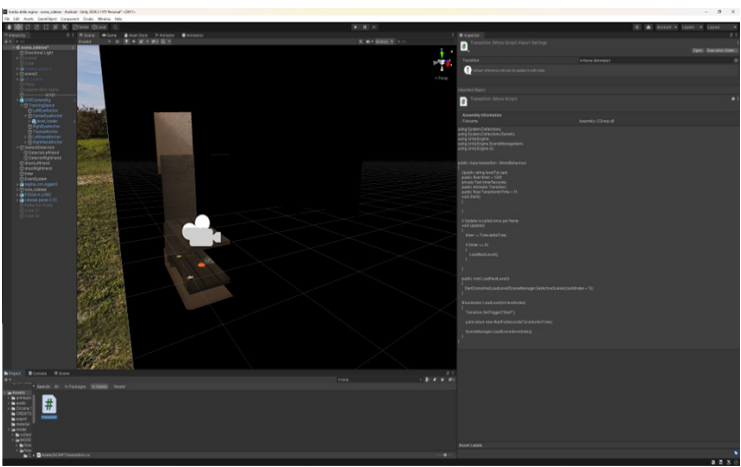
Conclusa la fase di ottimizzazione si è proceduto con la creazione del sistema di interazione con il mondo virtuale. Anche in questo caso sono stati utilizzati gli asset base forniti da meta, al fine di navigare lo spazio (Oculus XR Plugin v1.9.1). È stata quindi inserita l'*OVRCameraRig*, il sistema d'interazione con l'ambiente virtuale invece è stato gestito mediante riconoscimento di *gesture* legato all'*hand tracking*. Nello specifico, come è stato già indagato il movimento della mano reale viene convertito in movimento della mano virtuale mediante il riconoscimento video delle mani reali, questo movimento viene riconosciuto e utilizzato come input per modificare le coordinate dello *skeleton prefab*, ossia una stilizzazione della mano, non visibile, costituita da nodi e aste rappresentanti le falangi della mano. In relazione al movimento di quest'ultimo oggetto viene modificata e animata la *mesh* della mano visualizzata. Conoscendo i valori di questo sistema di coordinate, è possibile associare a una precisa posizione della mano un sistema di valori coordinata. Sfruttando questo principio è stato generato un sistema in grado di paragonare le coordinate dello *skeleton* attivo con un sistema noto al fine di far riconoscere determinate posizioni della mano e poter associare funzione a tale riconoscimento, ovviamente legato a un determinato range di tolleranza per contrastare l'eventuale imprecisione di tracking delle mani (Figura 65). Completato il processo di ricostruzione virtuale dell'ambiente e stabilito il sistema d'interazione e navigazione è stato possibile procedere con la realizzazione della sequenza narrativa prevista. In accordo con lo *Storyboard* sono state realizzate 5 scene, ossia introduzione tomba A, tomba A, introduzione tomba B, tomba B, conclusione, alle quali è stata aggiunta una scena di titoli di coda e una d'inizio esperienza. Questa struttura è stata ricalcata attraverso la realizzazione di scene differenti (*Unity scene*), il passaggio da una scena a un'altra quindi è stata gestita mediante *script* in *C-Sharp*, il cui funzionamento prevede un *timer*, allo scadere del quale viene compilata la funzione di cambio *scene* passando così alla successiva. Dal punto di vista visivo la transizione è stata realizzata mediante *fade-in/fade-out* a nero (Figura 66), ossia nel momento di chiusura della scena la vista si oscura, mentre nel momento di apertura da scura diventa chiara. Questa transizione è stata realizzata mediante l'inserimento di un *canvas world space*, vincolato al movimento della camera. All'interno del *canvas* è stato a sua volta inserita un'immagine nera di dimensione sufficiente a coprire interamente la vista dell'utente, animata al fine di diventare trasparente. Così nel momento in cui il *timer* si azzerava viene richiamata la funzione di cambio scena, la quale, compila prima l'animazione dell'immagine nel

canvas che da trasparente diventa nera, e in seguito fa avvenire il cambio di scene. Anche per questo progetto è stato inserito l'interazione mediante sensore di prossimità così che nel momento in cui l'utente vada a rimuovere il visore, da qualsiasi scena e in qualsiasi momento esso si resetterà e tornerà alla prima scena, la *home*.



Un aspetto importante e comune a tutte le scene realizzate risulta essere il montaggio della sfera sonora. A monte della realizzazione di tutte le animazioni e montaggi eseguiti all'interno di *Unity* è stato effettuato un missaggio sonoro in *Adobe Premiere* al fine di amalgamare al meglio musiche e recitato. Delle dieci tracce sonore realizzate è stata eseguita una specifica selezione di brani e in seguito mixati nuovamente tra loro al fine di alternare al meglio momenti recitati e momenti musicali soprattutto operando con i volumi. Queste operazioni sono state in ogni caso validate in collaborazione con il compositore Francesco De Melis. Analizzando in dettaglio le peculiarità relative alle singole scene realizzate è importante sottolineare le seguenti caratteristiche:

Fig.65
Sistema di coordinate relative alla mano chiusa.



- Inizio esperienza: Questa scena ha funzione di *home*, rappresentando la scena che l'utente incontra appena indossa il visore. In questo progetto non essendo prevista la possibilità della doppia lingua è stato sfruttato il sistema di riconoscimento di *gesture* per dare l'input d'avvio (Figura 67). L'utente semplicemente chiudendo la propria mano richiama la funzione di cambio scena entrando così nella prima scena dell'esperienza. Nel momento in cui, tra un utente e un altro, il visore non viene indossato questa scena funge da perno ed essendo statica blocca l'incedere della narrazione assicurando che il nuovo utente fruisca dell'esperienza per intero.

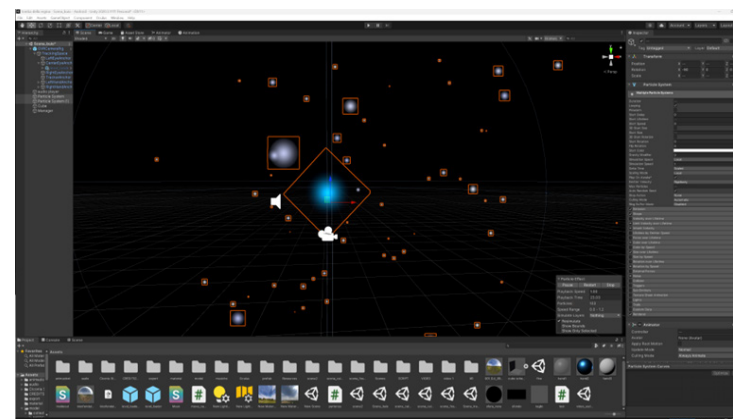


Fig.66
Sistema di transizione fade-in/ fade-out.

Fig.67
Scena home con gesture d'inizio esperienza.

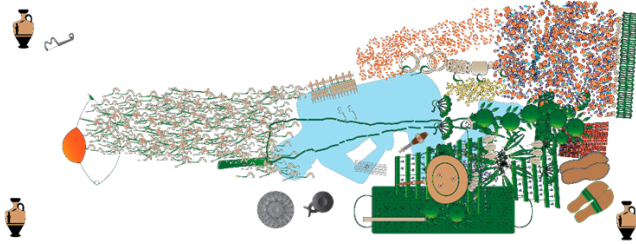
- Introduzione alla tomba A: questa scena si caratterizza semplicemente per la presenza della regina su fondo scuro, la quale si presenta all'utente. Riguardo la realizzazione pratica di questa scena gli oggetti virtuali utilizzati sono quattro, un *audio source* per la riproduzione delle musiche e un secondo per la voce della regina. Il riproduttore relativo alla musica è stato inserito in modo tale che l'audio sia omnidirezionale, mentre la riproduzione della voce della regina è stata inserita mediante audio spaziale 3D in modo tale che l'utente possa capire la direzione di provenienza della voce e girarsi verso di essa. Gli altri due oggetti utilizzati sono due sistemi particellari, uno per rappresentare la regina e l'altro per dare una dimensione fisica e suggestiva alle musiche. La realizzazione della dimensione visiva della regina è stata uno dei problemi principali legati alla realizzazione pratica in *game engine*. Dalle operazioni preliminari, e in particolare dallo *storyboard* si era già deciso di rappresentarla come una luce animata, ma la realizzazione visiva di luci è molto onerosa da un punto di vista computazionale e non supportato quindi dalle caratteristiche tecniche del dispositivo. Si è scelto quindi di utilizzare un sistema particellare, esso è un emettitore di elementi semplici, come immagini 2D orientate in modo tale che la faccia del singolo elemento sia sempre rivolta in modo perpendicolare al punto d'osservazione. La Regina è stata realizzata mediante la concentrazione in un punto di più elementi base (tre elementi), in questo caso la rappresentazione di una sfera la cui trasparenza aumenta all'aumentare della distanza dal suo centro. È stata realizzata in colore blu al fine di renderla maggiormente visibile in relazione al contesto prevalentemente marrone delle due tombe. Infine l'ultimo nodo riguarda la sua animazione, per dare l'idea che fosse la luce a parlare all'osservatore è stata predisposta un'animazione sincrona alla voce dell'attrice. In questo caso non è stata realizzata una semplice animazione manuale dell'oggetto virtuale, ma è stato realizzato mediante uno *script* in *C-sharp*. Il codice realizzato è in grado di leggere i dati della traccia audio e di modificare intensità e dimensione della sfera al variare dei bassi della traccia in riproduzione. Questo espediente non solo è stato utile a diminuire i tempi necessari per realizzare le animazioni, ma senza dubbio ha contribuito alla realizzazione di un'animazione preci-

sa e versatile; infatti, basta cambiare la traccia audio in input per avere le nuove animazioni. Questa particolare struttura particellare, relativa alla figura della regina, è stata riproposta anche nelle altre scene. Il secondo sistema particellare è stato utilizzato per dare una dimensione visiva al coro in lingua protolatina della traccia audio, in questo caso gli elementi base del sistema sono stati programmati per comparire e scomparire in modo casuale intorno all'osservatore (Figura 68).



- Tomba A: la realizzazione di questa scena presenta un'ingente problematica, ossia la rappresentazione del ricco corredo. In fase d'acquisizione fotogrammetrica erano state digitalizzate solo delle fibule, delle ambre, e dei pendagli, non sufficienti a rendere l'idea della ricchezza della tomba; senza considerare di dover risolvere il problema di come rappresentare il corpo della regina. Effettuare una riproposizione iterata di quegli elementi sarebbe stato oneroso da un punto di vista computazionale e filologicamente scorretto. Questo aspetto è stato risolto mediante l'inserimento di un'immagine stilizzata del rinvenimento dei reperti, realizzata dall'archeologo Giacomo Bardelli. Essa riporta tutte le tipologie di oggetti e mediante l'utilizzo di colori diversi, facilitandone la comprensione della loro collocazione e delle differenze materiche. La sagoma della salma della regina è stata realizzata con lo stesso colore della luce animata per creare così uno specifico collegamento visivo (Figura 69).

Fig.68
Vista del sistema
particellare, al centro
la rappresentazione
luminosa della
Regina.



Altro punto rilevante di questa scena riguarda la realizzazione delle animazioni. Esse sono state realizzate in fase di creazione dell'esperienza e direttamente nell'ambiente di sviluppo della *game engine*. Nello specifico in questa scena è stata animata la luce della regina, la quale si muove nello spazio indicando gli oggetti che descrive; è stato animato il tavolato in legno al fine di coprire i resti della regina per lasciare spazio al calesse, il quale si genera dal basso e seguendo la musica si avvicina ruotando verso l'osservatore. La realizzazione di questi movimenti è stata realizzata in modo manuale, utilizzando *animator* ed *animation* associati agli oggetti, attraverso l'utilizzo e inserimento di *keyframe* (Figura 70). Mediante questo sistema viene associato a un determinato momento del tempo una specifica caratteristica dell'oggetto, il software interpola il valore tra un *keyframe* e il successivo facendo appunto avvenire movimenti e trasformazioni. Tutte le animazioni sono sincronizzate tra loro in modo manuale.

- Introduzione della tomba B: questa scena si caratterizza per la presenza della regina su sfondo nero, non sono presenti né effetti particellari né musica, solo luce e voce. Da un punto di vista realizzativo risulta essere una versione semplificata della precedente scena introduttiva.
- Tomba B: in questa scena l'utente si trova all'interno della ricostruzione della tomba B, con davanti a sé l'insieme dei reperti digitalizzati. Anche in questo caso sono state realizzate le animazioni sia della luce della regina, che degli oggetti, utilizzando sempre il medesimo procedimento, ossia *animator controller*, *animation* e *keyframe*, il tutto sincronizzando movimenti, musica e parole. La particolarità di questa scena è la presenza di una piccola interazione, conclusa la descrizione dei reperti è stata inserita la possibilità di interagire con uno di essi, dando la possibilità di prendendolo con la

Fig.69
Schematizzazione grafica della sepoltura con corredo personale ricostruzione G. Bardelli (Clini et al, 2024).

mano e osservarne i dettagli. Riguardo la realizzazione di questa interazione è stato scelto di utilizzare il medesimo gesto utilizzato per iniziare l'esperienza, ossia la chiusura della mano. Il visore riconoscendo la posizione della mano chiusa e richiama la funzione *grab*, ossia nel momento in cui il *collider* della mano tocca il *collider* del reperto, se la mano si chiude o è chiusa l'oggetto viene vincolato alla mano. Sempre tenendola chiusa o movendola viene spostato l'oggetto simulando di avere effettivamente il controllo di quest'ultimo (Figura 71).

Anche se il funzionamento di questo sistema d'interazione non presenta particolari criticità, nell'ottica generale dell'esperienza di fruizione presenta delle peculiarità e vincoli.

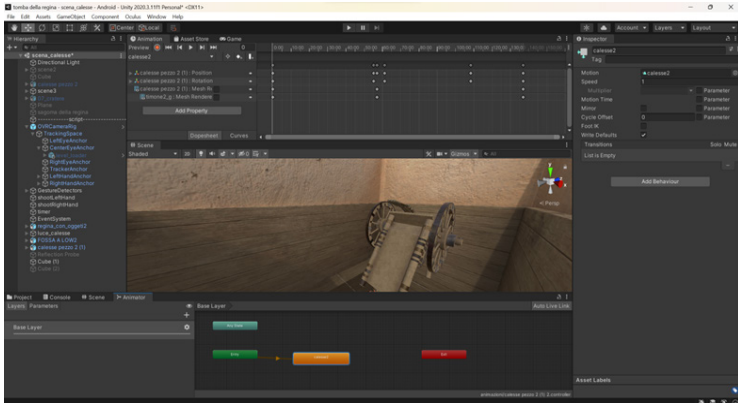
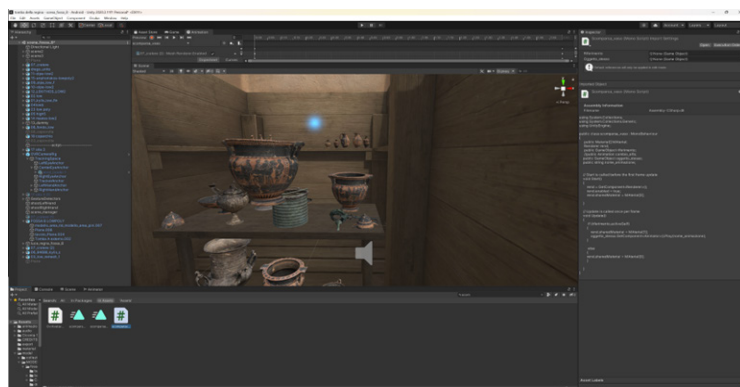


Fig.70
Sistema animation (in alto)/animator (in basso) per la comparsa del calesse.

Fig.71
Sistema d'interazione-grab.

È stato riscontrata un'incompatibilità tra il sistema d'animazione e il sistema di *grab*; e in particolare, se il reperto risulta soggetto ad *animation*, volto alla modifica di coordinate spaziali, non è possibile modificarle mediante *grab*, rendendo l'interazione non funzionante. Dato che l'interazione avviene al termine di un'animazione che porta l'oggetto davanti all'osservatore, risulta facile comprendere l'impossibilità di portare a termine l'interazione. Questo sistema è stato risolto mediante l'utilizzo di uno *script*, in particolare nel momento in cui l'oggetto animato si colloca nella posizione finale compare un suo gemello non soggetto ad animazione, facendo scomparire l'oggetto precedente. Da un punto di vista visivo il cambio d'oggetto non è percettibile poiché la compilazione avviene in un sessantesimo di secondo (Figura 72). Questo codice gestisce anche un altro aspetto, ossia la comparsa delle mani, le quali erano state disabilitate nel resto dell'esperienza al fine di non distrarre l'utente.



- L'uscita dalla tomba: in questa scena il focus principale è stato quello di contestualizzare il sito archeologico con il territorio, sono stati fatti diversi tentativi cercando di utilizzare il modello derivante da fotogrammetria da drone, o le prese laser. In entrambi i casi la soluzione non si è rivelata funzionale per due motivi: la risoluzione delle texture non era sufficiente per l'estensione territoriale e la resa della vegetazione acquisita non era adeguata agli scopi preposti. La soluzione finale adottata è stata quella di abbandonare la fruizione mediante ambiente 3D e di tornare all'utilizzo di panoramiche

Fig.72
Doppio vaso visibile;
sulla sinistra script
finalizzato allo scam-
bio del vaso.

monoscopiche, utilizzando quindi le panoramiche effettuate in fase d'acquisizione. Da un punto di vista realizzativo sono state eseguite delle renderizzazioni panoramiche (tombe aperte, chiuse ma visibili e ricoperte da terra) all'interno di *Blender* e montate all'interno delle panoramiche reali. Particolare attenzione è stata posta ai dettagli della sfera temporale eliminando tutti gli elementi antropici a noi contemporanei e facendoli ricomparire solo nel momento in cui le tombe non sono più visibili. L'esperienza così si conclude salendo in cielo e potendo osservare il sito nel contesto territoriale del parco del Conero. Questa parte è stata realizzata mediante un montaggio in sequenza di panoramiche ad alta risoluzione eseguite da drone (Figura 73).

