



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione

A.a. 2024/2025

Sessione di laurea Dicembre 2025

**Tecnologie immersive per la
comunicazione del patrimonio
intangibile della memoria: il caso del
Museo Carcere Le Nuove**

Relatore:

Francesco Strada

Candidata:

Anastasia Dominguez Burzio

Sommario

La tesi esplora la progettazione e lo sviluppo di un'esperienza immersiva che combina realtà aumentata (AR) e realtà virtuale (VR) all'interno del Museo Carcere Le Nuove di Torino. L'obiettivo è costruire un'esperienza immersiva che si integri con l'ambiente reale del museo attraverso l'utilizzo dei portali virtuali in corrispondenza delle porte delle celle, le quali assumono il ruolo di ponte tra reale e virtuale, ma anche tra presente e passato. Dal punto di vista narrativo, l'esperienza ruota attorno all'audio delle testimonianze storiche raccolte attraverso le interviste a due testimoni, Giuseppe e Carla, mentre, sul piano del design dell'interazione, adotta un approccio contemplativo volto a privilegiare il coinvolgimento emotivo rispetto a quello informativo o ludico. La principale sfida tecnica riguarda l'allineamento tra mondo reale e virtuale in entrambe le modalità (AR e VR), garantendo un'esperienza coerente e immersiva. Oltre agli aspetti tecnici e narrativi dell'applicazione, la ricerca indaga le modalità di integrazione delle tecnologie immersive nei musei, interrogandosi su quando e come esperienze in realtà aumentata e virtuale possano essere introdotte in modo efficace, e su quale ruolo assumano rispetto alla visita tradizionale.

Indice

Elenco delle tabelle	IV
Elenco delle figure	V
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivo	2
1.2 Il caso studio: Museo Carcere Le Nuove	3
1.3 Struttura della tesi	4
2 Stato dell'arte	5
2.1 Realtà aumentata, virtuale e mista: caratteristiche e differenze . . .	5
2.2 Applicazioni nel turismo e nel patrimonio culturale	6
2.3 Tecnologie e metodologie per la progettazione di esperienze XR nei contesti culturali	10
2.3.1 Dispositivi XR e sistemi di interazione	10
2.3.2 Tecniche di ricostruzione e creazione di contenuti immersivi .	12
2.3.3 Criteri di progettazione e finalità culturali	13
3 Progettazione dell'esperienza	16
3.1 Analisi del contesto museale e definizione degli obiettivi	17
3.1.1 Analisi e selezione dello spazio	18
3.1.2 Analisi dell'identità espositiva e degli obiettivi di apprendimento	22
3.1.3 Analisi dell'esperienza del visitatore e criticità	23
3.1.4 Conclusioni dell'analisi	24
3.2 Definizione dell'idea progettuale	24
3.3 Dalle testimonianze alla narrazione immersiva	27
3.4 Dalla narrazione immersiva alla progettazione dell'interazione . . .	30
4 Implementazione tecnica	39
4.1 Scelta degli strumenti e <i>framework</i> di sviluppo	39
4.2 Architettura logica e macchina a stati	42

4.3	Allineamento spaziale tra ambiente reale e virtuale	45
4.3.1	Passthrough Camera API	47
4.3.2	Gestione del rilevamento del QR code	48
4.3.3	Problematiche riscontrate	51
4.4	Implementazione <code>TestimonyState</code>	52
5	Valutazione dell'esperienza	62
5.1	Visita guidata	63
5.2	Metodo di analisi	63
5.3	Risultati ANOVA e t-test per ciascun questionario	65
5.3.1	Questionario socio-tecnico	65
5.3.2	Net Promoter Score (NPS)	68
5.3.3	Questionario IMI	70
5.3.4	Questionario PARQ	75
5.3.5	Questionario UES	77
5.3.6	Questionario PMM	82
5.4	Analisi dei Mediatori Parziali: Correlazioni di Pearson e Regressioni OLS	86
5.4.1	Metodologia Statistica	86
5.4.2	Limitazioni e Precisazioni Metodologiche	87
5.4.3	Risultati Analisi	88
5.5	Le PMM dei visitatori	90
6	Conclusioni e sviluppi futuri	106
6.1	Sintesi delle risposte alle domande di ricerca	106
6.1.1	RQ1: Tecnologie immersive come mediatori emotivi della memoria storica	106
6.1.2	RQ2: Aspetti tecnici, narrativi e interattivi per un coinvolgi- mento empatico	107
6.1.3	RQ3: Il dialogo tra AR/VR e visita guidata tradizionale	108
6.2	Limiti della ricerca	108
6.3	Sviluppi futuri	109
6.4	Riflessione finale	111
	Bibliografia	113

Elenco delle tabelle

2.1	Tipologie di esperienze XR nel patrimonio culturale e esempi rappresentativi	9
3.1	<i>Framework</i> di design per esperienze AR con smart glass nel patrimonio culturale	17
3.2	Temi trattati nelle celle allestite	22
5.1	Risultati ANOVA Two-Way e T-test del questionario Socio-tecnico .	66
5.2	Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattore del questionario Socio-tecnico	67
5.3	Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Net Promoter Score (NPS) . .	69
5.4	Sintesi Interpretativa del Net Promoter Score (NPS)	69
5.5	Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Fattori IMI	72
5.6	Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattori IMI	72
5.7	Risultati ANOVA One-Way e T-test: Fattori PARQ	76
5.8	Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Fattori UES Significativi . . .	78
5.9	Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattori UES Significativi . .	78

Elenco delle figure

2.1	Virtuality continuum	6
2.2	Dispositivi per tecnologie XR	12
2.3	Modello concettuale	15
3.1	Braccio femminile	19
3.2	Braccio della morte	19
3.3	Rotonda	20
3.4	Braccio tedesco	20
3.5	Pianta del carcere	21
3.6	Pianta braccio maschile e disposizione celle illustrate nella Tabella 3.2	23
3.7	Portale virtuale nel virtuality continuum	25
3.8	Portale virtuale visuale esterna la cella	26
3.9	Portale virtuale visuale interna la cella	26
3.10	Mappa frasi chiave interviste	29
3.11	Diagramma di flusso dell'esperienza	30
3.12	Schermata 1 Tutorial	31
3.13	Schermata 2 Tutorial	31
3.14	Schermata 1 Introduzione	32
3.15	Schermata 2 Introduzione	32
3.16	Posizionamento foto sulla parete della cella	34
3.17	Mappa punti di interazione	34
3.18	Mappa che associa il numero del punto di interazione con la testimonianza	35
3.19	Mappa che associa il numero del punto di interazione con le animazioni e i contenuti audio	36
3.20	Scena caduta lettere dal soffitto	37
3.21	Fronte della lettera	37
3.22	Retro della lettera	38
4.1	Diagramma di flusso degli stati	43
4.2	Macchina a stati finiti dell'esperienza	44

4.3	Selezione lingue	44
4.4	Quadrato guida per corretta scansione QR code	50
4.5	Foto e suggerimento	53
4.6	Cella virtuale	54
4.7	Scatoletta di Giuseppe realizzata con fotogrammetria	56
4.8	Animazione nomi campi di concentramento e simboli	56
4.9	Animazione bandiera italiana	57
4.10	Animazione mani	57
4.11	Animazione volto femminile	58
4.12	Animazione volto maschile	58
4.13	Animazione lampione	59
4.14	Animazione camion	59
4.15	Animazione cella	60
4.16	Animazione soldato	60
4.17	Animazione bottiglia	61
4.18	Animazione testo	61
5.1	Profili fattori questionario socio-tecnico	68
5.2	Punteggio medio NPS per tipo di visita	70
5.3	Punteggio medio NPS per gruppo e tipo di visita	70
5.4	Punteggio medio IMI per tipo di visita	73
5.5	Punteggio medio IMI per gruppo e tipo di visita	73
5.6	Punteggio medio Fattori IMI per tipo di visita	74
5.7	Punteggio medio Fattori IMI per tipo di visita e gruppo	74
5.8	Punteggio medio PARQ	76
5.9	Punteggio medio fattori PARQ	76
5.10	Punteggio medio UES per tipo visita	79
5.11	Punteggio medio UES per tipo visita e gruppo	79
5.12	Punteggio medio fattori UES per tipo visita	80
5.13	Punteggio medio fattori UES per tipo visita e gruppo	81
5.14	Word cloud Visita AR	84
5.15	Word cloud Visita GUIDATA	85

Capitolo 1

Introduzione

La cultura rappresenta oggi uno dei pilastri fondamentali per la costruzione di società inclusive, sostenibili e consapevoli della propria memoria collettiva [1]. Particolare importanza è da attribuire al patrimonio culturale immateriale, come definito nella Convenzione per la salvaguardia del patrimonio culturale immateriale, adottata dall'UNESCO nel 2003 ed entrata in vigore in Italia nel 2007 [2]. Il patrimonio non si limita, infatti, ai monumenti o alle collezioni materiali, ma comprende pratiche, espressioni orali, conoscenze, riti e altre forme intangibili di cultura che riflettono la creatività e l'identità delle comunità. La sua importanza, come espresso dall'UNESCO, non risiede tanto nella manifestazione culturale in sé, bensì nella ricchezza di conoscenza e competenze che vengono trasmesse da una generazione all'altra. Per garantire questa trasmissione, l'UNESCO ha definito una serie di misure volte all'identificazione, documentazione, preservazione, protezione, promozione e valorizzazione del patrimonio culturale immateriale. In questo contesto, l'Italia, Paese che si distingue a livello mondiale per la ricchezza del proprio patrimonio culturale, rappresenta un caso emblematico. Nel 2022 erano attivi 4416 luoghi del patrimonio che hanno accolto oltre 107 milioni di visitatori, il Paese detiene inoltre 59 siti UNESCO, 18 elementi iscritti nella lista del patrimonio immateriale e 14 città appartenenti al *Creative Cities Network*. Tuttavia, solo il 33% della popolazione ha visitato almeno una mostra o un museo nel corso dell'anno, evidenziando un netto divario tra la ricchezza dell'offerta culturale e il livello di coinvolgimento dei cittadini italiani [3]. Alla luce di questi dati, risulta fondamentale interrogarsi sul ruolo del museo e sulle modalità con cui esso comunica con il pubblico contemporaneo. Come osserva Giuliano Gaia, uno dei pionieri del digitale nei musei italiani, il museo può essere inteso come un medium o, meglio, come un dispositivo complesso che integra funzioni e logiche proprie dei media e che permette di far vivere all'utente un'esperienza. Nel suo essere medium, il museo è immediato e immanente: si presenta per come è, va vissuto nella sua materialità, ma allo stesso tempo si apre a pratiche e linguaggi digitali e postdigitali che ne ampliano

i confini oltre lo spazio fisico. La sua comunicazione diventa così un processo ibrido, che unisce strumenti, forme e pratiche differenti [4]. In questo scenario è evidente come l'introduzione di nuove tecnologie giochi un ruolo fondamentale. Diversi studi hanno infatti dimostrato come la fruizione museale si stia evolvendo da un modello trasmissivo a uno esperienziale, fondato su interazione, emozione e costruzione condivisa di significato [5] [6] [7]. In questa prospettiva, le tecnologie immersive come realtà aumentata (AR) e realtà virtuale (VR) diventano veri e propri mediatori cognitivi ed emozionali tra individuo, memoria e spazio espositivo [8]. Le esperienze immersive non solo rafforzano il coinvolgimento dei visitatori, ma generano anche benefici economici e sociali. Secondo l'OECD [9] e l'ICOM [10], la digitalizzazione del patrimonio culturale aumenta l'attrattività turistica, diversifica le fonti di reddito e promuove modelli di fruizione più accessibili e sostenibili. Un confronto interessante emerge con i Paesi Bassi dove la partecipazione culturale è sensibilmente più elevata: nel 2022 il 52% della popolazione ha visitato almeno un museo [11]. I Paesi Bassi mostrano un forte impegno nella digitalizzazione del patrimonio: la strategia nazionale per il patrimonio digitale testimonia l'adozione sistematica di soluzioni digitali e immersive nei musei [12]. Questo esempio evidenzia come l'innovazione tecnologica possa incidere positivamente sul coinvolgimento dei cittadini e sulla valorizzazione del patrimonio culturale, dimostrando che l'accessibilità digitale e la dimensione esperienziale sono leve strategiche per la partecipazione. In questo scenario, l'introduzione delle tecnologie immersive non rappresenta solo un'evoluzione tecnica, ma un cambiamento nel modo di percepire, comprendere e vivere il patrimonio culturale. Il museo oggi si trova così a dialogare con più forme di comunicazione: da quella più propriamente digitale, che sfrutta interfacce e dispositivi tecnologici, a quella più tradizionale della visita guidata e del racconto diretto.

1.1 Obiettivo

L'obiettivo della tesi è duplice. Da un lato, esplorare le potenzialità e i limiti delle tecnologie immersive applicate alla valorizzazione della memoria storica, dall'altro indagare come queste possano dialogare con le pratiche comunicative più consolidate, contribuendo a creare esperienze di visita più partecipate, empatiche e consapevoli. Per raggiungere questo obiettivo, ci si è calati nel contesto pratico e reale del Museo Carcere Le Nuove di Torino, individuato come spazio adatto per la sperimentazione. All'interno di questo contesto è stato possibile progettare e sviluppare un'applicazione immersiva che integra elementi di realtà aumentata e realtà virtuale. Sono state affrontate tutte le fasi di sviluppo, dalla progettazione concettuale e tecnica fino alla realizzazione pratica con implementazione in loco, nel rispetto delle specificità spaziali e narrative del museo. La fase finale ha riguardato

la valutazione sperimentale, volta ad analizzare non solo l'efficacia dell'applicazione immersiva ma anche il modo in cui essa si inserisce e dialoga con la visita guidata tradizionale, oltre a consentirne un confronto diretto tra le due modalità di fruizione in termini di coinvolgimento, comprensione e impatto emotivo. In questo quadro, la ricerca si articola attorno alle seguenti domande di ricerca principali:

RQ1 In che modo le tecnologie immersive possono contribuire alla valorizzazione e alla trasmissione del patrimonio intangibile della memoria?

RQ2 Quali aspetti tecnici, narrativi e interattivi devono essere considerati nella progettazione di un'esperienza immersiva che integri realtà aumentata e realtà virtuale, al fine di favorire un coinvolgimento empatico e consapevole del visitatore?

RQ3 In che misura e in quali condizioni l'applicazione immersiva (AR/VR) e la visita guidata tradizionale possono dialogare o differenziarsi, e quali implicazioni emergono da un loro eventuale confronto in termini di esperienza, comprensione e impatto emotivo del visitatore?

1.2 Il caso studio: Museo Carcere Le Nuove

Il Museo Carcere Le Nuove di Torino rappresenta un luogo di memoria profondamente radicato nella storia del Novecento italiano. Costruito nella seconda metà dell'Ottocento e rimasto in funzione come carcere fino al 2003, ha attraversato fasi cruciali della storia nazionale in particolare, la drammatica stagione della Resistenza, la quale occupa un ruolo centrale nella visita guidata del museo. La scelta di questo museo come caso studio nasce da due motivazioni principali. La prima riguarda la sua natura intrinseca: infatti questo museo non si configura semplicemente come luogo da visitare per i suoi manufatti o reperti storici, ma come spazio di riflessione. La scelta stessa di fare visitare solo attraverso visite guidate è dettata anche da questa sua natura, offrendo un'esperienza diretta che, più che porre al centro la storia, pone al centro le storie delle persone, raccontate in certi casi da testimoni diretti o dalle guide. La seconda motivazione è di carattere organizzativo e pratico. Il museo è gestito dall'Associazione "Nessun Uomo è un'isola", composta da soci volontari, che portano avanti con passione le attività di tutela del patrimonio del luogo. Se questo, da una parte, garantisce l'autenticità, dall'altra comporta una serie di limitazioni: risorse economiche ridotte, personale ristretto e una struttura museale che non dispone degli stessi mezzi di istituzioni più grandi. Queste condizioni fanno del Museo Le Nuove un terreno fertile per sperimentare soluzioni innovative, in cui le tecnologie immersive possano essere un supporto sostenibile per valorizzare e ampliare l'esperienza di visita.

1.3 Struttura della tesi

La tesi è articolata in 5 capitoli, ciascuno dei quali affronta un aspetto specifico del percorso di ricerca e progettazione:

- Nel **Capitolo 2** si delinea lo stato dell'arte relativo all'utilizzo delle tecnologie immersive nel turismo culturale, concentrandosi in particolare su AR e VR e di come queste abbiano ridefinito la modalità di comunicazione e narrazione museale.
- Nel **Capitolo 3** viene descritto in modo approfondito il processo di progettazione dagli aspetti concettuali e narrativi fino all'integrazione dei contenuti storici e testimonianze dirette, mostrando come questi siano stati tradotti in un percorso interattivo e immersivo.
- Nel **Capitolo 4** vengono illustrati gli aspetti tecnici del progetto: gli strumenti utilizzati, le diverse fasi di sviluppo e le principali criticità affrontate, in particolare quelle legate all'allineamento tra mondo reale e virtuale.
- Nel **Capitolo 5** viene mostrata la metodologia di valutazione utilizzata e vengono analizzati i risultati ottenuti, i quali permettono di trarre considerazioni fondamentali per gli obiettivi della ricerca.
- Nel **Capitolo 6** infine vengono sintetizzati i risultati principali, discutendone le implicazioni e le possibili direzioni di sviluppo futuro.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Questo capitolo presenta il quadro teorico e applicativo di riferimento relativo alle tecnologie immersive, con particolare attenzione al loro impiego nel settore culturale e museale. Nella prima parte vengono definite e inquadrate, sulla base della letteratura scientifica, la realtà aumentata (AR), la realtà virtuale (VR) e la realtà mista (MR), chiarendone le caratteristiche distintive e il loro posizionamento all'interno del continuum della realtà estesa (XR). Nella seconda parte si analizzano le principali modalità con cui tali tecnologie sono state adottate nel tempo nel contesto del turismo culturale e della valorizzazione del patrimonio, individuando le tendenze evolutive e le esperienze più significative. Infine, si riflette sulle motivazioni e sui fattori che ne determinano l'efficacia, evidenziando i benefici economici, sociali e ambientali derivanti dal loro utilizzo.

2.1 Realtà aumentata, virtuale e mista: caratteristiche e differenze

Nel dibattito e nella letteratura sulle tecnologie immersive, è importante distinguere tra differenti concettualizzazioni di quella che viene generalmente definita Realtà Estesa (Extended Reality, XR). La XR viene comunemente descritta come un continuum, noto come “virtuality continuum”, come illustrato in Figura 2.1, che ha ai suoi estremi la realtà fisica e la Realtà Virtuale (VR) [13]. L'asse del continuum misura quanto un'esperienza sia ancorata al mondo reale o, al contrario, interamente simulata, includendo al suo interno le forme intermedie Realtà Aumentata (AR), Virtualità Aumentata (AV), che rientrano nella categoria più generale della Realtà Mista (MR). La VR consente di immergere e isolare la percezione dell'utente dal mondo reale creando un mondo che, pur essendo digitale, appare come realistico e segue regole coerenti. Gli input forniti dall'utente vengono utilizzati per modificare l'ambiente digitale in tempo reale. Questa interattività contribuisce a generare la

sensazione di presenza, ossia la percezione di essere parte integrante del mondo virtuale. Le esperienze di MR, al contrario, complementano la realtà piuttosto che sostituirla completamente, dando all'utente l'impressione che oggetti reali e virtuali coesistano nello stesso spazio. In particolare, in AR gli elementi virtuali vengono sovrapposti all'ambiente reale, mentre in AV elementi reali, come video o fotografie, vengono incorporati all'interno di ambienti virtuali. In entrambe queste forme di MR, gli oggetti reali e virtuali coesistono in modo coerente e possono interagire tra loro, creando un ponte tra reale e virtuale [14]. Per chiarezza terminologica, nel testo il termine AR verrà utilizzato come categoria specifica lungo il continuum, corrispondente al punto in cui il mondo reale domina e gli oggetti virtuali lo arricchiscono. Va sottolineato che, secondo la definizione di Milgram e Kishino, citata, AR non deve essere intesa come una forma di MR priva di interazione, come talvolta appare in altre definizioni, si tratta piuttosto di un tipo specifico di MR, che può includere l'interazione con gli oggetti nell'ambiente.

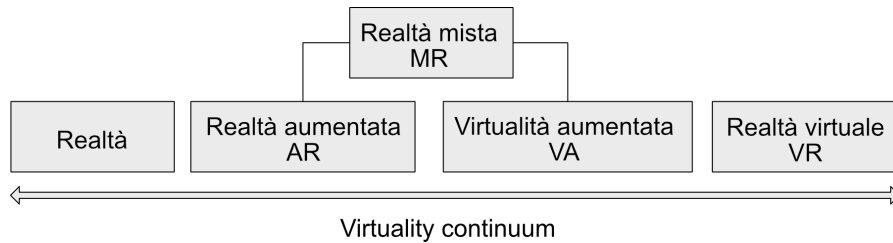


Figura 2.1: Virtuality continuum

2.2 Applicazioni nel turismo e nel patrimonio culturale

Quando si parla di tecnologie XR applicate al turismo e alla valorizzazione del patrimonio culturale, è importante considerare come, più in generale, l'utilizzo della tecnologia offra strumenti e supporto per una serie di compiti fondamentali per musei, istituzioni e operatori culturali: dalla digitalizzazione dei materiali, alla ricostruzione e rappresentazione del patrimonio tangibile e intangibile. In questo modo si concretizza il concetto di Digital Cultural Heritage (DCH), ossia una serie di processi di digitalizzazione che hanno il fine di sostenere le esigenze del patrimonio culturale e migliorare l'esperienza dei visitatori [8]. In questo contesto, le modalità di applicazione delle XR nel patrimonio culturale sono state profondamente influenzate da diversi fattori: da un lato l'evoluzione tecnologica, che ha progressivamente reso più accessibili strumenti come gli HMD (Head-Mounted Display), dispositivi indossabili per la fruizione di realtà virtuale e aumentata, i

dispositivi mobili e la fotogrammetria; dall'altro l'accettazione crescente da parte dei musei e del pubblico, parallelamente a un mutamento culturale più ampio in cui la tecnologia è entrata a far parte della quotidianità, ridefinendo le aspettative di fruizione e interazione [10] [9]. L'impiego delle tecnologie XR nel turismo culturale e nella valorizzazione del patrimonio ha dato origine a una grande varietà di esperienze, difficilmente classificabili per ambiti tematici, poiché molti progetti combinano più funzioni. Possiamo tuttavia individuarne due principali:

- Ricostruzione e conservazione digitale
- Esplorazione virtuale e accessibilità del patrimonio

Le tecnologie XR permettono infatti di rispondere a due esigenze fondamentali nella valorizzazione del patrimonio culturale: da un lato, ricostruire e conservare digitalmente oggetti, spazi e ambienti, contribuendo alla loro tutela e alla loro trasmissione nel tempo; dall'altro, consentire nuove forme di accesso, esplorazione e interazione, rendendo fruibili anche luoghi geograficamente distanti, inaccessibili o non più esistenti. Quando queste tecnologie vengono combinate con elementi di *storytelling* e dinamiche di *gamification*, e sfruttano il coinvolgimento fisico e percettivo tipico dell'esperienza immersiva, è possibile generare esperienze complesse, coinvolgenti e altamente efficaci per pubblici diversi. Tali esperienze non solo favoriscono una comprensione più profonda dei contenuti culturali, ma promuovono anche una partecipazione attiva e multisensoriale del visitatore, ampliando il concetto stesso di fruizione del patrimonio [8]. In questo senso, risulta utile la classificazione proposta da Rodríguez-García e Alaguero (2023) [15], elaborata per esperienze iVR, ma applicabile anche alle diverse forme di realtà estesa (XR), che distingue le applicazioni in base al livello di interattività e di coinvolgimento offerto. Le quattro categorie di esperienze XR, di seguito riportate, possono essere riassunte come mostrato in Tabella 2.1.

1. Esperienze passive

Comprendono esperienze in cui l'utente assume un ruolo puramente ricettivo e osserva contenuti immersivi (video 360°, fotografie panoramiche, render 3D) senza possibilità di interazione o esplorazione autonoma. Sono spesso utilizzate per rendere accessibili luoghi remoti o scomparsi, o per permettere la visita a siti archeologici o musei non fisicamente raggiungibili. Esempi significativi sono i progetti della Foundation of the Hellenic World (The workshop of Pheidias in ancient Olympia, A journey to ancient Miletus), considerati tra i primi ad utilizzare la VR nel contesto della valorizzazione del patrimonio culturale [16]. Queste rappresentano le prime forme di applicazione della tecnologia XR nel campo della valorizzazione del patrimonio culturale, ma continuano a essere utilizzate ancora oggi nello sviluppo di virtual tour. In particolare, durante la pandemia da COVID-19, tali soluzioni hanno giocato un

ruolo fondamentale nel garantire la fruizione culturale a distanza, permettendo agli utenti di esplorare musei e siti archeologici anche quando la visita fisica non era possibile [17]. Anche esperienze più recenti come “Dreams of Dalí” (Dalí Museum), “Modigliani VR: The Ochre Atelier” (Tate Modern) e “Mona Lisa: Beyond the Glass” (Louvre) rientrano in questa categoria: pur essendo altamente immersive, il ruolo dell’utente rimane principalmente ricettivo [18]. Questo approccio risulta particolarmente efficace perché consente di offrire un’esperienza guidata e controllata, facilmente accessibile a un pubblico ampio e variegato, garantendo al contempo la fruizione sicura e strutturata dei contenuti culturali. In particolare, risponde alle esigenze dei musei: nel caso della Mona Lisa, ad esempio, permette di osservare il celebre dipinto senza le difficoltà legate alla folla di visitatori, offrendo una visuale ravvicinata e dettagliata; “Dreams of Dalí” consente di entrare letteralmente in un quadro, esplorandone lo spazio interno e osservandolo da vicino; infine, “Modigliani VR: The Ochre Atelier” permette di ricostruire fedelmente lo studio dell’artista, offrendo una visione immersiva del contesto creativo originale.

2. Esperienze esplorative

Le esperienze esplorative consentono all’utente di muoversi liberamente in un ambiente virtuale o aumentato, di solito di dimensioni più o meno ampie, ma senza possibilità di interazioni complesse. Uno dei primi esempi storici è la “Streetmuseum App” del Museum of London (2010), che utilizzava fotografie storiche delle collezioni museali per permettere agli utenti di visualizzare, tramite smartphone, come erano cambiati edifici e strade della città nel tempo [16]. Un altro esempio significativo più recente è “Reblink” (Art Gallery of Ontario, 2017), in cui la realtà aumentata viene utilizzata per reinterpretare opere pittoriche esistenti, sovrapponendo animazioni e contenuti multimediali che ne trasformano la percezione e ne ampliano il significato.

3. Esperienze esplorative interattive

Questa categoria combina la libertà di movimento tipica delle esperienze esplorative con forme di interazione più avanzate con l’ambiente virtuale o con oggetti presenti al suo interno. La complessità di tali interazioni può variare da azioni semplici, come afferrare o attivare oggetti, fino a meccaniche più elaborate di tipo ludico o narrativo. Esempi significativi includono: “Santa Maria d’Agano” (Italy, 26th century BC), dove l’utente può raccogliere una torcia e illuminare gli ambienti, “Little Manila” (USA, 20th century) e la ricostruzione di Paestum (Italy, 5th century BC), in cui l’utente esplora liberamente gli ambienti e interagisce con elementi della ricostruzione storica [15].

4. Esperienze interattive

Le esperienze interattive si distinguono per la presenza di interazioni complesse, spesso in spazi limitati o privi di movimento libero. Si possono individuare due sottotipi principali [15]:

- *Sandbox educative*, in cui l'utente svolge attività o mini-giochi legati al contesto culturale, come nella ricostruzione del Teatro Romano di Cartagena (Spagna, I secolo), dove è possibile risolvere enigmi e compiti didattici;
- *Interazioni integrative*, in cui l'azione dell'utente diventa parte attiva della ricostruzione stessa, come nella simulazione del campo da tennis di Rennes (Francia, XVII secolo), che permette di giocare con personaggi digitali.

Tabella 2.1: Tipologie di esperienze XR nel patrimonio culturale e esempi rappresentativi

Categoria	Caratteristiche principali	Esempi
Esperienze passive	Osservazione senza interazione, fruizione guidata	Foundation of the Hellenic World, Dreams of Dalí, Modigliani VR: The Ochre Atelier, Mona Lisa: Beyond the Glass
Esperienze esplorative	Libertà di movimento, esplorazione autonoma, interazione minima	Streetmuseum App (Museum of London), Reblink (Art Gallery of Ontario)
Esperienze esplorative interattive	Libertà di movimento combinata con interazioni semplici	Santa Maria d'Agano (Italy), Little Manila (USA), ricostruzione di Paestum (Italy)
Esperienze interattive	Interazioni complesse, spazio limitato	Teatro Romano di Cartagena (Spagna), simulazione campo da tennis di Rennes (Francia)

2.3 Tecnologie e metodologie per la progettazione di esperienze XR nei contesti culturali

Per comprendere appieno la tecnologia XR è necessario analizzare sia i dispositivi necessari per la sua corretta implementazione, sia il modo in cui essi operano e interagiscono con lo spazio e l'utente. Accanto all'aspetto hardware, si affianca un insieme di tecniche digitali fondamentali per la costruzione di esperienze immersive nel campo della valorizzazione del patrimonio. Tra queste tecniche abbiamo la fotogrammetria, la modellazione 3D e la scansione laser le quali consentono di ricostruire e rappresentare in modo accurato ambienti e oggetti. È importante notare che la scelta delle tecniche e dei dispositivi è fortemente condizionata, da una parte, dal contenuto e dal messaggio che il luogo di cultura vuole trasmettere, dall'altra, da una serie di limitazioni di fattibilità, che vanno da questioni economiche e logistiche fino alla gestione degli spazi fisici e all'esperienza del visitatore. In questa sezione verranno quindi affrontati questi tre aspetti fondamentali:

- l'analisi dei principali dispositivi XR e delle loro funzionalità
- le tecniche digitali per la ricostruzione e la creazione di contenuti immersivi
- criteri di scelta che guidano la progettazione di esperienze XR nei contesti culturali, includendo una riflessione sul perché abbia senso adottare queste tecnologie nella valorizzazione del patrimonio

2.3.1 Dispositivi XR e sistemi di interazione

I dispositivi XR si distinguono principalmente in base al livello di immersione e alla configurazione hardware [19] riassunto nella Figura 2.2. Per quanto riguarda la VR tra i principali dispositivi abbiamo:

- **Head-Mounted Display supportati (Supported HMDs):** dispositivi collegati via cavo a un computer esterno, come l'HTC Vive, utilizzati per applicazioni immersive ad alta fedeltà.
- **HMD autonomi (Standalone HMDs):** dispositivi con calcolo integrato, come il Meta Quest, che consentono all'utente di muoversi liberamente senza cavi, aumentando la praticità e l'accessibilità economica.
- **HMD VR per smartphone:** custodie in cui inserire lo smartphone, offrendo un'esperienza VR di base.
- **Sistemi a bassa immersione (Low-immersion Desktop VR):** utilizzo di monitor, tastiere e mouse, con il vantaggio di costi ridotti e semplicità d'uso.

- **CAVE (Cave Automatic Virtual Environment):** installazioni di grandi dimensioni con pareti e pavimenti come schermi stereoscopici, in grado di offrire immersione totale senza HMD.

I dispositivi AR combinano la percezione del mondo reale con contenuti digitali sovrapposti. Tra i principali dispositivi troviamo:

- **HMD AR:** come il Microsoft HoloLens 2, dispositivo Optical See-Through che consente la proiezione di oggetti virtuali direttamente nel campo visivo dell'utente, supportando interazioni a mani libere e comandi vocali. Tuttavia, dispositivi di fascia alta come HoloLens sono spesso associati a costi elevati.
- **Dispositivi mobili (smartphone e tablet):** sono la classe più diffusa per applicazioni AR basate su marker, grazie alla disponibilità di librerie come ARCore e ARKit. L'utilizzo dei tablet permette una visualizzazione più ampia rispetto agli smartphone.

Il posizionamento dei contenuti digitali nello spazio reale può avvenire tramite:

- **Marker-based:** il sistema riconosce marker con motivi specifici e ricostruisce la loro posizione e prospettiva nello spazio.
- **Markerless:** il sistema determina la posizione e il movimento dell'utente senza bisogno di marker fisici o ausili esterni.

Inoltre, per la visualizzazione AR esistono due principali approcci:

- **Optical See-Through (OST):** L'utente vede il mondo reale attraverso lenti trasparenti.
- **Video See-Through (VST):** l'immagine del mondo reale passa attraverso una telecamera e viene mostrata su un display, consentendo simulazioni più complesse.