- *Credits*: quest'ultima scena presenta i *credits* dell'applicazione, semplicemente realizzata mediante un'immagine animata su sfondo nero. Conclusa questa parte il visore torna direttamente nella scena di *home*.

Ultimata la realizzazione di ogni scena è stata realizzata l'applicazione finale per *Meta quest 2-3* generando l'APK mediante il pacchetto JDK, SDK, NDK Android. Tutto il processo realizzativo è stato effettuato mediante un *workflow* iterativo di tentativi prove visive e comunicative, validate ed eseguite in collaborazione sia con l'archeologo Giacomo Bardelli, sia con il compositore Francesco De Melis.

Test e training

Mediante osservazioni è stato notato che in nessun caso l'utente si è trovato in difficoltà nell'eseguire l'interazione relativa all'avvio dell'esperienza, grazie alla semplicità del gesto. Caso diverso invece è l'interazione con il reperto, in questo caso la maggior parte degli utenti (80% circa) non era in grado di eseguire la *gesture* al fine di prendere l'oggetto. Infatti, trovandosi all'interno di un ambiente realistico l'utente è portato a interagire in modo naturale, ad esempio avvicinandosi con i palmi delle mani verso la parte bassa del vaso, costringendo l'operatore a suggerire il movimento da fare per prendere il vaso. Per risolvere questo problema è stata inserita una tabella illustrativa volta a mostrare il movimento corretto, grazie alla quale è stato possibile facilitare e suggerire l'interazione con ottimi risultati. Eseguiti dei nuovi test, in questo caso sul campione pilota degli studenti del corso di Laurea in ingegneria edile-architettura, il 90% degli utenti è stato in grado di eseguire l'interazione senza alcun

suggerimento da parte dell'operatore esterno. In sede di questa verifica agli utenti è stato sottoposto il test volto alla valutazione del gradimento mediante risposte aperte e chiuse.



Da questi risultati è emerso un grande interesse nei confronti dell'immersione e del realismo esprimendo però la volontà di una maggior interazione con l'ambiente virtuale. Un altro interessante dato riguarda la durata dell'esperienza; è stato osservato che nessun utente ha espresso parere negativo relativo alla durata dell'esperienza in quanto troppo lunga (il 100% degli utenti ha visualizzato l'esperienza nella sua totalità). L'ultimo aspetto rilevante, diverso dalla prima esperienza descritta, è risultato dalla domanda riguardo la volontà di pagare per effettuare l'esperienza nel museo ottenendo il 100% nella risposta affermativa. Anche per questa esperienza sono state programmate delle giornate relative al training degli operatori. Sono state divise in due momenti, in cui sono stati istruiti due gruppi diversi. Anche in questo caso gli operatori sono stati istruiti sul funzionamento del visore, su come avviare l'applicazione, e su come gestire l'esperienza tra un utente e il successivo. È stato importante far fare più volte l'intera procedura al fine di memorizzare tutti i passaggi, inoltre è stato utile far provare l'esperienza all'operatore spiegando particolarità al fine di far comprendere ogni necessità e risolvere eventuali problemi in fase di fruizione. Da un punto di vista progettuale, come è stato già mostrato, l'esperienza è stata pensata per facilitare il più possibile la fruizione in chiave museale; infatti, è stato eliminato l'uso di controller e creato un sistema automatico di auto-reset al fine di facilitare il passaggio dalla fruizione di un utente al successivo senza l'in-

Fig.73
Sequenza conclusiva
dell'esperienza.

tervento dell'operatore, se non per aiutare a indossare il dispositivo. In conclusione, questo lavoro ha mostrato un iter volto alla valorizzazione del patrimonio archeologico con particolare interesse verso la contestualizzazione di reperti attualmente esistenti con un contesto archeologico e territoriale non più fruibile. Il *workflow* mostrato si caratterizza quindi per una grande attenzione nei confronti della digitalizzazione scientifica dei reperti, non solo utile alla fruizione virtuale, ma anche fondamentale per documentare il patrimonio in questo caso dell'antiquarium di Numana. I modelli virtuali realizzati, sia i reperti che gli ambienti non sono stati utilizzati solo nella loro dimensione immersiva, ma sono stati utilizzati anche per la realizzazione di video esplicativi molto usati proprio nell'antiquarium. Infine, l'insieme dei reperti è stato utilizzato per la realizzazione di una libreria digitale, allo scopo di proporre al visitatore un approfondimento di carattere scientifico. Tale libreria digitale è stata realizzata per *Microsoft Surface*, e il suo funzionamento è contestualizzato su due schermi, uno touch tramite il quale dare input, l'altro statico su cui visualizzare i contenuti. Riguardo la divisione tematica degli argomenti una prima sezione inquadra territorialmente, il sito archeologico e le due tombe, i reperti sono divisi per tomba d'appartenenza e per tipologia, come ceramica locale, suppellettili in bronzo, ceramica greca per la tomba b; ornamenti e calesse per la tomba A. Selezionato il reperto è stata prevista la possibilità di osservarne il modello 3D in modo monoscopico e all'anaglifo, leggerne una descrizione e visualizzarne un'ortofoto in alta risoluzione. Tutto lo sviluppo è stato eseguito in *Unity*, nonché tutto il sistema di selezione, navigazione, e interazione è stato gestito mediante la scrittura di *script* in *C-Sharp* (Figura 74).



Fig.74
Libreria Digitale.

Caso studio 3: le fornaci di Urbisaglia

L'ultimo caso studio riportato riguarda la progettazione e lo sviluppo di un nuovo v.i.m legato al patrimonio archeologico. L'oggetto di studio di questo progetto è il complesso produttivo di Pollentia-Urbs Salvia (MC), caratterizzato dalla presenza di diverse fornaci dedicate alla realizzazione di vasellame d'uso quotidiano. L'intento di questo progetto è stato dettato dalla volontà di esplorare attraverso nuove metodiche di fruizione digitali le fasi produttive della ceramica, dalla lavorazione dell'argilla fino alla vendita del vaso. La realizzazione di questo applicativo si inserisce nell'ambito di un progetto europeo TRANSFER. Questa iniziativa si concentra sulla gestione e valorizzazione di una rete di parchi archeologici dell'area adriatica, promuovendo metodi e standard di pianificazione sostenibile per il patrimonio culturale come bene di ricerca attraverso l'elaborazione di un modello di gestione comune. Questo progetto di fruizione si pone quindi come azione pilota dell'unico parco archeologico italiano partner del progetto. L'area archeologica di Urbisaglia risulta essere una delle zone più ricche, interessanti e rilevanti dell'intero panorama archeologico marchigiano. Famosissime e tuttora visibili sono i suoi resti d'età imperiale, come il teatro, l'anfiteatro e il tempio criptoportico, segno della ricchezza e dell'importanza dell'insediamento romano di Urbs Salvia (Perna, 2006). L'area d'interesse di questo progetto di fruizione però non riguarda la fase imperiale della città e nemmeno quella repubblicana, ma bensì l'insediamento antecedente alla fondazione della colonia. Nella zona sud-ovest dell'area forense sono stati rinvenuti all'inizi degli anni 2000 i resti di un insediamento produttivo, volto alla realizzazione di ceramica d'uso comune, riferibili circa alla prima metà del II sec. a.C. (Figura 75). Questo ritrovamento è estremamente importante poiché dà conferma della presenza di insediamenti abitativi e produttivi antecedenti la colonia romana, confermando così la continuità topografica tra la città repubblicana (Pollentia) e quella imperiale (Urbs Salvia)(Paci, 2014). Il sito produttivo è stato rinvenuto al di sotto della pavimentazione di un edificio di età repubblicana, il quale a sua volta era stato rinvenuto sotto resti romani risalenti all'età imperiale. Esso si caratterizza quindi per la presenza delle tracce di tre fornaci (Figura 76). La più antica sembra essere la fornace C orientata in senso est-ovest e collocata a nord-ovest dell'area di scavo. Essa si caratterizza per la presenza di una camera di cottura di 1,3 m di diametro, i resti rinvenuti si caratterizzano per la presenza di uno strato di terra concotta e un muretto, basamento essenziale per sorreggere la volta della camera di cottura.

La fornace A risulta essere la più grande del sistema produttivo e si colloca nell'estremo sud-est dell'area di scavo, con orientamento sud/nord. La camera di cottura si caratterizza per un diametro di 1,77m, i cui resti presentano le tracce di un pilastro ellittico in frammenti in laterizio.

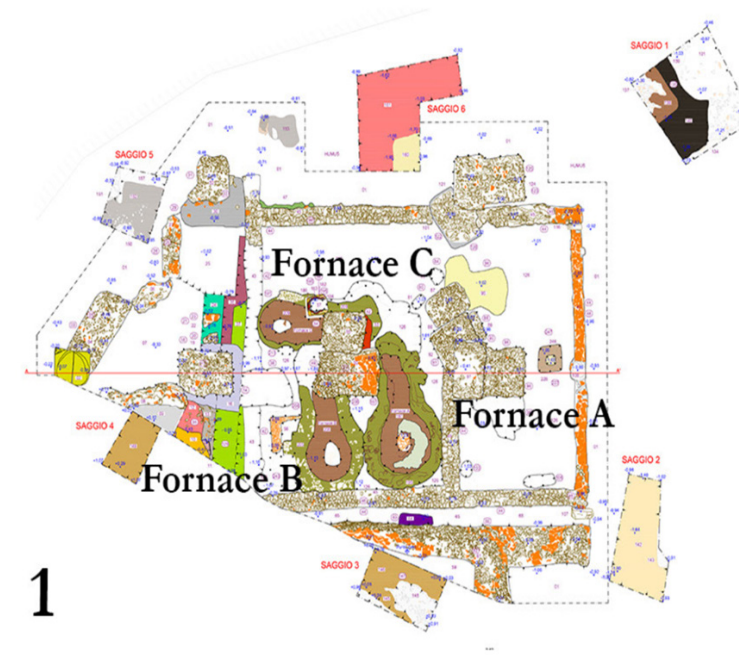


Fig.75
Planimetria archeologica della città di Pollentia-Urbs Salvia; A) L'area di scavo del sistema produttivo.

Fig.76
Le fornaci di Pollentia-Urbs Salvia (Relazione tecnico-scientifica, Abaco Società Cooperativa, 2012).

Sull'imboccatura, al di sotto dei livelli di distruzione e abbandono, sono stati individuati uno strato di cenere compatta e uno sottostante di terra rubefatta, traccia dell'utilizzo della fornace. La fornace B è collocata a fianco della fornace A, anche in questo caso dallo scavo archeologico è stato possibile individuarne il perimetro mediante il ritrovamento di resti della struttura della camera di cottura e dalla presenza di terra rubefatta. Il diametro della camera di combustione è leggermente inferiore a quella precedente, ossia 1,6 m di diametro, sono presenti i resti della struttura voltata e del sostegno interno del piano forato (Figura 77). Queste strutture sono molto simili tra loro, per forma e materiali costruttivi, soprattutto le fornaci A e B si caratterizzano per dimensioni molto simili, mentre la fornace C risulta essere di più modeste dimensioni. Esse presentano una conformazione basata sul sistema del forno aperto, caratterizzata da: camera di cottura circolare scavata parzialmente nel terreno e in parte costruiti con frammenti di laterizi, amalgamati mediante terra molto compatta. Al centro della camera di cottura è documentato in ogni caso un pilastro di sostegno per il piano forato, mentre il muro di sostegno della volta molto probabilmente era costituito da mattoni. In definitiva questi resti attestano e confermano l'uso dell'area per attività artigianali. Nonostante l'assenza di elementi di scavo in grado di attestare una cronologia assoluta è possibile stabilire una periodizzazione temporale del sito a partire dall'analisi stratigrafica. Alla prima fase appartiene la fornace C; in una fase successiva la costruzione della fornace B e A, la quale taglia i riempimenti della fornace C e ne ostruisce l'area d'imbocco. Nell'ultima fase, sicuramente successiva alla dismissione delle fornaci e forse contemporanea all'edificio repubblicano è stata individuata una piccola forgia, sorta in corrispondenza della fornace C. In relazione ai frammenti ceramici rinvenuti, seppur non direttamente all'interno delle fornaci, è possibile affermare che questo stabilimento era dedicato alla produzione di ceramica d'uso domestico (Perna et al., 2022). Questa area urbana ebbe vocazione produttiva dal III secolo a.C., fino alla fine del II secolo a.C. quando l'attività produttiva venne dismessa per lasciar posto all'edificio repubblicano. Ai fini dell'esperienza immersiva l'interesse primario riguarda la rappresentazione e descrizione della vita produttiva di questo sito. Le attuali condizioni di fruizione archeologica avvalorano ulteriormente questa scelta, infatti, oggi i resti di queste fornaci non sono più visitabili poiché nell'ottica generale, dell'intero parco archeologico, si è deciso di ricoprirne i resti prerepubblicani a favore di quelli repubblicani e imperiali, oggi visibili. L'esperienza di fruizione immersiva, quindi, faci-

lita la lettura del patrimonio oggi non accessibile. Anche per la realizzazione di questa esperienza, come abbiamo già visto e indagato nei lavori precedentemente trattati, si è seguito l'oramai noto iter caratterizzato da pre-produzione, produzione, post-produzione terminando con test e training.



Pre-produzione

In questo caso si sono indagate le possibilità offerte dalle tecnologie di realtà immersiva in campo archeologico, al fine di valorizzare un patrimonio poco conosciuto e oggi non fruibile, ma allo stesso tempo importante e caratteristico della tradizione storica del luogo. L'assenza di reperti direttamente acquisibili mediante metodiche digitali suggerisce la necessità di porre grande attenzione ai processi di modellazione 3D volti alla creazione di un ambiente ricostruttivo virtuale realistico, inteso proprio come atto di ricerca e ricostruzione archeologica. L'oggetto archeologico al centro di questo progetto sono le due fornaci coeve (A e B) con l'intento di rappresentare e far conoscere il funzionamento dell'impianto produttivo. Al fine di avere un'esperienza completa e realistica l'indagine ricostruttiva è stata estesa anche al di là del resto rinvenuto, compiendo delle azioni d'ipotesi ricostruttiva di quello che doveva essere l'intero complesso. Anche in questo caso nella fase di pre-produzione sono state eseguite tutte le scelte di carattere narrativo mediante l'oramai noto schema (*script, storytelling, storyboard, animatic*) e in relazione alle scelte narrative sono state programmate le fasi di

Fig.77
Panoramica da sud dell'area delle fornaci al termine dello scavo (Relazione tecnico-scientifica, Abaco Società Cooperativa, 2012).

creazione dei contenuti e quindi di produzione. Di seguito verranno descritti i principali elementi legati alla scelta di carattere narrativo:

- *Script*: l'intento principale legato allo sviluppo di questa esperienza virtuale e immersiva concerne la possibilità di indagare, attraverso degli espedienti narrativi, i principali aspetti d'interesse legati al patrimonio archeologico e storico del sito. Dall'indagine e studio archeologico sono stati individuati quattro tematiche principali: il sito archeologico, il sito produttivo, le fasi della lavorazione della ceramica e gli oggetti ceramici d'uso quotidiano. Questi punti sono essenziali per contestualizzare il complesso produttivo caratterizzato dalla presenza delle due fornaci, sia con l'attuale parco archeologico d'Urbisaglia, che con la ricostruzione virtuale di ciò che doveva essere all'epoca il sito produttivo, conferendo così la possibilità di descrivere il processo di lavorazione dell'argilla e la tipologia d'oggetti e utilizzati.
- *Storytelling*: viste le tematiche narrative principali è stato possibile individuare la strategia narrativa più adatta alla comunicazione selezionata. A differenza delle esperienze precedentemente realizzate, volte prevalentemente alla ricerca dell'impatto emozionale, in questo caso si è deciso di creare una narrazione caratterizzata da un taglio maggiormente descrittivo, quindi didattico. La caratterizzazione emozionale è ugualmente ricercata, ma, in questo caso, mediante la realizzazione di un ambiente immersivo realistico e coinvolgente. Da un punto di vista narrativo si è deciso quindi di corredare l'esperienza visiva da una voce fuoricampo, la quale da una parte descrive ciò che l'utente sta osservando, dall'altra si rivolge a esso coinvolgendolo e invitandolo a seguire i vari passi della produzione della ceramica cercando di catturarne l'attenzione.
- *Storyboard*: mediante la stesura dello *storyboard* è stato possibile conferire dimensione visiva ai temi individuati. Nello specifico si sono previsti quattro momenti principali, ossia 'introduzione archeologica', 'all'interno dell'edificio di produzione', 'utilizzo delle fornaci' e infine 'all'interno della bottega'. Nella prima scena è stata prevista una contestualizzazione del sito archeologico attuale con la ricostruzione virtuale delle fornaci. L'utente si trova all'interno dell'attuale

sito archeologico, gradualmente l'ambiente muta passando così a una versione del sito ricostruito. Per far capire l'attendibilità delle fonti ricostruttive vengono dapprima fatte comparire le fornaci, e in secondo luogo il resto del sito. Il secondo momento previsto concerne la prima fase del ciclo produttivo della ceramica, nello specifico l'utente si trova all'interno di un edificio, generalmente presente in luoghi produttivi di questo tipo, e già introdotto nella scena precedente. Il punto di vista dell'utente è pensato in modo tale da poter osservare sia l'interno che l'esterno, potendo creare un collegamento visivo con l'ambiente virtuale delle fornaci già conosciuto ed esplorato nella scena precedente. In questa fase narrativa si procede alla descrizione delle prime fasi di lavorazione, ossia la preparazione e lavorazione dell'argilla, giungendo così alla realizzazione del vaso crudo. La terza fase narrativa si concentra sulla descrizione dell'utilizzo delle fornaci, risultando così il cuore della comunicazione. L'utente è posto all'esterno degli edifici e di fronte alle fornaci al fine di osservare al meglio le fasi di lavoro. Quest'area tematica è divisa a sua volta in tre scene, una per ogni fase operativa (carico dei vasi crudi all'interno della fornace; accensione e alimentazione della fornace; e infine scarico della fornace). Da un punto di vista visivo in questo caso, per far comprendere al meglio i passaggi operativi, si è optato per l'utilizzo di performance attoriale reale ricontestualizzate all'interno dell'ambiente virtuale. L'ultimo momento narrativo è ambientato all'interno della bottega, un luogo preposto alla vendita dei vasi prodotti. In questo caso il focus narrativo è stato incentrato sulla descrizione delle varie tipologie di vasi d'uso quotidiano. Il fruitore si trova all'interno di un edificio molto semplice con davanti a sé un tavolino con dei vasi sopra, si è voluto sperimentare una peculiare modalità narrativa, dando la possibilità all'utente di interagire con l'ambiente e quindi scegliere un vaso e ascoltarne la descrizione.

- *Animatic*: in questa esperienza non sono presenti grandi animazioni, si prevede unicamente la possibilità di animare una luce all'interno dell'edificio di produzione. In questo caso è stata prevista una luce spot finalizzata all'illuminazione degli oggetti d'interesse, eseguendo delle traslazioni semplici in accordo con l'incedere della narrazione.

Questo schema narrativo presenta in sé la necessità di dover alternare momenti caratterizzati dall'utilizzo di panoramiche monoscopiche, necessarie per contestualizzare l'utilizzo di riprese della performance attoriale su *green screen*, e altre scene caratterizzate dalla volontà di inserire interazioni, e quindi realizzate mediante la fruizione di un ambiente 3D immersivo stereoscopico con sei gradi di libertà. Riguardo la progettazione della sfera sonora anche in questo caso sono state previste musiche originali, meno d'impatto o cariche di significato, come nell'esperienza precedente. Il compito della sfera sonora in questo caso è stato quello di fare da semplice sottofondo all'incedere dell'esperienza. A differenza degli altri casi, volendo ricercare la resa realistica dell'ambiente virtuale ricostruito, è stata posta maggior attenzione al *sound design* e in particolare ai suoni di fondo. Da un punto di vista organizzativo le prime azioni programmate hanno riguardato la realizzazione della sfera visiva, ossia la ricostruzione archeologica del sito, e della sfera narrativa con la scrittura della sceneggiatura. Successivamente sono state previste le riprese cinematografiche, programmando una giornata in teatro di posa e la creazione di tutti gli oggetti di scena con cui gli attori era previsto che interagissero durante le riprese, come vasi, legno, mattoni, argilla. Infine, come già accennato, la realizzazione di musiche, suoni e soprattutto la registrazione della voce narrante in doppia lingua italiano e inglese. Anche per questo lavoro è stato creato un esteso gruppo operativo caratterizzato dalla presenza di figure professionali e accademiche, come gli archeologi dell'Università degli Studi di Macerata; il videomaker Christian Mazur; Marchingegno, uno studio professionale esperto nella realizzazione di allestimenti museali e il compositore e *sound designer* Simone Mosca.

Produzione

Riguardo l'effettiva produzione dei contenuti audiovisivi il punto di partenza è stato la realizzazione della ricostruzione archeologica, intesa non come semplice rappresentazione visiva ma come processo d'indagine attiva. Ottenuta questa ricostruzione è stato possibile procedere con le riprese in *green screen* e la produzione audio, il tutto ovviamente rapportato alla stesura definitiva della sceneggiatura realizzata in contemporanea all'indagine e modellazione archeologica. Procedendo con la trattazione dell'indagine archeologica volta alla ricostruzione dell'ambiente produttivo è importante sottolineare due principi fondamentali per la realizzazione efficace di un'esperienza vir-

tuale, ossia la ricerca di realismo e la realizzazione di un ambiente completo 'chiuso', il tutto vagliato, verificato e validato mediante procedimento di indagine archeologica. La ricerca di realismo è un aspetto fondamentale di questo lavoro, da cui dipende non solo il gradimento, ma anche il coinvolgimento, la capacità d'apprendimento e quindi la qualità stessa dell'esperienza. Riguardo invece la realizzazione di un ambiente 'chiuso', quindi completo, è importante per ragioni di carattere scenico legato unicamente alla fruizione immersiva dell'ambiente virtuale. L'utente, avendo la possibilità di guardarsi intorno a 360 gradi o anche di esplorare, non deve incombere in punti vuoti o in cui il suo sguardo può andare all'infinito senza incontrare nulla, poiché ciò rappresenta uno sviluppo spaziale innaturale, a meno di trovarsi in un deserto, facendo cadere immediatamente quel senso di realismo e coinvolgimento tanto ricercato. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto quindi è stato importante progettare l'ambiente virtuale in relazione ai punti di vista previsti già in fase di pre-produzione andando a verificare la chiusura delle quinte sceniche per ogni punto d'interesse. La ricerca del realismo invece è stata realizzata mediante l'inserimento di elementi di dettaglio come imprecisioni, sporco, graffi o rotture. Al fine di ottimizzare i tempi di realizzazione è stato sviluppato uno specifico *workflow* caratterizzato dalla realizzazione di due modelli 3D, uno finalizzato alla validazione archeologica della ricostruzione dei macro-elementi architettonici, *level of detail* 1 (LOD1); il secondo invece realistico e finalizzato alla ricerca di realismo (LOD2). La logica generale dietro questo *workflow* consiste nell'utilizzare il modello 3D (LOD1) come strumento di indagine e verifica archeologica, data la possibilità di effettuare modifiche in modo speditivo. Una volta validate tutte le scelte archeologiche è stato ottenuto un modello di rappresentazione 3D realistico necessario alla fruizione. Riguardo la realizzazione del primo modello (LOD1) è stata applicata una specifica metodologia operativa l'*extended matrix* (EM), un sistema in grado di connettere il modello 3D realizzato alle fonti consultate in fase ricostruttiva mediante l'utilizzo di schemi logici e stratigrafici. Questo metodo è in fase di sviluppo presso il CNR Ispc di Roma (Demetrescu, 2022). Tale procedura ha permesso di discretizzare lo studio archeologico ricostruttivo mediante la realizzazione di una matrice di Harris estesa. Comunemente, in ambito archeologico, questi schemi sono impiegati per studiare e discretizzare le stratigrafie di scavo di un determinato sito, in relazione sia al loro susseguirsi, che alla loro distruzione (Harris et al., 1999). La matrice estesa, oltre a valutare le varie stratigrafie reali presenti, valuta anche strati virtuali, ossia legati a un'ipotetica

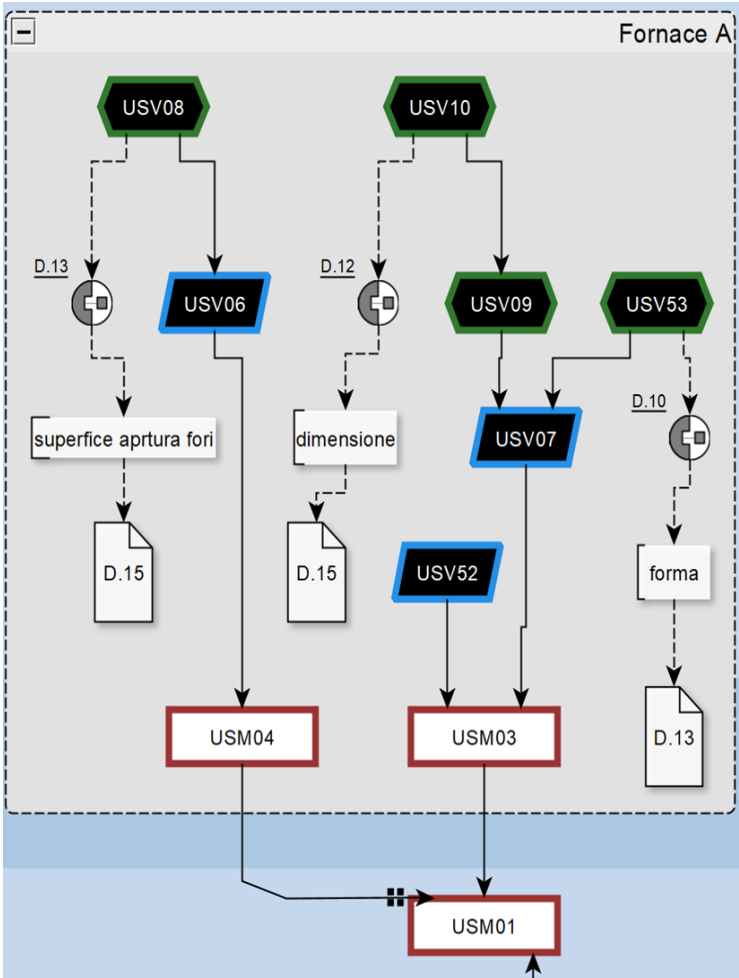
esistenza volta a effettuare ipotesi ricostruttive. I passi operativi per la creazione del primo modello (LOD1) sono tre:

- Il primo si caratterizza per la raccolta delle fonti relative al sito archeologico in questione. Nello specifico sono stati raccolti tutti i documenti, foto, piante, rilievi degli scavi archeologici, messi a sistema in una tabella *Excel* dove vi sono state specificate tipologia di fonte, utile a recuperare il materiale, e in più una breve descrizione di ciò che si vuol verificare o estrapolare dalla fonte stessa.
- Il secondo passo riguarda la lettura stratigrafica dei resti in sito rinvenuti; è stato così realizzato il primo livello della matrice estesa, che in questo caso viene individuata proprio con la matrice di Harris. Parallelamente a questo passo all'interno dell'ambiente di modellazione, ossia *Blender*, sono state rappresentate queste unità stratigrafiche mediante semplici modelli poligonali (Modelli Proxy). Non potendo utilizzare dei rilievi digitali tutto questo primo lavoro di modellazione è stato eseguito sulla base della relazione di scavo. Mediante l'utilizzo del *add-on* per *Blender* *EM Blender Tools* è stato possibile associare e importare la matrice, realizzata in formato *GraphML*, all'interno del software di modellazione e associare a ciascuna unità 3D la corrispondente unità stratigrafica della matrice. Questo strumento consente di poter lavorare in unico ambiente schema-modello 3D, in cui ogni elemento presenta il medesimo nome e medesime caratteristiche. In questa fase sono stati riportati gli strati relativi all'orografia delle fornaci mediante i nodi stratigrafici 'certi' data la loro attuale esistenza (nodi rossi).
- Il terzo passo consiste nell'andare a formulare le ipotesi ricostruttive sia nello schema che nel modello 3D. Questo passaggio è stato realizzato mediante un processo iterativo di formulazione di ipotesi e di visualizzazioni. Nella formulazione delle ipotesi ricostruttive sono stati utilizzati nodi relativi alle unità stratigrafiche virtuali divisi in tre categorie: ricostruzioni virtuali legate a resti ancora presenti in sito (colore blu), ricostruzioni virtuali di carattere strutturale, non presenti in sito ma necessari al completamento strutturale del complesso (colore verde) e gli *special finds*, ossia elementi presenti in sito intesi come oggetto singolo o frammento (colore giallo). All'interno della matrice, quindi, è

stato ricreato l'albero logico delle varie unità stratigrafiche virtuali necessarie alla realizzazione dell'intero complesso. Un'altra importante tipologia di nodo utilizzata in questa fase riguarda i 'documenti' e gli 'estrattori'. Per tenere traccia delle scelte ricostruttive e filologiche compiute sono state inserite all'interno dei nodi rappresentanti i documenti (nodo documento) consultati per la realizzazione della ricostruzione, con indicate anche la caratteristica dedotta dal documento (nodo estrattore). Inoltre, è stato possibile indicare la *directory* relativa al file consultato al fine di richiamarne direttamente il contenuto.

Per comprendere al meglio l'iter eseguito è possibile esaminare la matrice ricostruttiva della fornace A (Figura 78). In questo grafico risulta quindi molto chiaro lo schema relativo al susseguirsi degli strati sia reali che virtuali. Alla base di tutto è stato posto lo strato USM01, il fondo cotto della fornace; al di sopra di esso si posizionano altri due strati esistenti, ossia USM04 la fondazione del pilastro centrale del piano forato e USM03 i resti del sistema camera di combustione/prefurnio. Conclusi i nodi della certezza si riscontrano i nodi ricostruttivi legati ai resti in sito: USV06 il sostegno del piano forato; USM05 e USM07 in ordine, la ricostruzione del prefurnio e della camera di combustione. Di questi elementi quindi non abbiamo tracce dirette ma sono funzionali a completare ciò che è stato rinvenuto in sito. Conclusi i nodi 'blu' la struttura è stata completata mediante i nodi puramente ipotetici, come USV08, USV10, USV09 e USV53, rispettivamente piano forato, il camino, cupola emisferica e la chiusura laterale della fornace per il carico e lo scarico. Come è possibile vedere in questo caso troviamo l'utilizzo di nodi 'documenti' ed estrattori, poiché non avendo la possibilità di basare la ricostruzione su resti concreti sono stati utilizzati confronti con siti limitrofi, tipologie simili, consuetudini, trattatistica o esperienza di archeologia sperimentale. La medesima logica è stata utilizzata per effettuare la ricostruzione dell'intero sito. Riprendendo il principio della completezza dell'ambiente virtuale la ricostruzione archeologica non si è semplicemente limitata a individuare una ricostruzione virtuale di ciò che è presente in sito, ossia le fornaci, ma sono stati ipotizzati: una tettoia e due edifici adiacenti alle fornaci, separati di qualche metro dalle strutture appartenenti all'insediamento abitativo. (Figura 79). Riguardo la tettoia realizzata al di sopra delle fornaci è possibile riscontrare la fondazione di un ipotetico palo, dal quale è stato possibile ricavarne la dimensione. Inoltre, da

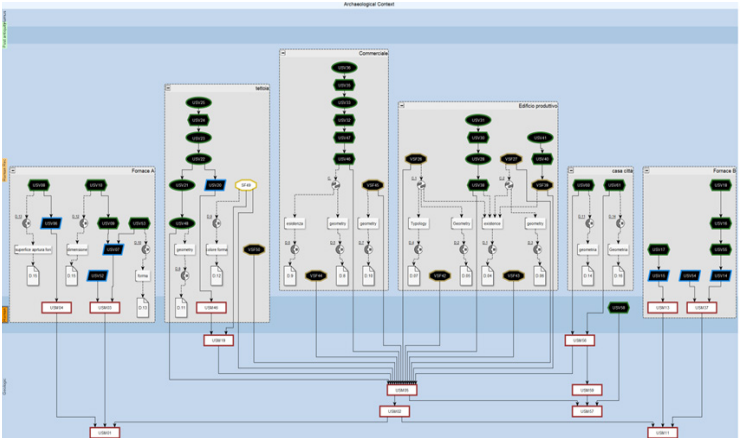
prove di archeologia sperimentale, la presenza di un riparo è risultata fondamentale per mantenere la fornace asciutta. Sempre da esperienze d'archeologia sperimentale è stata stimata l'altezza dell'intero complesso al fine di non avere problemi legati all'enorme calore emesso dalle fornaci, valutando un'altezza di 2,5-3 metri dal camino della fornace.



Gli edifici adiacenti alle fornaci si sono rivelati fondamentali per due ragioni, da un lato per completare la descrizione del ciclo produttivo della ceramica, inserendo così tutti i luoghi necessari alla produzione dei vasi; dall'altro lato è stato fondamentale per

Fig.78
Extended Matrix
ricostruttiva della
fornace A.

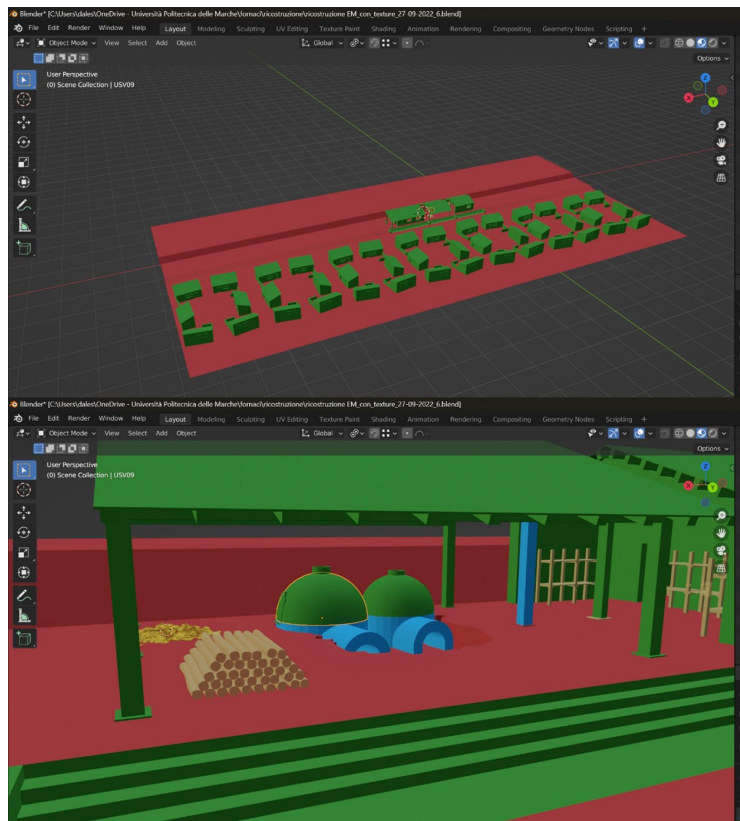
chiudere le quinte laterali in relazione alla vista frontale delle fornaci stesse. Da un punto di vista filologico non sono stati trovati resti diretti di questi edifici, ma risulta difficile ipotizzare un sistema produttivo del genere, senza degli edifici dedicati allo stoccaggio dei materiali da lavoro e degli oggetti realizzati. La conformazione architettonica di questo sistema è stata ripresa da un sito produttivo coevo limitrofo, ossia il sito archeologico di Septempeda.