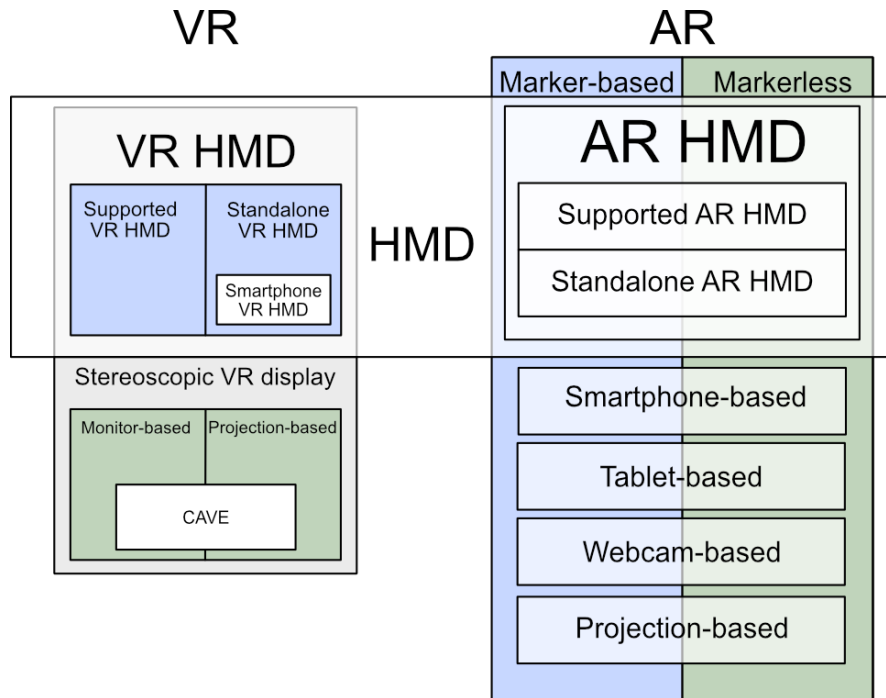


Figura 2.2: Dispositivi per tecnologie XR

2.3.2 Tecniche di ricostruzione e creazione di contenuti immersivi

Oltre ai dispositivi, la creazione di esperienze XR immersive richiede l'impiego di strumenti e metodologie specifiche per la ricostruzione fedele di opere d'arte e ambienti storici. Tali tecniche sono fondamentali non solo per garantire la conservazione digitale del patrimonio culturale, ma anche per renderlo accessibile e fruibile a un pubblico più ampio [20]:

- **Digital Anastylosis**

La *digital anastylosis* deriva dall'anastilosi, tecnica tradizionale di ricomposizione di opere storiche dai pezzi originali. Le tecnologie digitali permettono di affrontare problemi tipici, come frammenti degradati o mischiati con altri elementi distrutti. Esempi recenti includono il progetto SAFFO, che ha ricostruito affreschi in 2D usando il metodo SIFT (Scale Invariant Feature Transform), e la ricostruzione virtuale degli affreschi del Duomo di San Venanzio a Fabriano, combinando laser scanning 3D, fotogrammetria e fotografie panoramiche a 360°.

- **Fotogrammetria e 3D scanning**

Queste tecniche sono fondamentali per creare modelli tridimensionali realistici

di opere d'arte e ambienti storici, catturando dettagli geometrici e cromatici utili per le ricostruzioni digitali.

L'integrazione di queste metodologie consente di realizzare applicazioni XR con modalità di fruizione differenti, a seconda della tecnologia impiegata. Per quanto riguarda la VR, è possibile ottenere delle ricostruzioni complete e fedeli di opere o ambienti, come nel caso degli affreschi delle tombe etrusche documentati dal progetto *Etruscans in 3D* della Kessler Foundation. Invece, per quanto riguarda l'AR, è possibile creare delle applicazioni che vanno a sovrapporre ricostruzioni digitali all'ambiente o all'oggetto storico, un esempio è il progetto per la Basilica di Santa Caterina d'Alessandria a Galatina, dove l'utente può visualizzare dettagli dei dipinti e informazioni aggiuntive tramite smartphone o tablet. Altri casi includono la ricostruzione dei mosaici romani di Savignano sul Panaro e degli affreschi di Antonio Palomino nella Chiesa dei Santos Juanes a Valencia, in cui fotografie storiche sono state georeferenziate e sovrapposte per simulare l'aspetto originale delle opere. Queste applicazioni mostrano come le tecniche di digital anastylosis e fotogrammetria, combinate con XR, possano non solo aumentare la comprensione e la leggibilità dei contenuti culturali, ma anche estendere la fruizione del patrimonio nel tempo e nello spazio

2.3.3 Criteri di progettazione e finalità culturali

Nella progettazione e nell'adozione di tecnologie XR nei musei e nei siti culturali è fondamentale considerare che la tecnologia deve essere intesa come un mezzo e non come un fine. Essa serve a rafforzare e ampliare determinati paradigmi comunicativi, ma deve essere integrata in maniera funzionale in uno spazio complesso, non deve risultare invasiva né deve affaticare o ostacolare la visita dell'utente [21]. Il punto di partenza nella progettazione è dunque il contenuto: il materiale storico, il contesto e il pubblico di riferimento. La scelta del target, la quantità e qualità delle informazioni da trasferire, il percorso di visita e l'esperienza complessiva devono essere guidati dagli obiettivi comunicativi e di apprendimento e dalle condizioni specifiche di fruizione. Strumenti come AR e VR permettono di arricchire la percezione e il significato culturale di un sito o di un oggetto, creando esperienze immersive, interattive e personalizzabili. La realtà aumentata, in particolare, facilita l'integrazione tra visualizzazione, informazioni scientifiche e contesto reale, permettendo un approccio emozionale e cognitivo al patrimonio, che coinvolge tanto la razionalità quanto le dimensioni intime e sensoriali dei visitatori. Innovare nella cultura significa migliorare l'esperienza dell'utente e la comprensione dei contenuti, rendendo la fruizione più accessibile, interattiva e significativa, rispettando il valore e la complessità del patrimonio culturale [21]. Il fattore determinante per l'efficacia nell'uso delle tecnologie XR deriva da una complessa interazione di

variabili, riassunte in un modello concettuale mostrato nella Figura 2.3 [22] che include tre categorie principali:

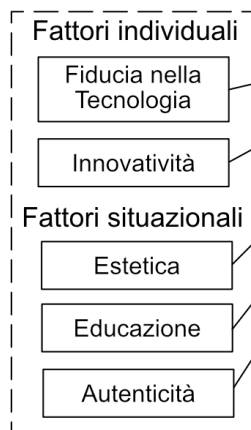
1. **Fattori tecnici:** caratteristiche intrinseche della tecnologia.
2. **Fattori individuali:** fiducia e atteggiamento dell'utente verso la tecnologia.
3. **Fattori situazionali:** qualità dei contenuti museali, estetica, valore educativo e autenticità.

La soddisfazione del visitatore è il mediatore tra questi tre fattori e il comportamento post-esperienza, influenzando sia l'intenzione di riutilizzare la tecnologia sia l'intenzione di rivisitare la destinazione. Questi fattori sono stati considerati nella fase di valutazione dell'esperienza condotta per il caso studio. A questo si aggiunge una dimensione più ampia dove i benefici dell'utilizzo di queste tecnologie possono essere analizzati secondo il quadro del Triple Bottom Line (TBL), considerando gli impatti economici, sociali e ambientali [23]. Dal punto di vista economico, XR può incrementare il numero di visitatori e la spesa associata, stimolare la fidelizzazione e la rivisitazione dei luoghi, aprire nuove fonti di guadagno e attrarre investimenti, migliorando al contempo l'efficienza operativa e creando opportunità legate alla produzione di contenuti digitali. Sul piano sociale, queste tecnologie favoriscono esperienze interattive e immersive, migliorano la comprensione e l'apprezzamento del patrimonio, preservano conoscenze e rappresentazioni autentiche del passato, aumentano l'accessibilità per utenti internazionali o con disabilità e rafforzano l'identità locale. Infine, sotto l'aspetto ambientale, XR contribuisce a proteggere siti storici e naturali, gestire in modo sostenibile le infrastrutture e le mostre e controllare i flussi di visitatori, riducendo l'impatto fisico e il rischio di degrado.

Prospettiva tecnica



Prospettiva sociale



Soddisfazione

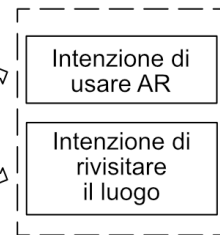


Figura 2.3: Modello concettuale

Capitolo 3

Progettazione dell'esperienza

Nel seguente capitolo verrà illustrato l'approccio progettuale adottato, insieme alle scelte e alle valutazioni maturate a seguito di un'attenta analisi. Fondamentale per questa fase è stato identificare un modello concettuale di riferimento per lo sviluppo del progetto. A tale scopo, si è scelto di adottare come base teorica il "Framework per esperienze AR con smart glass nel patrimonio culturale" proposto da Dima [24], riportato nella seguente Tabella 3.1. Questo modello, applicato al progetto presso il Museo Carcere Le Nuove, si articola in tre pilastri principali:

- **Interpretazione:** comprende la definizione degli obiettivi di apprendimento, la selezione dei contenuti storici e delle testimonianze, l'organizzazione temporale e l'utilizzo del materiale d'archivio. Questo pilastro guida la costruzione del contenuto e la scelta delle informazioni più rilevanti da presentare ai visitatori.
- **Narrazione emozionale:** riguarda la creazione di una narrazione che integri i contenuti storici con una prospettiva empatica e coinvolgente emotivamente. Include la definizione del ruolo del visitatore e il suo livello di *agency* (ossia la possibilità di influenzare l'esperienza e di interagire con il contenuto) e di *embodied cognition* (ossia l'apprendimento attraverso azioni fisiche e percezioni corporee nello spazio ibrido). L'obiettivo principale è favorire la costruzione dell'empatia storica.
- **Considerazioni tecnologiche:** riguarda le opportunità e i limiti della tecnologia, al fine di progettare la navigazione e la coreografia delle scene, definendo gli input sensoriali necessari per garantire un'esperienza coerente, immersiva e significativa.

È importante sottolineare come questi tre pilastri siano strettamente interconnessi: le decisioni prese in un ambito influenzano inevitabilmente gli altri, rendendo fondamentale considerarli simultaneamente durante l'intera fase di progettazione.

Tabella 3.1: *Framework* di design per esperienze AR con smart glass nel patrimonio culturale

Pilastri di Design	Elementi di design
Interpretazione (I)	(a) Obiettivi di apprendimento (b) Navigazione temporale (c) Materiale d'archivio
Narrazione emozionale (NE)	(a) Empatia storica (b) Narrazione (c) Ruolo del visitatore (d) On-/Off-boarding del visitatore (e) Agency (f) Embodied cognition
Considerazioni tecnologiche (CT)	(a) Meccanismi di navigazione (b) Coreografia (sequenze, ritmo, movimento nello spazio) (c) Input sensoriali (gesti, sguardo, eye tracking, suono direzionale)

3.1 Analisi del contesto museale e definizione degli obiettivi

Prima di avviare il processo progettuale vero e proprio, è stata condotta un'analisi preliminare del museo in modo da avere un quadro completo del contesto e del luogo in cui intervenire, con l'obiettivo di definire gli intenti del progetto in coerenza con i criteri individuati in precedenza. Questa analisi ha permesso di definire tre aspetti fondamentali:

- **Spazio:** analizzare gli spazi messi a disposizione dal museo, per scegliere il più adatto per l'inserimento di tecnologie immersive.
- **Obiettivi comunicativi e di apprendimento:** comprendere cosa e come il museo desidera trasmettere ai visitatori, per poter successivamente definire narrazione e materiali storici.

- **Percezione del museo da parte dei visitatori:** analizzando le visite guidate e le recensioni, individuare il profilo dei visitatori, i loro bisogni e il ruolo che assumono durante la fruizione del percorso museale.

3.1.1 Analisi e selezione dello spazio

In primo luogo è stata svolta l'analisi degli spazi del museo mostrati nelle Figure 3.1, 3.4, 3.2, 3.3, 3.5, con il fine di individuare l'ambiente più idoneo all'inserimento del progetto, considerando il loro stato di conservazione, allestimento e idoneità all'inserimento di tecnologie immersive.

Il **braccio femminile** è quello che più si avvicina alle condizioni originarie degli anni Quaranta, mantenendo gran parte della struttura e degli arredi dell'epoca. Questa autenticità lo rende uno spazio di grande valore storico, ma al tempo stesso meno adatto all'inserimento di tecnologie immersive, poiché già fortemente caratterizzato dal punto di vista allestitivo e narrativo. Il **braccio della morte** conserva l'aspetto originario ed è considerato uno degli spazi più intensi ed emozionanti dell'intera visita. Si tratta del luogo in cui i detenuti venivano condotti prima della fucilazione, una zona sotterranea estremamente umida e priva di luce naturale. L'unica illuminazione proviene da pannelli luminosi che riportano le ultime parole dei prigionieri, contribuendo a creare un'atmosfera fortemente suggestiva e di profondo impatto emotivo. Proprio per il valore simbolico e la delicatezza di questo spazio, le guide invitano i visitatori a mantenere il massimo rispetto durante la permanenza, sottolineandone la dimensione memoriale. Per questi motivi, il braccio della morte è stato ritenuto inadatto alla realizzazione di un progetto immersivo, in quanto ogni intervento tecnologico rischierebbe di compromettere il carattere contemplativo e il silenzio che ne costituiscono l'essenza. La **rotonda**, spazio centrale del carcere, mostra chiaramente la struttura panottica originaria e funge da collegamento tra i vari bracci. Tuttavia, non ospita allestimenti museali permanenti e viene utilizzata prevalentemente come area di transito. Infine, il **braccio tedesco** presenta un aspetto più moderno: è rimasto in funzione come carcere fino al 2003 e successivamente è stato adattato per l'attuale percorso museale. A differenza del braccio femminile, ospita pochi arredi d'epoca o oggetti che ingombrano lo spazio e presenta un allestimento lineare a parete con pannelli informativi. Questa caratteristica lo rende un luogo ideale per garantire un movimento libero e sicuro all'interno dell'esperienza XR. Inoltre, l'intervento tecnologico contribuisce ad arricchire uno spazio che oggi preserva in misura minore le caratteristiche originarie, offrendo così un valore aggiunto sia narrativo che esperienziale. Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la portata storica del braccio tedesco: durante la Seconda guerra mondiale vi erano detenuti numerosi oppositori politici, in particolare durante il periodo della Resistenza, tema centrale nella memoria del museo e fortemente valorizzato nelle

visite guidate. Per questi motivi è stato scelto il braccio tedesco come ambiente principale per la realizzazione dell'esperienza immersiva.



Figura 3.1: Braccio femminile



Figura 3.2: Braccio della morte



Figura 3.3: Rotonda



Figura 3.4: Braccio tedesco

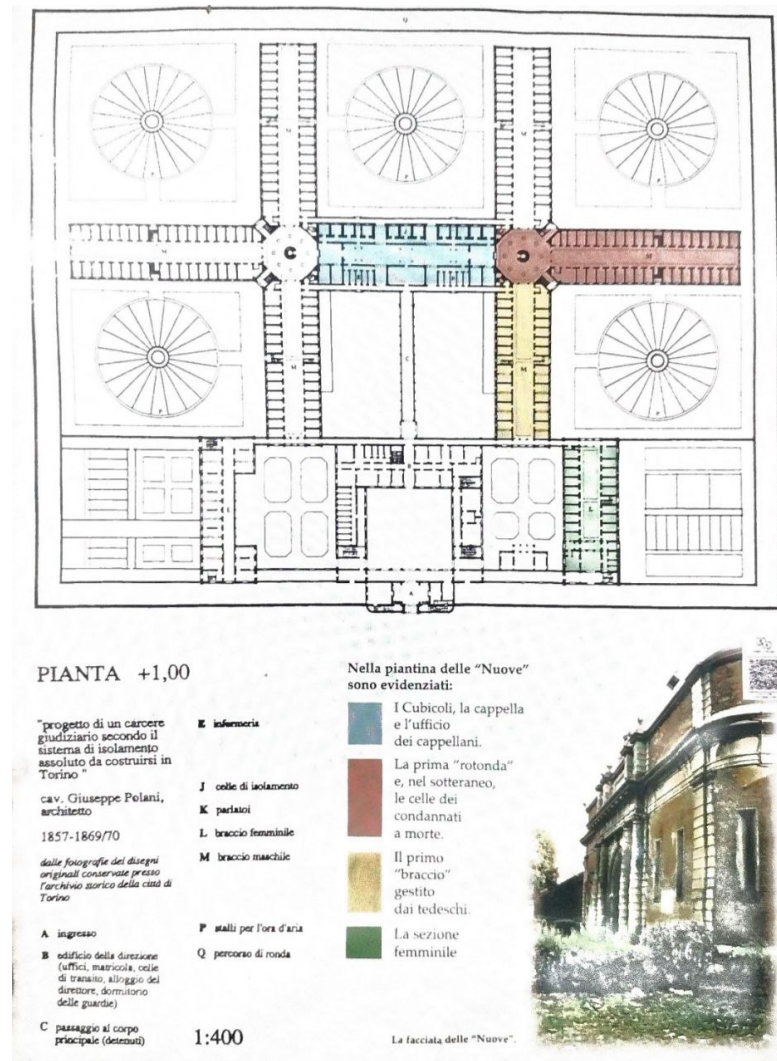


Figura 3.5: Pianta del carcere

3.1.2 Analisi dell'identità espositiva e degli obiettivi di apprendimento

Successivamente, è stata condotta un'analisi approfondita dell'allestimento del braccio tedesco, con l'obiettivo di comprendere come il museo comunica la sua identità e quali obiettivi di apprendimento intende raggiungere. L'analisi ha permesso di capire quali contenuti il museo desidera trasmettere, in che modo li trasmette, e come l'esperienza dei visitatori possa essere arricchita rimanendo coerente con l'identità espositiva del luogo. Poiché il museo è visitabile esclusivamente accompagnati da una guida, è stato fondamentale analizzare anche la visita guidata, che copre diversi periodi storici e luoghi tra cui il braccio tedesco dove viene posta particolare attenzione al periodo storico della Resistenza. La narrazione risulta fortemente influenzata dal racconto orale. In alcuni casi, le guide sono testimoni diretti o familiari di chi ha vissuto gli eventi narrati, in altri casi, si tratta di volontari profondamente motivati dal valore educativo e memoriale del museo. Questa dedizione conferisce un valore aggiunto all'esperienza, rendendola più autentica e coinvolgente. Durante la visita al braccio tedesco, le guide si soffermano principalmente su alcuni temi chiave:

- la condizione disumana in cui si trovavano i detenuti
- le torture e il percorso dei prigionieri destinati alla fucilazione o alla deportazione
- le testimonianze e le storie delle persone che sono passate per questo luogo

A questi argomenti si affiancano brevi accenni ai temi affrontati nelle celle allestite per la consultazione autonoma, per le quali i visitatori dispongono di circa quindici minuti di tempo. Le tematiche di queste celle sono riassunte nella Tabella 3.2, mentre nella Figura 3.6 si osserva la disposizione delle celle. Il cuore della visita

Tabella 3.2: Temi trattati nelle celle allestite

Cella	Tema trattato
108	“Notte e nebbia” (Direttiva Nacht und Nebel)
107	“Dalle leggi razziali all'uguaglianza”
109	“Deportati politici”
110	“Ignazio Vian” (storia del partigiano)
105	“Partigiani”
104	Cella allestita come una cella originaria dell'epoca

è l'esperienza umana, il vissuto e il dolore dei detenuti, raccontati da guide che trasmettono con cura e dedizione queste testimonianze. Questa attenzione alla

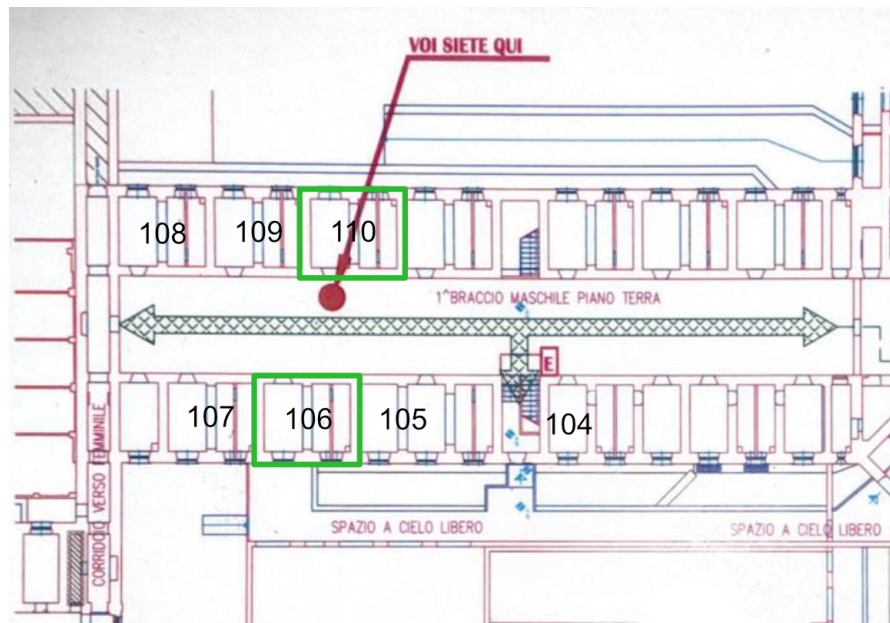


Figura 3.6: Pianta braccio maschile e disposizione celle illustrate nella Tabella 3.2

memoria e alla persona riflette la missione dell'Associazione "Nessun Uomo è un'Isola", che si propone di diventare testimone della storia attraverso un percorso museale inedito e un'esperienza unica. Gli obiettivi dell'associazione comprendono il recupero del complesso edilizio del Carcere Le Nuove come memoria storica, l'apertura della struttura per favorire riflessione e consapevolezza, la collaborazione con istituzioni ed enti, l'elaborazione degli eventi storici in elementi di coscienza civile, l'acquisizione di testimonianze di chi ha sofferto, e la valorizzazione dei protagonisti della Resistenza affinché le giovani generazioni ne conoscano il valore e l'impegno democratico.

3.1.3 Analisi dell'esperienza del visitatore e criticità

Per completare l'analisi, sono state prese in considerazione le recensioni dei visitatori. Il museo registra un punteggio medio di 4,6 su Google, con oltre 1.400 recensioni complessive. I giudizi sono in gran parte positivi, con particolare apprezzamento per l'atmosfera e l'architettura del luogo, che da sole suscitano emozione nei visitatori, e per la visita guidata, ritenuta efficace nel trasmettere la memoria del museo e nel restituirne la carica emotiva. Tuttavia, alcune recensioni evidenziano criticità: la lunghezza della visita (circa due ore), la mancanza di riscaldamento in alcune aree e la scarsa disponibilità di modalità alternative di fruizione. Questi aspetti risultano particolarmente rilevanti per chi cerca un'esperienza più personale o dinamica, ma anche per i visitatori stranieri, poiché buona parte delle guide

parla solo italiano. L'unico supporto in altre lingue, limitato all'inglese, è fornito tramite QR code posizionati sui pannelli informativi. Inoltre, l'allestimento si basa quasi esclusivamente su pannelli testuali e grafici, privi di elementi multimediali o interattivi. Ciò rende la visita carica di informazioni, ma anche più impegnativa, poiché richiede tempo per leggere e assimilare i contenuti, tempo non concesso per come è strutturata la visita guidata.

3.1.4 Conclusioni dell'analisi

Alla luce delle analisi svolte, la scelta del braccio tedesco si conferma la più adatta per lo sviluppo dell'esperienza XR. Questo sia per il suo valore storico legato al periodo della Resistenza, tema centrale del museo, sia per il suo stato di conservazione relativamente moderno, che offre maggiori opportunità all'inserimento di tecnologie immersive, permettendo di creare un ponte tra il presente e un passato ormai non più osservabile direttamente nell'architettura dello spazio. L'analisi ha inoltre permesso di individuare i temi principali su cui basare l'esperienza: la testimonianza e l'esperienza umana. È stato possibile chiarire il ruolo del visitatore, tradizionalmente passivo durante la visita guidata, assegnandogli invece un ruolo attivo, volto a stimolare una riflessione introspettiva sulla storia. In questo contesto, la tecnologia diventa lo strumento ideale per raggiungere questo obiettivo. L'esperienza immersiva si propone quindi come un mezzo capace di instaurare un rapporto diretto e immediato con i contenuti del luogo, offrendo una fruizione più personale, coinvolgente e accessibile anche in tempi più brevi rispetto alla visita guidata tradizionale, pur rinunciando in parte alla dimensione più didattica della narrazione guidata. Infine, questa fase ha consentito di delineare una prima direzione progettuale coerente con i tre pilastri del *framework* di design precedentemente individuati: Interpretazione (I), Narrazione Emozionale (NE) e Considerazioni Tecnologiche (CT) che fungeranno da riferimento per lo sviluppo delle successive fasi di concept e prototipazione dell'esperienza. In particolare, il pilastro dell'Interpretazione trova fondamento nei temi dell'esperienza umana e del valore della testimonianza, strettamente connessi al periodo storico della Resistenza e al contesto specifico del braccio tedesco. Per quanto riguarda la Narrazione Emozionale e le Considerazioni Tecnologiche, sebbene non ancora completamente definite, emerge con chiarezza la volontà di attribuire al visitatore un ruolo attivo e partecipativo, reso possibile proprio dall'impiego consapevole della tecnologia come strumento di mediazione e riflessione.

3.2 Definizione dell'idea progettuale

A seguito dell'analisi preliminare precedentemente descritta, si è definita l'idea progettuale principale del progetto, basata su un concetto presente nella narrazione

della visita guidata del museo: la cella.

La cella rappresenta un luogo chiuso, intimo e delimitato, simbolo della privazione della dignità umana, ma al contempo simbolicamente proiettato verso l'esterno, come se custodisse un passaggio verso un'esperienza più ampia. Questo concetto, unito all'idea del portale virtuale, ha guidato l'intero sviluppo del progetto, influenzandone sia le scelte narrative sia quelle spaziali e interattive. Nell'esperienza AR, l'utente si avvicina alla cella reale e varca la soglia della porta: questo momento segna la transizione tra il mondo fisico e quello virtuale e al contempo una transizione da presente a passato. Chiudendosi la porta alle spalle, l'utente entra in un ambiente VR completamente ricostruito, dove prendono vita interazioni, animazioni e contenuti multimediali (Figure 3.8, 3.9). Questo approccio è in linea con quanto proposto da Cisternino et al.[25] che descrivono i “virtual portals” come strumenti per la transizione tra realtà e virtualità, consentendo all'utente di percepire lo spostamento attraverso dimensioni spazio-temporali diverse e di vivere un'esperienza personale e immersiva (Figura 2.1). La progettazione punta a mantenere una continuità sensoriale: toccando le pareti dell'ambiente virtuale, l'utente percepisce la consistenza e la presenza delle superfici reali, mentre odori, umidità e freddo evocano l'ambiente fisico originale. In questo modo, l'esperienza non è solo visiva o uditiva, ma multisensoriale, combinando percezioni reali e virtuali per favorire un coinvolgimento profondo e immersivo. Questa integrazione tra realtà aumentata e virtuale permette di creare un ponte esperienziale che guida il visitatore in un viaggio immersivo, rendendo tangibile la memoria storica e allo stesso tempo amplificando la dimensione narrativa e emozionale della visita.

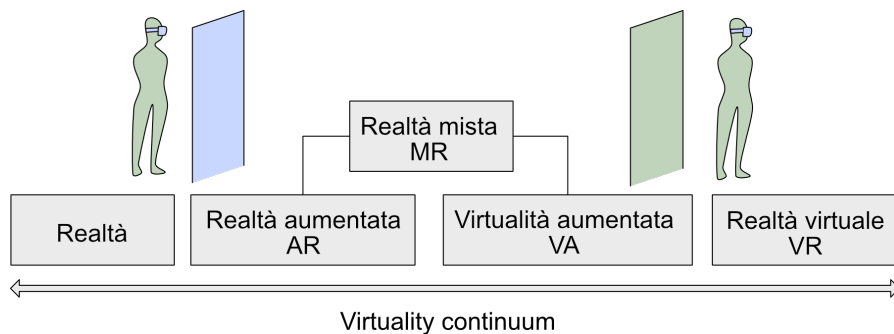


Figura 3.7: Portale virtuale nel virtuality continuum



Figura 3.8: Portale virtuale visuale esterna la cella



Figura 3.9: Portale virtuale visuale interna la cella

3.3 Dalle testimonianze alla narrazione immersiva

Definita l'idea progettuale principale e individuati nella fase di analisi la direzione progettuale, si è passati allo sviluppo e definizione del pilastro della *Narrazione emozionale*. Per lo sviluppo è stato fondamentale riflettere sul rapporto tra patrimonio culturale immateriale e patrimonio culturale materiale. È nel momento in cui la memoria, le testimonianze e i vissuti immateriali trovano spazio negli oggetti, nei luoghi e negli ambienti fisici che il patrimonio prende davvero vita. L'idea centrale della narrazione è proprio questa: restituire un'idea di cosa fosse la cella attraverso le voci di chi, in maniera diretta o indiretta, l'ha vissuta. L'obiettivo è trovare le storie nella storia, affinché ogni visitatore possa riconoscere, attraverso il racconto personale, una parte della propria esperienza umana. Solo così è possibile comprendere più a fondo la portata degli eventi storici: non come narrazione lontana o impersonale, ma come qualcosa che continua a parlare anche al nostro presente [24]. Un secondo nucleo concettuale riguarda la memoria storica: essa non deve essere percepita come qualcosa di anacronistico, ma come una dimensione viva e attuale. Il Museo Le Nuove già lavora in questa direzione, come dimostra un progetto recente in collaborazione con una scuola: le ragazze e i ragazzi hanno riflettuto sulle analogie tra l'esperienza dei deportati e quella degli immigrati, culminata in un'installazione allestita in una delle celle. L'intento è dunque ripensare il carcere Le Nuove oggi, e domandarsi: cosa rappresenta oggi la Resistenza? Quali memorie e valori di liberazione e giustizia essa trasmette? Visitare questo luogo storico diventa allora un'esperienza sospesa tra passato, presente e futuro, dove i segni materiali del passato restano vivi nella nostra memoria collettiva. In questo percorso, le testimonianze dirette e indirette dei sopravvissuti assumono un ruolo centrale. La voce reale dei testimoni costituisce un ponte unico verso il passato, ma rappresenta anche un patrimonio destinato a scomparire: le generazioni future non avranno più l'opportunità di ascoltare direttamente chi ha vissuto quegli eventi in prima persona. Tale questione si collega al concetto di memoria storica come patrimonio culturale immateriale, riconosciuto e tutelato dall'UNESCO [2], che ne sottolinea il valore simbolico e la necessità di trasmetterla in maniera autentica e continua. Come evidenzia Liliana Segre, sopravvissuta ad Auschwitz e oggi Senatrice a vita, la conservazione della memoria richiede strumenti capaci di garantirne la fedeltà nel tempo. In questo senso, l'impiego di registrazioni audio originali e suoni reali, come proposto nell'ambito dell'immersive journalism dalla giornalista e documentarista statunitense Nonny de la Peña, consente di restituire l'esperienza emotiva e sensoriale delle testimonianze, accrescendo significativamente l'impatto e l'efficacia del racconto. Come afferma l'autrice, l'obiettivo dell'immersive journalism è quello di permettere al fruitore di entrare in uno scenario virtualmente ricreato,

sperimentando in prima persona eventi o situazioni reali, così da instaurare un legame diretto con le emozioni e i significati che li caratterizzano [26]. Nel caso specifico di questo progetto, la voce del testimone diventa il principale veicolo narrativo, integrata alla ricostruzione virtuale dell'ambiente che non tende a un iperrealismo fine a sé stesso, che rischierebbe anzi di snaturare il valore simbolico del luogo, ma fa ricorso a espedienti narrativi e visivi di carattere evocativo. Questo, unito al fatto che l'esperienza si svolga nel luogo fisico in cui quegli eventi si sono verificati, arricchita e amplificata da elementi virtuali, contribuisce a un livello di coinvolgimento superiore, stimolando una partecipazione emotiva profonda e orientando la percezione del visitatore verso una comprensione più intima e riflessiva dell'esperienza. Per questo, una fase fondamentale del progetto è stata quella delle interviste, condotte per raccogliere testimonianze dirette e indirette:

- Giuseppe, testimone diretto, prigioniero politico al carcere Le Nuove, a cui spettava la fucilazione al Martinetto
- Carla, testimone indiretta, che racconta la storia di suo marito Mario, prigioniero politico deportato a Dachau, e di suo zio Giuseppe, prigioniero politico e operaio Fiat deportato a Mauthausen

La scelta di queste storie non è casuale: nel braccio maschile del carcere Le Nuove, i detenuti uscivano dalle celle solo per due motivi, per essere fucilati o per essere deportati nei campi di concentramento e di sterminio. Le testimonianze di Giuseppe e di Carla, dunque, rappresentano in modo emblematico le due vie attraverso cui si compiva il destino dei prigionieri politici rinchiusi in quelle celle. Inoltre, queste due voci testimoniano due diverse forme di trasmissione della memoria: quella di chi ha vissuto direttamente l'esperienza e quella di chi, pur non avendola vissuta in prima persona, la sente profondamente vicina grazie al legame affettivo e familiare con chi l'ha subita. Dall'analisi delle interviste, inizialmente della durata di circa un'ora e successivamente sintetizzate in circa tre minuti, sono stati individuati i punti fondamentali della testimonianza, volti a creare un legame emotivo con l'ascoltatore e a trasmettere una visione storica ravvicinata, generando così una mappa di frasi chiave (Figura 3.10).