L'edificio di sinistra, quello legato a funzioni commerciali, è stato riproposto all'interno di questa ricostruzione 3D nella medesima forma e dimensione di quello del sito limitrofo, dato che la destinazione d'uso era la medesima. Nel caso dell'edificio di destra, quello legato alla lavorazione della ceramica, sono stati aggiunti tutti gli elementi necessari a tale scopo, quale il porticato per lo stoccaggio e l'asciugatura dei vasi; la vasca per la battitura a piedi nudi dell'argilla e il tornio per la lavorazione del vaso. In questo caso si è fatto riferimento non solo al sito produttivo limitrofo, ma anche alla consuetudine archeologica mediante confronto con altri siti noti. Per quanto riguarda la realizzazione dell'insediamento abitativo, esso si colloca frontalmente alle fornaci, in questo caso sono state create delle varianti relative a una piccola abitazione rinvenuta nel sito archeologico sempre di Septempeda. Oggi abbiamo certezza della presenza dell'insediamento, ma non si hanno dati specifici poiché gli scavi sono in corso d'opera. Interessante è stato il caso dell'aggiunta nel sistema urbano di alcune tettoie; infatti, durante il lavoro

Fig.79
Extended Matrix
dell'intero complesso
archeologico.

di ricostruzione l'avanzamento degli scavi ha portato alla luce i resti di altri sistemi produttivi come una forgia, la quale, seppur in piccolo è stata inserita nella ricostruzione. Per concludere il sistema scenico legato alla ricostruzione archeologica l'unico punto non definito rimasto risultava essere l'area retrostante le fornaci, non avendo rinvenuto resti e grazie alla presenza di un dislivello nel terreno è stato sufficiente ipotizzare una zona boschiva, concludendo così la fase di ricostruzione archeologica di primo livello LOD1 (Figura 80).



Tutta la modellazione relativa al LOD1 è stata eseguita mediante l'utilizzo di procedimenti di modellazione solida, come cubi sfere o cilindri, oppure tramite estrusioni e operazioni booleane. Direttamente collegata alla realizzazione del modello ricostruttivo archeologicamente validato è importante sottolineare che anche i vasi utilizzati nel modello sono frutto di studio archeo-

Fig.80
Modellazione
LOD1; in alto
l'intero complesso; in
basso dettaglio delle
fornaci.

logico avvenuto in relazioni a resti rinvenuti in sito, sono state individuate tre differenti tipologie, un'olpe, un'olla e una brocca. La modellazione di questi reperti è stata effettuata mediante l'estrazione del profilo attraverso curve di Bézier e realizzato un solido di rivoluzione. Conclusa la modellazione di primo livello si è passati alla realizzazione del LOD2, ossia il modello di rappresentazione realistico. Il realismo in questo caso è stato ricercato tramite una modellazione specifica di dettagli e aggiunta di oggetti necessari alla creazione dei vasi, quali tronchi, secchi, argilla, vasi o strumenti di lavoro. In questo caso oltre alle già citate tecniche di modellazione diretta, sono state impiegate anche altre tecniche avanzate, utili all'inserimento di dettagli, soprattutto nel caso di modellazione di forme organiche, o gestire in modo agile la generazione di elementi casuali. Queste tecniche sono: *sculpting*; modellazione su base di simulazione fisica e *geometry node*, ovviamente riferiti al software di modellazione *Blender*. Le tecniche di *sculpting* sono state utilizzate per modellare gli elementi in terra, come le fornaci, il terreno scavato intorno a quest'ultime e la scarpata retrostante le fornaci. La caratteristica comune nell'utilizzo di tecniche di *sculpting* consiste nel lavorare con modelli caratterizzati da un numero elevato di poligoni, il quale conferisce la possibilità di inserire minuziosi dettagli superficiali. Questa tecnica consente di lavorare una qualsiasi forma geometrica come se fosse un elemento in argilla. Mediante l'utilizzo di appositi pennelli 3D o *Brush* è stato possibile aggiungere o togliere materiale, renderlo più o meno regolare o disegnare direttamente in 3D dettagli. Nel caso specifico della modellazione delle fornaci, partendo da una discretizzazione regolare delle forme individuate è stato effettuato un *voxel remeshing* al fine di amalgamare i punti di giuntura tra prefurnio e camera di combustione; in seguito, è stata effettuata una suddivisione delle superfici al fine di avere più poligoni e infine sono stati aggiunti dettagli superficiali mediante *sculpting* e in particolare mediante i *brush clay* e *clay strips* (Figura 81). La simulazione fisica è stata utilizzata per posizionare in modo naturale oggetti all'interno della scena, come tronchi o residui di cocci rotti. Riguardo i tronchi questo procedimento è stato utilizzato per creare una disposizione naturale di questi, è stata creata una semplice catasta in cui i vari livelli di legno sono stati disposti distanziati di qualche centimetro. In seguito, è stata assegnata una massa e un volume d'ingombro a ogni elemento e stabilito un piano statico su cui farli adagiare. Stabiliti questi parametri è stata eseguita la simulazione fisica lasciando cadere i tronchi sul piano statico; raggiunta la disposizione finale è stata interrotta la simulazione e salvata la posizione. Il mede-

simo procedimento è stato adottato per la realizzazione della disposizione dei cocci di vaso. Nello specifico sono state utilizzate le tipologie individuate in fase d'indagine archeologica, frammentati in modo casuale e lasciati cadere, simulando a tutti gli effetti una rottura per impatto (Figura 82). L'ultima modalità di modellazione avanzata riguarda l'utilizzo del *geometry node* di *Blender*, mediante un sistema parametrico a nodi è stata gestita la collocazione casuale dei vasi sugli scaffali e delle case nell'insediamento abitativo.

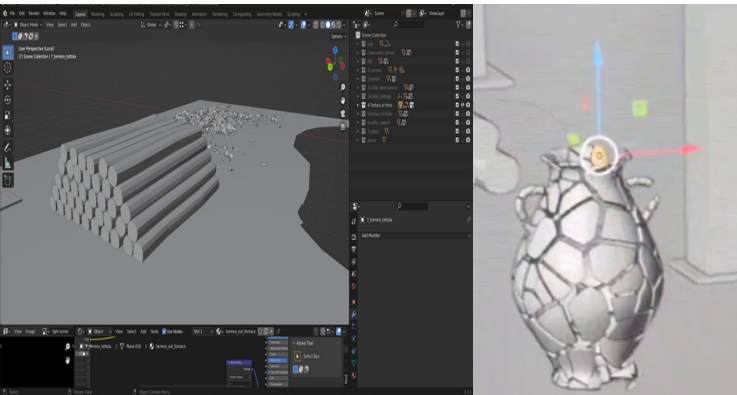
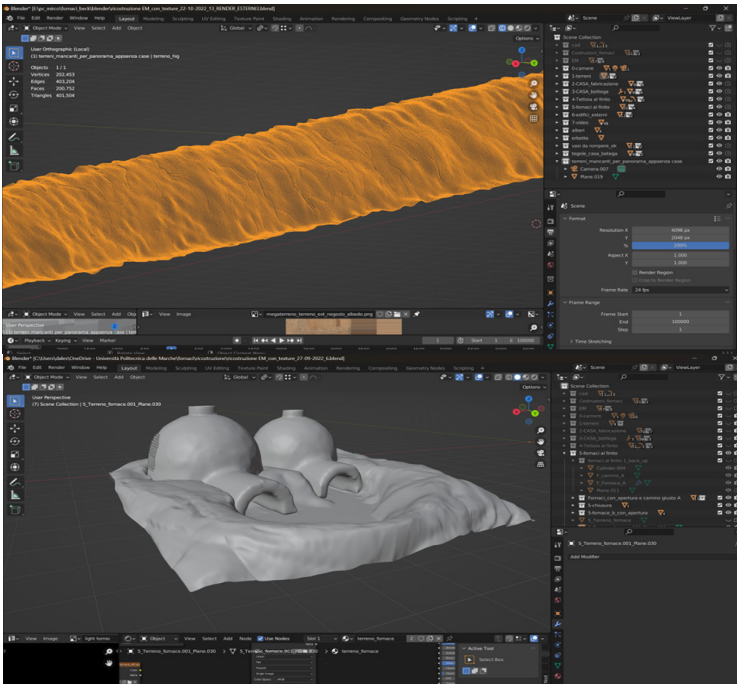
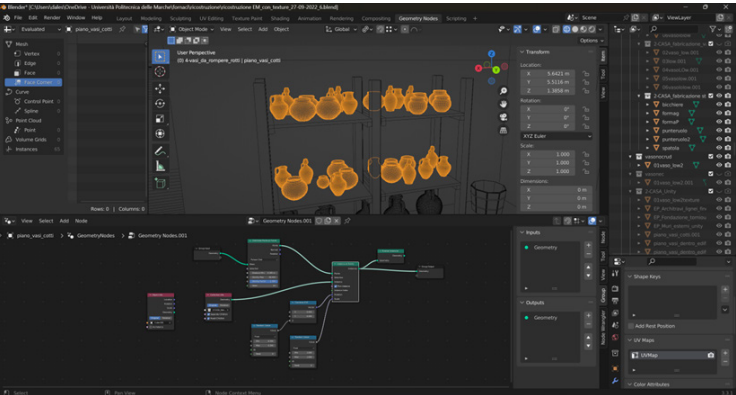


Fig.81
Dettaglio della modellazione mediante sculpting.

Fig.82
Dettaglio della modellazione mediante simulazione fisica.

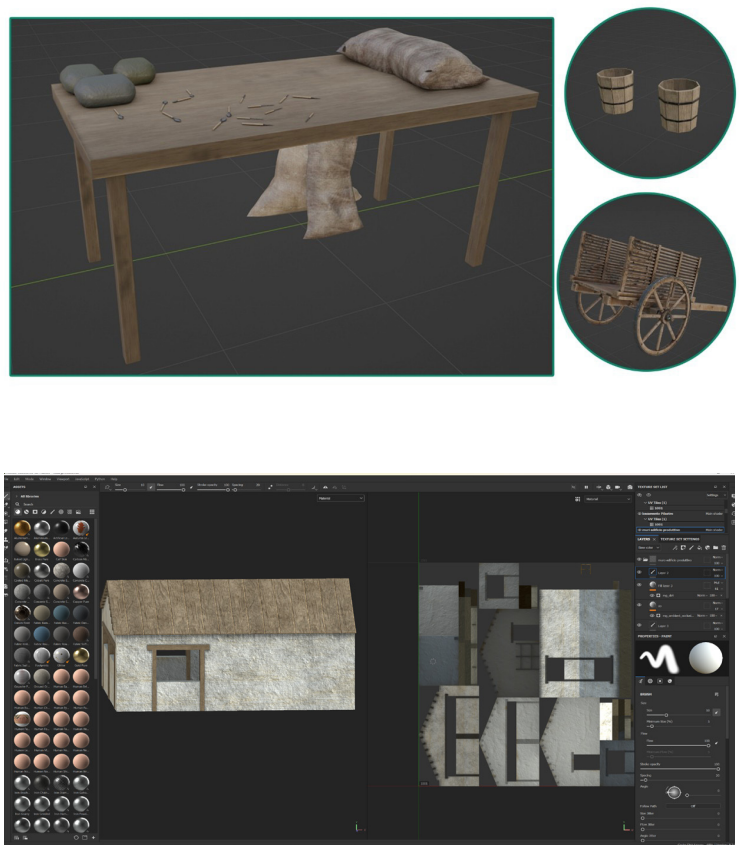
Prendendo ad esempio la disposizione dei vasi sugli scaffali è stato sufficiente stabilire un piano d'appoggio, dopodiché è stato dato in input un *asset* di vasi precedentemente realizzati, dei valori di variazione casuale di traslazione, rotazione, scala, densità e colore, ottenendo in output la disposizione casuale per posizione, dimensione e colore. Tutto è stato gestito mediante parametri rendendo così il risultato finale realistico, ma allo stesso tempo versatile dato che cambiando semplicemente l'estensione del piano di partenza è stato possibile ottenere una nuova conformazione (Figura 83).



La fase di modellazione si è conclusa mediante la realizzazione effettiva degli oggetti di scena virtuali, necessari a rendere l'ambiente realistico e realmente vissuto, ossia secchi, sacchi, panetti d'argilla, utensili ed un carro (Figura 84). La creazione dell'ambiente virtuale si è conclusa con la fase di texturizzazione. Tutti i modelli creati sono stati esportati in *obj* e importati all'interno del software *substance painter* (Figura 85). Anche in questa fase operativa il tema principale è stata la ricerca di realismo. In questo caso oltre all'utilizzo di procedure automatiche di generazione di dettagli cromatici, è stato realizzato un attento lavoro di *texture painting* mediante l'utilizzo di stencil utili all'aggiunta di macchie e schizzi d'acqua e argilla, con l'intento di rappresentare effettivamente un ambiente utilizzato per finalità produttive. Tutto il lavoro relativo alla realizzazione del comparto visivo, non solo il LOD 1, ma anche il LOD 2 è stato realizzato in stretta collaborazione con il gruppo di archeologia dell'università di Macerata guidato dal professor Roberto Perna e la ricercatrice Ludovica Xavier De Silva. Come già anticipato, parallelamente

Fig.83
Geometry node, Blender.

alla realizzazione del comparto visivo è stata realizzata la versione finale della sceneggiatura. In questo caso è stato eseguito uno specifico lavoro di coordinamento tra il gruppo di lavoro dell'università di Macerata e Andrea Tonelli di Marchingegno, storico esperto di *storytelling*, finalizzato alla mediazione tra contenuto scientifico da veicolare e linguaggio tipico della comunicazione e del mondo dell'intrattenimento.

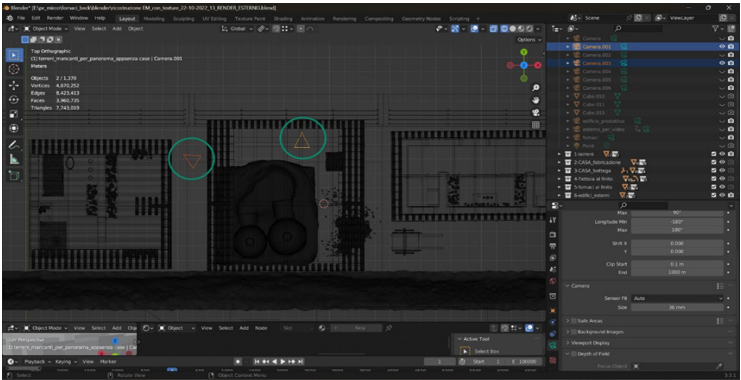


Una volta realizzato il modello finale e ottenuta la stesura definitiva della sceneggiatura è stato possibile procedere con le riprese cinematografiche su *green screen*. Sono state così individuate le tre scene da realizzare: la scena di carico delle fornaci, ossia la fase in cui i vasi crudi vengono inseriti nella fornace, la scena di alimentazione e gestione della fornace, in cui viene po-

Fig.84
Oggetti di scena.

Fig.85
Texture painting della bottega.

sta la legna nel prefurnio e controllata la temperatura, e infine la scena di scarico, in cui viene aperta la fornace e tirati fuori i vasi cotti. In questo caso le riprese cinematografiche si sono caratterizzate per una maggior interazione tra ambiente virtuale e spazio reale, dovendo interagire con oggetti fisici. Ad esempio, nella scena di carico della fornace l'attore si è trovato a dover prendere in mano un oggetto reale al fine di posizionarlo all'interno della fornace virtuale. Per realizzare questa interazione si sarebbe dovuto costruire un ingombro di volume pari all'ingresso della fornace, ma rivestito del medesimo colore verde del *green screen*. Questa soluzione avrebbe comportato un aumento eccessivo dei costi di produzione, per questa ragione si è optato per una selezione di punti di vista tali per cui non venisse mai inquadrato l'interno della fornace, progettando di far scomparire la porzione di attore entrante nella fornace (Figura 86).



Un'altra difficoltà è stata riscontrata nel settaggio delle luci, infatti, in questo caso non si è trattato di una scena con condizioni d'illuminazione stabile e diretta, come nell'esperienza precedentemente descritta della Scuola d'Atene, ma la presenza delle fornaci virtuali implica automaticamente la presenza del fuoco, da cui ne è derivata la necessità di inserire nell'ambiente reale una luce variabile utile a ricreare l'illuminazione dalla fiamma. Tale criticità è stata risolta sul set mediante l'utilizzo di un pannello led in grado di simulare la luce vibrante del fuoco. Riguardo la realizzazione dei *props* di scena sono stati prodotti: due set di vasi, uno realizzato mediante tecniche di archeologia sperimentale, i vasi cotti; l'altro realizzato mediante tecniche di stampa 3D, utilizzando i medesimi modelli usati all'interno

Fig.86
Cerchiati in verde lo schema dei due punti di vista selezionati.

dell'ambiente 3D, in seguito alla stampa i vasi sono stati colorati e laccati al fine di ottenere il giusto colore del vaso crudo. Altri oggetti utilizzati sul set furono elementi in legno, per alimentare la fornace, argilla e mattoni per simulare la chiusura e l'apertura della porta di carico della stessa (Figura 87).



Forti dell'esperienza già maturata nel primo caso di studio descritto, è stato deciso di eseguire le riprese nel medesimo teatro di posa, ossia Grafiche Ricciarelli a Monsano (AN), soprattutto valutando la grande estensione della superficie del *green screen* a disposizione. Sono state utilizzate circa 10kw di luce alogena per illuminare il set, cercando di simulare la luce solare inserita nel progetto di ricostruzione virtuale. È stato possibile avere una preview del risultato finale mediante l'utilizzo di un mixer video *black magic*, in grado di bucare il verde e inserire la ripresa in tempo reale all'interno dell'ambiente virtuale. Questo aspetto è stato fondamentale per testare movimenti e rapporti proporzionali tra reale e virtuale. Per quanto riguarda la macchina da presa è stata utilizzata una cinecamera Red Komodo, ottica Canon 24-70 serie L con focale 50 mm. Il risultato finale è stato girato in 6k. Le riprese sono state effettuate in un'unica giornata e per scandire i tempi legati alle azioni degli attori è stata riprodotta una lettura del copione della voce fuoricampo. Tutto il comparto tecnico per la realizzazione del set e delle riprese è stato gestito da Christian Mazur e Matteo Giacchella di Up-ping Studio (Figura 88). Un altro aspetto importante della fase di produzione riguarda la composizione delle musiche, nello

Fig.87
Props di Scena.

specifico sono state realizzate quattro tracce sonore, ricercando sonorità antiche campionate anche con rumori e suoni ricollegabili a oggetti ceramici. La realizzazione del suono di fondo invece è stata effettuata in fase di post-produzione utilizzando come base il girato finale. La sfera sonora è stata composta dal sound designer e musicista Simone Mosca. Per concludere, l'ultimo aspetto della fase di produzione sono state realizzate due registrazioni riguardo le voci fuoricampo, realizzate in studio di registrazione professionale. La voce italiana è stata interpretata dall'attrice Francesca Rossi Brunori mentre quella inglese da Lillian Olivieri.



Post-produzione

Conclusa la generazione di tutti i contenuti è stato possibile procedere con la loro post-produzione al fine di ottenere l'esperienza finale. Anche in questo caso il *Meta Quest 2/3* è stato designato come dispositivo immersivo di riproduzione dell'esperienza. Il montaggio finale di tutti i contenuti si caratterizza per la necessità di alternare momenti caratterizzati dall'esplorazione di un ambiente 3D, importanti per interagire, ad altri in cui ciò che viene fruito non è altro che un video panoramico monosco-

Fig.88
Immagini del set in teatro di posa.

pico fondamentale per l'inserimento della performance attoriale. Queste due anime dell'esperienza sono state unite e messe in sequenza all'interno della *game engine Unity*. Al fine di poter ottenere il prodotto finale, quindi, si è dovuto procedere con la predisposizione dei contenuti sopra citati al fine di funzionare correttamente all'interno dell'applicativo. Le operazioni svolte per raggiungere questo scopo possono essere divise in due famiglie in relazione alle modalità di fruizione. La prima riguarda il montaggio finale del girato cinematografico volto all'unione effettiva del girato reale con l'ambiente virtuale, mentre il secondo riguarda la fruizione diretta dell'ambiente virtuale, ossia l'ottimizzazione computazionale del modello 3D complesso. Riguardo la prima tematica operativa, il punto di partenza di queste azioni di post-produzione ha visto la presenza da un lato di riprese reali, dall'altro lato le visualizzazioni statiche dell'ambiente virtuale e, infine, la componente sonora quanto audio, musiche e suoni. Questi elementi, quindi, sono stati uniti al fine di ottenere un unico video panoramico monoscopico a 360 gradi. Nello specifico sono stati realizzati due video distinti uno introduttivo relativo alla contestualizzazione del sito archeologico e il secondo relativo alle fasi produttive delle fornaci. Il montaggio relativo al primo video è stato risolto in modo lineare dato che non sono presenti momenti ibridi reale/virtuale, ma partendo da una foto panoramica equirettangolare ad alta risoluzione (16384x8192) del sito attuale, in cui sono visibili i resti imperiali e repubblicani, mediante dissolvenza incrociata si giunge alla visualizzazione del sito produttivo ricostruito (Figura 89). Nello specifico è stata realizzata una renderizzazione equirettangolare in *Blender*, mediante motore *Cycles*, sia del sito archeologico composto solo dalle due fornaci e in seguito composto da tutti gli altri elementi della zona produttiva. Il tutto è stato montato assieme al messaggio sonoro del recitato, delle musiche e dei suoni, mediante il programma di editing video *Adobe Premiere Pro*, facendo attenzione a esportare su file separati audio e video i quali verranno riprodotti da oggetti virtuali differenti all'interno della *game engine*. Questa scelta è stata compiuta al fine di facilitare la realizzazione dell'esperienza in doppia lingua, al fine di non portare all'interno dell'applicazione due video con lingua diversa, ma un solo video con due tracce audio differenti, una per ogni lingua. Riguardo la realizzazione del secondo video, il primo passo è stato la renderizzazione delle viste 3D individuate durante la fase di ripresa cinematografica, in particolare sono stati individuati due punti di presa, uno frontale all'imbocco del prefurnio, per le scene di carico e di scarico, e l'altra di tre quarti rispetto al prefurnio, per la scena di alimentazione della fornace.

ce. Anche in questo caso la renderizzazione è stata effettuata in *Blender* mediante *Cycles*, ottenendo due immagini equirettangolari panoramiche a 360 gradi monoscopiche (Figura 90).



Fig.89
Sequenza
introduttiva;
a) panoramica
resti attuali; b)
ricostruzione fornaci;
c) ricostruzione zona
produttiva.

Riguardo il girato cinematografico, la prima azione è stata l'eliminazione dello sfondo verde mediante tecnica *chroma key*, all'interno del software *DaVinci* e *Adobe After Effects*. Le clip otte-

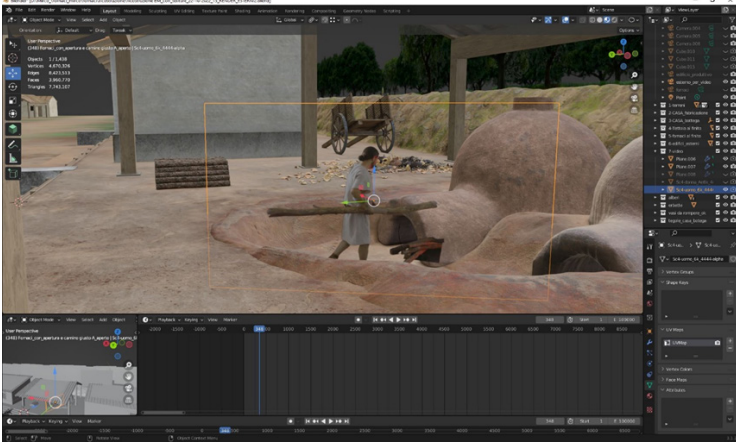
nute, essendo ancora in forma prospettica sono state importate nuovamente all'interno di *Blender* per renderizzarne le distorsioni panoramiche, in più, nella renderizzazione, è stato facilitato il processo di *color correction* (Figura 91). Le riprese erano state effettuate utilizzando una gamma cromatica neutra per amalgamare meglio i colori in fase di post-produzione. Nello specifico la renderizzazione di ogni frame è stata impostata in modo tale da non renderizzare l'intero ambiente, ma facendo in modo che esso influenzi cromaticamente il soggetto.



Questo principio è stato fondamentale per la resa della scena dell'alimentazione della fornace in relazione alla luce prodotta dal fuoco presente all'interno del prefurnio. In fase di post-produzione ci si è resi conto che il pannello led utilizzato per simulare la luce delle fiamme non era sufficiente a illuminare né l'attore, né i tronchi a diretto contatto con il fuoco, producendo solo un leggero riflesso rosso sul contorno delle figure. Al fine di conferire realismo alla scena, quindi, è stata inserita una luce omnidirezionale cromaticamente affine al fuoco. Ultimata la

Fig.90
Equirettangolari della scena virtuale: a) scena d'alimentazione della fornace; b) scena di carico/scarico della fornace.

fase di renderizzazione si è passati alla fase di compositing in *Adobe Premiere* e *Adobe After Effects*. In questa procedura si sono giustapposte le clip reali su quelle virtuali andando a sottolineare luci e ombre al fine di amalgamare al meglio le scene, e andando a creare delle maschere finalizzate a coprire le parti di girato poste all'interno delle fornaci virtuali. Anche in questa operazione la realizzazione della scena d'alimentazione della fornace si è rivelata particolarmente critica in relazione al fatto che l'attore, nel momento di prendere dei tronchi in legno da mettere all'interno della fornace, passa davanti a quelli già presenti dentro la fornace; questa conformazione non è risolvibile mediante una semplice maschera statica poiché il fornaciaio finirebbe anch'esso dietro la maschera scomparendo nella fornace.



La risoluzione di questo elemento critico è stata effettuata mediante l'utilizzo di una maschera dinamica volta a separare l'attore dai tronchi messi a terra, al fine di poter mascherare mediante la fornace solo i tronchi già in essa. Tutto questo processo è stato gestito all'interno di *Adobe After Effects* utilizzando il *tool rotobrush*, il quale, definendo un contorno semplice di un oggetto in movimento, ne genera la mascheratura dinamica utilizzando processi di riconoscimento automatico e intelligenza artificiale (Figura 92). Un altro elemento realizzato al fine di conferire maggior realismo alla scena è stato la creazione virtuale dell'effetto del fumo dalla fornace. Tale visualizzazione è stata realizzata in *Blender* mediante simulazione virtuale del fluido, e in seguito renderizzata mediante il motore di *render*

Fig.91
Inserimento del frame all'interno dell'ambiente di modellazione di Blender.

Cycles. Per ottimizzare il calcolo e salvare memoria in fase di memorizzazione del singolo frame è stato scelto di renderizzare solo la porzione coinvolta, e non salvare il canale alfa del singolo frame, ma memorizzare solo i canali RGB, impostando come sfondo un colore verde omogeneo, successivamente rimosso mediante la tecnica *chroma key* in *Adobe Premiere Pro* (Figura 93).



Per concludere il processo di *editing* sono state inserite delle semplici transizioni a nero tra una scena e l'altra ed effettuato il missaggio sonoro mettendo a sistema non solo voce fuoricampo e musica, ma anche i rumori di fondo, come lo scoppiettio del fuoco, il cinguettio degli uccelli, i rumori legati all'azione dei

Fig.92
Maschera dinamica.

Fig.93
Dettaglio dell'inserimento del fumo.

personaggi, come passi toccare vasi o colpi di tosse (Figura 94). La seconda famiglia di operazioni volte alla realizzazione dei contenuti finali ha visto l'ottimizzazione dei modelli 3D da importare all'interno della *game engine Unity*. I processi operativi effettuati sono i medesimi già descritti (*remeshing*, *unwrapping*, *baking*), tale procedimento è stato realizzato per ogni oggetto presente all'interno degli edifici, per i terreni della scarpata e delle fornaci (Figura 95).



Fig.94
Risultato finale del compositing video.

Fig.95
Schema retopology del sistema delle fornaci.

vo delle esperienze precedentemente descritte, è stato seguito il medesimo iter sempre volto all'utilizzo degli *asset* messi a disposizione dalla casa produttrice *Meta* (Oculus XR Plug-in 3.0.2; OVRCameraRig). Nello specifico di questo lavoro è stato scelto di operare in modo differente da un punto di vista della struttura logica circa il funzionamento e il susseguirsi delle scene narrative. Nelle esperienze già trattate, ogni cambio d'ambientazione era stato gestito mediante un cambio di *Unity Scene*, comportando ogni volta, a livello computazionale, una distruzione di tutto ciò che era presente in memoria e un nuovo *loading* dei contenuti, causando ridondanza computazionale e un maggior dimensione dell'*apk* finale. In questo progetto si è quindi voluto gestire l'intera esperienza un'unica *Unity scene*, andando a inserire tutti i contenuti e gestendo mediante un unico *script*, tutte le transizioni necessarie al passare da una fase narrativa all'altra. Secondo una caratterizzazione generale, questo sistema ottimizza anche il funzionamento dell'applicazione poiché, 'spegnere' e 'accendere' un componente già caricato in memoria è un processo molto più rapido e meno oneroso in confronto a dover cancellare e ricaricare ogni volta tutti contenuti. La struttura software risultante in questo caso si caratterizza unicamente di due *Unity scene*: una relativa all'esperienza immersiva e la seconda relativa ai *credits*. La scena relativa all'esperienza si costituisce di cinque momenti distinti:

- Schermata '*home*', questo ambiente è finalizzato alla selezione della lingua, italiana o inglese. La scena è sostanzialmente costituita da un *canvas*, ossia schermata d'interfaccia utente volto all'inserimento di contenuti 2D, sul quale è stato inserito il titolo dell'applicazione, una scritta in doppia lingua per informare l'utente di selezionare la lingua mediante *button* e i due pulsanti per selezionarla. Anche in questo caso è stata prevista l'interazione mediante l'utilizzo diretto delle mani, *hand tracking* senza utilizzare controller. Lo sfondo generale di questa schermata è stato realizzato mediante una panoramica sferica di una delle viste delle fornaci (Figura 96).
- La seconda scena prevede l'introduzione del sito archeologico. Questa è stata realizzata mediante l'utilizzo di panoramica sferica, quindi per far avvenire il passaggio dalla scena '*home*' è stato disattivato il *canvas* iniziale e cambiata l'immagine di sfondo, che in questo caso è stata sostituita dal video panoramico, come già trattato nel precedente caso studio. In questo caso, come nelle due scene successive la visualizza-

zione delle mani virtuali è stata disabilitata poiché non richiesto il loro utilizzo (Figura 97).

- La terza scena è ambientata all'interno dell'edificio adibito alla lavorazione dell'argilla. In questo caso il passaggio dalla scena precedente avviene attivando il modello 3D dell'edificio, il sistema delle fornaci e solo l'esterno del secondo edificio visibile dal punto di vista selezionato. Viene cambiata l'immagine di sfondo panoramica, la quale è stata realizzata all'interno dell'ambiente 3D (*Blender*) mantenendo solo i terreni e le case di sfondo. La narrazione in questa scena è stata sottolineata mediante l'utilizzo di una luce animata, realizzata mediante l'utilizzo classico di *key frame*, *animation* e *animator controller*, la quale viene attivata in sequenza mediante *script* e temporizzata in relazione alla voce fuori campo (Figura 98).
- La quarta scena riguarda le fasi di lavoro con le fornaci, questa come l'introduzione viene eseguita mediante video panoramico; quindi, semplicemente viene spento tutto il sistema 3D precedentemente attivo e cambiata la panoramica di sfondo con il video realizzato (Figura 99).
- La quinta e ultima scena è ambientata all'interno dell'edificio adibito alla vendita dei vasi. In questo caso viene attivato unicamente il modello 3D dell'edificio, ma completo anche degli interni. Esternamente vengono attivati solo alcuni dei terreni, mentre la panoramica utilizzata come sfondo include, come nel caso della terza scena, le case del complesso abitativo. In questa fase conclusiva, dopo una breve introduzione iniziale dell'ambiente, l'utente è libero di prendere uno dei vasi disposti davanti a sé (mediante *hand tracking*) con la propria mano, posizionarlo sopra di una tegola illuminata e ascoltarne la descrizione (Figura 100).

Particolare attenzione è stata posta alla logica relativa al modo in cui vengono richiamati i contenuti. Nello specifico sono individuate due caratteristiche cardine, ossia evitare il sovrapporsi di più audio ed evitare che si potesse richiamare più volte lo stesso contenuto. Un'altra particolare interazione inserita in quest'ultima scena, emersa proprio facendo testare l'applicazione al gruppo di ricerca archeologica dell'università di Macerata è stata la rottura del vaso. Provando l'interazione con i vasi e cercando di prenderli in mano è capitato che il vaso cadesse a

terra senza rompersi; quindi, per aggiungere realismo all'interazione con il vaso virtuale è stato deciso di inserire, nell'eventualità di una sua caduta, la sua rottura.