3.4 Dalla narrazione immersiva alla progettazione dell'interazione

Una volta definita la narrazione immersiva, è stato necessario approfondire alcuni aspetti del pilastro della Narrazione Emotiva tra cui: Ruolo del visitatore, *On-/Off-boarding* del visitatore (ossia come introdurre il visitatore all'esperienza e come chiudere il percorso), *Agency*, *Embodied cognition* e in generale il pilastro delle Considerazioni Tecnologiche. In questa fase è stato elaborato un diagramma di flusso dei passaggi fondamentali dell'esperienza, che rappresenta le principali sequenze attraverso cui l'utente procede (Figura 3.11). Il diagramma funge anche da guida per la struttura logica dell'implementazione tecnica, definendo l'ordine e le dipendenze tra stati, azioni dell'utente e transizioni nella scena immersiva. Nel corso dello sviluppo, il diagramma verrà progressivamente ampliato e raffinato per includere tutti i dettagli e le varianti dell'esperienza. Per orientare l'utente, è stato

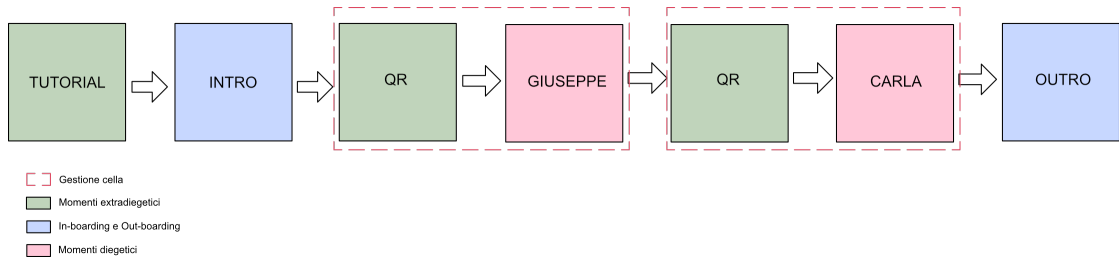


Figura 3.11: Diagramma di flusso dell'esperienza

innanzitutto inserito un breve tutorial non tanto sul funzionamento del dispositivo, spiegato invece a voce, quanto sui momenti extradiegetici dell'esperienza, ossia quegli istanti in cui il visitatore compie azioni necessarie per la fruizione ma esterne alla narrazione stessa, come ad esempio l'inquadratura dei QR code per l'allineamento della stanza virtuale (Figure 3.12, 3.13).

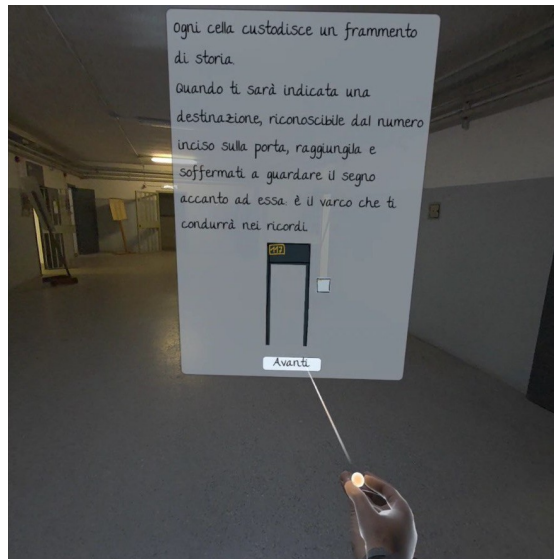


Figura 3.12: Schermata 1 Tutorial



Figura 3.13: Schermata 2 Tutorial

Successivamente, è stata inserita una breve introduzione che assegna al visitatore un obiettivo chiaro: scoprire cosa nascondono le pareti della cella, partendo da un dato storico reale, il decreto Nacht und Nebel. Questo decreto nazista prevedeva l'arresto, la deportazione e l'eliminazione segreta dei prigionieri politici, con lo scopo di cancellarne ogni traccia. L'esperienza si configura come una chiamata all'azione: il visitatore è chiamato a ricostruire la memoria perduta, esplorando le tracce lasciate dai prigionieri, poiché gli archivi di chi è passato in queste celle sono stati in gran parte distrutti o cancellati (Figure 3.14, 3.15).

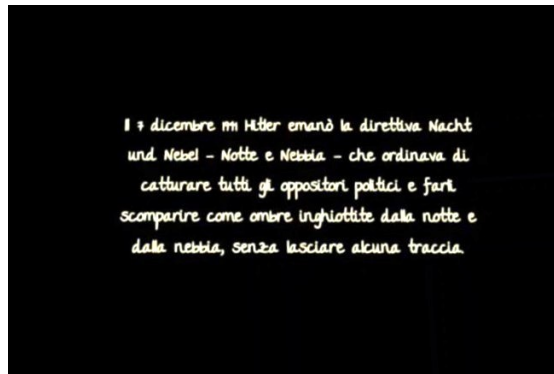


Figura 3.14: Schermata 1 Introduzione

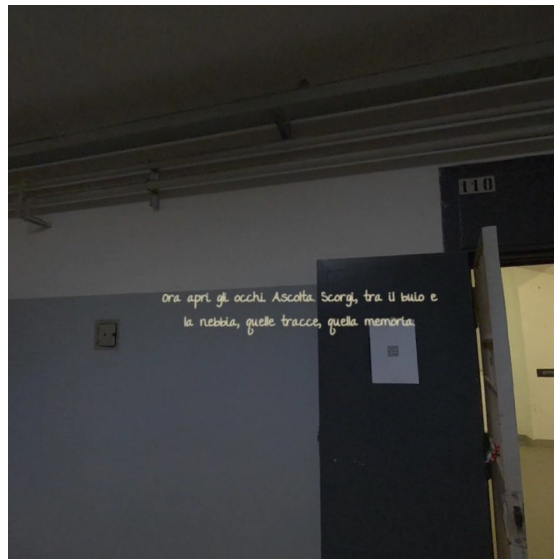


Figura 3.15: Schermata 2 Introduzione

Durante i test con gli utenti, che saranno descritti in una sezione successiva, una partecipante ha interpretato questo approccio come un ruolo simile a quello dello storico: il visitatore deve trovare la storia nelle storie, ricomponendo frammenti di memoria altrimenti perduti. Segue poi la fase di allineamento con l'inquadratura del QR code, descritta nella sezione dedicata all'implementazione tecnica, che garantisce la corrispondenza spaziale tra mondo reale e virtuale, permettendo un ingresso fluido e coerente nella cella. Una volta varcata la soglia, inizia l'immersione totale e si pone la questione di come far interagire il visitatore. La definizione del livello di interattività ha rappresentato un momento cruciale del progetto, poiché implicava un equilibrio tra coinvolgimento e introspezione. Come osserva Dima (2022), un'esperienza completamente gamificata rischia di compromettere l'immersione emotiva, trasformando il completamento del gioco nel principale obiettivo del visitatore, anziché favorire una relazione più profonda con il contenuto narrativo. In analogia con il progetto Sutton House Stories, dove l'autrice privilegia opportunità di gioco simbolico rispetto a meccanismi ludici orientati al risultato, nel progetto per Museo Carcere Le Nuove si è scelto di limitare l'interazione a un solo gesto significativo: il posizionamento della fotografia sulle pareti della cella (Figura 3.16). Questo gesto ha valore simbolico e contemplativo: consente di mantenere l'attenzione del visitatore sull'aspetto emotivo e riflessivo dell'esperienza, favorendo una partecipazione attiva senza distrazioni. La fotografia, raffigurante il testimone da giovane o della persona di cui si sta raccontando la storia, genera simbolicamente una crepa nel muro, rimandando all'idea iniziale di cercare tracce e memorie nascoste all'interno delle celle e collegandoci all'idea progettuale di cella come luogo che cerca di estendersi all'esterno. Per definire al meglio i punti di interazione è stata realizzata una mappa della cella (Figura 3.17) con i punti in cui posizionare la fotografia, collegando ciascun punto ai frammenti di testimonianza individuati nella mappa di frasi precedentemente elaborata (Figura 3.18). In questo modo, l'utente scopre progressivamente la storia, seguendo un percorso guidato che combina esplorazione spaziale e narrazione. Per ogni frammento di testimonianza inoltre, sono state progettate una serie di animazioni e tracce audio spazializzate, pensate per enfatizzare il contenuto emotivo e guidare l'attenzione del visitatore all'interno della cella, creando un'esperienza immersiva e multisensoriale, alcuni degli audio sono proprio stati realizzati all'interno del braccio tedesco (Figura 3.19). In questo modo, l'esperienza si propone come un puzzle narrativo guidato, volto a promuovere una fruizione contemplativa, a scapito di un'ampia libertà d'azione (*Agency*) del visitatore. L'unico momento in cui viene concessa maggiore libertà di scelta è quello della caduta delle lettere dal soffitto: l'utente può decidere quali lettere leggere o ascoltare, in parte o nella loro interezza, sperimentando così un'interazione più autonoma (Figure 3.20, 3.21, 3.22).

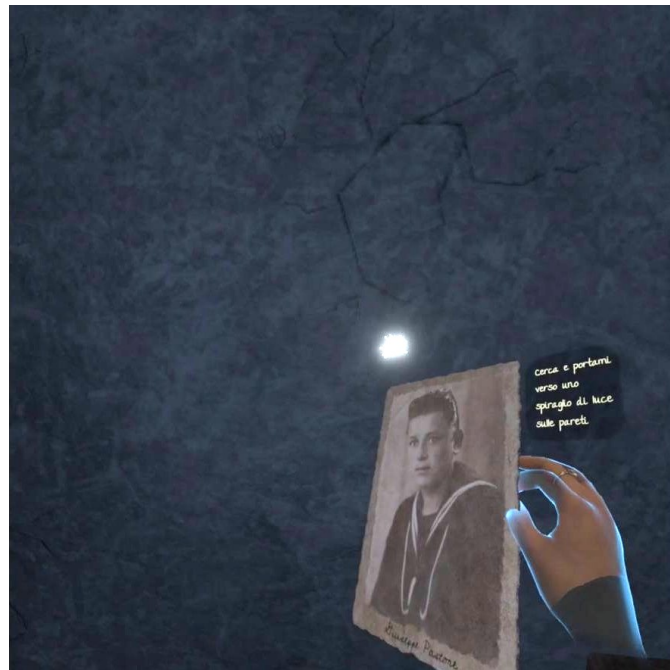


Figura 3.16: Posizionamento foto sulla parete della cella

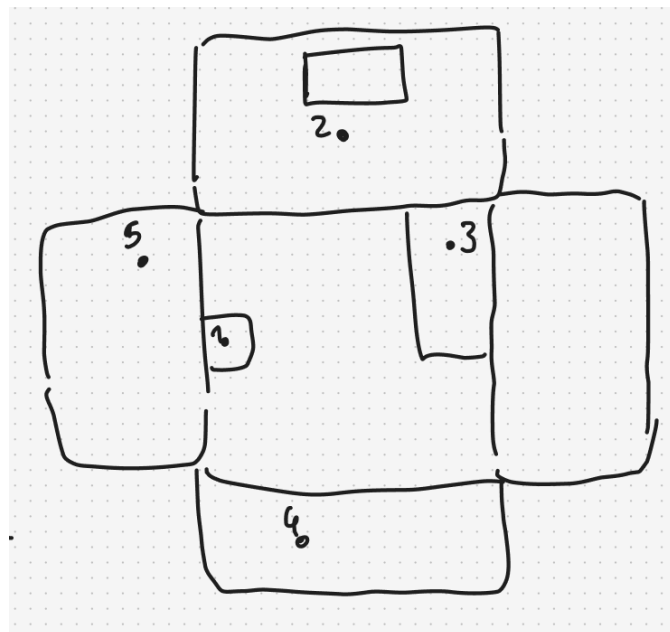


Figura 3.17: Mappa punti di interazione

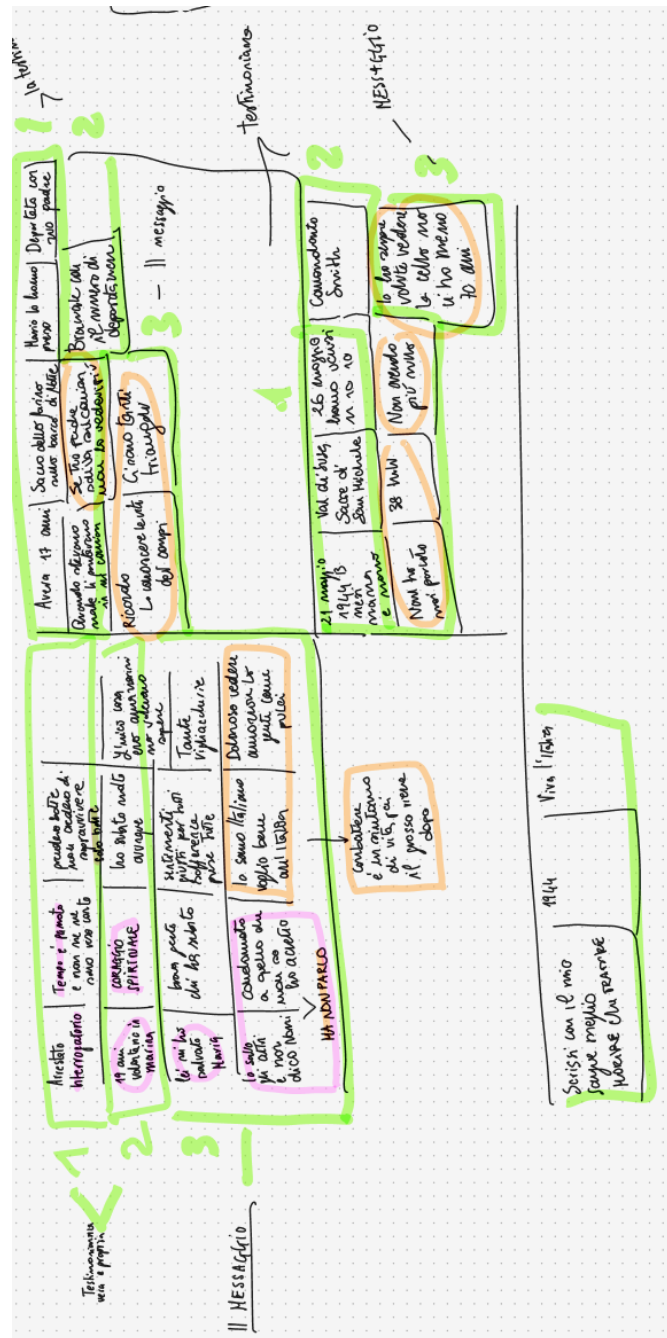


Figura 3.18: Mappa che associa il numero del punto di interazione con la testimonianza

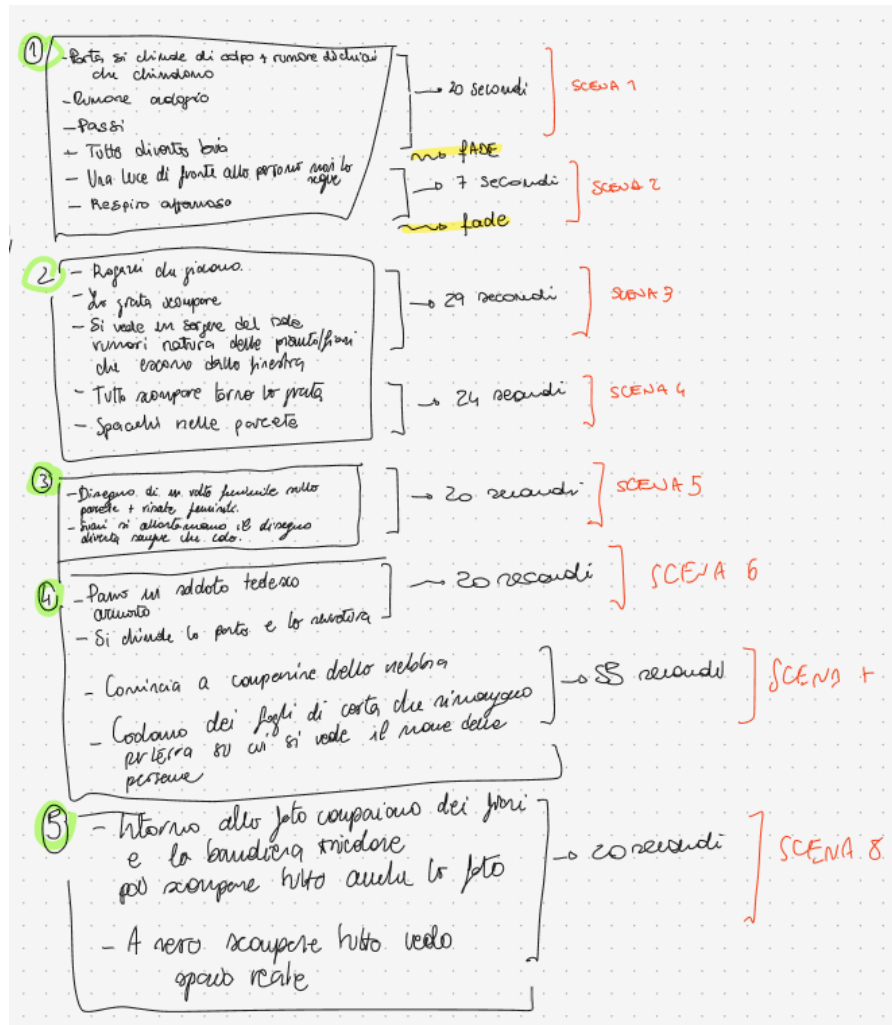


Figura 3.19: Mappa che associa il numero del punto di interazione con le animazioni e i contenuti audio



Figura 3.20: Scena caduta lettere dal soffitto



Figura 3.21: Fronte della lettera

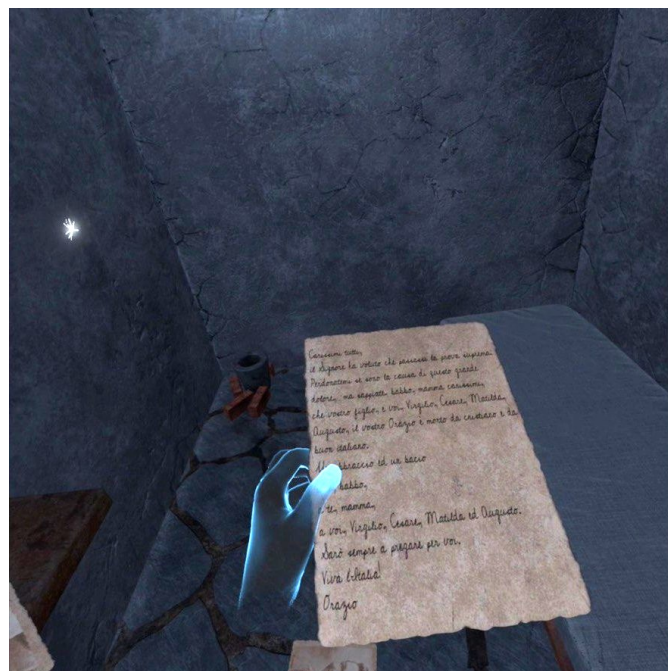


Figura 3.22: Retro della lettera

Capitolo 4

Implementazione tecnica

In parallelo allo sviluppo della narrazione immersiva e alla raccolta del materiale storico, è stata avviata l'implementazione tecnica dell'esperienza. Questo processo ha incluso non solo la scrittura del codice e la configurazione dei sistemi AR e VR, ma anche la modellazione 3D, la creazione di animazioni e di *asset digitali*, nonché l'integrazione di tutti gli elementi nella scena immersiva. Il seguente capitolo illustra, da una parte, le scelte tecnologiche adottate, i *framework* e le librerie utilizzate, l'analisi dello spazio fisico per il posizionamento e il tracking degli oggetti virtuali, e i metodi sviluppati per garantire l'allineamento tra ambiente reale e ambiente virtuale; dall'altra, le motivazioni alla base di queste scelte e il loro ruolo nel supportare la narrazione emotiva e l'esperienza complessiva del visitatore.

4.1 Strumenti e *framework* di sviluppo

Fin dall'inizio, la scelta del dispositivo ha privilegiato il Meta Quest 3, un Head-Mounted Display (HMD) che consente un'immersione completa e avanzata in realtà aumentata e virtuale. Grazie alle sue fotocamere RGB integrate, il visore è in grado di visualizzare l'ambiente reale e offrire così una vera esperienza di realtà aumentata, funzionalità non supportata dal precedente Meta Quest 2. A differenza degli smartphone, che utilizzano schermi 2D e interazioni limitate, l'HMD permette un tracciamento spaziale preciso e un'interazione naturale tramite controller e rilevamento delle mani, garantendo un allineamento accurato degli elementi virtuali nello spazio fisico e un coinvolgimento maggiore. Le funzionalità supportate nativamente dal Meta Quest 3 includono:

- **Tracciamento posizionale (*positional tracking*):** Consente al dispositivo di rilevare con precisione la propria posizione e orientamento nello spazio fisico, garantendo una corretta integrazione tra movimento reale e virtuale.

- **Rilevamento di piani (*plane detection*):** Identifica automaticamente superfici piane nell'ambiente reale, come pavimenti, pareti e tavoli, permettendo di ancorarvi gli oggetti virtuali in modo coerente.
- ***Meshing e Bounding Box Detection*:** Crea una rappresentazione geometrica semplificata (*mesh*) dell'ambiente circostante e individua i *bounding box*, ovvero i rettangoli che delimitano gli oggetti o le aree rilevate. Questi strumenti facilitano il posizionamento e le interazioni corrette degli elementi virtuali nello spazio reale.
- ***Raycast e Ancore (Spatial Anchors)*:** Permette all'utente di interagire con la scena tramite controller o mani e consente di fissare in modo stabile e duraturo i contenuti virtuali in posizioni precise del mondo reale.
- **Occlusione:** Supporta la gestione dinamica dell'occlusione, ovvero la capacità degli oggetti reali di nascondere quelli virtuali quando si sovrappongono visivamente, migliorando il realismo.

Tuttavia, è importante notare che, al momento dello sviluppo del progetto, alcune funzionalità avanzate presentavano limitazioni o non erano disponibili:

- ***Face/Body Tracking*:** il Meta Quest 3 non dispone di fotocamere interne per il tracciamento facciale completo, a differenza del Meta Quest Pro, e quindi non supporta un riconoscimento preciso delle espressioni facciali. Per quanto riguarda il corpo, il dispositivo include un sistema di *inside-out upper-body tracking*, che permette di rilevare i movimenti di torso, spalle, gomiti e polsi tramite le telecamere integrate e algoritmi di *computer vision*, tuttavia, va sottolineato che il *tracking* non copre l'intero corpo, limitandosi alla parte superiore.
- **Camera:** inizialmente, l'accesso alle videocamere frontali era limitato al *feed* visivo di base dell'ambiente circostante. Con il rilascio delle Passthrough Camera API nell'aprile 2025, è stato reso disponibile un accesso più avanzato, che comprende *feed* multi-camera ad alta risoluzione, metadati e funzionalità ottimizzate per applicazioni di *computer vision* e *machine learning*. Le API (*Application Programming Interface*) sono interfacce che permettono a diversi software di interagire, facilitando l'accesso e la gestione di funzionalità complesse come quelle offerte dalle videocamere. Questo rappresenta un importante progresso tecnologico, ampliando notevolmente le potenzialità d'uso del visore. Le modalità di interazione e l'uso di queste nuove API sono descritte più avanti nel paragrafo dedicato.

Successivamente, si è passati alla valutazione dei *framework* e delle librerie per lo sviluppo dell'applicazione. È stato scelto Unity come *game engine*, ovvero un

ambiente di sviluppo integrato che fornisce strumenti e componenti software per creare applicazioni interattive in 2D e 3D, con supporto per realtà aumentata e virtuale. Questa scelta si basa sulla consolidata diffusione di Unity nel settore [19], sull'ampia compatibilità con dispositivi XR e sulla vasta disponibilità di pacchetti e strumenti specifici. Le opzioni principali per il *framework* erano due:

- **OpenXR:** uno standard aperto e un *framework* royalty-free sviluppato dal Khronos Group, che fornisce un'interfaccia comune per accedere alle funzionalità native di dispositivi XR, facilitando lo sviluppo multiplatforma e l'interoperabilità tra sistemi.
- **Meta SDK:** il *framework* ufficiale per lo sviluppo di applicazioni destinate ai dispositivi Meta. A differenza di OpenXR, fornisce un accesso diretto e approfondito alle funzionalità avanzate e specifiche dei dispositivi Meta, permettendo di sfruttare appieno le potenzialità hardware e le API proprietarie offerte dalla piattaforma.

Nel caso di OpenXR, per l'implementazione di un'applicazione in realtà mista sul Meta Quest 3 sono necessarie due librerie aggiuntive:

- **Unity OpenXR Meta:** pacchetto che estende il supporto di OpenXR per i visori Meta, permettendo a Unity di accedere alle estensioni proprietarie Meta attraverso lo standard OpenXR. Consente di sfruttare funzionalità specifiche dei dispositivi Meta mantenendo al contempo la compatibilità con lo standard aperto.
- **AR Foundation:** *framework* di Unity che fornisce un livello di astrazione multiplatforma per gestire tracciamento delle superfici, rilevamento dei piani e gestione delle ancore spaziali. In combinazione con Unity OpenXR Meta, consente di sviluppare applicazioni per il Meta Quest 3 accedendo sia alle funzionalità standard di AR che alle estensioni proprietarie Meta, garantendo compatibilità cross-platform.
- **XR Interaction Toolkit:** pacchetto Unity che semplifica l'implementazione di interazioni in realtà aumentata e virtuale. In combinazione con AR Foundation e Unity OpenXR Meta, facilita la creazione di interazioni immersive (puntamento, selezione, manipolazione di oggetti) in modo modulare, garantendo compatibilità con i dispositivi Meta e altri dispositivi XR.

Sebbene la soluzione basata su OpenXR e AR Foundation rappresenti un approccio efficace e multiplatforma per la gestione delle funzionalità di base della realtà aumentata, essa copre solo una parte delle capacità XR effettivamente offerte dal visore. Per accedere a funzioni avanzate come la Depth API e Passthrough Camera API, è necessario integrare le API proprietarie del Meta XR SDK. La soluzione

adottata sfrutta lo standard OpenXR come base principale, integrandolo con il Meta XR SDK per accedere alle funzionalità avanzate che OpenXR, nelle sue estensioni disponibili, non supporta completamente. Questa scelta è coerente con la direzione strategica condivisa sia da Unity che da Meta. Unity ha designato OpenXR come API principale per lo sviluppo XR multiplatforma, mentre Meta, in qualità di pioniere dello standard OpenXR, ha dichiarato il suo impegno nel contribuire all'espansione e al miglioramento continuo di OpenXR [27]. Sebbene l'integrazione delle API proprietarie del Meta XR SDK consenta di estendere le funzionalità dell'applicazione, quando l'architettura si basa principalmente su OpenXR e AR Foundation, le potenzialità del Meta SDK rimangono solo parzialmente sfruttabili. Questo perché OpenXR e AR Foundation offrono un livello di astrazione multiplatforma che, pur garantendo interoperabilità, non supporta completamente tutte le capacità hardware e software specifiche disponibili tramite il Meta SDK, le quali rimangono solo parzialmente integrate nello standard. Di conseguenza, alcune funzionalità avanzate esclusive dei dispositivi Meta possono non essere completamente accessibili o sfruttate se non si integra direttamente il Meta SDK come base primaria. Tuttavia, questo scenario è destinato a evolversi: Meta sta investendo significativamente nell'espansione di OpenXR e, poiché Unity promuove questo standard come principale percorso di sviluppo, è plausibile che le future versioni offriranno un accesso più completo alle funzionalità avanzate dei dispositivi Meta.

4.2 Architettura logica e macchina a stati

L'architettura logica del progetto si basa su una macchina a stati finiti (*Finite State Machine*, FSM), che gestisce la sequenza e il comportamento dei diversi momenti dell'esperienza immersiva (Figura 4.2). Questo approccio consente di mantenere il codice modulare, scalabile e facilmente estendibile, separando la logica di ciascuna fase della narrazione dalle componenti tecniche e dai sistemi di gestione comuni. Per lo sviluppo della macchina a stati si è partiti dal diagramma di flusso precedentemente mostrato (Figura 3.11) che in parte è stato ampliato. Alla base della macchina a stati è stata definita l'interfaccia `IExperienceState`, che fornisce la struttura di riferimento per ogni stato concreto. Ogni stato implementa tre metodi principali:

- `Enter()`: viene chiamato all'avvio dello stato e gestisce l'attivazione di elementi UI, audio e logica iniziale.
- `Update()`: viene eseguito ad ogni frame, utile per controlli continui come l'ascolto di input dell'utente.

- `Exit()`: viene chiamato al termine dello stato; disattiva elementi UI o listener e pulisce le risorse utilizzate.

Questa interfaccia viene implementata dagli stati concreti che corrispondono ai momenti narrativi principali dell'esperienza (Figura 4.1).

- `TutorialState`
- `IntroState`
- `SetRoomState`
- `TestimonyState`
- `OutroState`

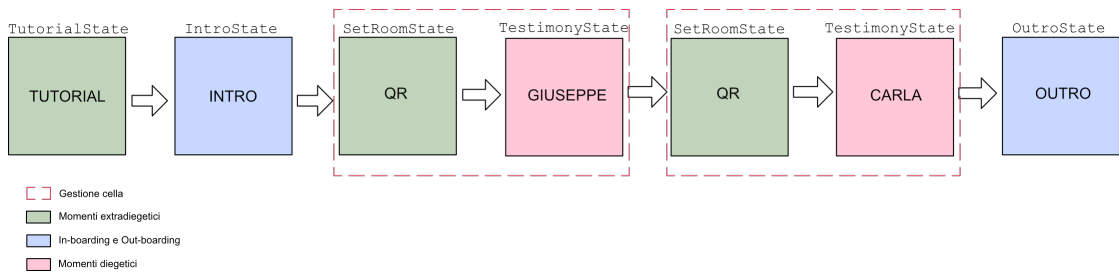


Figura 4.1: Diagramma di flusso degli stati

Per la gestione della macchina a stati e in generale del flusso dell'esperienza si sono utilizzati due componenti principali:

- **ExperienceManager**: È il punto di ingresso principale dell'applicazione. Si occupa di inizializzare la macchina a stati e i diversi manager (audio, UI, input, eventi) i quali centralizzano funzioni comuni e comunicano tramite un sistema di eventi condiviso.
- **ExperienceStateMachine**: È la classe che gestisce le transizioni tra stati, offrendo i metodi per la gestione.

Per la gestione dei contenuti (testi e audio) di ciascuno stato, è stata implementata una struttura dati dedicata basata su *Scriptable Object*. Ogni stato dispone di un proprio *Scriptable Object* contenente i riferimenti ai materiali testuali e audio in più lingue. In questo modo, in base alla lingua selezionata dall'utente, il sistema è in grado di recuperare dinamicamente le risorse corrette. La selezione della lingua avviene tramite uno script dedicato, che aggiorna globalmente la lingua dell'esperienza (Figura 4.3).