La realizzazione di questa tipologia d'interazione avviene utilizzando due versioni di vaso, una integra e un'altra frammentaria. L'utente interagisce non con un vaso ma con un volume cubico di pari dimensioni, al cui interno sono stati posti i due vasi sovrapposti. L'utente spostando il volume cubico sposta automaticamente e nello stesso modo anche ciò che vi è contenuto dentro, in questo caso i due vasi. Nel momento in cui l'oggetto tocca terra mediante *collider* viene richiamata una funzione che spegne il vaso integro e attiva quello frammentato simulando così una sua rottura. In concomitanza con questo cambio di vasi la funzione richiama anche un *audio source* che riproduce il rumore di rottura di quest'ultimo. In relazione alla possibilità di poter influenzare i contenuti da ascoltare è stato realizzato il sistema di conclusione dell'esperienza predisponendo tre scenari differenti. Il primo scenario si verifica nel momento in cui tutte le descrizioni sono state ascoltate; oppure, nel momento in cui tutti i vasi si sono rotti, o anche ogni combinazione ibrida di vasi ascoltati o rotti, in questo caso compare un pulsante, il quale, una volta premuto, fa avvenire il cambio di scena portando l'utente ai titoli di coda. Nel caso in cui un utente non interagisca con tutti i vasi disponibili o semplicemente ha piacere nel rimanere nell'ambiente virtuale, dopo un periodo di tempo prestabilito, l'esperienza finisce portando automaticamente l'u-

Fig.96
Schermata "home".

tente alla conclusione. Tutto lo schema logico, nonché l'alternanza tra i diversi momenti narrativi è stato gestito da un unico script in *C-Sharp*. Nello specifico ognuno dei cinque momenti narrativi previsti corrisponde a una sequenza di funzioni, corrispondente alla sequenza di selezione di contenuti da mostrare.



Fig.97
Contestualizzazione Archeologica con i resti attuali.

Fig.98
Sequenza descrittiva edificio produttivo.

Fig.99
Scene relative alla scena delle fornaci.

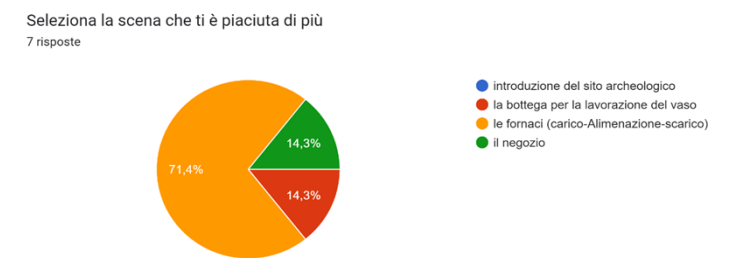
Fig.100
Sequenza d'interazione dell'ultima scena.

Ognuna di queste funzioni è stata messa a sistema in uno schema temporizzato basato sulla durata del contenuto audio di ogni singolo momento, mentre ogni singola transizione è stata realizzata con il medesimo sistema *fade-in/fade-out*. Questo modo di funzionare si interfaccia perfettamente con la possibilità di avere in modo agile più versioni ma con lingue differenti, poiché mediante questo impianto, in fase di selezione lingua, viene semplicemente comunicato al software il cambio del file da riprodurre, evitando così di dover fare più copie del medesimo oggetto, ma viene cambiato solo ciò che è necessario. La scena relativa ai titoli di coda contiene al suo interno unicamente un *canvas* con un'immagine animata recante i nomi di chi ha partecipato alla realizzazione dell'esperienza virtuale. Anche in questo caso è stato proposto il medesimo sistema di reset del contenuto al togliere del visore, al fine di facilitare le mansioni dell'operatore museale, già discusso nei due casi precedenti. Concluso lo sviluppo dell'intera sequenza si è potuto procedere direttamente con la realizzazione dell'*apk* finale mediante l'utilizzo degli SDK, JDK, NDK *Android*.

Test e training

Come per le precedenti esperienze mostrate, anche in questo caso, sono stati predisposti dei test sia in fase di sviluppo, che in fase conclusiva e di perfezionamento. Nello specifico sono state effettuate numerose prove al fine di trovare una strategia funzionante riguardo l'interazione prevista nell'ultima scena, provando diverse soluzioni in fase di *debugging*. In seguito, sono stati predisposti test mediante osservazione e questionari. Dalle osservazioni è stato notato come l'interfaccia preposta alla selezione della lingua non sia risultata immediatamente efficace. Per risolvere questo problema è stato inserito un'icona animata utile a mostrare il modo di selezionare la lingua, ma anche questa modifica è risultata non efficace poiché l'utente era portato a premere sull'icona invece che sul pulsante preposto. La soluzione finale è stata quella di rimuovere l'icona e rendere maggiormente visibili i pulsanti di selezione cambiandone dimensione e colore. Un'altra difficoltà è stata riscontrata in relazione al tracciamento del visore, il quale, da un passaggio da un utente all'altro avrebbe potuto modificare il punto 'zero' causando un disallineamento tra 'utente e i pulsanti di selezione. Questo elemento è stato risolto lasciando la possibilità all'operatore di intervenire

con un controller e premere un pulsante di reset della posizione ricentrando l'origine. In seguito all'esecuzione dei test pilota è stato evinto anche in questo caso che gli elementi maggiormente apprezzati sono il senso d'immersione e la ricostruzione archeologica. Dalle domande a risposta aperta è emerso che gli elementi che hanno colpito di più gli utenti sono stati proprio l'interazione e l'unione di girato cinematografico e ambiente VR. Mentre alla domanda cosa non ti è piaciuto la risposta più quotata è stata l'impossibilità di esplorare liberamente lo spazio 3D. Data la natura ibrida di questa esperienza, proponendo scene con girato cinematografico e altre più interattive, è stato chiesto di indicare la scena piaciuta maggiormente (Figura 101). Mentre circa la domanda relativa all'effettuare l'esperienza a pagamento è stato riscontrato un risultato assimilabile alla prima esperienza descritta, riscontrando un 85% di risposte positive.



Anche per questo V.I.M è stata proposta una giornata di training riguardo l'utilizzo del dispositivo, dell'applicazione e come gestire l'afflusso d'utenza. Tale attività è stata svolta istruendo le guide del parco archeologico d'Urbisaglia, in quell'occasione è stata anche presentata l'esperienza virtuale alla cittadinanza del comune d'Urbisaglia, riscontrando un grande interessamento nei confronti delle nuove tecnologie anche da parte dei visitatori più anziani. Questa applicazione fa parte a tutti gli effetti del nuovo allestimento del parco archeologico di Urbisaglia. In definitiva questa esperienza si è posta come un nuovo modo di approcciare la valorizzazione del patrimonio archeologico, oramai quasi immateriale. Tramite l'utilizzo dell'applicativo è stata data la possibilità di visitare e vivere un qualcosa che attualmente non è più possibile osservare. Inoltre, questa esperienza operativa è stata in grado, ancora una volta, di mostrare la necessità di unire linguaggi differenti per potenziare le capa-

Fig.101
Gradimento delle scene.

cità comunicative legate al patrimonio. Proprio a tal fine questo lavoro ha visto la collaborazione attiva di molteplici professionalità provenienti da campi differenti andando incontro a uno degli obiettivi del progetto TRANSFER di cui questo applicativo ne è uno degli esiti, esso propone di definire una figura professionale che possa essere un raccordo tra le diverse competenze e nella gestione e valorizzazione dei parchi archeologici. Queste capacità di *networking* e coordinamento sono essenziali nella creazione e gestione di una filiera digitale in grado di produrre e sviluppare progetti innovativi di valorizzazione e gestione nel campo dei beni culturali.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In conclusione, attraverso queste esperienze è stato mostrato un nuovo modo di approcciare lo sviluppo di esperienze immersive volte alla fruizione del patrimonio culturale, capace di coinvolgere emotivamente l'utente, ma allo stesso tempo evitare una banalizzazione del messaggio scientifico insito nel valore stesso del bene culturale. In un mondo caratterizzato dall'incredibile sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche, la difficile situazione pandemica di Covid-19 è stata in grado di evidenziare l'inadeguatezza e inconsapevolezza del mondo della cultura nel padroneggiare le potenzialità di questi sistemi. Partendo dall'analisi di tale situazione sono stati così individuati quattro temi fondamentali per lo sviluppo e gestione consapevole del patrimonio culturale digitale: Digitalizzazione scientifica, fruizione del bene culturale, formazione di nuove competenze e valutazioni utente. Mediante queste esperienze operative è stato mostrato come essi non vadano individuati come elementi separati ma come elementi fortemente connessi. Nello specifico il cuore del lavoro ha visto concentrare la propria attenzione sugli aspetti legati alla generazione di processi di fruizione digitale del patrimonio, creando così un'esperienza immersiva e interattiva (*V.I.M. virtual interactive movie*), capace di trasportare l'utente all'interno di una dimensione differente, una 'macchina del tempo' capace di rivoluzionare la percezione stessa del patrimonio approdando a un qualcosa di totalmente nuovo. Il primo caso proposto, l'esperienza VR 'La Scuola d'Atene', indaga modi differenti di fruire del patrimonio artistico, nello specifico l'arte figurativa, dando dimensione spaziale a ciò che tradizionalmente è sempre stata caratterizzata dalla sua dimensione bidimensionale. La realtà virtuale ha conferito la possibilità, quindi di indagare e raccontare nuove interpretazioni dell'opera. Da un punto di vista narrativo è stata sperimentata una modalità basata sulla generazione di video panoramici monoscopici andando a unire riprese reali con ambienti virtuali. Attraverso il secondo caso descritto, 'la tomba della regina Picena di Sirolo-Numana', è stato mostrato come sia possibile ricontestualizzare archeologicamente i reperti, tradizionalmente legati a una fruizione museale, mostrando in chiave emozionale la loro originaria collocazione e funzione. In questo caso, la narrazione è stata sperimentata mediante l'utilizzo di elementi unicamente virtuali, utilizzando un ambiente immersivo e stereoscopico avendo così la possibilità di inserire piccole interazioni con l'ambiente virtuale. La sfera narrativa nonché quella emozionale è stata in-

dagata mediante la composizione di musiche originali, rendendo la sfera sonora il cuore dell'opera. Con l'ultimo caso studio, 'le fornaci di Urbisaglia', si è voluto mostrare un caso applicativo di ricostruzione archeologica, analizzando e descrivendo non solo il luogo produttivo ma anche oggetti e attività svolte. La narrazione in questo caso è stata realizzata unendo le caratteristiche sperimentate nei casi già descritti, alternando parti più cinematografiche mediante l'utilizzo di panoramiche monoscopiche e ambienti immersivi stereoscopici, con particolare attenzione rivolta alle possibilità interattive. Ciò che emerge da queste esperienze è la necessità di collegare mondi apparentemente differenti, come arte architettura, archeologia, cinema, musica e gaming. Per avvalorare il contenuto veicolato sono state eseguite metodiche di generazione scientifica del contenuto digitale e validazione mediante collaborazioni con esperti del settore come studiosi d'arte, storici e archeologi. Per implementare le potenzialità comunicative, narrative ed emozionali è stato necessario seguire metodi e tecniche realizzative tipiche del mondo dell'intrattenimento, chiamando in causa professionalità del settore come sceneggiatori, attori, registi, compositori. Questo duplice aspetto ha portato così all'ibridazione del linguaggio scientifico, inteso come metodo, ricerca e contenuto; con quello della comunicazione dell'intrattenimento, inteso in questo caso come veicolo narrativo. Lo sviluppo di queste esperienze si è caratterizzato per l'individuazione di uno specifico *workflow* costituito da: una fase preliminare in cui si chiarifica quale contenuto scientifico si vuol narrare e la sua conversione in chiave narrativa, una fase di produzione in cui si vanno a realizzare ricerche di carattere scientifico volto alla validazione e produzione dei contenuti visivi virtuali, una fase di post-produzione in cui elementi scientifici ed elementi narrativi vengono messi insieme in un unico sistema di fruizione, mostrando chiaramente come, in ognuna di queste fasi, i due linguaggi si fondano andandosi a completare. Un altro aspetto rilevante emerso dallo sviluppo di questi applicativi è l'attenzione nei confronti della sostenibilità, intesa sia in termini di costi, che in relazione alla facilità d'utilizzo e gestione. Questi aspetti sono centrali per un'effettiva diffusione di tale tipologia d'esperienza soprattutto nei luoghi della cultura, quali musei e parchi archeologici. Attraverso lo sviluppo di questi tre casi studio, quindi, è stato mostrato come sia possibile sviluppare diverse modalità di fruizione immersiva mediante l'impiego di dispositivi tecnologici economici (*Meta Quest 2-Meta Quest 3*). Ciò permette quindi anche a enti culturali medio piccoli di potersi avvalere di questi strumenti, e non a caso il frutto di questo lavoro di ricerca è

tuttora utilizzato in realtà culturali di tale entità. È stato inoltre mostrato come sia centrale progettare degli aspetti specifici nella *user interface* volti a semplificare la gestione del dispositivo (*hand tracking*, reset automatico dell'esperienza), al fine di rendere l'utente finale quanto più autonomo dall'intervento e aiuto dell'operatore museale. Questo aspetto si è rivelato centrale anche al fine di facilitare le fasi di training di quest'ultimo all'utilizzo della tecnologia. È stato visto, inoltre, come la creazione di determinati strumenti di fruizione debba essere supportata da test di gradimento e usabilità per comprendere come l'utente possa percepire l'esperienza fornendo un feedback sul lavoro svolto, spunti di miglioramento e ottimizzandone l'efficacia comunicativa. L'analisi di quest'intero *workflow* mostra come la realizzazione di queste esperienze di fruizione sia caratterizzata dalla messa a sistema di saperi e competenze molto diverse tra loro, gestite mediante un'attiva collaborazione di figure professionali differenti. Ciò che risulta centrale, infatti, non è la stretta conoscenza in dettaglio di ogni singolo ambito da parte di un singolo individuo, ma che ci sia una figura professionale in grado di poter coordinare l'intero gruppo avendo cognizione di necessità e potenzialità di ogni singolo campo. Ed è proprio su tale competenza che va fondata la figura del nuovo curatore digitale. Mediante a definizione delle competenze di questa nuova figura professionale in unione con la formazione di personale specializzato all'interno dei luoghi della cultura e mediante l'utilizzo di nuove tecnologie è stato possibile implementare alcuni degli aspetti fondamentali della *digital readiness* proposta all'interno del 'piano nazionale per la digitalizzazione' (PND). Lo sviluppo quindi di questi processi, proprio a stretto contatto con istituzioni museali si sono rivelate fondamentali non solo per fornire nuovi strumenti d'attrazione per il pubblico, ma sono stati in grado di innescare fondamentali spunti d'interesse verso processi e piani programmatici di digitalizzazione per la tutela, la documentazione e valorizzazione del patrimonio culturale. La bontà di questa linea di sviluppo è stata confermata anche a livello internazionale; infatti, il secondo lavoro descritto 'la tomba della regina Picena di Sirolo-Numana' è risultato vincitore del premio internazionale F@IMP promosso da AVICOM, per installazioni museali immersive legate al mondo dell'archeologia, sottolineando la crescita dell'interesse internazionale verso questa tipologia di esperienza audiovisiva. L'esperienza riguardo 'La Scuola d'Atene', non più fruibile dal settembre 2021, verrà riproposta nel nuovo allestimento digitale di Palazzo Pianetti a Jesi, ridando vita e voce a una mostra temporanea non più fruibile. L'esperienza de 'le fornaci di Urbisaglia', oltre alla sua con-

sueta fruizione nell'ambito del parco archeologico di Urbisaglia, è in mostra all'interno dell'iniziativa In-Nova Macerata, progettato volto a mostrare nuovi metodi tecnologici di fruizione del museo virtuale. Analizzando ora i possibili sviluppi futuri, queste esperienze seppur complete, e pronte per l'utilizzo pubblico, rappresentano solo un primo passo verso questa ibridazione di mondi diversi. In futuro la possibilità di far entrare in contatto linguaggi differenti potrà essere applicata al fine di connettere il mondo della cultura con la sempre più rilevante sfera virtuale della nostra società, il Metaverso. Aprendo così questo settore a nuove e inesplorate possibilità economico-sociali, facendo approdare tali esperienze a una nuova modalità e dimensione di fruizione collettiva. Da un punto di vista tecnologico la sfida futura sarà quella di poter implementare sempre più l'interazione sensoriale, superando il semplice coinvolgimento visivo-uditivo, arrivando a stimolare la sfera tattile, ottenendo un coinvolgimento sempre più immersivo e realistico. Inoltre, le sfide e le potenzialità proposte dall'IA, Intelligenza artificiale, permetteranno lo sviluppo sempre più agile di esperienze molto complesse. L'integrazione di questi sistemi all'interno di applicativi immersivi, come quelli proposti in questo testo, espanderà le potenzialità non solo di fruizione, ma anche di ricerca artistica innescando un dialogo diretto con il patrimonio culturale, a fronte sempre di una forte validazione scientifica del contenuto. Questo utilizzo consapevole dello strumento digitale consente quindi di poter dare nuovo valore al patrimonio digitale, conferendo così la possibilità di poterlo vivere, averne esperienza nel modo più autentico, emozionale e coinvolgente. Queste nuove esperienze, come una 'macchina del tempo', sono in grado di trasportare l'utente all'interno di una dimensione differente, capace di rivoluzionare la percezione stessa del patrimonio approdando a un qualcosa di totalmente nuovo, conferendo, seppur in modo diverso, quel senso di 'aura' di cui parlava Benjamin, ossia quell'insieme di sentimenti, di valori ed emozioni capaci di far 'immergere' nuovamente l'uomo nell'arte, nella cultura e nella sua tradizione.