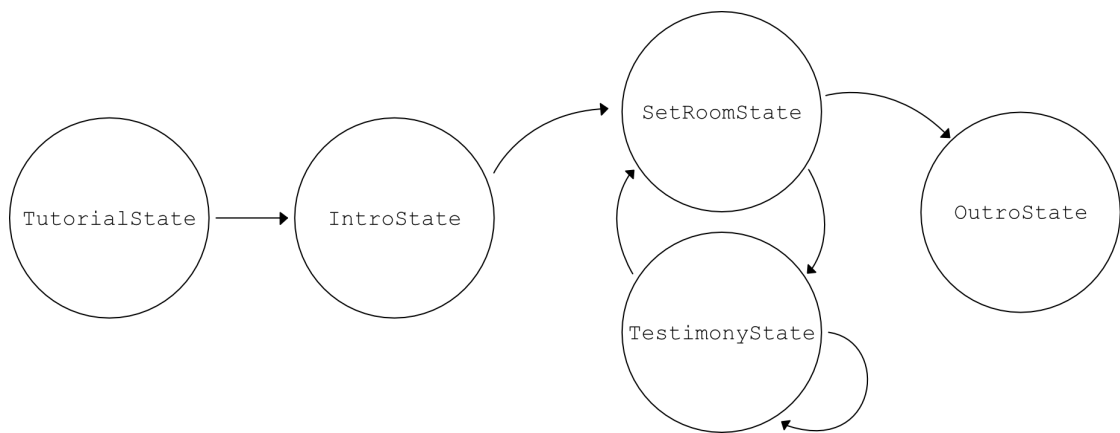


Figura 4.2: Macchina a stati finiti dell'esperienza

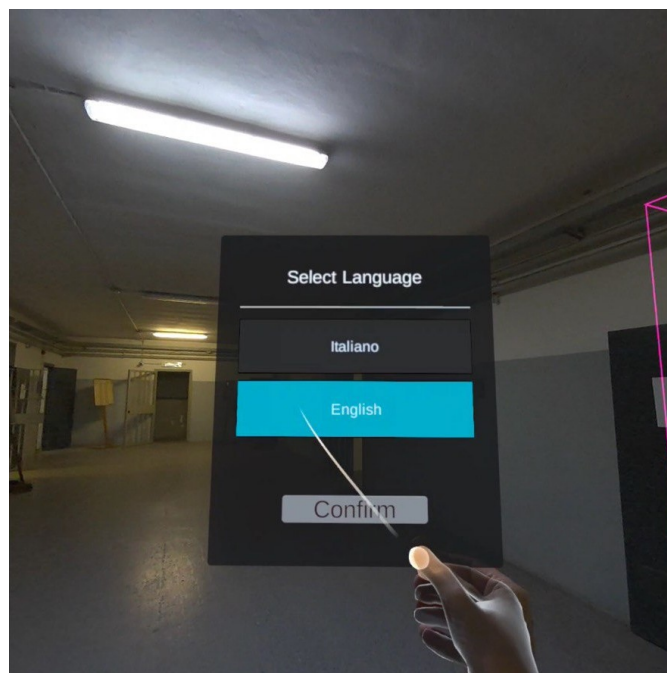


Figura 4.3: Selezione lingue

4.3 Allineamento spaziale tra ambiente reale e virtuale

Come anticipato in precedenza, l'elemento tecnico più cruciale dell'esperienza è l'allineamento tra lo spazio fisico reale e quello virtuale. Nel caso degli HMD, la prima operazione fondamentale consiste nella definizione dell'area di gioco, che può essere *room-scale* o stazionaria. Questo processo, gestito dal sistema Guardian di Meta, permette di delimitare un'area di sicurezza all'interno della quale l'utente può muoversi liberamente. Nel caso del progetto del Museo Carcere Le Nuove, tuttavia è necessario superare questo limite. L'esperienza prevede infatti che l'utente possa muoversi liberamente nello spazio fisico, esplorando le celle attraverso i portali virtuali in realtà aumentata (AR). In questa fase l'utente si muove in sicurezza grazie al *feed* visivo fornito dalle camere del visore. Quando si entra in una cella virtuale, e l'applicazione passa alla modalità VR, è fondamentale che la stanza reale (fisicamente vuota) coincida esattamente con quella virtuale. Questo allineamento è necessario sia per coerenza immersiva, in modo che il contatto con la parete virtuale corrisponda a quello con la parete reale, sia per sicurezza, evitando che l'utente urti le superfici fisiche. Il Meta Quest 3 permette di scansionare una o più stanze grazie al sistema detto *Space Setup*. Tale funzionalità è indispensabile per il corretto funzionamento del *Plane Manager* di AR Foundation. Infatti, a differenza di altre piattaforme AR, come ARKit di Apple o ARCore di Google, che si basano sul continuo rilevamento dell'ambiente circostante, AR Foundation su Meta Quest utilizza invece i dati memorizzati in fase di Space Setup, salvando un modello della scena (*Scene Model*) che descrive le superfici e la disposizione degli oggetti reali nello spazio. Questo rappresenta un primo limite nell'uso di OpenXR con AR Foundation, tuttavia tale vincolo non risulta restrittivo ai fini del progetto, in quanto la scena di riferimento è statica (la cella) e la mappatura iniziale fornisce informazioni spaziali sufficienti. Grazie a questi dati, l'applicazione è in grado di comprendere la posizione dell'utente nello spazio rilevato e di individuare i piani di collisione della stanza. Un ulteriore elemento chiave è rappresentato dalle *spatial anchors*, ossia le ancore spaziali che consentono di associare oggetti virtuali a coordinate fisiche reali. In questo modo, anche in caso di variazioni di posizione o orientamento dell'utente, gli oggetti virtuali mantengono la propria collocazione stabile, garantendo maggiore coerenza e realismo all'esperienza, aspetto particolarmente rilevante all'interno della cella virtuale. In sintesi, questi strumenti risultano fondamentali per la realizzazione di un'applicazione di realtà aumentata. Infatti, a differenza di un'applicazione di sola realtà virtuale, questo tipo di applicazioni necessitano di un processo di allineamento del sistema di riferimento del mondo reale con quello virtuale. Tale processo consente di ottenere un passaggio fluido dalla modalità AR alla modalità VR, garantendo che l'ambiente virtuale coincida perfettamente con quello

reale, indipendentemente dalla posizione iniziale dell'utente. Per raggiungere questo obiettivo, è stato necessario sperimentare e confrontare diverse soluzioni di allineamento spaziale tra i due ambienti.

Il primo approccio adottato si basava su un sistema di *raycasting* manuale, che coinvolgeva attivamente l'utente nel processo di calibrazione. L'utente, all'interno della modalità AR, effettuava un puntamento verso la parete contenente la porta della cella, scegliendo un punto situato lateralmente rispetto all'ingresso (sul lato destro o sinistro). A partire da quel punto di impatto, l'applicazione identificava il piano della parete colpita e ne calcolava le intersezioni con gli altri piani rilevati. In questo modo era possibile determinare con precisione un angolo tridimensionale dello spazio reale (parete colpita, parete adiacente, pavimento), utilizzato come riferimento geometrico stabile per l'intera scena virtuale. Questo approccio consentiva di ottenere la posizione e l'orientamento corretti del modello 3D della cella, garantendo che le superfici virtuali combaciassero con quelle fisiche. In termini tecnici, il procedimento prevedeva i seguenti passaggi:

1. Acquisizione del punto di impatto: tramite un *raycast*, si ottenevano la posizione di contatto con la parete e la direzione della normale della superficie.
2. Identificazione dell'angolo di riferimento: identificata la parete colpita dal *raycast*, venivano individuati la parete adiacente e il pavimento attraverso il sistema di classificazione fornito da AR Foundation. Calcolando l'intersezione geometrica tra questi tre piani, si otteneva l'angolo preciso della stanza in prossimità della porta.
3. Creazione dell'ancora spaziale: infine, veniva creata un'ancora (*ARAnchor*) nel punto calcolato, a cui veniva associato il modello 3D, garantendone la stabilità e la coerenza spaziale nel tempo.

Questo sistema, seppur efficace, richiedeva l'intervento diretto dell'utente. Con il rilascio delle Passthrough Camera API (aprile 2025) da parte di Meta, il processo è stato progressivamente rielaborato in un sistema più automatizzato e controllato, basato sulla cattura diretta del flusso video e sull'elaborazione delle coordinate 2D rilevate dalla fotocamera per generare ancore nello spazio 3D. Le nuove API hanno reso possibile un'analisi più dettagliata dell'ambiente e una maggiore stabilità del posizionamento, ma hanno anche evidenziato i limiti dell'integrazione con lo standard OpenXR come framework principale. Infatti, molte delle funzionalità offerte dalla Passthrough Camera API, come l'accesso diretto ai *frame* RGB o la conversione accurata da coordinate immagine a mondo reale, rientrano nelle API proprietarie di Meta e non sono completamente integrate nello standard OpenXR. Per superare tali limitazioni, è stato necessario combinare l'uso delle API OpenXR con componenti specifici del Meta XR SDK.

4.3.1 Passthrough Camera API

Le Passthrough Camera API, rilasciate nel mese di aprile del 2025 per Meta Quest 3 e 3S, integrano nuove funzionalità che si basano sulle API Camera2 di Android, consentendo un accesso diretto e a basso livello ai flussi video delle telecamere frontali. Questo consente una comprensione più profonda dell'ambiente e delle azioni dell'utente, andando oltre le funzionalità già offerte in precedenza. Come indicato nella documentazione ufficiale di Meta, le Passthrough Camera API [28] forniscono:

- un feed RGB diretto, non ostruito dalla UI.
- accesso ai metadati della camera.
- integrazione con *pipeline* ML/CV e sistemi di tracciamento avanzato.
- possibilità di trasformare coordinate immagine 2D in coordinate spaziali 3D.

Per l'implementazione pratica in Unity, sono stati utilizzati come riferimenti il *repository* ufficiale di Meta “Unity-PassthroughCameraApiSamples” [29] e il *repository* di esempio “QuestCameraKit” [30]. Il primo *repository* è necessario per l'intergrazione di queste nuove API, mentre il secondo è risultato fondamentale come esempio di implementazione del sistema di rilevamento e tracciamento di un QR code. Per comprendere il funzionamento di queste API sono di fondamentale importanza le seguenti classi fornite nel *repository* ufficiale Meta:

1. **WebCamTextureManager**: Gestisce la richiesta dei permessi necessari all'accesso della fotocamera e inizializza la texture video (**WebCamTexture**) selezionando la fotocamera destra o sinistra del visore.
2. **PassthroughCameraUtils**: Questa classe è cruciale per le operazioni di *computer vision* e l'allineamento spaziale. Il suo scopo principale è quello di fornire l'accesso ai metadati della telecamera e di gestire la conversione tra i sistemi di coordinate 2D e 3D.

La classe **PassthroughCameraUtils** espone i seguenti parametri fondamentali:

- **Parametri intrinseci**: dipendono dal modello fisico della fotocamera (lunghezza focale, punto principale, *skew*, risoluzione). Sono fondamentali per trasformare coordinate 3D del mondo in coordinate 2D dell'immagine, o viceversa. Questi parametri sono essenziali per un tracking accurato, realtà aumentata precisa e *raycasting* da coordinate schermo. In questo contesto, un metodo chiave fornito da questa classe è **ScreenPointToRayInWorld**, che verrà spiegato successivamente.

- **Parametri estrinseci:** rappresentano la posizione e l'orientamento della fotocamera nello spazio 3D del mondo. Permettono di sapere dove si trova la camera nello spazio e in quale direzione sta guardando.

La funzionalità più importante per il progetto offerta da queste API è la possibilità di trasformare oggetti rilevati nell'immagine 2D in coordinate spaziali 3D. Nel *repository* di esempio "QuestCameraKit" e nella documentazione Meta viene definito il seguente metodo: `Ray ScreenPointToRayInWorld(PassthroughCameraEye cameraEye, Vector2Int screenPoint)`. Questo metodo restituisce un raggio 3D nello spazio del mondo, che parte dall'origine della fotocamera passthrough e passa attraverso un pixel specifico dell'immagine 2D. Passando ad esempio le coordinate dello schermo del centro dell'oggetto rilevato, si ottiene un raggio 3D che punta dalla fotocamera verso l'oggetto nello spazio. Tuttavia, per determinare la posizione effettiva dell'oggetto, è necessaria anche una conoscenza della profondità dell'ambiente. Grazie al sensore di profondità integrato nel Meta Quest 3, è possibile sfruttare i componenti `ARPlaneManager` e `ARRaycastManager` di AR Foundation per determinare sia il punto di intersezione tra un raggio 3D generato e l'ambiente fisico mappato, sia la normale della superficie che ne definisce l'orientamento. Combinando queste informazioni, è possibile collocare con precisione oggetti virtuali nello spazio reale, garantendo un corretto allineamento tra il contenuto digitale e l'ambiente fisico. In particolare, l'`ARAnchorManager` consente di ancorare la stanza virtuale all'angolo della stanza reale più vicino al QR code, creando un legame persistente e stabile tra i due ambienti.

4.3.2 Gestione del rilevamento del QR code

Il QR code funge da marcatore fisico nell'ambiente reale, utile per riconoscere un punto di interesse preciso. Attraverso l'analisi dell'immagine con la libreria ZXing e l'utilizzo del `ARRaycastManager`, `ARAnchorManager` e `ARPlanManager` di AR Foundation, è possibile collocare con precisione un oggetto virtuale nello spazio reale, in modo coerente con quanto descritto nella documentazione Meta precedentemente approfondita. ZXing è una libreria open source molto diffusa, specificamente progettata per l'elaborazione di immagini di codici a barre (1D e 2D, inclusi i QR code). Originariamente implementata in Java, è stata portata su diverse piattaforme e linguaggi, tra cui C#/.NET, rendendola ideale per l'uso in Unity. Nel contesto del progetto, la libreria ZXing.NET (la versione per C#, adatta a Unity) funge da componente fondamentale per l'analisi e l'interpretazione delle immagini all'interno dello script `QrCodeDetection`. Il processo si svolge in modo sequenziale. Inizialmente, lo script ottiene un *frame* (fotogramma) corrente dal flusso video gestito da `WebCamTextureManager`. Questo frame viene passato alla libreria ZXing per l'analisi. La libreria esegue gli algoritmi di riconoscimento dei pattern per identificare la struttura del QR code all'interno dell'immagine 2D acquisita. In

caso di successo, ZXing non si limita a decodificare i dati testuali contenuti, ma restituisce anche le coordinate 2D precise dei vertici del QR code nell'immagine. Queste coordinate vengono utilizzate, come descritto in precedenza, in combinazione con i metodi di `PassthroughCameraUtils` (nello specifico `ScreenPointToRayInWorld`) per proiettare la posizione 2D del QR code nello spazio 3D reale, permettendo l'integrazione spaziale. Andando nel dettaglio del processo, la prima fase prevede la costruzione di un dizionario che mappa il contenuto testuale dei QR code (una stringa identificativa univoca) ai corrispondenti `GameObject` da attivare, che rappresentano le celle virtuali da mostrare all'utente. Successivamente, lo script si occupa della configurazione di ZXing e avvia una *coroutine* che attende che la texture video sia inizializzata. Una volta pronta, la scansione ciclica viene avviata a intervalli regolari. Il processo di scansione avviene in modo asincrono:

- Acquisisce i pixel correnti dalla webcam.
- Avvia l'operazione di riconoscimento del QR code in un *thread* separato per evitare di bloccare il *main thread* dell'applicazione, garantendo la fluidità dell'esperienza.
- Se un risultato valido viene trovato, questo viene passato al metodo di elaborazione successivo.

A questo punto si passa al metodo di elaborazione dei risultati. In primo luogo, il metodo verifica che il contenuto del QR code sia presente tra le chiavi note del dizionario. In seguito esegue un controllo aggiuntivo per verificare se il QR code sia centrato all'interno di un'area guida visiva predefinita sullo schermo (Figura 4.4). Questo controllo è cruciale per garantire che l'utente si posizioni correttamente rispetto al QR code fisico, migliorando l'accuratezza del rilevamento. Se il QR non è centrato nella guida, il timer di stabilizzazione viene resettato e il processo ricomincia. Ottenuta la coordinata 2D, questa deve essere convertita nel sistema di coordinate schermo di Unity. Questa trasformazione è necessaria perché le coordinate restituite dalla libreria ZXing non sono direttamente utilizzabili per un *raycast* nello spazio AR, mentre i metodi di *raycasting* di AR Foundation richiedono coordinate schermo Unity standard. Per determinare la posizione effettiva del QR code nello spazio 3D, è fondamentale combinare le informazioni 2D con i dati di profondità dell'ambiente (ottenuti dal sensore integrato). Questo viene realizzato utilizzando l'`ARRaycastManager` di AR Foundation, il quale interseca il raggio 3D generato dalle coordinate trasformate con i piani tracciati dall'ambiente, restituendo il punto di impatto e la normale della superficie. La determinazione della posizione finale applica lo stesso principio geometrico descritto in precedenza per la prima versione con il *raycasting* manuale: identifica il pavimento, la parete colpita dal *raycast* e una seconda parete perpendicolare, calcolandone l'intersezione esatta. Questo punto rappresenta l'angolo della stanza reale dove deve essere ancorata la

stanza virtuale, garantendo un allineamento geometricamente corretto. Il codice implementa inoltre un meccanismo di stabilizzazione per aumentare l'affidabilità del rilevamento. Quando un QR code valido viene rilevato e posizionato correttamente all'interno della guida, un timer inizia a incrementarsi. Il QR deve essere tracciato continuamente per almeno 5 secondi senza interruzioni. Durante questo periodo, una barra di progresso visuale riempie proporzionalmente, fornendo all'utente un feedback visivo del progresso. Se il QR viene perso per più di 0.3 secondi, il timer di stabilizzazione viene resettato e il processo ricomincia da zero. Questo meccanismo previene falsi positivi dovuti a rilevamenti occasionali o instabili. Una volta raggiunto il tempo di stabilità richiesto, viene avviata una *coroutine* che introduce un ulteriore ritardo di 5 secondi, durante il quale l'utente rimane fermo per permettere una stabilizzazione finale. Trascorso questo tempo, viene invocato il metodo asincrono di creazione dell'ancora, che utilizza i componenti di AR Foundation per creare un'ancora AR nella posizione calcolata. L'ancora fissa la stanza virtuale in modo persistente nello spazio reale: anche se l'utente si muove o l'applicazione viene messa in pausa, l'ancora rimane ancorata alla medesima posizione del mondo reale, garantendo coerenza e continuità dell'esperienza.



Figura 4.4: Quadrato guida per corretta scansione QR code

4.3.3 Problematiche riscontrate

L'implementazione del sistema di allineamento tra ambiente reale e virtuale ha evidenziato diverse sfide tecniche, legate da un lato all'hardware e al software della Meta Quest 3 e all'uso delle nuove Passthrough Camera API, come già evidenziato, e dall'altro alla natura dell'ambiente stesso. La prima problematica riguarda il riconoscimento dello spazio da parte del dispositivo attraverso AR Foundation. Il sistema si basa sulla Scene Model memorizzata durante la fase di *Space Setup*, tuttavia, nonostante la *Scene Model* sia per sua natura fissa, l'algoritmo che gestisce i piani rilevati presenta fenomeni di instabilità: il sistema tende a generare piccoli spostamenti (*jitter*) nelle coordinate dei piani oppure a creare istanze duplicate di superfici già identificate. Questi artefatti, sebbene apparentemente minori, si accumulano durante l'esecuzione dell'applicazione e possono compromettere la precisione dell'allineamento spaziale. Ulteriormente critica è la questione della geometria ripetitiva dell'ambiente. La struttura architettonica del braccio tedesco, caratterizzata da celle disposte in modo regolare e sistematico, presenta una simmetria e una ripetitività che confondono gli algoritmi di *feature detection* e *plane detection* del visore. In questo contesto, l'instabilità intrinseca dell'*ARPlaneManager* è amplificata: il sistema ha maggiore difficoltà nel distinguere tra piani simili di celle diverse, generando confusione nella mappatura spaziale. Affinché l'applicazione riconosca correttamente quale cella deve essere tracciata, è stato necessario implementare un vincolo operativo: il visore deve essere posizionato all'altezza esatta della cella di interesse. Se l'utente accede al visore in una posizione verticale errata, il sistema confonde le coordinate spaziali e traccia celle adiacenti o sbagliate invece di quella prevista. Questo vincolo, sebbene risolvibile mediante istruzioni chiare all'utente, riduce la flessibilità e l'usabilità dell'applicazione, poiché introduce un prerequisito fisico rigido per il corretto funzionamento del tracciamento e della corretta identificazione della cella.

La seconda problematica emerge dall'architettura stessa dell'applicazione sviluppata. L'utente rimane sempre in AR, ma all'interno di uno spazio virtuale (VR) ancorato alla realtà fisica attraverso la *spatial anchor* calcolata inizialmente. Questo approccio comporta un costo computazionale significativo: il sistema deve continuamente aggiornare e ricalcolare la posizione e l'orientamento dell'ancora spaziale man mano che l'utente si muove, garantendo che gli oggetti virtuali rimangano vincolati alla posizione corretta nello spazio fisico. Tuttavia, questo tracciamento continuo dell'ancora è fondamentale per il corretto funzionamento del portale virtuale e abilita dinamiche interattive essenziali: consente all'applicazione di creare momenti in cui il portale si apre e fa trasparire lo spazio reale, creando una transizione fluida tra il mondo virtuale e quello fisico. Per mitigare l'impatto sulle prestazioni, è stato necessario implementare un sistema di gestione dinamica del *feed* della camera: durante la modalità VR (quando il *passthrough* non è necessario), il *feed*

video viene disabilitato per liberare risorse computazionali e migliorare il *frame rate*. Nonostante questa ottimizzazione, si osserva comunque una riduzione dei *FPS* durante la modalità VR dovuta al continuo ricalcolo della posizione dell'ancora. Questo fenomeno è particolarmente evidente quando l'utente si muove rapidamente nello spazio, generando un carico aggiuntivo sugli algoritmi di *positional tracking* che deve compensare i cambiamenti di posizione in tempo reale. Tuttavia, questa riduzione prestazionale rimane contenuta e non compromette significativamente l'esperienza immersiva complessiva, poiché il *frame rate* si mantiene a livelli sufficientemente fluidi per garantire una percezione naturale dell'ambiente virtuale. Infine, altre problematiche riguardano il corretto tracciamento della posizione del QR code. L'integrazione tra le Passthrough Camera API e lo standard OpenXR non fornisce un tracciamento preciso del marcatore QR. Tuttavia, è stato possibile superare questa limitazione grazie al sistema di allineamento descritto precedentemente: piuttosto che affidare il posizionamento dell'ancora esclusivamente alla rilevazione del QR, il sistema combina il tracciamento del marcatore con il *raycast* sul piano della parete, ricavando da questa intersezione l'angolo preciso della stanza mediante il calcolo dell'intersezione tra i piani vicini (parete, parete adiacente e pavimento). In questo modo, anche se il tracciamento del QR presenta instabilità, la geometria dei piani tracciati fornisce un ancoraggio geometrico stabile. L'utilizzo di un QR code di dimensioni contenute garantisce inoltre che l'utente si posiziona a una distanza ravvicinata dal piano e con l'orientamento corretto rispetto ad esso, migliorando la coerenza dei dati acquisiti. Infine, il meccanismo di stabilizzazione temporale, che richiede una tracciatura continua per almeno 5 secondi prima della creazione dell'ancora, filtra i falsi positivi causati da rilevamenti occasionali, permettendo al sistema di garantire una configurazione stabile e affidabile.

4.4 Implementazione TestimonyState

Una volta implementata la logica di base per l'allineamento spaziale e il corretto funzionamento del portale virtuale, è stato possibile passare alla realizzazione del nucleo narrativo e interattivo dell'esperienza, ovvero lo stato **TestimonyState**. In questa fase sono stati considerati in modo congiunto diversi aspetti di design: il design dell'interazione, il design dell'ambientazione tramite la modellazione 3D e il design della narrazione, strettamente intrecciato con il sistema di animazioni. La logica principale di gestione di questo stato è affidata allo script **TimelinesManager**. Dal punto di vista dell'interazione, si è scelto di adottare una meccanica semplice ma significativa: il posizionamento di una fotografia in punti specifici della cella mediante l'uso di **XRSocketInteractor**, fornito dallo *XR Interaction Toolkit* di Unity. A ogni *socket* corrisponde una Timeline di Unity, che coordina una serie di azioni svolte dal sistema (segnali, audio e animazioni) mostrate all'utente. L'utilizzo

del sistema Timeline risulta particolarmente adatto a supportare la narrazione, poiché il relativo pannello di editing, simile a un editor video a clip e tracce, permette un controllo preciso sulla sequenza e sulla durata di ogni evento. L'interfaccia utente è stata progettata per essere il meno invasiva possibile, pur fornendo un orientamento chiaro. Quando l'utente afferra la fotografia, compare per circa 8 secondi un piccolo riquadro accanto ad essa con l'indicazione: «Cerca e portami verso uno spiraglio di luce sulle pareti» (Figura 4.5).

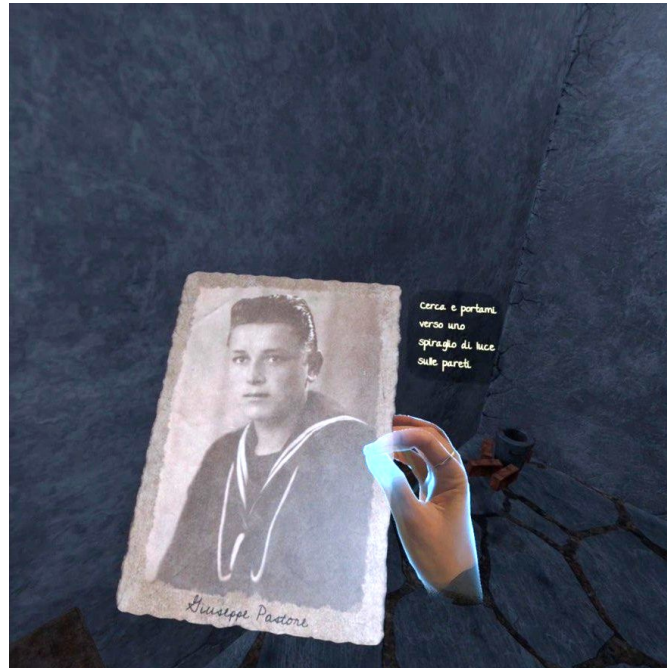


Figura 4.5: Foto e suggerimento

Il *socket* corrispondente è segnalato da una sottile crepa luminosa sulla parete, che richiama visivamente il suggerimento testuale. Alcuni utenti hanno sperimentato un leggero spaesamento rispetto all'azione da compiere, ma una volta compresa la meccanica il compito è stato percepito come semplice e gratificante, senza generare frustrazione: lo sforzo iniziale è stato compensato dalla sensazione di ricompensa e di scoperta. Nel momento in cui l'utente cerca e posiziona la foto, il suo ruolo è attivo. Una volta agganciata la foto al *socket* e avviata la Timeline associata, l'esperienza diventa invece più passiva, consentendo all'utente di concentrarsi sull'ascolto della testimonianza e sulla dimensione emotiva del racconto. Dopo che l'utente ha interagito con tutti i *socket* presenti nella stanza, lo stato **TestimonyState** si conclude e il sistema ritorna a **SetRoomState** se sono ancora disponibili altre stanze da esplorare; in caso contrario, passa allo stato **OutroState**. Questa organizzazione a stati favorisce un approccio modulare e facilmente estendibile all'esperienza. Per

quanto riguarda la modellazione e le animazioni, in una fase preliminare è stata realizzata una fotogrammetria dell'ambiente reale, con l'obiettivo di ottenere un modello digitale in scala della cella. A partire da questo modello ad alta complessità, si è costruito un modello con una geometria più semplice adatta alla fruizione in VR. Le texture sono state realizzate attraverso Substance Painter, facendo riferimento ai dati storici forniti dal museo, così da ricostruire l'aspetto della cella e degli oggetti significativi (Figura 4.6). Per scelta progettuale non si è puntato a un'iper-realisticità dell'intero ambiente (ad esempio evitando di applicare la fotogrammetria a ogni singolo oggetto), per non distogliere l'attenzione dell'utente dal contenuto narrativo e per evitare di snaturare il messaggio dell'esperienza.

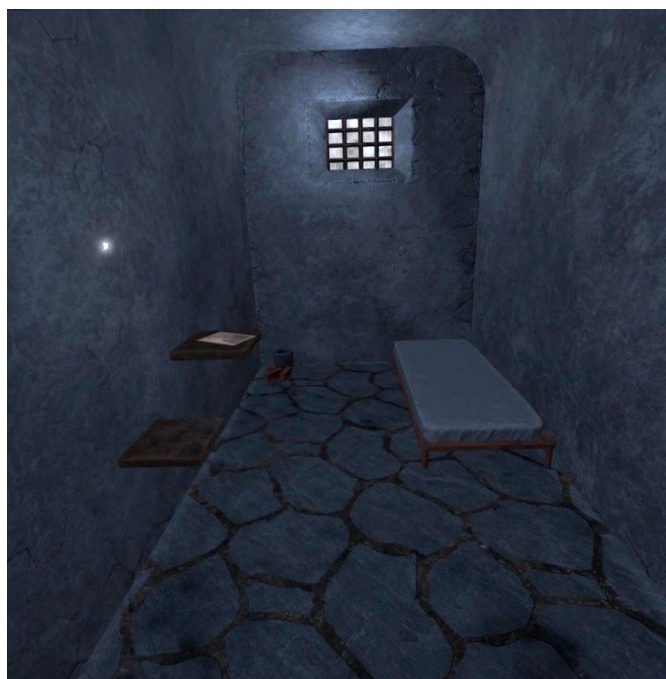


Figura 4.6: Cella virtuale

La fotogrammetria e l'utilizzo di texture basate su foto sono stati impiegati in modo mirato per alcuni elementi chiave, come un oggetto appartenente a un testimone (Figura 4.7), e le fotografie reali delle persone coinvolte. In questo modo si mantiene un forte legame con la storia e si rafforza la vicinanza emotiva con i protagonisti. Per quanto riguarda le animazioni, le quali sono strettamente legate alle scelte narrative, è stato utilizzato Blender il quale fornisce lo strumento Grease Pencil per creare animazioni 2D disegnate a mano. Per integrare queste animazioni in Unity è stato usato il componente *Decals* di Unity. A livello pratico, è stata creata una texture in formato *spritesheet*, in cui ogni riquadro rappresenta un *frame* dell'animazione. Tramite uno *shader* e uno *script* dedicati, il *decal*

viene animato proiettando in sequenza questi frame sulla superficie 3D, soluzione particolarmente adatta per la resa di murales animati. Anche in questo caso è stata privilegiata un'estetica semplice e non iperrealistica, in continuità con il resto dell'ambiente (Figure 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12). Questa tecnica è stata utilizzata anche per la creazione dell'animazione principale che viene fatta partire quando viene collocata la foto nel *socket*, ossia un crepa luminosa nella parete che si espande. In questo modo l'elemento architettonico nato per separare e isolare diventa, nello spazio virtuale, un canale attraverso cui la testimonianza attraversa il tempo e si mostra sotto forma di disegni animati. Durante ogni frammento di testimonianza sono stati inseriti delle dissolvenze a nero che mostrano animazioni di oggetti: un camion, un lampione, una lampadina, la stessa cella (Figure 4.14, 4.13, 4.15). Queste animazioni sono state realizzate direttamente in Unity con lo scopo di rappresentare aspetti esterni alla dimensione della cella, creando così una dimensione narrativa che trascende lo spazio confinato del prigioniero. Un momento particolarmente significativo avviene quando la porta della cella si apre e lo spazio reale viene rivelato attraverso una transizione alla dimensione AR. In questo istante, un soldato virtuale appare nello spazio reale, creando un ponte emotivo tra la memoria rappresentata e la presente contemporanea dell'utente (Figura 4.16). Un ulteriore elemento di questo tipo si presenta nell'*OutroState*, dove la dimensione AR ricompare con l'animazione di un oggetto 3D: una bottiglia di vetro che rotola verso l'utente e che rivela una lettera (Figura 4.17). In questo segmento, una dissolvenza a bianco crea una contrapposizione cromatica rispetto alla dimensione più scura della cella, conducendo l'utente verso il testo della lettera del fondatore del museo (Figura 4.18). Questo messaggio conclusivo invita a essere cittadini attivi e consapevoli, trasformando l'esperienza immersiva in un appello consapevole alla responsabilità storica e civile.