APPENDICI

La Scuola d'Atene²⁴



²⁴
<https://www.youtube.com/watch?v=dipn-v6Dy4c>

La tomba della regina picena di Sirolo-Numana²⁵



25
<https://www.youtube.com/watch?v=vFvxF-QIKQKE>

Le fornaci di Urbisaglia²⁶



26
<https://youtu.be/YkNxcnnuknE>

BIBLIOGRAFIA

- Agostino, D., & Costantini, C. (2022). A measurement framework for assessing the digital transformation of cultural institutions: the Italian case. *Meditari Accountancy Research*, 30(4), 1141–1168. <https://doi.org/10.1108/MEDAR-02-2021-1207>
- Angeloni, R., Pierdicca, R., Paolanti, M., Mancini, A., & Tonelli, A. (2021). *Measuring and evaluating visitors' behaviors inside museums: the co.me. project. scires-it*, 11(1), 167–178. <https://doi.org/10.2423/i22394303v11n1p167>
- Antinucci, F. (2014). *Comunicare nel museo* (G. Laterza, Ed.; 2nd ed.). Laterza Editore.
- Autodesk. (2006). *Autodesk FBX SDK Overview*. <http://paulbourke.net/dataformats/fbx/fbx.pdf>
- Azhar, S. (2011). *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry* (Vol. 11, Issue 3).
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <http://www.cs.unc.edu/~azumaW/>
- Baradaran Rahimi, F., Boyd, J. E., Eiserman, J. R., Levy, R. M., & Kim, B. (2022). Museum beyond physical walls: an exploration of virtual reality-enhanced experience in an exhibition-like space. *Virtual Reality*, 26(4), 1471–1488. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00643-5>
- Barazzetti, L., Scaioni, M., & Remondino, F. (2010). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: Combining accuracy with automation. *Photogrammetric Record*, 25(132), 356–381. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00599.x>
- Bardelli, G. (2021). Ambre non figurate da Numana. *Rivista Di Archeologia*, XLV.
- Bardelli, G. (2022). Wie viel Macht hinter der Pracht? Erste Überlegungen zu reichen Frauenbestattungen in Numana. In P. Amann, R. de Vela, & R. P. Kramer (Eds.), *Gesellschaft und Familie bei Etruskern und Italikern. Akten des 18. Treffens der Arbeitsgemeinschaft Etrusker & Italiker* (Wien, Institut für Alte Geschichte und Altertumskunde, Papyrologie und Epigraphik. <https://doi.org/10.25365>
- Bardelli, G., Milazzo, G., & Vollmer, I. A. (2019). La Tomba della Regina di Sirolo. Ricerca e restauro a trent'anni dalla scoperta. In N. Frapiccini & A. Naso (Eds.), *Archeologia Piceana* (pp. 415–425). Quasar.
- Battistini, F., & di Stefano, C. (2018, November 26). Virtual Reality meets Degas: an immersive framework for art exploration and learning. *7th European Workshop on Visual Information*.
- Bekele, K. M., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11. <https://doi.org/10.1145/3145534>
- Benjamin, W. (2017). *L'opera d'arte nel tempo della sua riproducibilità tecnica (1935/36)*. Cariatì, S., Cicero, V., Triepi, L. (a cura di). Firenze-Milano: Giunti-Bompiani.
- Bekele, M. K. (2019). Walkable Mixed Reality Map as interaction interface for Virtual Heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00127>
- Bommes, D., Lévy, B., Pietroni, N., Puppo, E., Silva, C., Tarini, M., & Zorin, D. (2012). State of the Art in Quad Meshing. *Computer Graphic Forum*, 3, 1–24.
- Bontchev, B., & Vassileva, D. (2016). Assessing engagement in an emotionally-Adaptive applied game. *ACM International Conference Proceeding Series, 02-04-November-2016*, 747–754. <https://doi.org/10.1145/3012430.3012602>
- Bourke, P. (1999a). *Object Files (.obj)*. <http://paulbourke.net/dataformats/obj/>
- Bourke, P. (1999b, October). *Stl format*. <http://paulbourke.net/dataformats/stl/>
- Bozzelli, G., Raia, A., Ricciardi, S., de Nino, M., Barile, N., Perrella, M., Tramontano, M., Pagano, A., & Palombini, A. (2019). An integrated VR/AR framework for user-centric interactive experience of cultural heritage: The ArkaeVision project. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00124>
- Braud, T., Fernandez, C. B., & Hui, P. (2022). Scaling-up AR: University Campus as a Physical-Digital Metaverse. *Proceedings - 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, VRW 2022*, 169–175. <https://doi.org/10.1109/VRW55335.2022.00044>
- Broucke, P., Forte, M., Siliotti, A., & Bommelaer, J.-F. (1999). Virtual Archaeology: Re-Creating Ancient Worlds. *American Journal of Archaeology*. <https://doi.org/10.2307/506978>
- Brusaporci, S., & Trizio, I. (2013). La “Carta di Londra” e il Patrimonio Architetonico: riflessioni circa una possibile implementazione. *SCIRES-IT - SCientific REsearch and Information Technology*, 3(2), 55–68. <https://doi.org/10.2423/i22394303v3n2p55>
- Burdea, G., & Coiffet, P. (2003). *Virtual reality technology* (John Wiley, Ed.; 2nd ed.). Wiley-interscience.
- Card, S. K., & Mackinlay, J. D. (1999). Readings in Information Visualization: Using Vision To Think. <https://www.researchgate.net/publication/220691172>
- Carpentiero, L. (2020). Il BIM come modello di gestione di un sito archeologico. Oltre i limiti dell'oggetto parametrico tra criticità e nuove proposte. *Newsletter Di Archeologia CISA*, 11, 69–86.
- Carrozzino, M., Evangelista, C., Brondi, R., Tecchia, F., & Bergamasco, M. (2014). Virtual reconstruction of paintings as a tool for research and learning. *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), 308–312. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.06.003>
- Cecotti, H. (2022). Cultural Heritage in Fully Immersive Virtual Reality. *Virtual Worlds*, 1(1), 82–102. <https://doi.org/10.3390/virtual-worlds1010006>
- Chardonnet, J.-R., Mirzaei, M. A., Merienne -, F., & Mérienne, F. (2017). Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 33(10), 771–785.
- Chattha, U. A., Janjua, U. I., Anwar, F., Madni, T. M., Cheema, M. F., & Janjua, S. I. (2020). Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*, 8, 130486–130499. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076>
- Chiabrando, F., Donadio, E., & Rinaudo, F. (2015). SfM for orthophoto generation: Awinning approach for cultural heritage knowledge. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W7), 91–98. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-91-2015>
- Christopoulos, A., Pellas, N., Kurczaba, J., & Macredie, R. (2022). The effects of augmented

- reality-supported instruction in tertiary-level medical education. *British Journal of Educational Technology*, 53(2), 307–325. <https://doi.org/10.1111/bjet.13167>
- Ciammaichella, M. (2019). Prospettive architettoniche dipinte da Giovanni Antonio Fumiani nel Martirio e Gloria di San Pantalone a Venezia. *Disegnare Idee Immagini*, 58, 48–59.
- Clay, V., König, P., & König, S. (2019). Eye tracking in virtual reality. *Journal of Eye Movement Research*, 12(1). <https://doi.org/10.16910/jemr.12.1.3>
- Clini, P., Angeloni, R., D'Alessio, M., Buroni, P., & Buroni, A. (2019). Leonardo digitale, applicazioni virtuali per il cinquecentenario leonardiano alla mostra “Leonardo e Vitruvio. Oltre il cerchio ed il quadrato.” *Archeomatica*, 20–21.
- Clini, P., Angeloni, R., D'Alessio, M., Callegari, M., & Birarelli, S. (2019). Le macchine di leonardo. In *Leonardo e Vitruvio, oltre il cerchio ed il quadrato* (pp. 133–150). Marsilio Editore.
- Clini, P., Angeloni, R., D'Alessio, M., & Marinelli, E. (2022, January 21). La Digitalizzazione per una fruizione del Patrimonio Culturale in sito e da remoto: il caso studio della Pala Gozzi di Tiziano. *AIUCD 2022 - Culture Digitali. Intersezioni: Filosofia, Arti, Media. Preceedings Della 11a Conferenza Nazionale*. <https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/6848>
- Clini, P., Angeloni, R., & D'Alessio Mirco. (2021). Con Colocci e Raffaello nella Scuola di Atene Tecnologie immersive per un viaggio virtuale. In *Raffaello e Angelo Colocci Bellezza e Scienza nella costruzione del mito dell'antica Roma* (pp. 114–115). Maggioli.
- Clini, P., & Quattrini, R. (2020). Umanesimo digitale e bene comune? Linee guida e riflessioni per una salvezza possibile. *Capitale Culturale*, 2020, 157–175. <https://doi.org/10.13138/2039-2362/2529>
- Clini, P., Quattrini, R., Angeloni, R., D'Alessio, M., & Cappucci, R. (2020). Realtà virtuale e potenzialità dei facsimili digitali per i musei. Il caso dello Studiolo del Duca di Urbino. *Disegnare Idee Immagini*, 61, 56–67. www.messaggerielibri.it
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., Carolis, G., & Ruggeri, L. (2015). Disegnare la città insegnando a rilevare. Tecnologie integrate per un rilievo urbano 3D. *Disegno & Città*, 523–530. <https://doi.org/ISBN: 978-88-492-3124-3>
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., & D'Alessio, M. (2021). Esperienze di mixed reality per la valorizzazione del patrimonio martiniano: la ricostruzione del complesso fortificato di Cagli. *Building Information Modeling*. www.dienne.org
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., Mirco, R. A., & Alessio, D. ' . (2022a). In dialogo con i musei: innovazione e trasformazione digitale per una nuova visione del patrimonio. In F. Angeli (Ed.), *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*.
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., Mirco, R. A., & Alessio, D. ' . (2022b). In dialogo con i musei: innovazione e trasformazione digitale per una nuova visione del patrimonio. In F. Angeli (Ed.), *43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione e Congresso della Unione Italiana per il Disegn*. FrancoAngeli s.r.l. <https://ohchr.org/>
- Clini, P., Angeloni, R., D'Alessio, M., Bardelli, G., & Finocchi, S. (2024). Un virtual immersive movie per la fruizione del patrimonio archeologico: il viaggio nella "tomba della regina" di sirolo-numana. *Archeologia e Calcolatori*, 35(1).
- Comes, R. (2016). Haptic devices and tactile experiences in museum exhibitions. *Journal of Ancient History and Archaeology*, 3(4). <https://doi.org/10.14795/j.v3i4.205>
- Curlee, B., Newman, T., Sarkar, K., & Bahamón, J. C. (2021). Conceptualizing embodied pedagogical mediation (EPM): The plávana project, a choreographer's toolkit. *CHI PLAY 2021 - Extended Abstracts of the 2021 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 37–42. <https://doi.org/10.1145/3450337.3483474>
- de Paolis, L. T., Aloisio, G., Celentano, M. G., Oliva, L., & Vecchio, P. (2011). Experiencing a town of the Middle Ages: An application for the edutainment in cultural heritage. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2011*, 169–174. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6013802>
- Demetrescu, E. (2015). Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice. *Journal of Archaeological Science*, 57, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.004>
- Demetrescu, E. (2022). *Extended Matrix, La trasformazione del record stratigrafico in ipotesi ricostruttiva*.
- Demetrescu, E., & Ferdani, D. (2021). From field archaeology to virtual reconstruction: A five steps method using the extended matrix. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11115206>
- Direzione generale musei - MIBACT. (2019). *Piano Triennale per la Digitalizzazione e l'Innovazione dei Musei*. <http://musei.beniculturali.it/wp-content/uploads/2019/08/Abstract-Piano-Triennale-per-la-Digitalizzazione-e-l%E2%80%99Innovazione-dei-Musei.pdf>
- Dore, C., & Murphy, M. (2012). *Integration of HBIM and 3D GIS for Digital Heritage Modeling, Digital Documentation*.
- Dorsey, J., Rushmeier, H., & Sillion, F. (2008). *Digital Modeling of material appearance*. Kaufmann, Morgan.
- Dragoni, A. F., Quattrini, R., Sernani, P., & Ruggeri, L. (2019). *Real Scale Augmented Reality. A Novel Paradigm for Archaeological Heritage Fruition*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_68
- El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., & Whiting, E. (2007). Detailed 3D Modelling of Castles. *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 199–220.
- Eliahu, K., Liounakos, J., & Wang, M. Y. (2022). Applications for Augmented and Virtual Reality in Robot-Assisted Spine Surgery. *Current Robotics Reports*, 3(2), 33–37. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00073-w>
- Europe Council Treaty Office. (2005). *Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society - Faro's Convention*. <https://www.coe.int/en/web/conventions/full-list/-/conventions/rms/0900001680083746>
- Europeana Foundation. (2020). *Europeana strategy 2020–2025: Empowering digital change*.
- Fabrizio Agnello, & Laura Barrale. (2021). Rianodare il passato e il presente con la restituzione prospettica: ricostruzione della perduta chiesa delle Stimmate di Palermo da foto d'archivio. In A. Arena, M. Arena, R. G. Bran-

- dolino, D. Colistra, G. Ginex, D. Mediati, S. Nucifora, & P. Raffa (Eds.), *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*. FrancoAngeli srl. <https://doi.org/10.3280/oa-548.83>
- Fangi, G., Malinverni, E. S., D'annibale, E., Tassetti, A. N., & Bozzi, C. A. (2011). Metodi innovativi per la documentazione e valorizzazione di siti archeologici. *15° Conferenza Nazionale ASITA*, 981–992.
- Ferdani, D., Fanini, B., Piccioli, M. C., Carboni, F., & Vigliarolo, P. (2020). 3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.004>
- Ferrari, F., & Medici, M. (2017). The Virtual Experience for Cultural Heritage: Methods and Tools Comparison for Geguti Palace in Kutaisi, Georgia. *Proceedings*, 932–942. <https://doi.org/10.3390/proceedings1090932>
- Ferretti, U., Quattrini, R., & D'alessio, M. (2022). A Comprehensive HBIM to XR Framework for Museum Management and User Experience in Ducal Palace at Urbino. *Heritage*, 5(3), 1551–1571. <https://doi.org/10.3390/heritage5030081>
- Ferri, P. (2011). *Nativi digitali* (B. Mondadori, Ed.). Mondadori.
- Finocchi, S. (2018). NUMANA. *Picus*, XXXVII, 253–282.
- Foley, J. D., & Whitted, T. (1980). Graphics and An Improved Illumination Model for Shaded Display. *Comm. ACM*, 23(6), 343–349.
- Forte, M. (1997). *Virtual Archaeology* (Harry Abrams, Ed.).
- Forte, M., Pietroni, E., Rufa, C., & Borra, D. (2002). The virtual reality project of the Scrovegni Chapel o Padua. *Eight International Conference on Virtual System and Multimedia*, 25–27.
- Frommel, C. luitpold, Ray, S., & Tuffari, M. (1984). *Raffaello Architetto*. Electa.
- Gabellone, F., Ferrari, I., & Giuri, F. (2017). A new contribution for the reconstructive study of the theatre of Taormina. 595–600. <https://www.researchgate.net/publication/320651265>
- Gervail, J.-P., & le Rue, Y. (2015). Fusion of Multimedia and Mobile Technology in Audioguides for Museums and Exhibitions. *Fusion of Smart, Multimedia and Computer Gaming Technologies*, 173–205. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-14645-4_8
- Gimeno, J., Morillo, P., Manuel Orduña, J., & Fernández, M. (2018). An Easy-to-Use AR Authoring Tool for Industrial Applications. *Communications in Computer and Information Science*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-38241-3_2
- Ginzarly, M., & Jordan Srou, F. (2022). Cultural heritage through the lens of COVID-19. *Poetics*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.poetic.2021.101622>
- Glenn Davis Stone. (1999). American Antiquity. In *American Antiquity* (Vol. 64, Issue 1, pp. 182–183). <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2694366>
- Goleman, D. (1996). *Emotional intelligence: why it can matter more than IQ*. Bloomsbury Publishing.
- Gonizzi Barsanti, S., Guagliano, M., & Rossi, A. (2022). 3D Reality-Based Survey and Topology for Structural Analysis of Cultural Heritage. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(24). <https://doi.org/10.3390/s22249593>
- Guidi, G., Frischer, B., & Lucenti, I. (2007). Rome reborn-virtualizing the ancient imperial rome. *Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. <http://www.design.polimi.ithttp://www.iath.virginia.edu>
- Guidi, G., Russo, M., & Angeleddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archaeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2014.01.001>
- Guidi, G., Russo, M., & Beraldin, J.-A. (2010). Acquisizione 3D e modellazione poligonale. McGraw-Hill Education.
- Haouchine, N., Dequidt, J., Berger, M.-O., & Cortin, S. (2013). Deformation-based Augmented Reality for Hepatic Surgery. *Studies in Health Technology and Informatics*, 184.
- Happa, J., & Artusi, A. (2020). Studying illumination and cultural heritage. In *Springer Series on Cultural Computing* (pp. 23–42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37191-3_2
- Harris, E., Manacorda, D., & Gabucci, A. (1999). *Principi di stratigrafia archeologica* (Carocci, Ed.).
- He, Y., & Zhao, Y. (2012). Reform and exploration of the computer graphics. *Proceedings - 2012 IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference, APSCC 2012*, 403–405. <https://doi.org/10.1109/APSCC.2012.61>
- Henderson, S., & Feiner, S. (2011). Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10), 1355–1368. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.245>
- Huang, T. S. (1996). *Computer Vision: Evolution and Promise*. <https://cds.cern.ch/record/400313/files/p21>
- Huyzendveld, A. A., di Ioia, M., Ferdani, D., Palombini, A., Sanna, V., Zanni, S., & Pietroni, E. (2012). Virtual Archaeology Review The Virtual Museum of the Tiber Valley Project. *Virtual Archaeology Review*, 3(7).
- ICOM - International Council of Museums. (2020). *Museums, museum professionals and COVID-19*. <https://icom.museum/en/news/museums-museum-professionals-and-covid-19-survey-results/>
- Jan Nauta, G., & van den Heuvel, W. (2017). *Europeana DSI 2-Access to Digital Resources of European Heritage Deliverable D4.4. Report on ENUMERATE Core Survey 4 Revision final Date of submission*.
- Jokilehto, J. (1998). The context of the Venice Charter (1964). *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 2(4), 229–233. <https://doi.org/10.1179/135050398793138762>
- Joseph, B., & Gilmore, J. H. (1998). Welcome to the Experience Economy Harvard Business Review. *Harvard Business Review*, 97–105. <http://mkrgsensei.com/AMAE/Custom-er%20Satisfaction/Expereince%20Marketing/Experience%20Economy%20and%20Marketing.pdf>
- Kathryn Ramey. (2016). *Experimental Filming break the Machine*. Focal Press.
- Katsouri, I., Tzanavari, A., Herakleous, K., & Poullis, C. (2015). Visualizing and assessing hypotheses for marine archaeology in a VR CAVE environment. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 8(2). <https://doi.org/10.1145/2665072>
- Kingsland, K. (2020). Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultur-