Figura 4.7: Scatoletta di Giuseppe realizzata con fotogrammetria



Figura 4.8: Animazione nomi campi di concentramento e simboli



Figura 4.9: Animazione bandiera italiana



Figura 4.10: Animazione mani

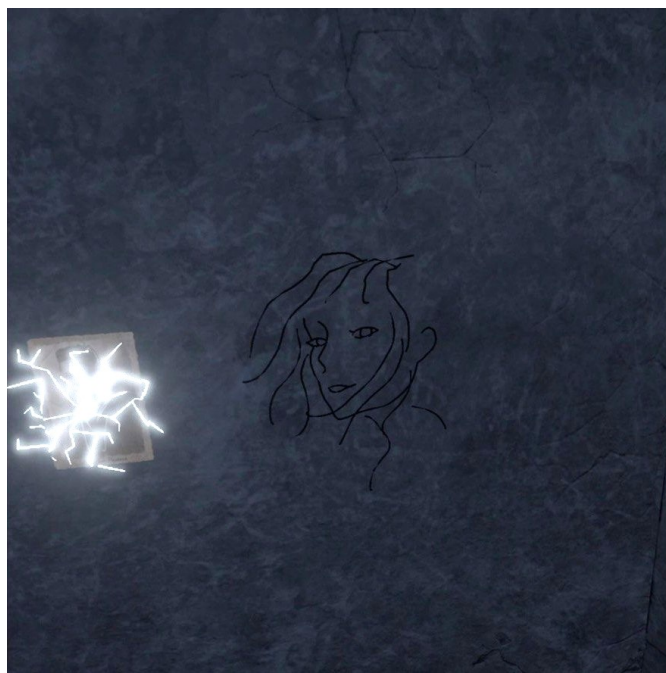


Figura 4.11: Animazione volto femminile



Figura 4.12: Animazione volto maschile

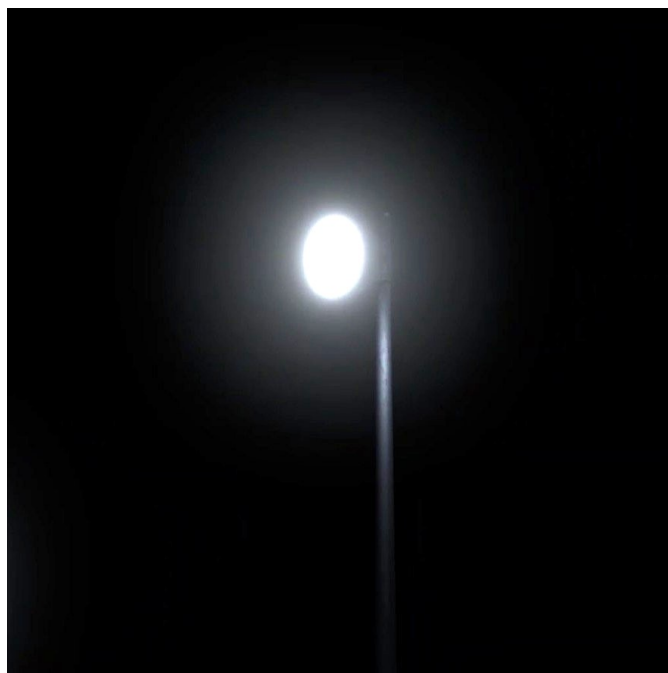


Figura 4.13: Animazione lampione



Figura 4.14: Animazione camion

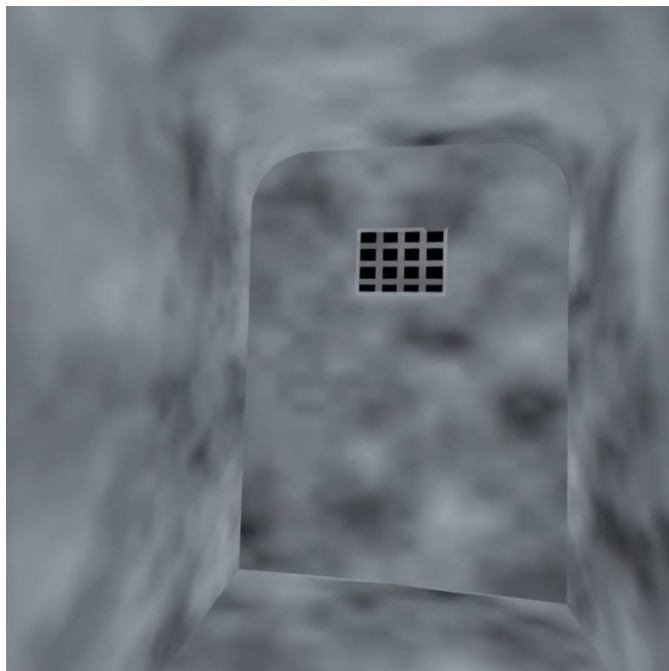


Figura 4.15: Animazione cella

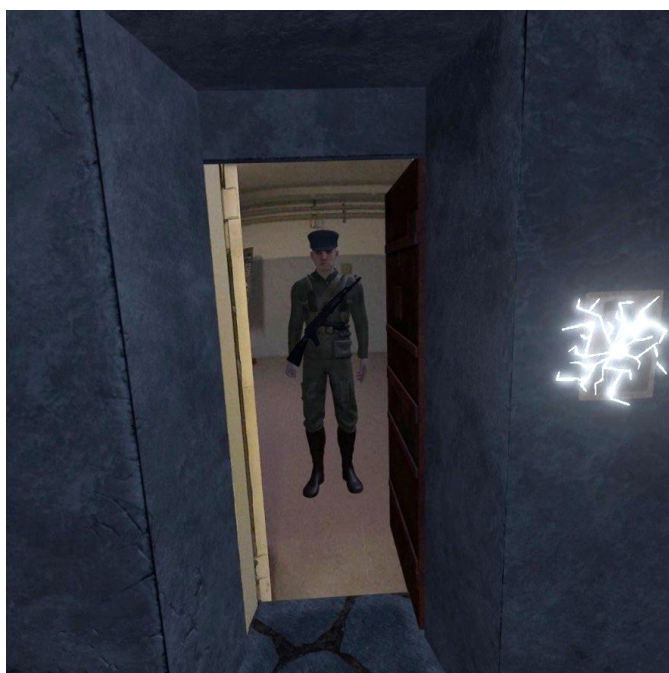


Figura 4.16: Animazione soldato

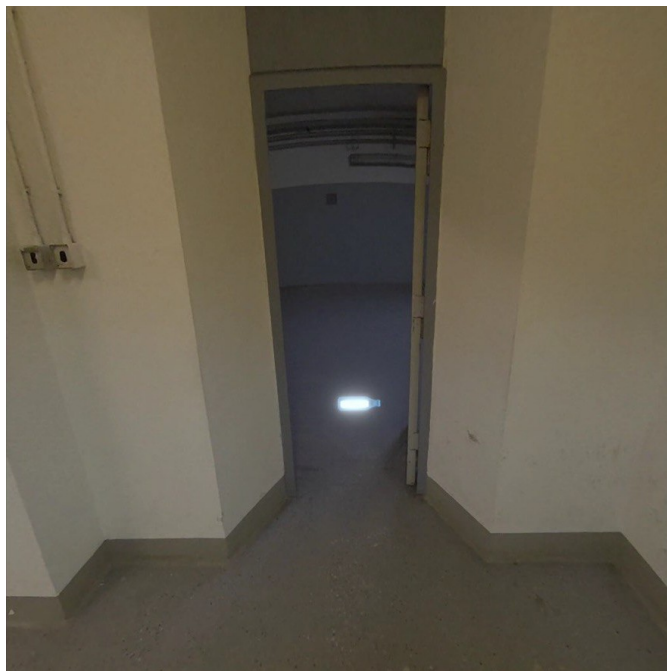


Figura 4.17: Animazione bottiglia

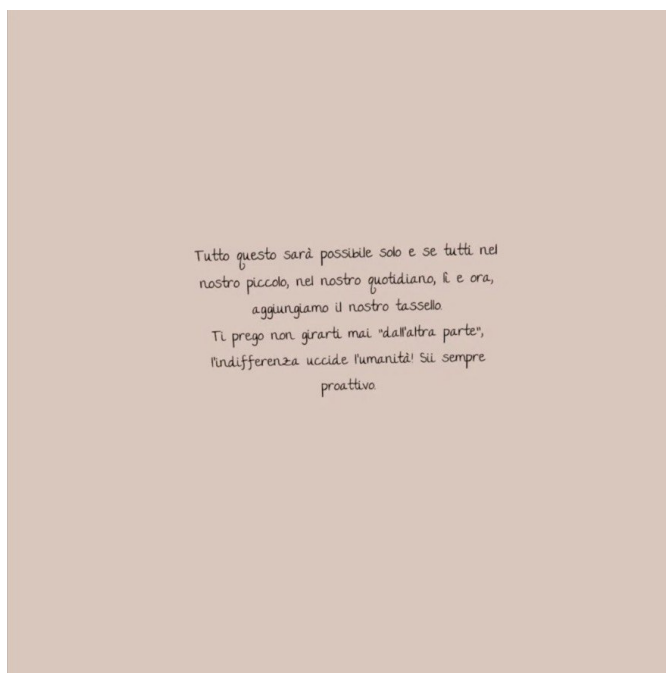


Figura 4.18: Animazione testo

Capitolo 5

Valutazione dell'esperienza

L'analisi si concentra sul confronto tra due modalità di visita: la visita guidata tradizionale e quella in realtà aumentata, indicate d'ora in poi come *visita guidata* e *visita AR*. I partecipanti sono stati suddivisi in due gruppi distinti in base all'ordine di fruizione: un gruppo ha svolto per prima la visita AR e successivamente quella guidata, mentre l'altro gruppo ha seguito l'ordine inverso. Questa scelta consente di indagare anche l'eventuale effetto dell'ordine di visita sulle percezioni e sulle valutazioni complessive dell'esperienza. Per ciascuna delle due modalità, i partecipanti hanno compilato i medesimi questionari adattati alla visita, ad eccezione di uno dedicato esclusivamente alla visita AR. Gli strumenti impiegati nello studio sono allineati a quelli adottati in sperimentazioni analoghe [31] e sono i seguenti:

- Questionario socio-tecnico, basato sul modello presentato al termine del Capitolo 2 [22]
- IMI (*Intrinsic Motivation Inventory*) [32]
- PARQ (*Presence and Augmented Reality Questionnaire*) [33] : utilizzato solo per la visita AR
- UES (*User Engagement Scale*) [34]
- NPS (*Net Promoter Score*) [35]
- PMM (*Personal Meaning Mapping*) [24]

Questi questionari hanno permesso di ottenere sia dati quantitativi di confronto tra le due modalità di visita, sia approfondimenti qualitativi sulle percezioni individuali. Il campione complessivo è costituito da 28 persone con le seguenti caratteristiche demografiche: il 62,1% ha un'età compresa tra i 18 e i 29 anni, il 27,6% tra i 30

e i 59 anni, mentre il 10,1% ha un'età pari o superiore ai 60 anni. Il 58,6% del campione è composto da donne e il 41,4% da uomini. Un aspetto significativo per caratterizzare preliminarmente il campione è rappresentato dalla familiarità con le tecnologie. Il 55,2% dei partecipanti dichiara una bassa familiarità con i videogiochi e il 72,4% una bassa familiarità con le tecnologie immersive. Al contrario, la familiarità media con smartphone e computer risulta elevata: con una scala Likert a 5 punti, il punteggio medio è pari a 4,31 per gli smartphone e 4,17 per i PC, mentre per i videogiochi e le tecnologie immersive i valori medi risultano più bassi, pari rispettivamente a 2,59 e 1,97. Rispetto all'ordine di visita, 15 partecipanti hanno svolto per prima la visita AR, mentre i restanti 13 hanno iniziato con la visita guidata.

5.1 Visita guidata

Prima di entrare nel dettaglio dell'analisi della valutazione dell'esperienza, è importante illustrare come è stata definita la visita guidata. Poiché il progetto si è concentrato solo su uno dei temi trattati durante la visita tradizionale proposta dal museo, quest'ultima è stata riadattata in modo da affrontare gli stessi contenuti presenti nella visita AR, così da favorire un confronto più efficace tra i due tipi di visita. Il testo di riferimento utilizzato durante la visita è stato visionato e approvato dal direttore del museo, al fine di garantirne la massima fedeltà storica ed efficacia comunicativa. Un ulteriore aspetto da sottolineare è che, durante la fase di valutazione dell'esperienza, il museo era interessato da lavori edili che hanno comportato lo sgombero di parte dell'allestimento. Questo elemento differenzia parzialmente la visita guidata oggetto di studio dalla visita tradizionale tipica proposta dal museo, infatti, pone l'allestimento in secondo piano rispetto alla narrazione della guida, che costituisce il fulcro principale dell'esperienza. La visita guidata ha una durata di circa 15–20 minuti e, rispetto alla visita AR, presenta in modo più marcato alcuni elementi storici specifici, quali date e riferimenti espliciti a eventi significativi del periodo della Seconda guerra mondiale. Il percorso comprende sia la narrazione dei due testimoni, sia la lettura di una delle lettere dei condannati a morte. Nella parte conclusiva, invece di utilizzare la stessa citazione del fondatore del museo presente nella visita AR, è stata inserita la citazione al discorso sulla costituzione di Calamandrei [36], scelta in quanto affine nel messaggio e nei contenuti, nonché più coerente con la struttura complessiva della visita guidata.

5.2 Metodo di analisi

L'analisi quantitativa è stata condotta sui punteggi medi dei vari fattori emersi dai questionari somministrati ai partecipanti al termine di ciascuna esperienza di

visita: la visita AR (AR) e la visita guidata tradizionale (G). Ogni partecipante è stato classificato in uno dei due gruppi distinti sulla base dell'ordine con cui ha completato le due visite: gruppo "AR prima" ($n=15$) e gruppo "Guidata prima" ($n=13$). Per ogni fattore di ciascun questionario è stata eseguita un'analisi della varianza (ANOVA) a misure ripetute. A seconda del questionario, è stata impiegata un'ANOVA a due fattori (*Two-Way*), per i questionari somministrati in entrambe le condizioni, o a un fattore (*One-Way*), per il PARQ, esclusivo della visita AR, con il seguente disegno:

- Fattore *within-subject*: **Tipo di Visita** (AR vs G), che mostra l'effetto della modalità di visita sul fattore considerato.
- Fattore *between-subject*: **Ordine** (AR prima vs Guidata prima), che mostra le differenze tra i due gruppi.
- Interazione: **Tipo di Visita** \times **Ordine**, che testa se l'effetto della modalità di visita varia in funzione dell'ordine di somministrazione.

Per l'interpretazione dei risultati dell'ANOVA, sono stati considerati tre indicatori statistici:

- **F-statistic**: rappresenta il rapporto tra la varianza tra i gruppi e la varianza entro i gruppi. Valori più elevati indicano differenze più marcate tra le condizioni.
- **p-value**: indica la probabilità che le differenze osservate siano dovute al caso. Valori $p < 0.05$ indicano differenze statisticamente significative (livello di confidenza del 95%).
- **Eta-squared** (η^2): misura la dimensione dell'effetto (*effect size*), ovvero la proporzione di varianza spiegata dal fattore considerato. Si considera effetto piccolo ($\eta^2 \approx 0.01$), medio ($\eta^2 \approx 0.06$) o grande ($\eta^2 \geq 0.14$).

Questo disegno di analisi consente di testare contemporaneamente tre aspetti: l'effetto principale della modalità di visita (quale tra AR e visita guidata genera valutazioni più elevate), l'effetto dell'ordine di visita (se il fatto di eseguire prima una modalità influenza le valutazioni complessive), e l'interazione tra i due effetti (se la preferenza per una modalità cambia a seconda dell'ordine). Al fine di approfondire le differenze specifiche tra le due condizioni di visita all'interno di ciascun gruppo, sono stati inoltre condotti t-test appaiati (*paired*) per confrontare direttamente i punteggi AR e G per ogni gruppo separatamente. Questo approccio consente di identificare quale modalità riceve valutazioni significativamente più alte all'interno di ciascun ordine di somministrazione. Al fine di esplorare le relazioni tra i diversi fattori dell'esperienza e identificare i principali predittori degli

outcome comportamentali (soddisfazione, NPS, intenzione di ritorno), sono state condotte analisi di correlazione e regressioni lineari multiple. Data la dimensione campionaria limitata ($n=28$), tali analisi hanno carattere esplorativo e i risultati vanno interpretati come preliminari, richiedendo conferma in studi successivi con un campione maggiore. Per completare e integrare i dati quantitativi con una prospettiva qualitativa, è stato inoltre impiegato il *Personal Meaning Mapping* (PMM). Questo metodo prevede che i partecipanti compilino una mappa concettuale dopo ciascuna esperienza utilizzando due colori diversi, nella quale rappresentano le idee, le emozioni e i significati personali associati a quella specifica visita. Quando si compila la mappa per la seconda volta, dopo la seconda visita, è possibile modificare i contenuti già presenti e stabilire nuovi collegamenti, così da ottenere una mappa integrata unica (vd. Sezione 5.5). Al termine della raccolta dei dati, la mappa è stata discussa in brevi interviste individuali, al fine di analizzarla riducendo il rischio di libere interpretazioni da parte del ricercatore.

5.3 Risultati ANOVA e t-test per ciascun questionario

5.3.1 Questionario socio-tecnico

Il questionario socio-tecnico è stato costruito a partire dal modello proposto da Chen et al. [22], che analizza le ragioni per cui le persone utilizzano la Realtà Aumentata nei musei del patrimonio culturale in una prospettiva socio-tecnica. In questo modello la soddisfazione ricopre un ruolo centrale all'interno di una catena causale che collega i fattori antecedenti alle intenzioni comportamentali future. Il modello teorico di riferimento può essere rappresentato come segue:

Fattori antecedenti (predittori) → Soddisfazione (mediatore parziale) → Intenzioni comportamentali (outcome)

In questa prospettiva, la soddisfazione non è solo un esito finale dell'esperienza, ma funge da mediatore parziale tra le caratteristiche dell'esperienza AR e i benefici comportamentali post-uso: rappresenta un anello intermedio e processuale tra singoli fattori di varia natura e le intenzioni successive. Lo studio di Chen et al. [22] mostra infatti che la soddisfazione predice positivamente sia l'intenzione di riutilizzare l'AR sia l'intenzione di rivisitare il museo, confermandone il ruolo cruciale nella valutazione complessiva dell'esperienza, questa analisi applicata al caso studio del Museo Carcere Le Nuove verrà approfondita successivamente. L'analisi comparativa iniziale comprende sei fattori definiti nel modello originario [22]:

- Novità (NOV)
- Estetica (AES)
- Educazione (EDU)
- Autenticità (AUT)
- Soddisfazione (SAT)
- Desiderio di ritornare (DRI)

Ciascun fattore è stato misurato mediante gli *item* originali proposti nel modello di Chen et al. [22], tradotti in italiano, utilizzando una scala Likert a 5 punti.

La Tabella 5.1 presenta i risultati dell'analisi della varianza *Two-Way* (ANOVA) e dei test t-test *paired*, focalizzandosi esclusivamente sui fattori che hanno raggiunto la significatività statistica ($p < 0.05$).

Tabella 5.1: Risultati ANOVA Two-Way e T-test del questionario Socio-tecnico

Fattore	Fonte	F	p	η^2	Gruppo
NOV	Tipo Visita	7.31	0.012	0.220	Guidata Prima
AES	Tipo Visita	27.97	<0.001	0.518	Entrambi*
EDU	Gruppo	5.17	0.031	0.166	—
	Interazione	11.58	0.002	0.308	—
AUT	Tipo Visita	13.82	0.001	0.347	Guidata Prima
	Interazione	7.81	0.010	0.231	—
SAT	Tipo Visita	6.41	0.018	0.198	Nessuno**
DRI	Tipo Visita	10.80	0.003	0.293	Guidata Prima

Nota: Colonna *Gruppo* indica dove il t-test è significativo: * entrambi i gruppi significativi, ** nessun gruppo mostra differenze significative

I risultati indicano che il *Tipo di Visita* è il fattore più influente, determinando differenze significative in cinque fattori su sei: Novità (NOV), Estetica (AES), Autenticità (AUT), Soddisfazione (SAT) e Desiderio di ritornare (DRI). L'Educazione (EDU) rappresenta un caso particolare, poiché mostra un effetto principale del *Gruppo* e soprattutto un'interazione significativa tra il *Tipo di Visita* e l'*Ordine*, suggerendo che il valore educativo percepito dipende dalla sequenza con cui le due esperienze sono state vissute.

Il gruppo che ha iniziato con la visita guidata (*Guidata Prima*) mostra differenze più marcate tra le due modalità rispetto al gruppo che ha iniziato con l'AR.

L'*effect size* (η^2) rivela che l'Estetica (AES) è il principale discriminante tra le due

modalità ($\eta^2 = 0.518$), spiegando circa il 52% della varianza totale. Questo suggerisce che le differenze visive e estetiche tra l'esperienza mediata dalla tecnologia AR e la guida umana tradizionale costituiscono il contrasto percettivo più rilevante per i partecipanti.

La Tabella 5.2 sintetizza i risultati chiave per ogni fattore, fornendo un'interpretazione qualitativa dei dati statistici.

Tabella 5.2: Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattore del questionario Socio-tecnico

Fattore	Risultato interpretativo
NOV	L'AR è percepita come più nuova quando contrapposta alla visita tradizionale (soprattutto nel gruppo guidata-prima).
AES	Massimo discriminante ($\eta^2=0.518$). L'esperienza estetica differisce marcatamente tra le due modalità. L'effetto di contrasto è più pronunciato nel gruppo guidata-prima.
EDU	Unico fattore con interazione significativa. Il valore educativo dipende dalla sequenza: chi vede prima la tradizionale percepisce l'AR come più educativa.
AUT	Visia AR percepita come meno autentica quando contrapposta direttamente alla guida umana, ma ugualmente autentica come primo contatto. L'ordine modula l'autenticità percepita.
SAT	Entrambe le modalità generano soddisfazione equivalente. Le esperienze sono complementari, non competitive.
DRI	Il tipo di visita stimola il desiderio di ritornare, soprattutto nel gruppo guidata-prima. L'ordine di presentazione delle due modalità influenza l'intensità della motivazione.

La Figura 5.1 visualizza l'andamento dei punteggi medi per ciascun fattore, stratificati per *Tipo di Visita* e *Gruppo*. I grafici rivelano visivamente i *pattern* emersi dall'ANOVA:

- **NOV, AES, AUT, DRI:** mostrano un chiaro *effetto di contrasto sequenziale*. Nel gruppo *Visita Guidata prima* (linea verde), i punteggi registrano una diminuzione più pronunciata passando dalla visita AR alla visita guidata, indicando un percepito differenziale marcato tra le due modalità. Al contrario, nel gruppo *Visita AR Prima* (linea arancione), le curve risultano più piatte, suggerendo una percezione più omogenea delle due esperienze.
- **EDU:** presenta un *pattern* distintivo con un'interazione evidente. I due gruppi mostrano traiettorie divergenti, il gruppo che ha iniziato con la visita guidata percepisce l'AR come significativamente più educativa, mentre l'altro gruppo

non rileva differenze sostanziali. Questo conferma il ruolo cruciale dell'ordine di presentazione nel mediare il valore educativo percepito.

- **SAT:** evidenzia l'equivalenza di soddisfazione tra le due modalità, con i due gruppi che mantengono livelli di gradimento simili indipendentemente dal tipo di visita. Le curve quasi parallele indicano che entrambe le esperienze generano soddisfazione comparabile.

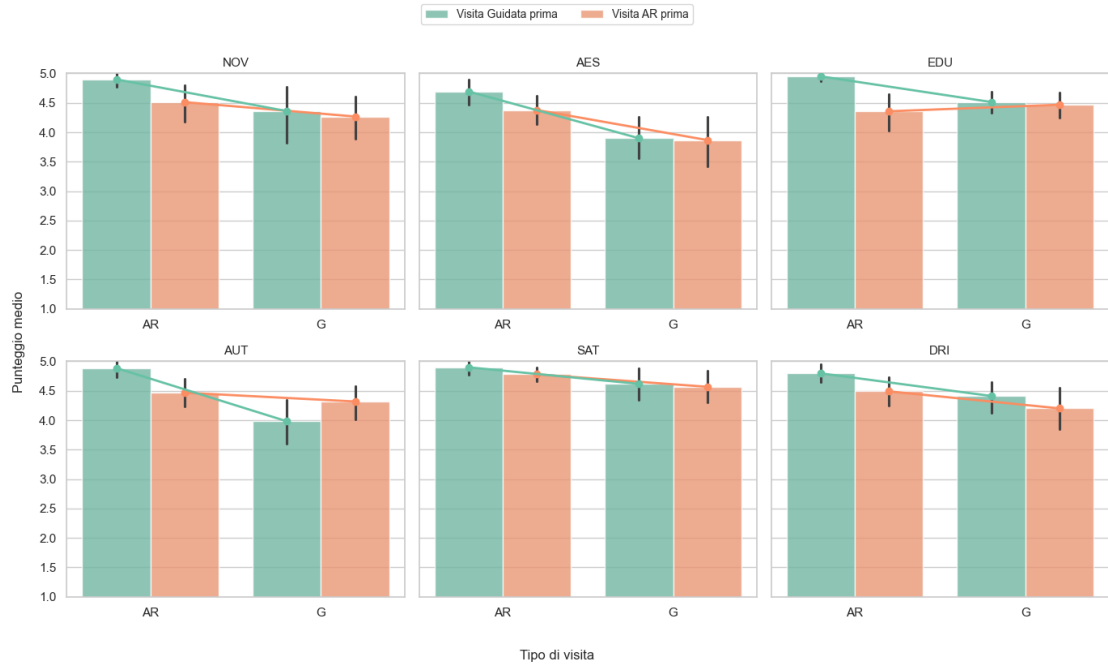


Figura 5.1: Profili fattori questionario socio-tecnico

5.3.2 Net Promoter Score (NPS)

Il *Net Promoter Score* (NPS) rappresenta un indicatore sintetico ampiamente adottato nell'ambito della *customer experience* per quantificare la propensione dei clienti a raccomandare un servizio o un'esperienza con una scala da 0 a 10. Sebbene originariamente concepito come misura di fedeltà e raccomandazione [35], la letteratura scientifica ha progressivamente validato l'NPS quale strumento significativo per valutare la soddisfazione complessiva dell'utente. In particolare, Srirahayu et al. [37] hanno empiricamente dimostrato l'esistenza di una relazione significativa tra soddisfazione e NPS, mediata dal costrutto di fedeltà, evidenziando come gli utenti caratterizzati da livelli superiori di soddisfazione tendono a manifestare valori di NPS più elevati. Sulla base di tali evidenze, l'NPS è stato selezionato nel presente

studio come outcome, poiché consente di individuare efficacemente tanto la soddisfazione complessiva rispetto all'esperienza quanto la lealtà e la propensione del visitatore al ritorno futuro. Inoltre è stato analizzato secondo metodologia ANOVA Two-Way e t-test paired precedentemente descritta. La Tabella 5.3 presenta i risultati dell'analisi della varianza Two-Way e dei test t-test paired per l'NPS.

Il *Tipo di Visita* risulta il fattore determinante ($F=7.79$, $p=0.010$, $\eta^2=0.231$), mentre l'effetto principale del *Gruppo* si avvicina al margine di significatività ($F=3.27$, $p=0.082$), indicando un'influenza marginale dell'ordine di visita sulla raccomandabilità complessiva.

La Tabella 5.4 fornisce un'interpretazione qualitativa dei risultati NPS.

Il gruppo che ha iniziato con la visita guidata manifesta una differenza significativa nella propensione a raccomandare le due modalità ($t=2.42$, $p=0.032$), suggerendo che l'AR ottiene una valutazione comparativa più favorevole quando contrapposta direttamente all'esperienza guidata. Al contrario, nel gruppo che ha iniziato con l'AR, la propensione a raccomandare risulta meno differenziata, indicando una percezione più omogenea tra le due modalità nel primo contatto. Ad ogni modo entrambe le esperienze sono fortemente raccomandate registrando una media di punteggio di 9.4 per la visita AR e 8.8 per la visita Guidata. Questi risultati preliminari sull'NPS costituiscono la base per le successive analisi di mediazione e regressione, nelle quali l'NPS verrà valutato come potenziale outcome influenzato dai sei fattori socio-tecnici e come mediatore di effetti comportamentali più ampi.

Tabella 5.3: Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Net Promoter Score (NPS)

Fattore	Fonte	F	p	η^2	Gruppo
NPS	Tipo Visita	7.79	0.010*	0.231	Guidata Prima
	Gruppo	3.27	0.082	0.112	—

Nota: Colonna *Gruppo* indica dove il t-test è significativo

Tabella 5.4: Sintesi Interpretativa del Net Promoter Score (NPS)

Fattore	Risultato Interpretativo
NPS	Il tipo di visita influenza significativamente la propensione dei partecipanti a raccomandare l'esperienza. L'AR ottiene una migliore <i>raccomandabilità</i> quando contrapposta direttamente all'esperienza guidata, mentre la sua raccomandazione è meno enfatizzata quando è il primo contatto con il museo.

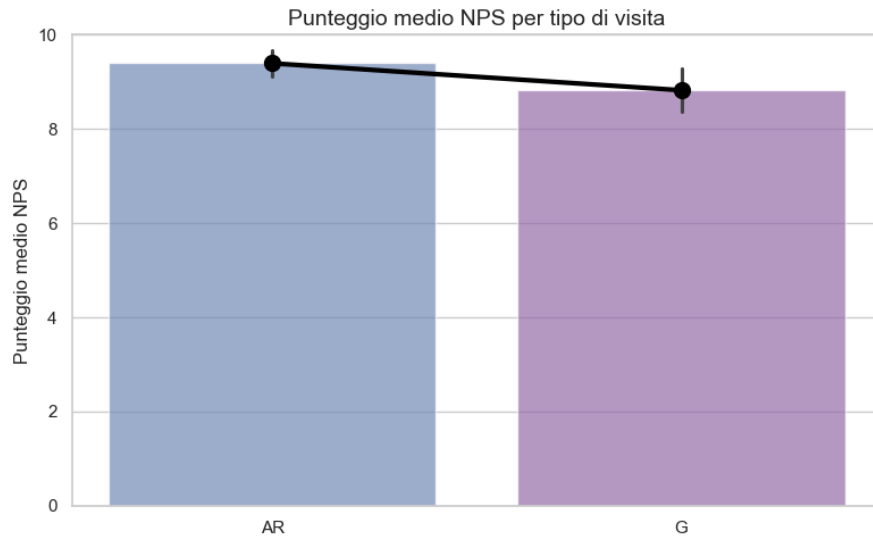


Figura 5.2: Punteggio medio NPS per tipo di visita

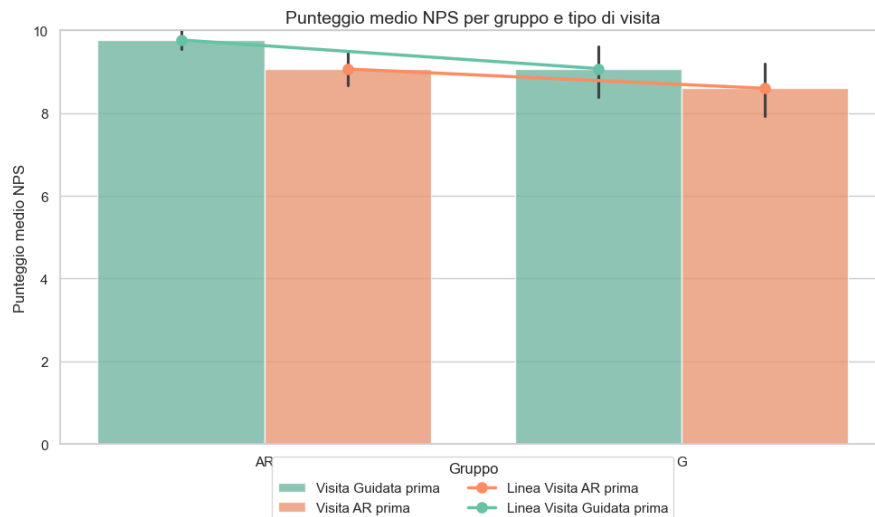


Figura 5.3: Punteggio medio NPS per gruppo e tipo di visita

5.3.3 Questionario IMI

L'*Intrinsic Motivation Inventory* (IMI) è uno strumento multidimensionale che misura la qualità dell'esperienza motivazionale intrinseca attraverso valutazioni di interesse, competenza percepita, autonomia e pressione esterna, fornendo un profilo complesso della risposta soggettiva del partecipante all'attività proposta. [32]. Nel presente studio, il questionario IMI è impiegato nella sua versione breve, articolato

in 14 *item* su scala Likert a cinque punti, e comprende tre fattori principali:

- Competenza percepita (COMP)
- Interesse (INT)
- Impegno (IMP)

Seguendo il medesimo modello di analisi, sono stati applicati test ANOVA Two-Way e t-test paired per esaminare gli effetti del tipo di visita, dell'ordine di visita e della loro interazione sui tre fattori IMI. I risultati, presentati nella Tabella 5.5, rivelano *pattern* di significatività differenziati tra i tre fattori, con evidenze particolarmente forti per INT ($\eta^2=0.433$) e COMP ($\eta^2=0.357$). La Tabella 5.6 fornisce un'interpretazione sintetica dei risultati, mentre la Figura 5.4 illustra il punteggio medio globale dell'IMI per ciascuna modalità di visita. Emerge chiaramente una superiorità della visita AR rispetto alla visita guidata in termini di motivazione intrinseca complessiva. Questo risultato generale è articolato nelle tre sottoscale, come visualizzato nella Figura 5.6.

Per quanto riguarda la Competenza (COMP), l'interazione tra tipo di visita e ordine risulta estremamente significativa ($p<0.001$), come evidenzia anche la Figura 5.7, nel gruppo visita Guidata prima, la differenza di competenza percepita tra AR e visita guidata è marcatissima ($t=4.39$, $p=0.001$). Al contrario, nel gruppo visita AR prima, non emerge alcuna differenza significativa ($t=-0.80$, $p=0.438$), suggerendo che quando l'AR rappresenta il primo contatto, non si percepisce un vantaggio in termini di competenza rispetto alla successiva esperienza guidata. L'Interesse (INT) emerge come il fattore più discriminante tra le due modalità ($\eta^2=0.433$, $p<0.001$), con un effetto principale significativo del tipo di visita non moderato dall'ordine. Come mostrato nella Figura 5.7, entrambi i gruppi manifestano differenze significative a favore dell'AR: nel gruppo visita Guidata prima l'interesse per l'AR è marcatamente superiore ($t=3.67$, $p=0.003$), mentre nel gruppo AR-prima la differenza persiste e rimane significativa ($t=2.55$, $p=0.023$). Questo indica che l'AR genera maggior interesse intrinseco indipendentemente dall'ordine di presentazione, suggerendo che la componente di novità e coinvolgimento tecnologico dell'AR stimola l'interesse in maniera coerente. L'Impegno (IMP) è modulato principalmente dall'interazione tra tipo di visita e ordine ($p=0.016$, $\eta^2=0.205$). Nel gruppo visita guidata prima, i partecipanti investono significativamente più impegno nell'AR ($t=2.38$, $p=0.035$), mentre nel gruppo visita AR prima la differenza non raggiunge la significatività statistica ($t=-1.19$, $p=0.255$). Questo suggerisce che l'ordine di visita influenza il livello di sforzo: quando l'AR è sperimentata dopo la visita guidata, viene percepita come più impegnativa, mentre quando rappresenta il primo contatto, l'impegno percepito tra le due modalità è più equilibrato.

Tabella 5.5: Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Fattori IMI

Fattore	Fonte	F	p	η^2	Gruppo
COMP	Tipo Visita	6.03	0.021	0.188	Guidata Prima
	Interazione	14.41	<0.001	0.357	—
INT	Tipo Visita	19.82	<0.001	0.433	Entrambi*
IMP	Interazione	6.71	0.016	0.205	—

Nota: Colonna *Gruppo* indica dove il t-test è significativo; * entrambi i gruppi significativi

Tabella 5.6: Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattori IMI

Fattore	Risultato interpretativo
COMP	La competenza percepita è influenzata principalmente dall'interazione tra tipo di visita e ordine. Nel gruppo visita Guidata prima, i partecipanti percepiscono significativamente maggiore competenza nell'AR rispetto alla visita guidata.
INT	L'interesse è il discriminante più forte tra le due modalità. Entrambi i gruppi manifestano differenze significative. L'AR genera quindi maggior interesse indipendentemente dall'ordine di presentazione.
IMP	L'impegno dipende principalmente dall'interazione. Nel gruppo visita Guidata prima, i partecipanti investono significativamente più impegno nell'AR. L'ordine di visita dunque influenza il livello di sforzo percepito come necessario tra le due modalità.

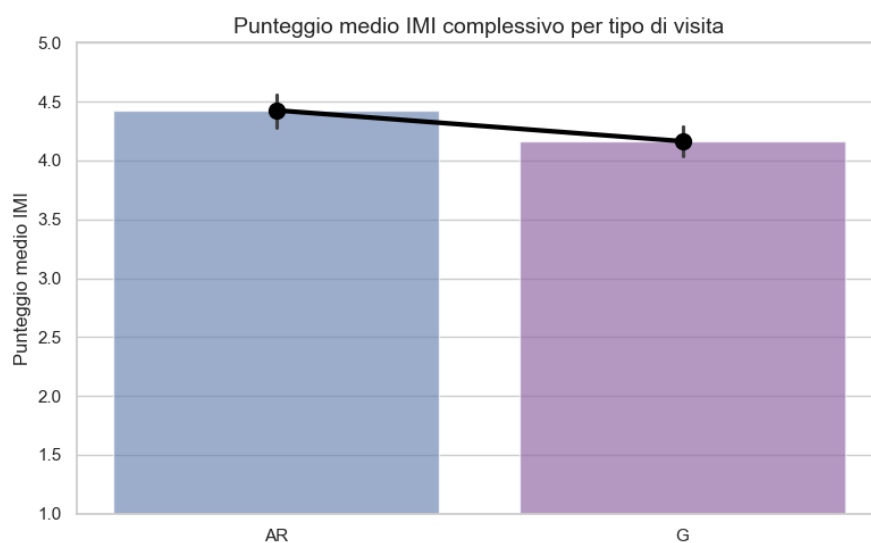


Figura 5.4: Punteggio medio IMI per tipo di visita

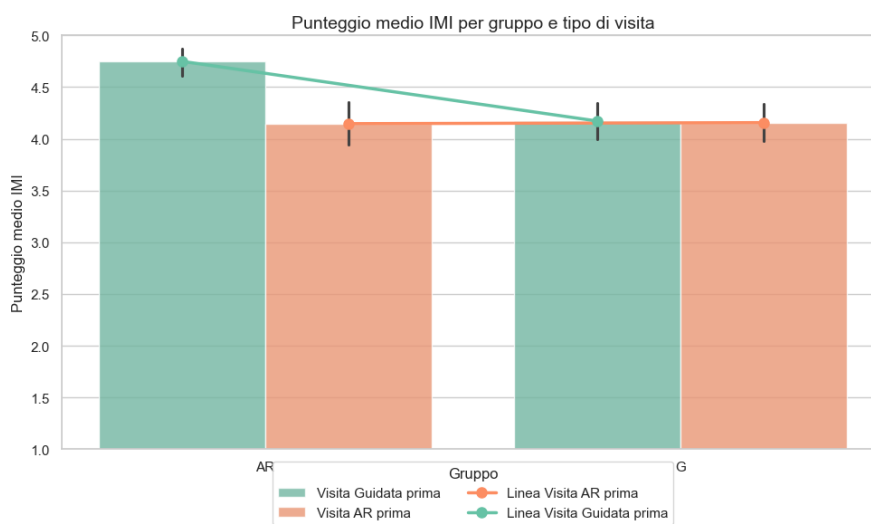


Figura 5.5: Punteggio medio IMI per gruppo e tipo di visita

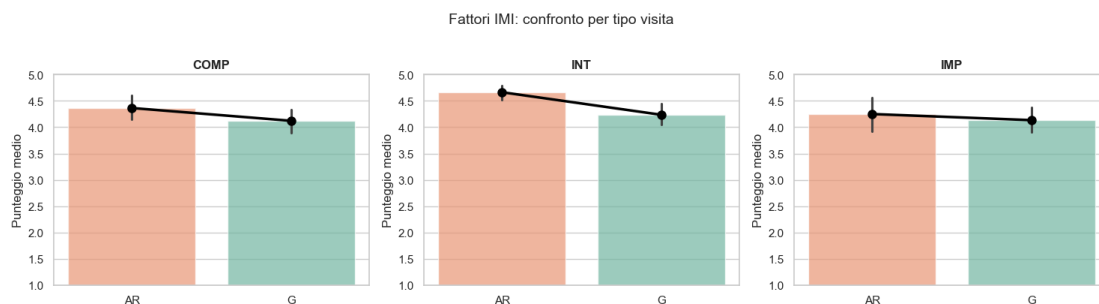


Figura 5.6: Punteggio medio Fattori IMI per tipo di visita

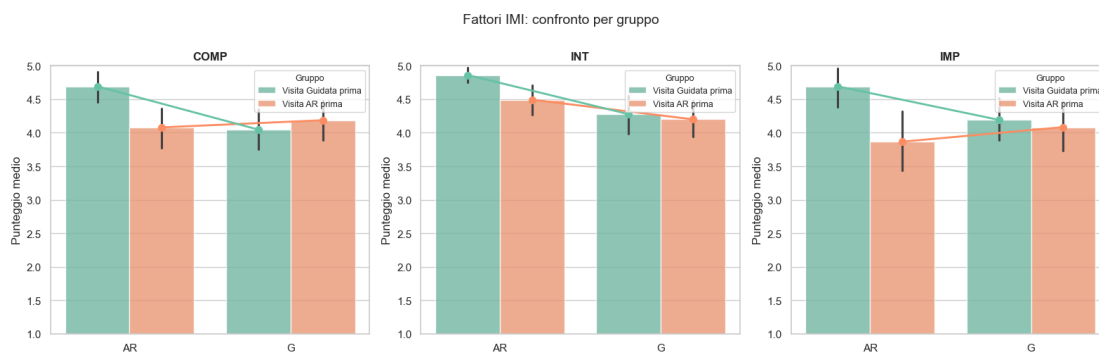


Figura 5.7: Punteggio medio Fattori IMI per tipo di visita e gruppo

5.3.4 Questionario PARQ

Il *Presence and Augmented Reality Questionnaire* (PARQ) è stato progettato per valutare in modo specifico la qualità dell'esperienza in Realtà Aumentata, con particolare attenzione alle dimensioni di realismo percepito, interattività e coinvolgimento [33]. Nel presente studio il PARQ viene somministrato esclusivamente dopo la visita AR e consente di misurare quanto i contenuti aumentati siano percepiti come realistici, in che misura il sistema risulti interattivo e il grado di immersione e coinvolgimento sperimentato dall'utente. Queste dimensioni costituiscono gli elementi fondamentali della "presenza" in AR e caratterizzano il valore esperienziale della tecnologia nel contesto museale.

Il questionario è articolato in tre fattori composti da tre item ciascuno, valutati mediante scala Likert 1-4:

- Realismo (A)
- Interattività (B)
- Coinvolgimento (C)

A differenza dei fattori precedenti (questionario socio-tecnico, NPS, IMI), i risultati presentati nella Tabella 5.7 rivelano che nessuno dei tre fattori PARQ mostra differenze statisticamente significative tra i due gruppi di visita. Questo *pattern* di uniformità suggerisce che le dimensioni della "presenza" in AR, realismo percepito, interattività e coinvolgimento non sono modulate dall'ordine di visita, restando stabili e coerenti indipendentemente dal fatto che i partecipanti abbiano sperimentato prima la modalità AR o la visita guidata. Inoltre, come evidenziato visivamente nelle Figure 5.9, 5.8, i punteggi medi registrati per tutti e tre i fattori risultano complessivamente positivi e superiori al punto mediano della scala Likert 1-4, indicando che l'applicazione AR è stata percepita come efficace sotto i tre punti di vista analizzati dal PARQ. Questo risultato conferma la validità tecnica e progettuale dell'installazione AR: la capacità dell'AR di generare "presenza", cioè quella sensazione psicologica di essere realmente presenti all'interno dell'ambiente aumentato, rimane robusta e trasversale, rappresentando un punto di forza fondamentale della tecnologia implementata nel contesto del Museo Carcere Le Nuove.

Tabella 5.7: Risultati ANOVA One-Way e T-test: Fattori PARQ

Fattore	Fonte	F	p	η^2	Significatività
A	Gruppo	0.96	0.336	0.034	ns
B	Gruppo	0.28	0.598	0.010	ns
C	Gruppo	1.53	0.226	0.054	ns

Nota: ns = non significativo; Nessun fattore PARQ mostra differenze significative tra i gruppi

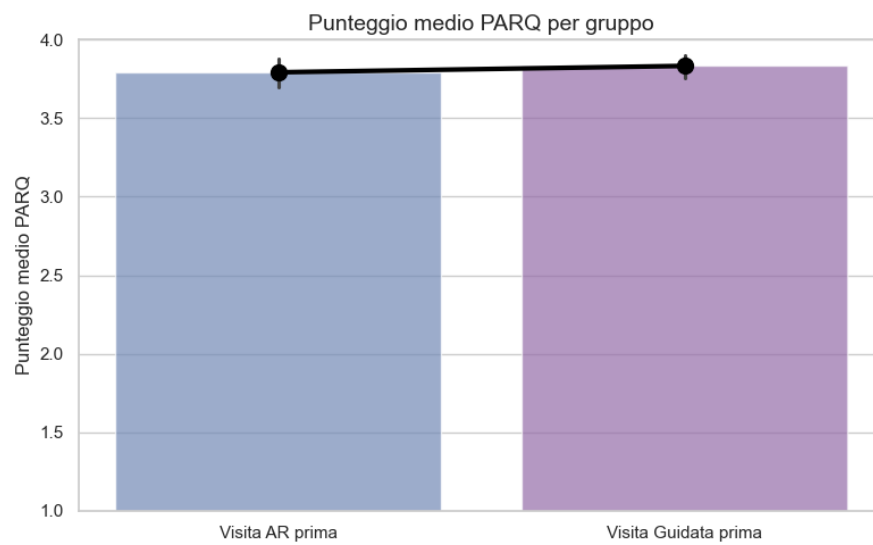


Figura 5.8: Punteggio medio PARQ

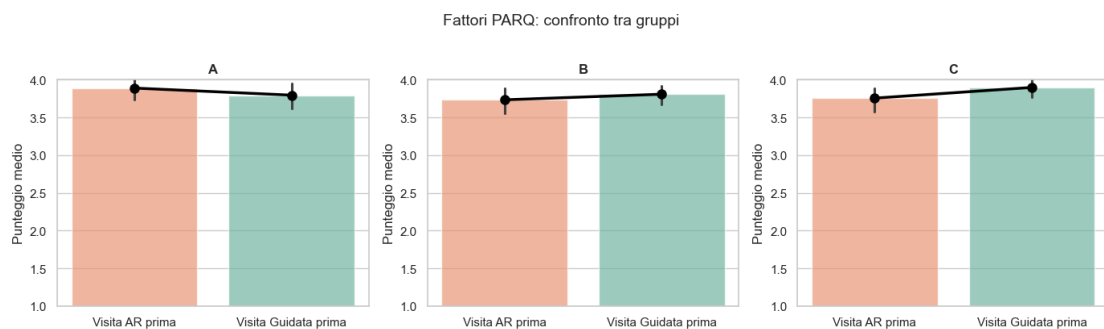


Figura 5.9: Punteggio medio fattori PARQ

5.3.5 Questionario UES

La *User Engagement Scale* (UES) rappresenta uno strumento psicometrico standardizzato per valutare il coinvolgimento dell'utente nell'interazione con sistemi digitali o ambienti di interazione strutturata [34]. Nel presente lavoro è stata impiegata la versione breve della scala, adattata per risultare applicabile sia alla modalità di visita AR sia a quella guidata tradizionale. La scala breve comprende quattro fattori, ciascuno costituito da 3 *item* valutati su scala Likert a 5 punti:

- attenzione focalizzata (FA)
- usabilità percepita (PU)
- attrattiva estetica (AE)
- reward/gratificazione (RW)

Seguendo il medesimo approccio analitico, sono stati applicati test ANOVA Two-Way e t-test paired per esaminare gli effetti del tipo di visita e dell'ordine di visita sui quattro fattori UES. Come mostrato nella Tabella 5.8, due dei quattro fattori raggiungono la significatività statistica ($p < 0.001$), mentre gli altri due (Usabilità Percepita e *Reward*) non mostrano differenze significative tra le due modalità. La Tabella 5.9 fornisce un'interpretazione sintetica dei risultati significativi.

Entrambi i fattori significativi (FA e AE) presentano differenze marcate a favore della visita AR in entrambi i gruppi, indicando che la superiorità della visita AR è robusta e non moderata dall'ordine di visita. Inoltre, l'*effect size* per entrambi i fattori è estremamente elevato (FA: $\eta^2=0.513$, AE: $\eta^2=0.576$). Questo suggerisce che gli elementi interattivi e visivi della visita AR creano un'esperienza più immersiva e coinvolgente dal punto di vista dell'attenzione, ma anche dell'estetica. L'Attrattiva Estetica (AE), infatti, rappresenta il discriminante più forte tra i fattori UES ($\eta^2=0.576$), confermando quanto già osservato nel questionario socio-tecnico, ossia che la visita AR è in grado di offrire un'esperienza visiva superiore. Questo risultato evidenzia come la dimensione estetica e visiva sia il principale elemento di differenziazione tra le due modalità di fruizione. Come mostrato nella Figura 5.10, il punteggio UES complessivo per l'AR risulta superiore rispetto alla visita guidata. Questo *pattern* si mantiene coerente quando stratificato per gruppo di visita (Figura 5.11). L'analisi specifica dei quattro fattori UES (Figura 5.12) rivela una differenziazione interessante: mentre Attenzione Focalizzata (FA) e Attrattiva Estetica (AE) mostrano effetti principali significativi del tipo di visita, gli altri due fattori (Usabilità Percepita e *Reward*) non presentano differenze statisticamente significative. Questo suggerisce che l'AR eccelle specificamente in queste due dimensioni, mentre mantiene parità con la visita guidata in termini di usabilità e capacità di gratificazione. Infine, la Figura 5.13 conferma che i *pattern* osservati

rimangono stabili e robusti quando si stratifica per ordine di visita. In particolare, i due fattori significativi (FA e AE) mantengono la loro superiorità in entrambi i gruppi, rafforzando l'evidenza che la qualità dell'esperienza AR è percepita come superiore indipendentemente da quale modalità i partecipanti hanno sperimentato per prima.

Tabella 5.8: Risultati ANOVA Two-Way e T-test: Fattori UES Significativi

Fattore	Fonte	F	p	η^2	Gruppo
FA	Tipo Visita	27.41	<0.001	0.513	Entrambi**
AE	Tipo Visita	35.28	<0.001	0.576	Entrambi**

Nota: Colonna *Gruppo* indica dove il t-test è significativo; ** entrambi i gruppi significativi

Tabella 5.9: Sintesi Interpretativa dei Risultati per Fattori UES Significativi

Fattore	Risultato interpretativo
FA	Entrambi i gruppi percepiscono significativamente l'AR come capace di catturare e mantenere l'attenzione più efficacemente rispetto alla visita guidata. La capacità dell'AR di focalizzare l'attenzione risulta robusta e trasversale.
AE	Il discriminante più forte tra i fattori UES. Entrambi i gruppi valutano significativamente più elevata l'attrattiva estetica dell'AR. L'AR offre un'esperienza visiva e estetica marcatamente superiore alla guida tradizionale.

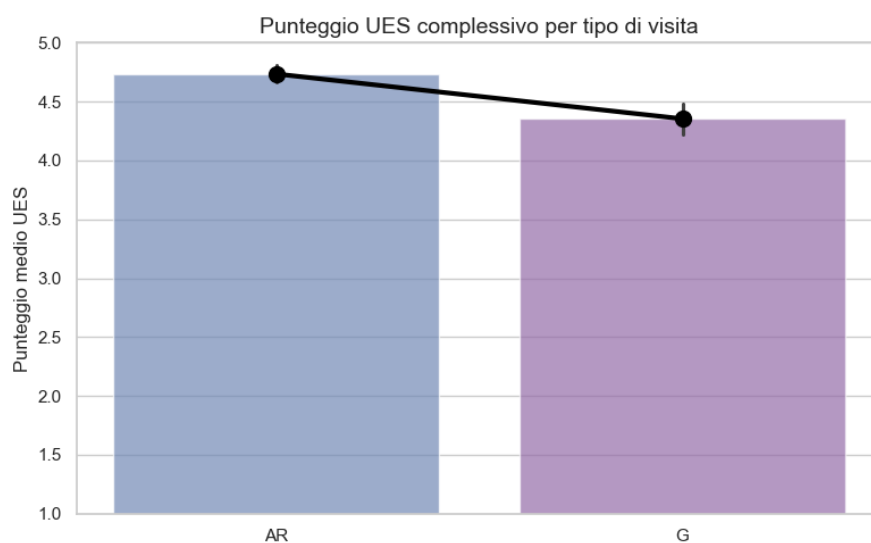


Figura 5.10: Punteggio medio UES per tipo visita

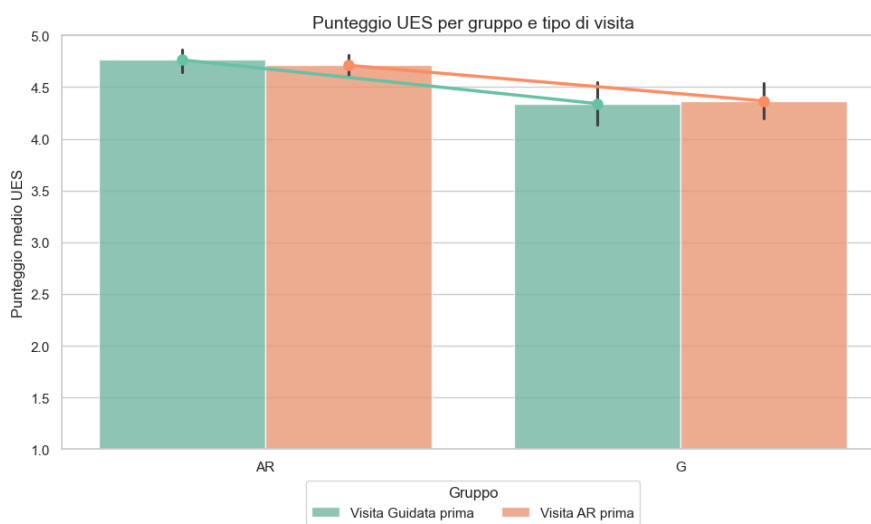


Figura 5.11: Punteggio medio UES per tipo visita e gruppo

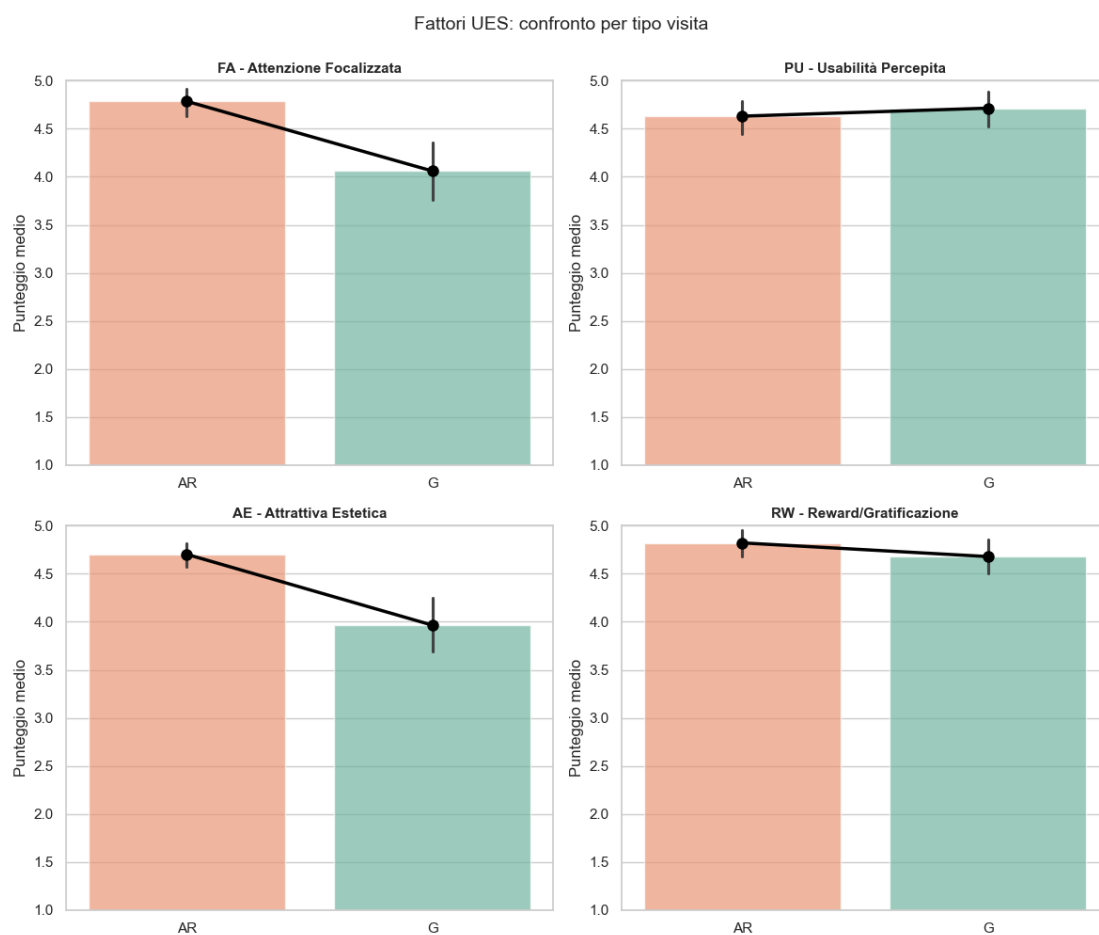


Figura 5.12: Punteggio medio fattori UES per tipo visita

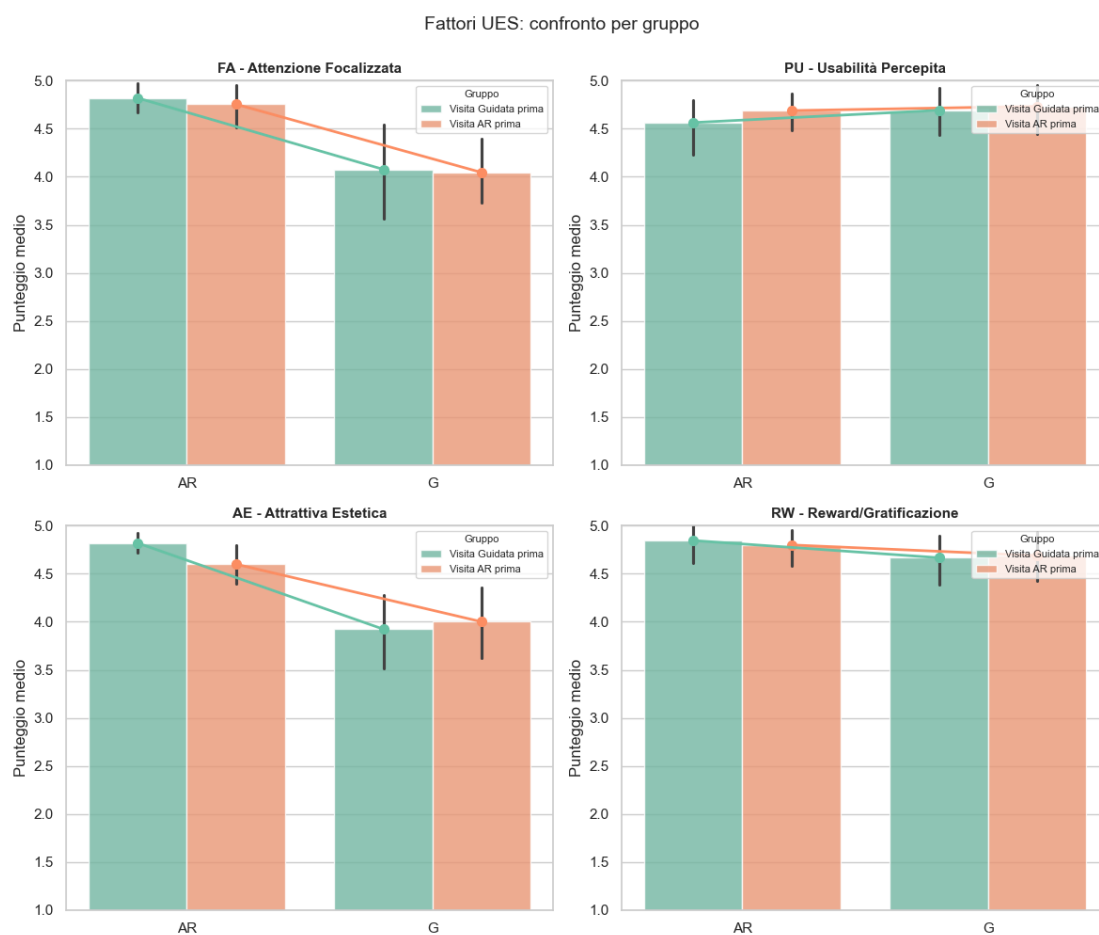


Figura 5.13: Punteggio medio fattori UES per tipo visita e gruppo

5.3.6 Questionario PMM

Il *Personal Meaning Mapping* (PMM) è uno strumento qualitativo sviluppato in ambito museale per esplorare il significato personale che i visitatori attribuiscono a un'esperienza [24]. Nel presente studio i partecipanti compilano una mappa concettuale due volte, una dopo la visita tradizionale e una dopo la visita AR, utilizzando parole-chiave e associazioni libere relative a ciò che ritengono più significativo. La mappa viene poi discussa in una breve intervista, permettendo di approfondire come cambiano le rappresentazioni mentali, le connessioni concettuali e i significati attribuiti al contenuto espositivo nelle due condizioni. Il PMM integra così i dati quantitativi con una lettura più ricca e sfumata delle percezioni e dei vissuti individuali. L'analisi delle mappe PMM è stata condotta secondo un approccio multi-livello. In primo luogo, è stata effettuata un'analisi lessicale attraverso *word cloud* per identificare i termini ricorrenti e la loro frequenza relativa nelle due visite mostrate nelle Figure 5.14 e 5.15. Successivamente, l'esame delle mappe concettuali individuali attraverso le interviste ha consentito di identificare i ragionamenti semantici più significativi, i *pattern* ricorrenti nelle associazioni concettuali costruite dai visitatori, e i percorsi di significazione emergenti in ciascuna esperienza. Questa analisi multi-livello ha permesso di evidenziare come i due diversi mezzi abilitino modalità distinte di elaborazione cognitiva e di costruzione di significato storico. La presenza di parole chiave come *resistenza*, *libertà*, *memoria*, *testimonianza*, *consapevolezza*, *persone*, *emozione*, *valore* in entrambe le visite non solo conferma la coerenza del messaggio fondamentale, ma dimostra anche l'efficacia nella sua trasmissione. Entrambe le esperienze, sebbene attraverso modalità differenti, riescono effettivamente a trasmettere l'importanza della memoria storica e della consapevolezza civile, testimoniando una convergenza narrativa intenzionale verso obiettivi educativi comuni. L'analisi delle parole ricorrenti non condivise tra le due visite permette di individuare strategie narrative specifiche per ciascuna esperienza, mostrando come uno stesso messaggio storico venga trasmesso attraverso approcci metodologici differenti. Le parole che caratterizzano la visita AR evidenziano un approccio che enfatizza:

- L'immersività e l'esperienza multisensoriale della tecnologia: *immersivo*, *chiusura*, *parole*
- Il privilegiare le storie individuali attraverso la valorizzazione di oggetti simbolici e personali: *braccialetto*, *fiore*, *foto*, *giovani*, *storie*, *fratture*
- Le emozioni intense: *emozione*, *tristezza*, *speranza*

Le parole che caratterizzano invece la visita guidata indicano un approccio che privilegia:

- La narrazione storica dettagliata: *storia*, *lettere*, *carcere*, *cancellazione*

- I valori civici e politici: *costituzione, conoscenza, credere*
- L'azione e la resistenza attiva: *lotta, coraggio, sacrificio*
- La relazione umana diretta: *vicinanza, paura*, termini che evidenziano il coinvolgimento emotivo e la connessione con il narratore umano

In conclusione, le due esperienze rappresentano modalità complementari e consapevolmente differenziate di fruizione storica: la prima privilegia l'acquisizione emotiva e sensoriale della memoria attraverso l'immersività tecnologica, mentre la seconda promuove l'apprendimento critico-civile mediante la narrazione storica strutturata e il dialogo diretto. Tale complementarietà riflette una prospettiva volutamente plurale, determinata dalla natura stessa dei mezzi utilizzati, che richiedono e abilitano modalità distinte di mediazione e ricezione dei contenuti storici. Dall'analisi delle interviste in cui i visitatori hanno illustrato le loro mappe concettuali emerge un riscontro significativo delle due esperienze. Numerosi visitatori hanno evidenziato come la visita AR li abbia condotti a elaborare associazioni prevalentemente emotivo-concettuali, mentre la visita guidata ha favorito l'acquisizione di nozioni storiche successivamente correlate ai medesimi concetti fondamentali. La testimonianza diretta e la parola del testimone sono stati identificati come strumenti particolarmente efficaci nel comunicare la portata e il valore degli eventi storici, generando una percezione di prossimità emotiva rispetto agli eventi narrati. Il luogo stesso si è rivelato fortemente emozionante. I visitatori più sensibili hanno riconosciuto come il contesto spaziale mantenga una carica emotiva intrinseca, indipendentemente dal medium tecnologico, confermando quanto già emerso dalle recensioni del museo. Molti hanno sottolineato l'importanza della relazione che si crea tra la guida e i visitatori, identificandola come elemento cruciale per l'efficacia della mediazione storica. Il processo di posizionamento della foto sulle pareti si è rivelato per alcuni inizialmente non intuitivo, ma tutti hanno conseguito l'obiettivo, trovando l'esperienza gratificante e auto-determinata. L'uso strategico dei cambi di scena, dal buio alla luce, ha contribuito a generare un'atmosfera intima e introspettiva particolarmente apprezzata, dando questa sensazione di essere avvolto dalla narrazione. Alcuni hanno espresso stupore rispetto alla capacità della tecnologia di evocare emozioni intense, specialmente nell'esperienza della cella. La scelta estetica delle animazioni, semplice ma efficace, è stata particolarmente apprezzata, in particolare la rappresentazione del fiore, il papavero, che ha contribuito a veicolare il messaggio con delicatezza e simbolicità. Il posizionamento della foto ha rappresentato un equilibrio efficace tra esplorazione autonoma e fruizione strutturata, conferendo un ruolo attivo senza generare sensazioni di pressione performativa. Ciò ha attribuito importanza al visitatore stesso, non passivo ma simile a uno storico che raccoglie e interpreta frammenti di storie e testimonianze che fanno parte della storia, permettendogli di sentirsi più coinvolto anche emotivamente. Gli oggetti

5.4 Analisi dei Mediatori Parziali: Correlazioni di Pearson e Regressioni OLS

L'analisi precedente ha evidenziato come le due modalità di visita differiscono significativamente su molteplici dimensioni psicologiche. Tuttavia, per comprendere i meccanismi causali sottostanti e identificare quali fattori mediano effettivamente la relazione tra le caratteristiche dell'esperienza e outcome finali, è necessario condurre un'analisi di mediazione parziale. Seguendo il modello teorico proposto da Chen et al. [22] come *framework* di riferimento (distinguendo tra predittori, mediatori parziali, e outcome), ma adattato alla presente ricerca date le limitazioni metodologiche (campione $n=28$, quindi precludendo SEM), è stata condotta un'analisi correlazionale e regressiva esplorativa sui fattori empiricamente raccolti tramite i quattro questionari somministrati. A differenza del modello originario, che identifica predittori e mediatori specifici tramite SEM su campioni ampi, la presente analisi esamina quale combinazione dei fattori misurati (Socio-tecnici, Motivazionali (IMI), di Engagement (UES), di Presence (PARQ) predice gli outcome nel contesto specifico del museo. Inoltre, l'analisi espande gli outcome includendo, oltre alle misure tradizionali di soddisfazione (SAT), intenzione a utilizzare AR (AUI) e propensione a ritornare (DRI), anche il Net Promoter Score (NPS) come indicatore aggiuntivo di raccomandazione complessiva, reso possibile dalla sua comparabilità teorica con SAT come misura di percezione positiva dell'esperienza.