- al heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>
- Krueger, M. W. (1991). *Artificial Reality II* (II). Addison-Wesley Professional.
- Kusajima, S., Takahashi, T., & Sumi, Y. (2018, February 6). Virtual participation in ukiyo-e appreciation using body motion. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3174910.3174946>
- Laboratorio per il Turismo Digitale (TDLab). (2014). *Piano strategico per la digitalizzazione del turismo italiano laboratorio per il turismo digitale*.
- Lampis, A. (2018). Ambienti digitali e musei: esperienze e prospettive in Italia. In A. Luigini & C. Panciori (Eds.), *Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio* (pp. 11–16). FrancoAngeli.
- Landolfi, M. (1998). Sirolo, necropoli picena “I Pini”, Tomba monumentale a circolo con due carri (520-500 a.C.). In *Carri da guerra e principi Etruschi, Catalogo della mostra*. L'ERMA.
- Landolfi, M. (2000). La tomba della Regina nella Necropoli Picena “I Pini” di Numana Sirolo. In *Catalogo della mostra: Eroi e Regine. Piceni popolo d'Europa* (pp. 21–41).
- Landolfi, M. (2012). La Regina Picena di Sirolo-Numana. In *Catalogo della mostra: “Principesse” del Mediterraneo all'alba della Storia*, (pp. 349–365).
- Leopardi, A., Ceccacci, S., Mengoni, M., Naspetti, S., Gambelli, D., Ozturk, E., & Zanolli, R. (2021). X-reality technologies for museums: a comparative evaluation based on presence and visitors experience through user studies. *Journal of Cultural Heritage*, 47, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.10.005>
- Letarouilly, P. (1882). *Le Vatican et la Basilique de Saint-Pierre de Rome*. VTE A. Morel et CIE Éditeurs.
- Liarokapis, F. (2007). An augmented reality interface for visualizing and interacting with virtual content. *Virtual Reality*, 11(1), 23–43. <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0055-1>
- Litvak, E., & Kuflik, T. (2020). Enhancing cultural heritage outdoor experience with augmented-reality smart glasses. *Personal and Ubiquitous Computing*, 24, 873–886. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01366-7>/Published
- Liu, Y., Lin, Y., Shi, R., Luo, Y., & Liang, H. N. (2021). RelicVR: A virtual reality game for active exploration of archaeological relics. *CHI PLAY 2021 - Extended Abstracts of the 2021 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 326–332. <https://doi.org/10.1145/3450337.3483507>
- Liu, Z., Yan, S., Lu, Y., & Zhao, Y. (2022, April 27). Generating Embodied Storytelling and Interactive Experience of China Intangible Cultural Heritage “Hua'er” in Virtual Reality. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519761>
- Lopez-Mencherero, V. M., & Grande, A. (2011). The Principles of the Seville Charter. *Proceedings XXIIIrd International CIPA Symposium*, 12–16.
- Lourakis, M., Alongi, P., Delouis, D., Lippi, F., Spadoni, F., & Alongi SPACE SpA, P. (2007). Recover: photorealistic 3d reconstruction of perspective paintings and pictures. *EVA 2007 London Conference*. <http://www.ics.forth.gr/recover/>.
- Luigini, A., & Panciroli, C. (2018). Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio. In F. Angeli (Ed.), *Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio* (pp. 17–25). francoangeli.
- Madhok, A. (2021). Globalization, de-globalization, and re-globalization: Some historical context and the impact of the COVID pandemic. *BRQ Business Research Quarterly*, 24(3), 199–203. <https://doi.org/10.1177/23409444211008904>
- Malfitana, D., Gabellone, F., Cacciaguerra, G., Ferrari, I., Giuri, F., & Pantellaro, C. (2016, October 7). Critical reading of surviving structures starting from old studies for new reconstructive proposal of the roman theatre of catania. *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLOGICA 2.0*. <https://doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.3556>
- Mandolesi, S., Gambelli, D., Naspetti, S., & Zanolli, R. (2022). Exploring Visitors' Visual Behavior Using Eye-Tracking: The Case of the “Studiolo Del Duca.” *Journal of Imaging*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/jimaging8010008>
- Mangani, G. (2018). *La bellezza del numero. Angelo Colocci e le origini dello stato nazione*. Il Lavoro Editoriale.
- Mangani, G., Clini, P., di Teodoro, F. P., Farinella, V., & Rowland, I. D. (2021). “Raffaello e Angelo Colocci, Bellezza e Scienza nella costruzione del mito della Roma antica.” Maggioli.
- Manovich, L. (2006). The poetics of augmented space. *Visual Communication*, 5(2), 219–240. <https://doi.org/10.1177/1470357206065527>
- Manzetti, M. C., & Nikos T. Papadopoulos. (2021). Being a spectator in a Roman theatre: a VR app. *Archeologia e Calcolatori*, 32.1, 457–468. <https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.25>
- Martirosov, S., & Kopecek, P. (2017). Virtual reality and its influence on training and education - Literature review. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 708–717. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.100>
- McDermott. (2018). *PBR Guide* 2018.
- Mchenry, K., & Bajcsy, P. (2008). *An Overview of 3D Data Content, File Formats and Viewers*. <http://isda.ncsa.illinois.edu/peter/publications/techreports/2008/NCSA-IS-DA-2008-002.pdf>
- Merlo, A., & Bartoli, M. (2021). Modelli interpretativi a servizio dell'arte: la porta del paradiso di Lorenzo Ghiberti. In A. Arena, M. Arena, D. Mediat, & P. Raffa (Eds.), *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*. FrancoAngeli srl. <https://doi.org/10.3280/oa-693.140>
- Mikhail, E., Bethel, J., & McGlone, C. (2001). Introduction to *Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12). http://vered.rose.utoronto.ca/people/paul_dir/IEICE94/ieice.html
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, 2351, 282–292. <https://doi.org/10.1117/12.197321>
- Miyashita, T., Meier, P. G., Tachikawa, T., Orlic, S., Eble, T., Scholz, T., Gapel, A., Gerl, A., Arnaudov, S., & Lieberknecht, S. (2008). An Augmented Reality Museum Guide. *7th*

- IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality., 103–106. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4637334>
- Moorhouse, N., tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2019). An experiential view to children learning in museums with Augmented Reality. *Museum Management and Curatorship*, 34(4), 402–418. <https://doi.org/10.1080/09647775.2019.1578991>
- Moreira, A., Quattrini, R., Maggiolo, G., & Mammoli, R. (2018). Hbim methodology as a bridge between Italy and Argentina. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2), 715–722. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-715-2018>
- NEMO (Network of European Museum Organisations). (2020). *Survey on the impact of the COVID-19 situation on museums in Europe Final Report*. <https://www.ne-mo.org/news/article/nemo/nemo-report-on-the-impact-of-covid-19-on-museums-in-europe.html>
- Nespeca, R. (2018). *Documentazione digitale per il cultural heritage. Point cloud come sistema informativo*. (Aracne, Ed.).
- Niglio, O. (2009). Conservazione e attualità degli ambienti antichi. Dalla Carta di Atene del 1931 alla Carta di Betlemme del 2008. *Esempi d'architettura*, 7(Rehabilitation planning in the historical towns of the occupied Palestinian territory), 31–41.
- Oberhuber, K. (1982). *Raffaello*. Mondadori.
- Paci, G. (2014). *La nascita della colonia romana di Urbisaglia*.
- Paul Valery. (1996). *Scritti sull'arte*. Milano: TEA.
- Perla, L., Felisatti, E., Grion, V., Agrati, L. S., Gallelli, R., Vinci, V., Amati, I., & Bonelli, R. (2020). Oltre l'era Covid-19: dall'emergenza alle prospettive di sviluppo professionale. *Excellence and Innovation in Learning and Teaching*, 2. <https://doi.org/10.3280/exioa2-2020oa10802>
- Perna, R. (2006). *Urbs Salvia: Forma e urbanistica*. L'Erma di Bretschneider.
- Perna, R., Postrioti, G., Giuliodori, M., Tadolti, M., Tubaldi, V., & Xavier De Silva, L. (2022). *Fornaci e produzioni ceramiche a Pollentia-Urbs Salvia in età repubblicana* (Vol. 4).
- Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Liv-ia's Villa Reloaded: An example of re-use and update of a pre-existing Virtual Museum, following a novel approach in storytelling inside virtual reality environments. *2015 Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2015*, 511–518. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419567>
- Portalés, C., Casas, S., Alonso-Monasterio, P., & Viñals, M. J. (2017). Multi-Dimensional Acquisition, Representation, and Interaction of Cultural Heritage Tangible Assets (pp. 72–95). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2927-9.ch004>
- Portalés, C., Rodrigues, J. M. F., Gonçalves, A. R., Alba, E., & Sebastián, J. (2018). Digital cultural heritage. In *Multimodal Technologies and Interaction* (Vol. 2, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/mti2030058>
- Potestà, G., & Epizefiri, V. (2022). Archeologia vista da Drone. Il teatro greco-romano di Locri Epizefiri. In C. Battini & E. Bistagno (Eds.), *43° Convegno Internazionale dei Docenti delle discipline della Rappresentazione* (pp. 2751–2770). Franco Angeli.
- Pucihar, K. Č., & Coulton, P. (2014). Exploring the evolution of mobile augmented reality for future entertainment systems. *Computers in Entertainment*, 11(2). <https://doi.org/10.1145/2582179.2633427>
- Purday, J. (2009). Think culture: Europeana.eu from concept to construction. *BIBLIOTHEK Forschung Und Praxis*, 33(2). <https://doi.org/10.1515/bfup.2009.018>
- Qiu, X., Liu, H., Ren, K., Zhang, M., Yan, H., & Lu, Y. (2021). Design and Implementation of “winning Luding Bridge” Immersion FPS Game Based on Unity3D Technology. *ACM International Conference Proceeding Series*, 65–71. <https://doi.org/10.1145/3480433.3480448>
- Quattrini, R., Frontoni, E., Clini, P., & Pierdicca, R. (2015). Mobile e Realtà Aumentata al Palazzo Ducale di Urbino: il museo è digitale. *Archeomatica*, 1, 32–37. file:///C:/Users/dales/Downloads/992-Articolo-4993-5063-10-20150517.pdf
- Quattrini, R., Gasparetto, F., Angeloni, R., & D'Alessio, M. (2019). Modelli digitali per comunicare il patrimonio e l'intervento di restauro. Palazzetto Baviera di Senigallia. *Archeomatica*, 10(3), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.07.010>
- Radder, L., & Han, X. (2015). An Examination Of The Museum Experience Based On Pine And Gilmore's Experience Economy Realms. *The Journal of Applied Business Research*, 31(2), 455–470.
- Rahaman, H., & Champion, E. (2019). To 3D or not 3D: Choosing a photogrammetry workflow for cultural heritage groups. *Heritage*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/heritage2030112>
- Rahaman, H., Champion, E., & Bekele, M. (2019). From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualisation and experience. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00102>
- Reilly, P. (1990). *Towards a virtual archaeology*.
- Remondino, F. (2011). Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse 3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects. *DISEGNARECON*, 90–98.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling-current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 25–31.
- Remondino, F., Rizzi, A., Agugiaro, G., Jimenez, B., Menna, F., Nex, F., & Baratti, G. (2011). Rilievi e Modellazione 3D. 15 a Conferenza Nazionale ASITA, 1825–1836.
- Russo, M., Guidi, G., & Remondino, F. (2011). Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e Calcolatori*, 22, 169–198.
- Salomon, D. (2011). *The Computer Graphics Manual*. Springer Science & Business Media.
- Samaroudi, M., Echavarria, K. R., & Perry, L. (2020). Heritage in lockdown: digital provision of memory institutions in the UK and US of America during the COVID-19 pandemic. *Museum Management and Curatorship*, 35(4), 337–361. <https://doi.org/10.1080/09647775.2020.1810483>
- Sarvade, Sable, & Ingle. (2019). Recent trends in virtual reality and computer graphics. *International Journal Of Innovations in Engineering Research And Technology*, 135–140.
- Savić, D. (2020). COVID-19 and Work from Home: Digital Transformation of the Workforce. In *TGJ* (Vol. 16, Issue 2).

- Sawicki, M., & Moody, J. (2020). *Filming the fantastic with virtual technology: Filmmaking on the digital backlot* (1st ed.). Routledge.
- Schipper, F. T., & Enrich Frank. (2013). A Concise Legal History of the Protection of Cultural Property in the Event of Armed Conflict and a Comparative Analysis of the 1935 Rorich Pact and the 1954 Hague Convention in the Context of the Law of War. *Archaeologies*, 9, 13–28. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11759-013-9230-7>
- Sdegno, A. (2018). The work of art in the age of mechanical reproduction by Walter Benjamin. *Disegno*, 2018(2), 161–168. <https://doi.org/10.26375/disegno.2.2018.17>
- Shirley, P. (2009). *Fundamentals of Computer Graphics* (Peters, Ed.). CRC Press.
- Spagnesi, G., Fondelli, M., & Mandelli, E. (1984). Raffaello l'architettura "picta" percezione e realtà. Multigrafica editrice s.r.l.
- Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G., & Monterosso, G. (2017). Virtual anastylosis of Greek sculpture as museum policy for public outreach and cognitive accessibility. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1), 011025. <https://doi.org/10.1117/1.jei.26.1.011025>
- Stober, D., Žarnić, R., Penava, D., Turkalj Podmanicki, M., & Virgej-Đurašević, R. (2018). Application of HBIM as a Research Tool for Historical Building Assessment. *Civil Engineering Journal*, 4(7), 1565. <https://doi.org/10.28991/cej-0309195>
- Stone, R. J. (1999). Virtual heritage. *UNESCO's World Heritage Magazine*, 18–20.
- Taccola, E., Rosselli, L., Albertini, N., & Martino, M. (2021). Etruscan hypogea in 3D: a proposal for an immersive and interactive visualization of Volterra's funerary contexts. *Archeologia e Calcolatori*, 32.2, 135–152. <https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.12>
- Tanprasert, T., & Yoon, D. (2022, April 27). AR Music Visualizers: Application Space and Design Guidelines. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519705>
- Theodoropoulos, A., & Antoniou, A. (2022). VR Games in Cultural Heritage: A Systematic Review of the Emerging Fields of Virtual Reality and Culture Games. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app12178476>
- Udwan, G., Leurs, K., & Alencar, A. (2020). Digital Resilience Tactics of Syrian Refugees in the Netherlands: Social Media for Social Support, Health, and Identity. *Social Media and Society*, 6(2). <https://doi.org/10.1177/2056305120915587>
- UNESCO. (2020). *Museums around the world in the face of COVID-19*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373530>
- Wagner, I., Maquil, V., Basile, M., Terrin, J.-J., Ehrenstrasser, L., & Wagner, M. (2009). Supporting Community Engagement in the City: Urban Planning in the MR-Tent. *Communities and Technology*, 8, 185–194. <https://doi.org/10.1145/1556460.1556488>
- Wagner, R. W. (1970). Edgar Dale: Professional. *Theory Into Practice*, 9(2), 89–95.
- Wang, X. (2009). Augmented Reality in Architecture and Design: Potentials and Challenges for Application. *International Journal of Architectural Computing*, 07(02), 309–326. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/147807709788921985>
- Wanstall, B. (1989). HUD on the Head for Combat Pilots. *Interavia*, 44, 334–338.
- Yoon, S. A., Elinich, K., Wang, J., Steinmeier, C., & Tucker, S. (2012). Using augmented reality and knowledge-building scaffolds to improve learning in a science museum. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(4), 519–541. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9156-x>
- Yuen, S. C.-Y., Yaoyuneyong, G., & Johnson, E. (2011). Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, 4(1). <https://doi.org/10.18785/jetde.0401.10>
- Zagato, L., Vecco, M., & Alessandro, A. D. '. (2015). *Citizens of Europe Culture e diritti a cura di La Convenzione di Faro e il nuovo Action Plan del Consiglio d'Europa per la promozione di processi partecipativi I casi di Marsiglia e Venezia*. <https://doi.org/10.14277/6969-052-5/SE-3-4>
- Zanchettin, V. (2018). La prima architettura. Le Stanze di Raffaello al tempo di Giulio II. *Römisches Jahrbuch Der Bibliotheca Hertziana*, 43, 371–427.
- Zhou, Y., Feng, T., Shuai, S., Li, X., Sun, L., & Duh, H. B. L. (2019, November 14). An eye-tracking dataset for visual attention modelling in a virtual museum context. *Proceedings - VRCAI 2019: 17th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*. <https://doi.org/10.1145/3359997.3365738>
- Zikas, P., Bachlitzanakis, V., Papaefthymiou, M., Kateros, S., Georgiou, S., Lydatakis, N., & Papagiannakis, G. (2016). Mixed Reality Serious Games and Gamification for smart education. *European Conference on Games Based Learning*.