5.4.1 Metodologia Statistica

Nell'analisi, sono stati calcolati modelli di correlazione di Pearson e regressioni OLS stratificati per:

- **Questionario:** Socio-tecnico, IMI (Motivazione), UES (Engagement), PARQ (Presence) (solo per AR)
- **Outcome:** SAT, NPS, DRI, e AUI (solo per AR)
- **Modalità:** Tipo di visita (Visita AR e Visita Guidata)

Questa analisi non considera l'ordine di visita, fornendo una stima globale dell'effetto mediatore di ciascun questionario sugli outcome, integrato su tutti i partecipanti ($n = 28$). Per questioni di robustezza statistica, è stata privilegiata l'analisi sul campione completo ($n = 28$) rispetto a un'analisi stratificata per ordine di esperienza, che avrebbe comportato sottogruppi troppo piccoli ($n = 15$ e $n = 13$) con conseguente instabilità dei parametri stimati. L'obiettivo è identificare quali scale di misura predicono meglio ciascun outcome nelle due modalità di visita, indipendentemente dalla sequenzialità sperimentale. Per ogni combinazione *questionario* \times *outcome* \times *modalità* sono state condotte:

1. **Correlazioni di Pearson** tra i fattori della scala e l'*outcome*, per quantificare l'associazione bivariata
2. **Regressioni OLS** con i fattori della scala come predittori e l'*outcome* come variabile dipendente, per quantificare l'effetto multivariato controllando per altri fattori della medesima scala

I coefficienti di regressione standardizzati (β) indicano la forza relativa di ciascun fattore nel predire l'*outcome*, mentre i valori p e gli intervalli di confidenza quantificano la significatività statistica. L' R^2 del modello complessivo indica la proporzione di varianza nell'*outcome* spiegata dalla scala di misura considerata.

5.4.2 Limitazioni e Precisazioni Metodologiche

È importante sottolineare alcune limitazioni e differenze rispetto al modello originario di Chen et al. [22]:

1. **Dimensione campionaria e complessità modellistica:** Chen et al. hanno condotto un'analisi SEM (*Structural Equation Modeling*) su un campione ampio ($n > 200$), permettendo una modellazione multivariata simultanea e test rigorosi di mediazione con controllo di più *pathway* causali. Nel presente studio, il campione ridotto ($n=28$) preclude l'uso di SEM, in quanto i gradi di libertà sarebbero insufficienti per stimare in modo affidabile modelli complessi multivariati. Pertanto, l'approccio adottato si basa su regressioni OLS univariate e correlazioni di Pearson, rappresentando un'analisi esplorativa.
2. **Presupposti teorici vs fattori empirici:** Il modello di Chen et al. identifica predittori, mediatori e outcome teoricamente fondati sulla letteratura di HCI e psicologia del turismo. Nel presente studio, si è adottato il *framework* teorico di Chen (distinguendo tra predittori, mediatori parziali e outcome), ma si è esteso l'analisi ai fattori empiricamente raccolti tramite i quattro questionari (Socio-tecnico, IMI, UES, PARQ), che non coincidono necessariamente con le variabili originarie di Chen. Questo approccio è valido teoricamente (basato su scale psicometriche consolidate), ma rappresenta un'operazionalizzazione diversa dei costrutti.
3. **Struttura di mediazione semplificata:** Chen et al. modellano un sistema di mediazione multipla e seriale complesso. Nel presente studio, si è adottata una struttura semplificata in cui:
 - i fattori dei questionari sono trattati come predittori diretti degli outcome
 - SAT è assunto come mediatore parziale sulla base dei risultati di Chen

- **NPS è aggiunto come outcome** ulteriore (non presente nel modello originario) sulla base della sua comparabilità teorica con SAT come misura di soddisfazione e raccomandazione.
- **Implicazioni sulla validità:** Dato il campione ridotto, l'approccio esplorativo, e le operationalizzazioni diverse, i risultati della presente analisi devono essere interpretati come indicativi e generativi di ipotesi piuttosto che confermatore del modello di Chen. Tuttavia, l'analisi mantiene valenza descrittiva e qualitativa nel riconoscere *pattern* di correlazione e predizione specifici al contesto museale e alle modalità di visita studiate, fornendo una base empirica per ulteriori ricerche su campioni più ampi.
- **Vantaggi dell'approccio semplificato:** Nonostante le limitazioni, l'approccio OLS stratificato offre vantaggi in termini di interpretabilità, trasparenza, e granularità: consente di identificare quali fattori specifici guidano gli outcome in ciascun contesto, informazione utile per designer e curatori anche quando non è possibile condurre modellazione SEM.

5.4.3 Risultati Analisi

Per la visita AR sono emersi i seguenti risultati rilevanti:

- Il NPS è l'outcome più predicibile, con il questionario UES che spiega il 67% della varianza ($R^2 = 0.668$, $F = 12.06$, $p < 0.001$).
- Il fattore AE del questionario UES emerge come il predittore dominante e statisticamente significativo ($\beta = 2.121$, $p < 0.001$), confermato dalla forte correlazione Pearson ($r = 0.79$). Analogamente, i fattori del questionario socio-tecnico predicono significativamente il NPS ($R^2 = 0.613$, $F = 7.292$, $p < 0.001$), con AES come fattore principale ($\beta = 0.915$, $p = 0.016$).
- L'outcome AUI è significativamente predetto dalla scala UES ($R^2 = 0.435$, $F = 4.626$, $p = 0.007$) con il fattore AE che raggiunge significatività statistica ($\beta = 0.560$, $p = 0.039$). Anche i fattori del questionario PARQ si mostrano rilevanti per la predizione di AUI, in particolare il fattore C (Coinvolgimento) come unico predittore significativo ($\beta = 0.743$, $p = 0.011$).

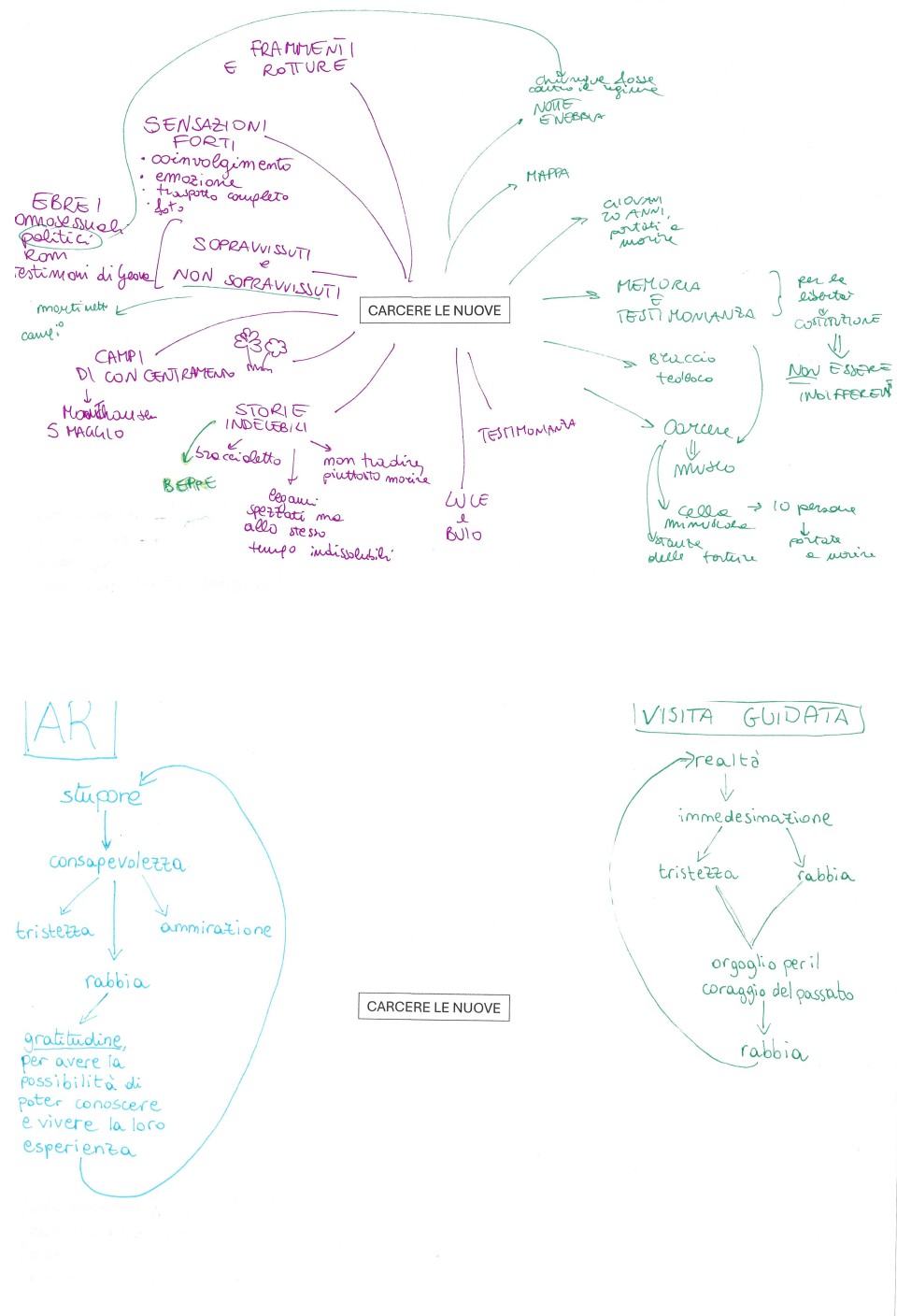
Per dare un'interpretazione operativa dei risultati emersi si può affermare che la propensione a raccomandare l'esperienza AR è principalmente guidata da fattori estetici e di attrattività visiva dell'interfaccia e dell'ambiente aumentato. Allo stesso tempo, l'intenzione all'utilizzo dell'AR è similmente guidata dall'apprezzamento estetico e dal senso di coinvolgimento e immersione dell'utente nell'ambiente aumentato. Queste conclusioni sono in linea sia con quanto emerso nell'analisi di Chen et al. [22] sia dalla letteratura attuale. Per quanto riguarda l'analisi della visita guidata sono emersi i seguenti risultati rilevanti:

- NPS è l'outcome più predicibile, con il questionario UES che spiega il 63,4% della varianza ($R^2 = 0.634$, $F = 9.981$, $p < 0.001$), in particolare con i fattori RW ($\beta = 1.225$, $p = 0.011$) e AE ($\beta = 0.925$, $p = 0.022$) come predittori significativi. Anche il questionario socio-tecnico mostra rilevanza ($R^2 = 0.444$, $F = 4.593$, $p = 0.007$) con NOV come predittore significativo ($\beta = 0.726$, $p = 0.033$).
- SAT è il secondo outcome più predicibile, con il questionario socio-tecnico che spiega il 60,9% della varianza ($R^2 = 0.609$, $F = 8.946$, $p < 0.001$), con il fattore AES come predittore significativo ($\beta = 0.259$, $p = 0.029$). Inoltre, il questionario UES spiega il 53,1% della varianza ($R^2 = 0.531$, $F = 6.519$, $p = 0.001$), con Reward/Gratificazione (RW) come predittore significativo dominante ($\beta = 0.579$, $p = 0.011$).
- DRI è significativamente predetto dal questionario socio-tecnico ($R^2 = 0.407$, $F = 3.953$, $p = 0.014$), con il fattore AUT come unico predittore significativo ($\beta = 0.564$, $p = 0.022$). Al secondo posto si colloca il questionario UES che spiega il 37,1% della varianza ($R^2 = 0.371$, $F = 3.397$, $p = 0.025$), con RW come predittore significativo ($\beta = 0.642$, $p = 0.036$).

Per una lettura operativa dei risultati, si può affermare che la propensione a raccomandare la visita guidata dipende da una combinazione di fattori estetici, gratificazione e percezione di novità. La soddisfazione, invece, è principalmente associata agli aspetti estetici e alla capacità dell'esperienza di ricompensare il visitatore. Infine, l'intenzione di ritornare risulta legata soprattutto alla percezione di autenticità e alla gratificazione ricevuta.

5.5 Le PMM dei visitatori

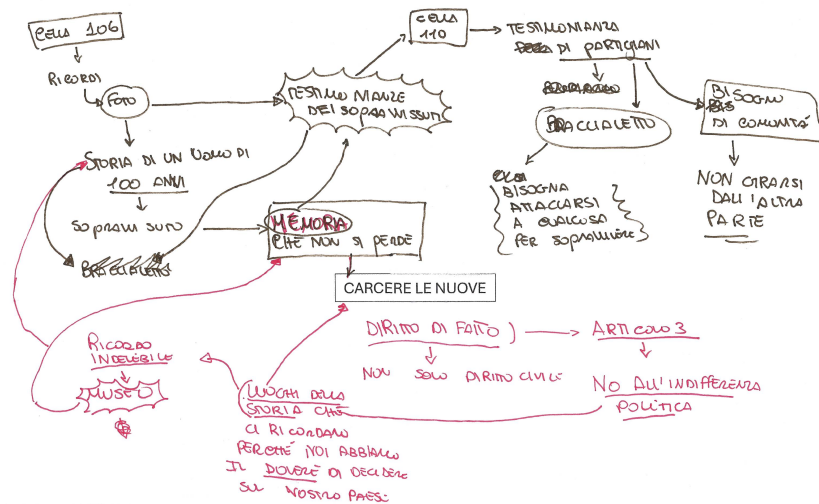
In questa sezione si illustrano le PMM e alcune foto scattate durante la visita AR.

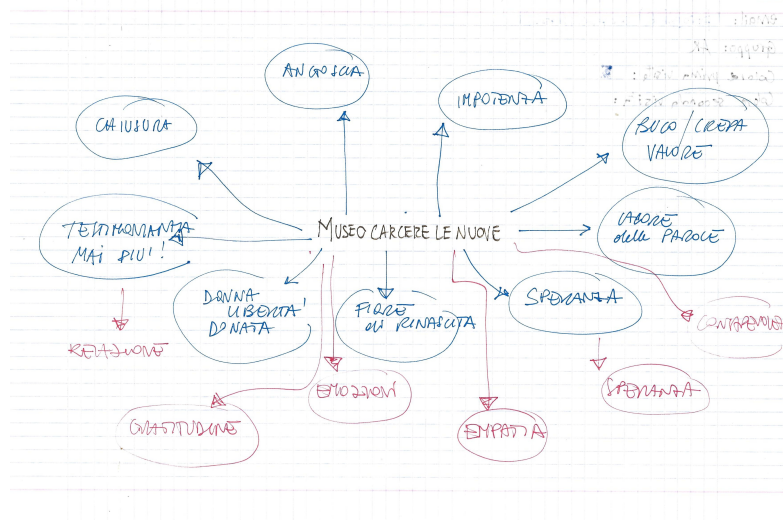
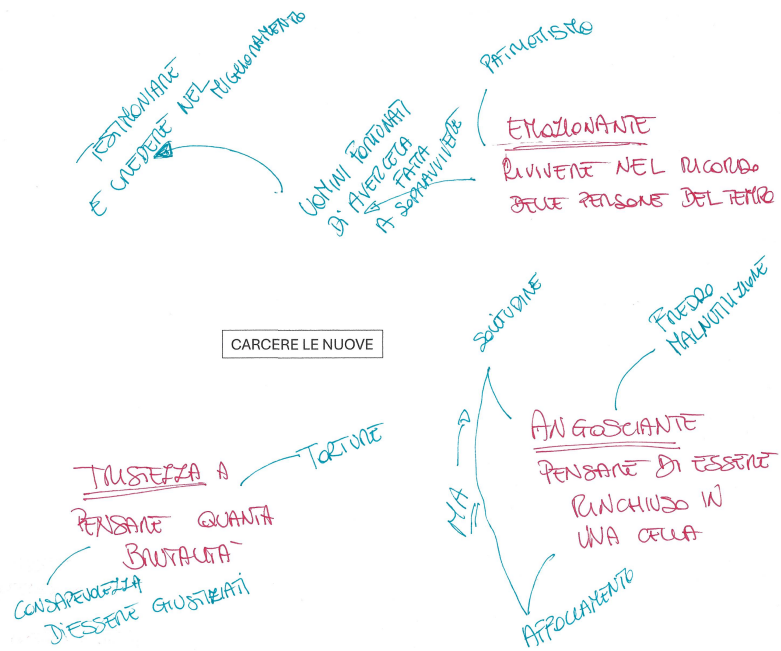


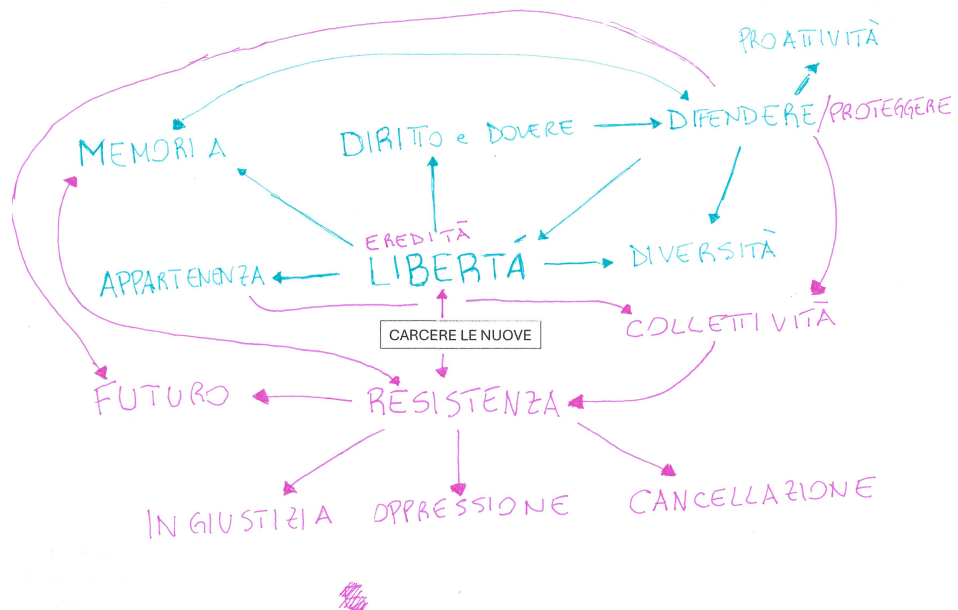
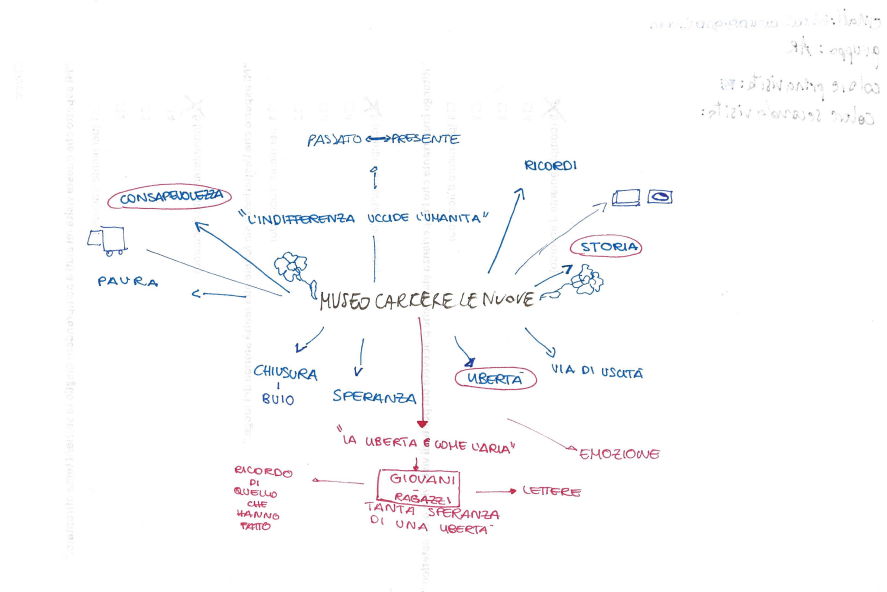
Tristezza Brutalità importanza di trasmettere il messaggio

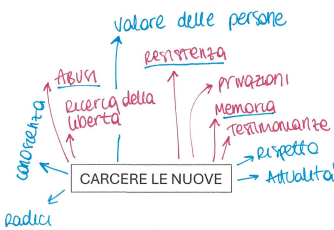
CARCERE LE NUOVE

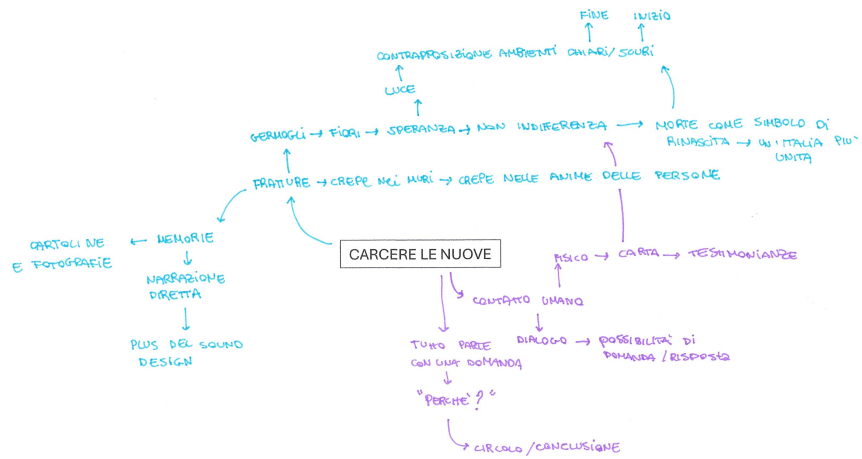
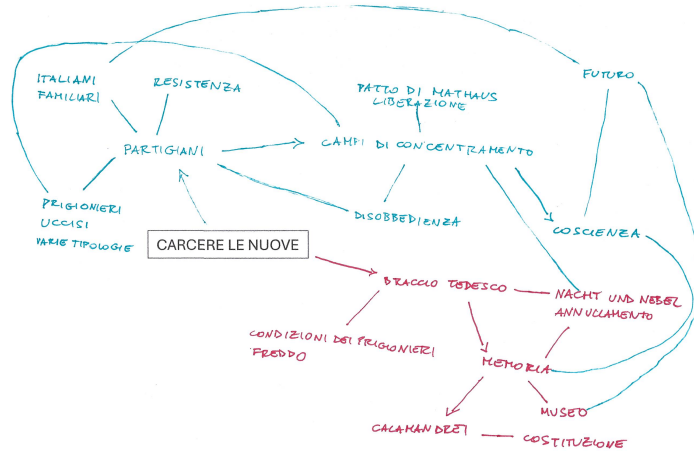
Conoscenza Disumanità Testimone delle vite

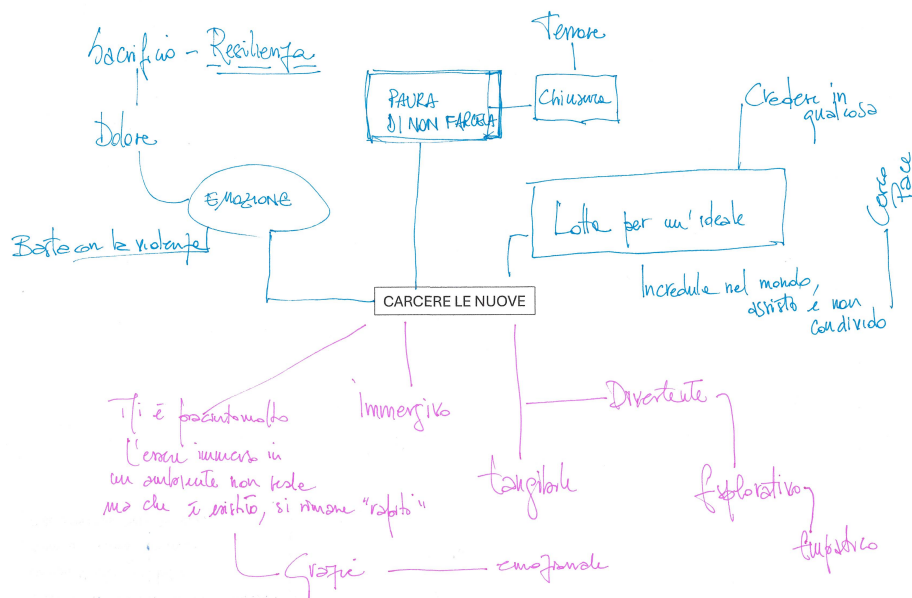
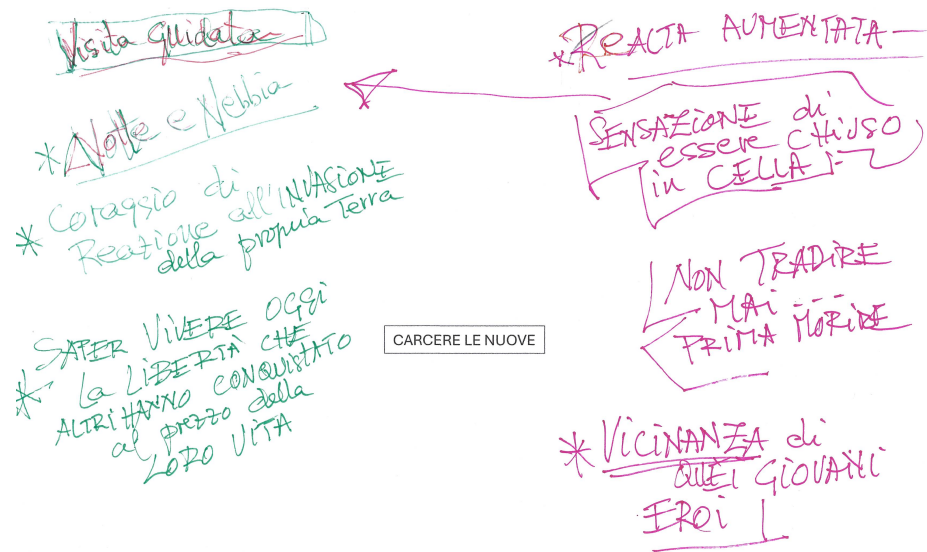












Libertà di pensiero democrazia generosità
 attenzione a custodire la libertà- proteggere la democrazia
 Costituzione sacrificio patrià
 uguaglianza ATTENZIONE governi totalitari

CARCERE LE NUOVE

MAI PIÙ

L'INDIFFERENZA

NON GIRARTI DALL'ALTRA PARTE

"MA IO NON PARLAVO NO NO NO..." "IO SONO ITALIANO"

STANZE PICCOLE
 ↓
 ASSEMBLAMENTO A TREASONE
 ↓
 PAURA, FAME, FREDDO
 ↓
 TORTURE
 ↓
 MORTE

TESTIMONIANZA SCRITTA
 ↓
 ULTIMA LETTERA AI CALI
 ↓
 CACCIA RUSSO AI CALI

CARCERE LE NUOVE

FOTO → VOLÈ
 ↓
 TRISTEZZA
 ↓
 RICORDO → CONSAPEVOLEZZA
 MORTE

Tedeschi	Carcerati	Disomogeneizzazione	Forza dell'animale
- Imposizione	- Terrore	- Cancellazione	- Pulire Ruggine
- Violenza	- Sofferenza	- Diritti negati	- Ultima lettera
- Comando	- Morte	- Impossibilità Impossibilità del carcere	- Nessun rimorso
			- Felicità libertà
			- Significato delle proprie presenze

CARCERE LE NUOVE

In cella

- Isolamento
- Solitudine
- fare i conti con se stessi
- Accettazione del proprio destino

Andare oltre

- Lettere alle famiglie
- Speranza nel futuro
- Speranza nella giustizia

Noi oggi

- Partecipazione
- Ricordare
- Anteporre eventi la storia
- Non ripetere gli stessi errori

IMMERSIVO:
SEMPRE EMOTIVANTE
ASCOLTARE DALLA VIVACITÀ
ESPERIENZE TRAUMATICHE

IL RITARDO AL PASSATO:
CON LA MEMORIA FILTRIAMO
LE INFORMAZIONI E LE
ESPERIENZE CON IL NOSTRO
PERSONALE FILTRO COSTRUITO
DALLE ESPERIENZE
PREGRESSE

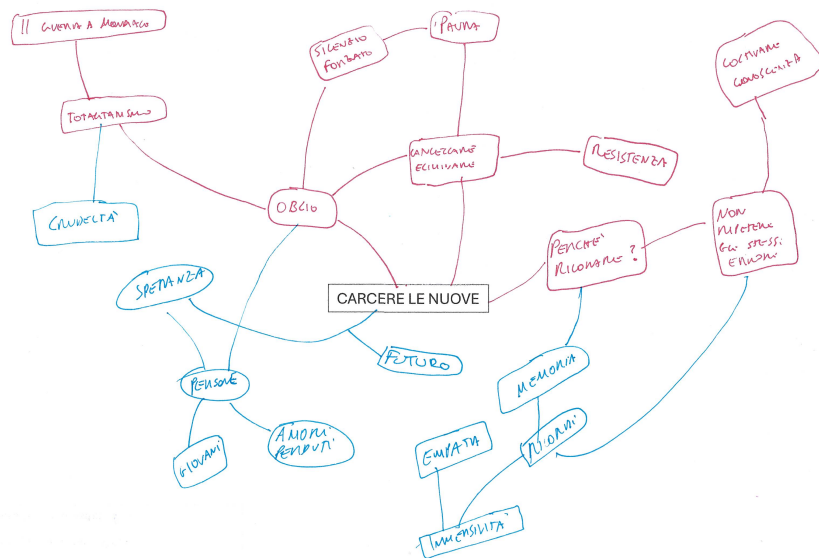
IL PRESENTE:
LIBERO DA SENSI DI COLPA
HA VISSUTO SERENAMENTE
ALIMENTANDO PENSIERI
POSITIVI IN ARMONIA
CON IL CREATO.

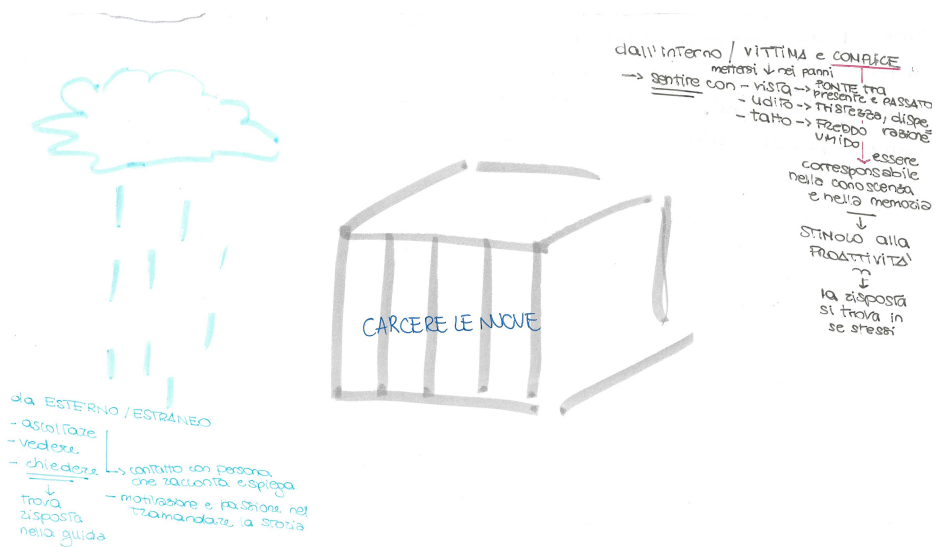
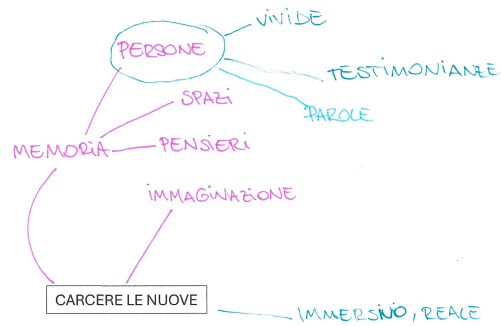
RIFLESSIVO:
COMMISSIONE CON IL PASSATO
EVOCATAMENTE LEGATO ALLA
PERCEZIONE TRASMEDIA DA UNA
NARRAZIONE RIEVOCA CIÒ
CHE CI HA FATTO RISOCCORRERE
DALLE CENERI.

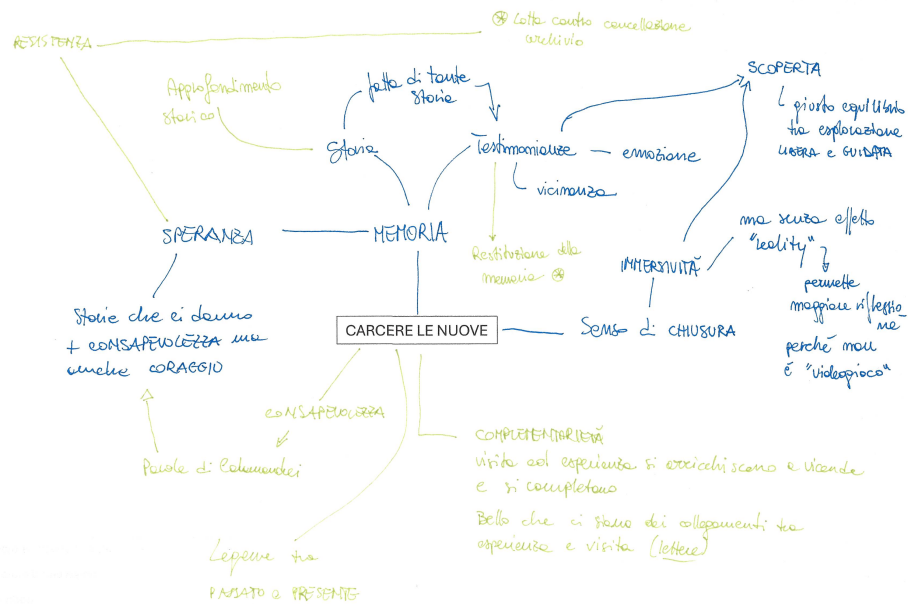
PROIEZIONE?
NON SEMPRE È NON
TUTTE LE ANIME SONO
DISPOSTE A FARNE TESSUTO

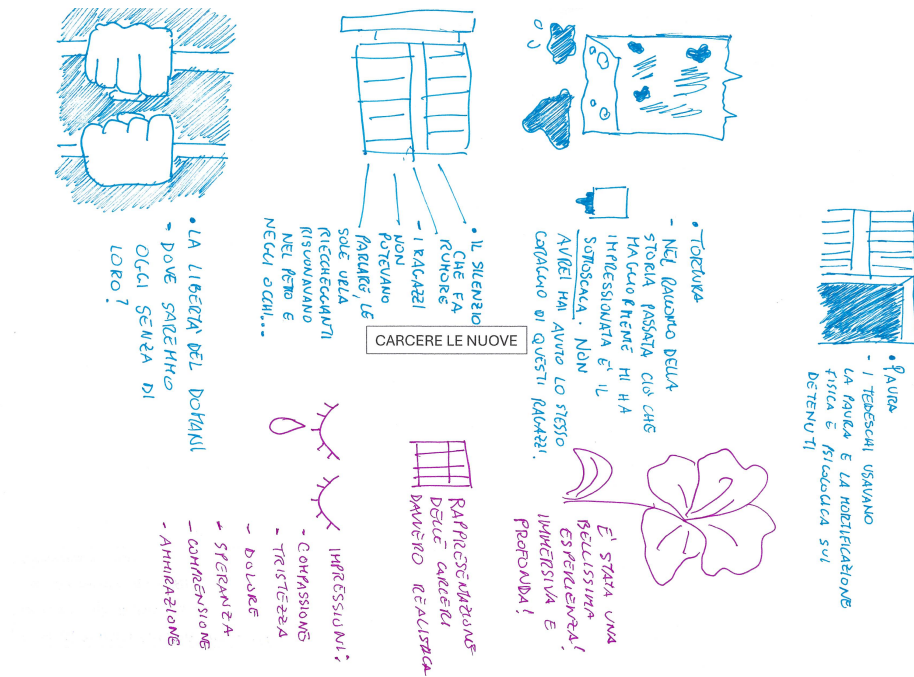


STANCHEZZA → MEMORIA → ODIO → RICADUTA → RESISTENZA → LIBERTA'















Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

La tesi ha esplorato il potenziale delle tecnologie immersive nella valorizzazione del patrimonio intangibile della memoria, indagando come l'integrazione di realtà aumentata e realtà virtuale possano generare esperienze significative di mediazione tra il presente e il passato, il reale e il virtuale. Sviluppando un'applicazione immersiva integrata nel Museo Carcere Le Nuove, è stato possibile verificare empiricamente come tali tecnologie possano effettivamente trasformare la fruizione della memoria storica.

6.1 Sintesi delle risposte alle domande di ricerca

Il progetto si è sviluppato tenendo conto delle tre domande di ricerca presentate nell'introduzione nella sezione 1.1.

Partendo dalle formulazioni iniziali fino ad arrivare alla valutazione qualitativa e quantitativa dell'esperienza, è emerso un quadro articolato e promettente circa le possibilità offerte dalle tecnologie immersive nel contesto della memoria storica.

6.1.1 RQ1: Tecnologie immersive come mediatori emotivi della memoria storica

La ricerca ha confermato che le tecnologie immersive, quando progettate intenzionalmente per contesti di memoria storica, operano non come semplici amplificatori visivi, ma come mediatori emotivi della consapevolezza storica. I risultati della sperimentazione documentano un significativo incremento dell'*engagement* e della motivazione intrinseca nei visitatori durante l'esperienza di realtà aumentata, evidenziato dai punteggi ottenuti nella *User Engagement Scale* (UES), nell'*Intrinsic Motivation Inventory* (IMI) e nel *Presence and Augmented Reality Questionnaire* (PARQ). Questi dati quantitativi confermano l'efficacia della tecnologia nel favorire

un coinvolgimento cognitivo profondo, un interesse intrinseco e una percezione di immersività e realismo dello spazio virtuale. Particolarmente rilevante è l'emergere, dalle analisi qualitative basate sul metodo PMM, di una rielaborazione emotivamente consapevole del messaggio storico. I visitatori non hanno semplicemente acquisito informazioni didattiche, bensì hanno interiorizzato e metabolizzato il significato della memoria trasmessa attraverso la tecnologia, trasformandola da contenuto esterno a esperienza personale. Ciò suggerisce che il patrimonio intangibile della memoria, costituito non solo da fatti storici, ma anche e principalmente da storie personali, può essere trasmesso in maniera efficace attraverso le tecnologie immersive quando queste sono centrate sulla narrazione emotiva e sulla testimonianza diretta.

6.1.2 RQ2: Aspetti tecnici, narrativi e interattivi per un coinvolgimento empatico

La progettazione di esperienze immersive efficaci nel contesto della memoria richiede di considerare simultaneamente tre dimensioni interconnesse. Dal punto di vista narrativo e concettuale, è indispensabile una narrazione ancorata a una solida base storica, che tuttavia sia in grado di coinvolgere il visitatore mostrando “le storie nella storia” ossia le testimonianze dirette e i racconti personali degli individui che hanno vissuto gli eventi. Questo approccio ha dimostrato di ancorare la storia astratta a un contesto umano più prossimo al visitatore contemporaneo, generando empatia e significato personale. Dal punto di vista dell'interazione, risulta fondamentale definire consapevolmente il ruolo del visitatore all'interno dell'esperienza. A differenza della visita guidata tradizionale, le tecnologie immersive posizionano il visitatore come protagonista attivo della navigazione spaziale e narrativa. In questo progetto, è stato scelto un'approccio contemplativo piuttosto che altamente interattivo, sia per rispettare la natura delicata del contesto, sia per evitare il rischio di “disneyfication” [38] che potrebbe compromettere l'obiettivo educativo e il rispetto nei confronti delle testimonianze presentate. Il design dell'interazione è stato concepito come semplice ma significativo, lasciando al visitatore il grado di libertà necessario per muoversi e scoprire, senza sovraccaricare di scelte interattive che avrebbero potuto distrarre dal messaggio narrativo. Dal punto di vista tecnico e narrativo, la soluzione del portale virtuale (che media la transizione tra spazio fisico reale e ambiente virtuale mediante le testimonianze immersive) si è rivelata particolarmente efficace. Il portale incarna le potenzialità distintive della tecnologia immersiva mantenendo nel contempo una fedeltà al contesto e alla missione museale, evitando eccessi tecnologici che allontanerebbero dal significato umano della memoria. In questo senso, risultano particolarmente efficaci sia l'utilizzo di fotografie reali dei personaggi storici, sia l'integrazione di oggetti narrativi ricostruiti tramite fotogrammetria, che contribuiscono a radicare l'esperienza in una

dimensione autentica e rispettosa.

6.1.3 RQ3: Il dialogo tra AR/VR e visita guidata tradizionale

La sperimentazione ha rivelato che realtà aumentata e visita guidata tradizionale non sono modalità competitive, bensì complementari, ciascuna con forze distintive che, combinate secondo un ordine e un'intenzione progettuale, generano un'esperienza integrata superiore. I dati hanno evidenziato che quando la visita guidata precede l'esperienza di realtà aumentata, essa svolge una funzione preparatoria cruciale: fornisce il contesto storico e spaziale necessario ai visitatori con minore preparazione sull'argomento, aumenta la loro competenza di base e orienta la comprensione dello spazio fisico in cui avverrà l'esperienza aumentata. La visita guidata offre inoltre un contatto umano diretto con l'istituzione e i suoi valori (nel caso del Museo Carcere Le Nuove, rappresentato dall'associazione Nessun Uomo è un'Isola), elemento che rafforza il legame emotivo con il messaggio complessivo. L'esperienza di realtà aumentata, di contro, eccelle nel mantenimento dell'attenzione focalizzata, nell'interesse intrinseco e nell'immersività emotiva. Dove la visita guidata potrebbe avere limitazioni logistiche o di personalizzazione, la tecnologia immersiva consente a ogni visitatore di vivere un'esperienza profonda e autonoma, mediata dal movimento personale e dal momento personale di contemplazione. L'ordine di fruizione ha dimostrato di modulare significativamente la percezione di fattori quali educazione, competenza e impegno. Questa scoperta suggerisce che il percorso di visita integrato (con prima la visita guidata e poi l'esperienza immersiva) rappresenta un modello particolarmente efficace per massimizzare sia la comprensione storica che l'impatto emotivo, incrementando inoltre la raccomandabilità dell'esperienza e l'intenzione dei visitatori di ritornare.

6.2 Limiti della ricerca

È importante sottolineare gli ambiti in cui i risultati presentano limitazioni significative che meritano considerazione. Il primo limite riguarda la dimensione campionaria della ricerca. La sperimentazione ha coinvolto 28 partecipanti, una dimensione che, sebbene adeguata per uno studio esplorativo e qualitativo, conferisce ai risultati delle analisi statistiche carattere prevalentemente esplorativo piuttosto che conclusivo. I *pattern* osservati nei dati sono coerenti e significativi, ma necessitano di conferma su campioni più ampi. Inoltre, il campione è stato reclutato presso il museo in un arco temporale limitato, il che potrebbe non rappresentare adeguatamente la diversità di pubblici che visitano l'istituzione. Un secondo limite è rappresentato dalla specificità del contesto. L'esperienza è stata

progettata specificamente per il Museo Carcere Le Nuove, tenendo conto della sua storia particolare, della sua missione educativa legata ai valori dell'associazione "Nessun Uomo è un'Isola", e del suo patrimonio immateriale specifico. Sebbene i principi di design e la metodologia siano potenzialmente trasferibili ad altri contesti di memoria, ogni nuova implementazione richiederebbe adattamenti significativi in relazione al contesto, al pubblico, ai contenuti narrativi, e alla missione istituzionale. Resta pertanto aperta la questione della loro estendibilità a contesti differenti. Un terzo limite riguarda le condizioni in cui è stata condotta la valutazione sperimentale. Durante la fase di raccolta dati, parte dell'allestimento fisico del museo era temporaneamente assente per interventi di manutenzione e restauro. Questa circostanza potrebbe aver influenzato la percezione complessiva dell'esperienza di visita guidata tradizionale, eventualmente rendendo meno favorevole il confronto rispetto alle condizioni normali di funzionamento del museo. Una valutazione condotta in condizioni di piena operatività del museo, con l'intero allestimento presente e funzionante, potrebbe generare risultati leggermente differenti. Un ulteriore limite riguarda le criticità tecniche emerse durante lo sviluppo dell'applicazione. In particolare, si sono evidenziate difficoltà nell'ottenere un allineamento spaziale preciso tra ambiente reale e ambiente virtuale. L'integrazione delle nuove Passthrough Camera API, ancora in una fase iniziale e non completamente consolidate in un *workflow* stabile, ha introdotto alcune instabilità. Allo stesso modo, l'impiego dei QR code presenta margini di miglioramento, soprattutto in termini di continuità del *tracking* e affidabilità. Sebbene tali aspetti siano stati gestiti con successo nella fase sperimentale, rappresentano comunque aree di miglioramento che potrebbero incidere sulla robustezza dell'implementazione in scenari d'uso quotidiani.

6.3 Sviluppi futuri

A partire dai risultati di questa ricerca, emergono diverse possibilità di sviluppo, sia dal punto di vista tecnico sia da quello contenutistico e metodologico.

Dal punto di vista tecnico, una priorità importante riguarda il miglioramento del sistema di allineamento spaziale, insieme all'ampliamento della funzionalità multilingua, attualmente già implementata in forma preliminare. Un'altra possibilità, esplorata nella fase di sviluppo ma successivamente scartata, riguarda l'integrazione di riprese a 360°, che risulterebbero particolarmente efficaci per estendere il Museo Carcere Le Nuove ai diversi luoghi di memoria ad esso collegati, come il Martinetto, spesso richiamato nelle testimonianze.

Dal punto di vista narrativo e contenutistico, un possibile sviluppo riguarda l'arricchimento del materiale narrativo. L'esperienza attuale integra due testimonianze orali, ma potrebbe essere ampliata mediante ulteriori testimonianze, materiali d'archivio digitalizzati, fotografie storiche e documenti primari. Questo genere di

stratificazione narrativa ampliherebbe le possibilità di esplorazione e approfondimento. Inoltre, grazie alla struttura implementata nell'applicazione, l'ampliamento dei percorsi risulta tecnicamente semplice, rendendo possibile offrire al visitatore la scelta tra diversi percorsi narrativi. Piuttosto che offrire un'unica esperienza standardizzata, si potrebbe immaginare una struttura che permetta ai visitatori di scegliere tra modalità di fruizione alternative: ad esempio, un percorso "intimo" focalizzato sulle memorie personali e sulle storie di relazione; un percorso "storico" più ampio focalizzato sul contesto politico e sociale; un percorso "educativo" specificamente disegnato per pubblici scolastici con approfondimenti didattici mirati. Questa personalizzazione aumenterebbe la rilevanza dell'esperienza per diversi segmenti di pubblico.

Un ulteriore sviluppo riguarda la connessione con altre istituzioni di memoria. Il Museo Carcere Le Nuove non esiste in isolamento rispetto al panorama italiano e internazionale della memoria pubblica. Sviluppi futuri potrebbero prevedere la creazione di collegamenti sia narrativi sia tecnici con altri musei della memoria, memoriali dell'Olocausto, musei di storia contemporanea e archivi digitali, contribuendo alla costruzione di una rete di esperienze immersive interconnesse che permettano al visitatore di comprendere la memoria storica in una prospettiva più ampia.

Dal punto di vista della ricerca futura, emergono diverse direzioni promettenti. Tra queste, un ruolo centrale è ricoperto dall'analisi dell'impatto dell'esperienza su pubblici specifici. Studi dedicati dovrebbero esplorare l'efficacia dell'esperienza per comunità scolastiche (quale impatto educativo?), per visitatori stranieri (quale percezione interculturale della memoria?), per persone con disabilità sensoriali o motorie (quale adattabilità dell'interfaccia?), per anziani (quale risonanza emotiva particolare?). Comprendere le specificità di questi pubblici permetterebbe di identificare necessità di adattamento e di personalizzazione.

Un altro aspetto di interesse riguarda l'approfondimento della combinazione tra visita guidata tradizionale ed esperienza aumentata, qui presentata in forma esplorativa. Studi futuri potrebbero analizzare più nel dettaglio l'efficacia di questa integrazione e le sue ricadute sulla comprensione e sul coinvolgimento dei visitatori. Inoltre, l'unione tra guida umana e contenuti aumentati potrebbe generare ulteriori vantaggi per l'istituzione museale, favorendo una maggiore soddisfazione del pubblico, una più alta probabilità di raccomandazione e un incremento nel ritorno dei visitatori, con possibili ricadute positive anche in termini di sostenibilità economica. Un'esperienza più coinvolgente e personalizzata potrebbe infatti rafforzare la relazione tra il museo e i suoi pubblici, sostenendo nel lungo periodo la missione culturale dell'istituzione.

6.4 Riflessione finale

La presente tesi ha dimostrato che le tecnologie immersive non sono semplici motori di innovazione tecnologica fine a se stessa, ma rappresentano veri e propri mediatori di esperienza capaci di generare coinvolgimento emotivo e profondità interpretativa nella trasmissione della memoria storica. Nel contesto specifico di un luogo di memoria storica come il Carcere Le Nuove di Torino, realtà aumentata e realtà virtuale hanno rivelato la loro capacità di instaurare un dialogo emotivamente consapevole e significativo tra le generazioni contemporanee e quelle che hanno vissuto direttamente gli eventi narrati. Ciò che emerge come centrale è la necessità assoluta di una progettazione storicamente precisa, etica e intenzionale della tecnologia. La mera capacità tecnica di creare esperienze immersive spettacolari non garantisce l'efficacia comunicativa e didattica o il rispetto dovuto ai contenuti di memoria; è invece il risultato di scelte progettuali consapevoli e strutturate che partono da obiettivi comunicativi e didattici specifici in linea con il museo. Queste scelte riflettono una convinzione profonda: non tutto ciò che è tecnicamente possibile è eticamente appropriato, né necessariamente efficace per la costruzione della consapevolezza storica di un cittadino. L'importanza di questo approccio emerge nitidamente dalla testimonianza diretta del direttore del museo, Calogero Modica, che ha sperimentato personalmente l'installazione immersiva, il quale scrive:

Per me è stata la seconda esperienza, l'AR dovrebbe già essermi familiare... eppure riesce a stupirmi. Dopo aver indossato gli occhiali di rito, ho cominciato l'immersione nel verosimile, eppur vero, nel rigore e nel rispetto degli eventi e delle persone coinvolte nella narrazione. Nulla è lasciato al caso, ogni dettaglio rigorosamente documentato; l'immersione di Anastasia nella storia e nelle storie ha prodotto la condivisione di fatti ed eventi poi rappresentati. Alla fine mi è stato chiesto: ti è piaciuto? La mia risposta inattesa è stata: sarebbe stato banale se mi fosse solo piaciuto. Entrare nella cella virtuale, essendone totalmente coinvolto, è stata un'esperienza unica. Prendere con le proprie mani le foto, una dopo l'altra, spostarle verso una luce su di una parete e ascoltare le parole dirette dei sopravvissuti o dei condannati a morte è stato come raccogliere dei frammenti del passato e farli propri. Viene poi chiusa la porta, dopo una fugace apparizione d'un soldato... difficile spiegare la sensazione provata. Ed ora cosa succede? Una voce racconta e le pareti si riempiono di nomi di lager, ma anche di fiori; sembrano quasi disegnati a mano libera come per dare una speranza in tanta sofferenza. Potrei continuare, ma a volte il silenzio vale più di mille parole. Mi sento solo di dire brava Anastasia per la tua sensibilità e per il rispetto della verità dei fatti.

La memoria intangibile, le testimonianze personali, le emozioni, il valore umano degli eventi storici, rappresenta un patrimonio fragile, minacciato dall'erosione che accompagna il passaggio generazionale. I testimoni diretti invecchiano, le loro voci diventano sempre più preziose e vulnerabili. Le tecnologie immersive, quando utilizzate con responsabilità, possono offrire strumenti potenti per la preservazione, la trasmissione e la rielaborazione consapevole di questa memoria. Non si tratta di sostituire la memoria vivente con una sua rappresentazione tecnica, ma di costruire una forma di mediazione capace di permettere alle generazioni future di incontrare, comprendere e sentire, in modo consapevole, le lezioni della storia. Questa democratizzazione tecnologica dell'accesso alla memoria implica però una responsabilità cruciale: preservare l'integrità, la dignità e la veridicità storica dei contenuti trasmessi. Le esperienze immersive non devono mai trasformarsi in spettacolo, riduzionismo o manipolazione emotiva. Devono essere ponti rispettosi tra presente e passato, capaci di favorire non solo una comprensione intellettuale degli eventi storici, ma anche una comprensione che passa attraverso l'emozione, il corpo e il coinvolgimento personale, trasformando l'informazione in comprensione, e la comprensione in responsabilità storica. Il presente lavoro di ricerca intende contribuire non a una celebrazione della tecnologia come fine a se stessa, bensì a una dimostrazione della sua capacità, quando posta consapevolmente al servizio di obiettivi umanistici, educativi e di memoria collettiva, di aprire nuove e più profonde possibilità di relazione tra comunità, storia, memoria e identità culturale condivisa. La tecnologia rimane uno strumento, la saggezza nel suo utilizzo rimane una responsabilità umana che non può essere delegata.

Bibliografia

- [1] UNESCO. *Culture / 2030 Indicators*. Rapp. tecn. Accessed: 2025-11-07. UNESCO, 2019. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371562> (cit. a p. 1).
- [2] UNESCO. *Convenzione per la salvaguardia del patrimonio culturale immateriale*. Adottata a Parigi il 17 ottobre 2003, entrata in vigore in Italia nel 2007. 2003. URL: <https://ich.unesco.org/en/convention> (visitato il giorno 07/11/2025) (cit. alle pp. 1, 27).
- [3] Ricerca e Istituti Culturali Ministero della Cultura. Direzione Generale Educazione e Fondazione Scuola dei beni e delle attività culturali, cur. *Minicifre della cultura. Edizione 2024*. Roma: Ministero della Cultura, 2024. URL: https://www.fondazione scuolapatrimonio.it/wp-content/uploads/2024/12/Minicifre-della-cultura_edizione-2024.pdf (cit. a p. 1).
- [4] Giuliano Gaia. *Il museo immediato. Digitale per la cultura: da Arpanet all'intelligenza artificiale*. Milano: Editrice Bibliografica, 2024 (cit. a p. 2).
- [5] Eilean Hooper-Greenhill. *The educational role of the museum*. Psychology Press, 1999 (cit. a p. 2).
- [6] John H Falk e Lynn D Dierking. *The museum experience revisited*. Routledge, 2016 (cit. a p. 2).
- [7] Nina Simon. *The participatory museum*. Museum 2.0, 2010 (cit. a p. 2).
- [8] Louis Nisiotis, Markos Souropetis e Eleni A Kyza. «Embracing cultural heritage through virtual reality: Development, usability and enjoyment evaluation of a vr environment for the church of panagia aggeloktisti». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 227–246 (cit. alle pp. 2, 6, 7).
- [9] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). *Promoting the digitalisation of the tourism ecosystem in Italy: A focus on SMEs*. Rapp. tecn. Accessed: November 7, 2025. Paris: OECD Publishing, lug. 2025. DOI: 10.1787/63616a85-en. URL: <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/07/promoting->

- the-digitalisation-of-the-tourism-ecosystem-in-italy_33726375/63616a85-en.pdf (cit. alle pp. 2, 7).
- [10] International Council of Museums (ICOM). *2021 ICOM Annual Report: A Year to Recover and Reimagine*. Accessed: November 7, 2025. Paris: ICOM, 2021. URL: https://www.icom.museum/wp-content/uploads/2022/07/2021-ICOM-Annual-Report_EN-1_compressed.pdf (cit. alle pp. 2, 7).
- [11] Boekmanstichting. *Cultuur en participatie 2023 – Themapagina: bezoek en beoefening van cultuur, kunst en erfgoed*. Accessed: 2025-11-07. Amsterdam: Boekmanstichting, 2023. URL: <https://www.cultuurmonitor.nl/en/thema/cultuur-en-participatie-2023/> (cit. a p. 2).
- [12] Netwerk Digitaal Erfgoed e Ministry of Education, Culture and Science (Netherlands). *National Digital Heritage Strategy 2021-2024*. Accessed: YYYY-MM-DD. Amsterdam: Netwerk Digitaal Erfgoed; Ministry of Education, Culture e Science, Netherlands, mar. 2021. URL: <https://netwerkdigitaal erfgoed.nl/wp-content/uploads/2022/05/National-Digital-Heritage-Strategy-2021-2024.pdf> (cit. a p. 2).
- [13] Paul Milgram e Fumio Kishino. «A taxonomy of mixed reality visual displays». In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), pp. 1321–1329 (cit. a p. 5).
- [14] Lucio Tommaso De Paolis, Pasquale Arpaia e Marco Sacco. *Extended Reality: International Conference, XR Salento 2023, Lecce, Italy, September 6-9, 2023, Proceedings, Part II*. Vol. 14219. Springer Nature, 2023 (cit. a p. 6).
- [15] Bruno Rodriguez-Garcia e Mario Alaguero. «Immersive virtual reality in cultural heritage dissemination: a comprehensive application for Novice Users». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 287–301 (cit. alle pp. 7–9).
- [16] Anna Chatsiopolou e Panagiotis Michailidis. «Cultural heritage applications based on augmented reality: A literature review». In: *International conference on extended reality*. Springer. 2023, pp. 194–209 (cit. alle pp. 7, 8).
- [17] Maurizio Mauri, Stefano Triberti e Daniela Villani. «The Silence of Art: Investigating the Emotional Experience of a Virtual Museum by Facial Expression Analysis». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 302–312 (cit. a p. 8).
- [18] Elena Spadoni, Marina Carulli e Monica Bordegoni. «A Conceptual Framework to Support a New Collaborative Design Process for Immersive Technology Integration in Museum Exhibitions». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 160–178 (cit. a p. 8).

- [19] Benedikt Hensen. «A systematic literature review of mixed reality learning approaches». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 15–34 (cit. alle pp. 10, 41).
- [20] Carola Gatto, Sofia Chiarello, Federica Faggiano, Benito Luigi Nuzzo, Ileana Riera Panaro, Giada Sumerano e Lucio Tommaso De Paolis. «Enhancing accessibility of cultural heritage: Extended reality and tactile prints for an inclusive experience of the Madonna Dell’Itri Church in Nociglia». In: *International Conference on Extended Reality*. Springer. 2023, pp. 146–159 (cit. a p. 12).
- [21] Bruno Fanini, Alfonsina Pagano, Eva Pietroni, Daniele Ferdani, Emanuel Demetrescu e Augusto Palombini. «Augmented reality for cultural heritage». In: *Springer Handbook of Augmented Reality*. Springer, 2023, pp. 391–411 (cit. a p. 13).
- [22] Yuangao Chen, Xini Wang, Bin Le e Lu Wang. «Why people use augmented reality in heritage museums: a socio-technical perspective.» In: *Heritage Science* 12.1 (2024) (cit. alle pp. 14, 62, 65, 66, 86–88).
- [23] Eleanor E Cranmer, MC Tom Dieck e Timothy Jung. «The role of augmented reality for sustainable development: Evidence from cultural heritage tourism». In: *Tourism Management Perspectives* 49 (2023), p. 101196 (cit. a p. 14).
- [24] Mariza Dima. «A design framework for smart glass augmented reality experiences in heritage sites». In: *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)* 15.4 (2022), pp. 1–19 (cit. alle pp. 16, 27, 62, 82).
- [25] Doriana Cisternino, Carola Gatto, Giovanni D’Errico, Valerio De Luca, Maria Cristina Barba, Giovanna Ilenia Paladini e Lucio Tommaso De Paolis. «Virtual portals for a smart fruition of historical and archaeological contexts». In: *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*. Springer. 2019, pp. 264–273 (cit. a p. 25).
- [26] Nonny De la Peña, Peggy Weil, Joan Llobera, Bernhard Spanlang, Doron Friedman, Maria V Sanchez-Vives e Mel Slater. «Immersive journalism: Immersive virtual reality for the first-person experience of news». In: *Presence* 19.4 (2010), pp. 291–301 (cit. a p. 28).
- [27] Meta Platforms, Inc. *Meta and OpenXR*. Consultato il 14 novembre 2025. Mar. 2025. URL: <https://developers.meta.com/horizon/blog/openxr-standard-quest-horizonos-unity-unreal-godot-developer-success/> (cit. a p. 42).
- [28] Meta Platforms, Inc. *Unity Passthrough Camera API Overview*. Consultato il 14 novembre 2025. 2025. URL: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-pca-overview> (cit. a p. 47).

- [29] Meta Platforms, Inc. *Unity-PassthroughCameraApiSamples*. Consultato il 14 novembre 2025. 2025. URL: <https://github.com/oculus-samples/Unity-PassthroughCameraApiSamples> (cit. a p. 47).
- [30] xrdevrob. *QuestCameraKit*. Consultato il 14 novembre 2025. 2025. URL: <https://github.com/xrdevrob/QuestCameraKit> (cit. a p. 47).
- [31] Pakinee Ariya, Natchaya Wongwan, Perasuk Worragin, Kannikar Intawong e Kittit Puritat. «Immersive realities in museums: evaluating the impact of VR, VR360, and MR on visitor presence, engagement and motivation». In: *Virtual Reality* 29.3 (2025), pp. 1–20 (cit. a p. 62).
- [32] Watsaporn Arayaphan, Orasa Sirasakmol, Wanvimol Nadee e Kittit Puritat. «Enhancing intrinsic motivation of librarian students using virtual reality for education in the context of culture heritage museums». In: *TEM Journal* 11.2 (2022), p. 620 (cit. alle pp. 62, 70).
- [33] Tassos Anastasios Mikropoulos, George Koutromanos, Ioannis Vrellis, Michael Delimitros e Tryfon Sivenas. «Presence in Augmented Learning: An Empirical Study Leading to a New Questionnaire Proposal». In: *International Conference on Immersive Learning*. Springer. 2025, pp. 36–47 (cit. alle pp. 62, 75).
- [34] Heather L O'Brien, Paul Cairns e Mark Hall. «A practical approach to measuring user engagement with the refined user engagement scale (UES) and new UES short form». In: *International Journal of Human-Computer Studies* 112 (2018), pp. 28–39 (cit. alle pp. 62, 77).
- [35] Frederick F Reichheld. «The one number you need to grow». In: *Harvard business review* 81.12 (2003), pp. 46–55 (cit. alle pp. 62, 68).
- [36] Piero Calamandrei. *Discorso sulla Costituzione – 26 gennaio 1955*. <https://formazione.indire.it/paths/piero-calamandrei-discorso-sulla-constituzione-26-gennaio-1955>. Riprodotto su sito INDIRE. 1955. (Visitato il giorno 26/11/2025) (cit. a p. 63).
- [37] Dyah Puspitasari Srirahayu, Esti Putri Anugrah e Khoirotun Layyinah. «Influence of satisfaction and loyalty on Net Promoter Score (NPS) in academic libraries in Indonesia». In: *Library Management* 42.6/7 (2021), pp. 325–339 (cit. a p. 68).
- [38] Pierre Balloffet, François H Courvoisier e Joëlle Lagier. «From museum to amusement park: The opportunities and risks of edutainment.» In: *International Journal of Arts Management* 16.2 (2014) (cit. a p. 107).

Ringraziamenti

Quello che si sta chiudendo ora è solo un testo, un testo che racchiude in sé tante parti di me, cresciute, cambiate, distrutte e ricomposte: un movimento costante di cose, pensieri e persone, tante persone e tanti spazi che hanno contribuito a dare forma a me e a queste pagine. Il mio ringraziare nasce prima ancora di questa tesi. Il mio ringraziare nasce il giorno in cui, dopo tanti sforzi, sono riuscita a superare Analisi I.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho conosciuto Gino, Elena, Riccardo, Sara, Fernanda e tanti altri, persone che non vedono l'università come un semplice passaggio necessario, ma come un luogo in cui crescere, costruire e costruirsi come individui capaci di pensare, ragionare e creare ponti.

Il mio ringraziare nasce tutte le volte che non superavo un esame e mia madre mi festeggiava, perché è soprattutto quando le cose vanno male che bisogna festeggiare.

Il mio ringraziare nasce ogni volta che mia sorella riusciva a farmi ridere anche nei momenti più difficili.

Il mio ringraziare nasce quando mio padre si sforzava di comprendere i concetti che stavo studiando.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho conosciuto Lara, Alessia, Alice, Mattia, Fefè, Silvia, Mariachiara, Marghe, Faber, Davide, Tommi e Lele che mi hanno mostrato quanto è bello affrontare le difficoltà con leggerezza e, soprattutto, insieme.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho deciso di iscrivermi a Ingegneria, nonostante fossi una ragazza, un “nonostante” che non dovrebbe più avere senso per nessuna, nonostante venissi dal liceo classico, nonostante avessi paura di non essere abbastanza.

Il mio ringraziare nasce il primo giorno di lezione con la Mazali, Bottino, Strada, Malnati e tanti altri professori, che insegnano con passione e, attraverso i progetti di gruppo, mostrano che l'università non è solo imparare a fare, ma scoprire insieme agli altri il senso profondo di ciò che si sta facendo, costruendo conoscenza e relazioni passo dopo passo.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui, al corso di game design, ho incontrato Giacomo, e da allora si rinnova ogni giorno nella sua gentilezza.

Il mio ringraziare nasce quando Valentina ha creduto in me partecipando a ogni

progetto, quando Marta mi accoglieva a casa sua con un gelato e il suo buon tè, e quando ritrovavo la presenza degli amici di sempre: Manzi, Andre, Orazio, Stefania e Virgi.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho conosciuto Felice Tagliente, Calogero Modica e Simone Pezzot, che insieme mi hanno mostrato la preziosità del Museo Carcere Le Nuove e la cura che ogni volontario mette in questo luogo.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho conosciuto Mario, che mi ha raccontato la sua grande storia di dolore: un dolore che ha fatto germogliare un grande fiore di speranza non solo in me, ma in tanti ragazzi e ragazze a cui ha donato la sua storia.

Il mio ringraziare nasce per Carla, che porta avanti questa speranza, credendo in me e donandomi la sua storia con generosità.

Il mio ringraziare nasce il giorno in cui ho conosciuto Beppe e Pieralba: con i suoi 100 anni, Beppe ha avuto la forza di raccontarmi la sua storia di dolore, donandomi una preziosa testimonianza di vita, coraggio e speranza.

Il mio ringraziare nasce dai piccoli grandi gesti che si scorgono al carcere: lo sguardo di Beppe la domenica, Maria che prepara la merenda dopo la messa, la cura con cui Nina si occupa del museo e svolge il complesso ruolo di guida per le scuole, insieme a tanti altri volontari.

Il mio ringraziare nasce per l'affetto e la fiducia che tutte queste persone mi hanno donato.

Il mio ringraziare nasce per Padre Ruggero, che mi ha permesso di conoscere i suoi condannati a morte: inizialmente erano solo foto storiche, nomi su pagine, ma oggi li sento vicini, quasi presenti accanto a me, perché nelle loro storie riconosco la nostra storia.

La storia di persone che, nonostante tutto, ma davvero tutto, non smettono di sperare.

Perché sperare è un gesto rivoluzionario: non è semplice ottimismo, è credere che quello che stai facendo abbia significato, comunque vada.