



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
interateneo con l'Università degli Studi di Udine

XXXII CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE AMBIENTALE E ARCHITETTURA

PO FRIULI VENEZIA GIULIA - FONDO SOCIALE EUROPEO 2014/2020

**RICERCA E SVILUPPO DI NUOVI SISTEMI PER
L'ACQUISIZIONE E LA DIVULGAZIONE INTERATTIVA
CON TECNOLOGIE DIGITALI DEL PATRIMONIO
ARCHITETTONICO DELL'AREA ISONTINA**

ICAR/17 Disegno/08b – Architettura

Dottoranda:
DOTT. ARCH. PAOLA COCHELLI

Coordinatore:
PROF. ALBERTO SDEGNO
Supervisore:
PROF. GIUSEPPE AMORUSO
Co-Supervisore:
PROF. ALBERTO BEINAT

ANNO ACCADEMICO 2018/2019



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
interateneo con l'Università degli Studi di Udine

XXXII CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE AMBIENTALE E ARCHITETTURA

PO FRIULI VENEZIA GIULIA - FONDO SOCIALE EUROPEO 2014/2020

**RICERCA E SVILUPPO DI NUOVI SISTEMI PER
L'ACQUISIZIONE E LA DIVULGAZIONE INTERATTIVA
CON TECNOLOGIE DIGITALI DEL PATRIMONIO
ARCHITETTONICO DELL'AREA ISONTINA**

ICAR/17 Disegno/08b – Architettura

Dottoranda:
DOTT. ARCH. PAOLA COCELLI

Coordinatore:
PROF. ALBERTO SDEGNO

Supervisore:
PROF. GIUSEPPE AMORUSO

Co-Supervisore:
PROF. ALBERTO BEINAT

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

Indice

	Obiettivi	7
1.	Nuove tecnologie per il patrimonio digitale	9
1.1	Visione stereoscopica	10
1.2	Percezione 3D e Realtà Virtuale (VR)	18
1.3	Dispositivi di Realtà Aumentata (AR)	24
1.4	Fruizione interattiva e camera immersiva	28
1.5	Mixed Reality (MR)	31
2.	Gorizia e il suo Castello. Analisi, evoluzione storica e ricostruzione 3D	37
2.1	Stato di fatto e condizioni attuali di utilizzo	37
2.2	Castello: analisi e ricostruzione grafica delle fasi di sviluppo storico	41
2.3	Rilievo architettonico	56
2.3.1	Problematiche di misura e rappresentazione	58
2.3.2	Applicazione di tecnologie di laser scanner	58
2.3.3	Applicazione della tecnologia di scansione con microfotografie	69
2.3.4	Rilievo 3D attraverso fotomodellazione SfM	71
2.4	Ricostruzione virtuale del modello architettonico master	75
2.5	Discretizzazione del modello	79
3.	Trasformare l'esperienza del patrimonio. La rappresentazione interattiva per l'accesso senza barriere alla conoscenza	83
3.1	Rappresentare l'esperienza del patrimonio	83
3.2	Ambienti di navigazione immersiva ed interattiva per il patrimonio culturale	91
3.3	Esperienza immersiva nel Castello di Gorizia e nella sua storia	94
4.	Conclusioni	119
5.	Bibliografia	121

Introduzione

Questa tesi di dottorato è l'atto finale di un percorso di ricerca triennale nato nel Dipartimento di Ingegneria e Architettura, e nello specifico nel settore disciplinare Rappresentazione dell'Architettura finanziato da una borsa di studio FSE della Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia all'interno del XXXII ciclo del dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura dell'Università degli Studi di Trieste in interateneo con l'Università degli Studi di Udine.

La ricerca di dottorato ha indagato il ruolo delle tecnologie emergenti per la comunicazione e la divulgazione dei beni culturali e la verifica di procedure per l'acquisizione e la divulgazione interattiva con applicazioni digitali per il patrimonio architettonico dell'area isontina. Nonostante il tema delle nuove tecnologie sia oggi predominante nella società contemporanea, le applicazioni e le strumentazioni oggi disponibili hanno necessità di essere diffuse e sperimentate affinché siano ampiamente accessibili ed utilizzabili. Inoltre la notevole quantità di dati, l'interoperabilità informatica dei contenuti e la complessità geometrica del patrimonio necessita la definizione di interfacce avanzate e la validazione della loro reale fruibilità attraverso test sperimentali.

La ricerca pertanto ha indagato applicazioni di trasformazione digitale e simulazione dell'esperienza al caso del Castello di Gorizia, monumento emblematico per tutta l'area isontina. Trasformare l'esperienza del patrimonio vuol dire studiare e ricercare soluzioni di accesso alla conoscenza attraverso l'utilizzo di tecnologie di visione e navigazione immersiva per ridurre il gap generazionale. La ricostruzione 3D del Castello ha permesso di gestire ed integrare in un unico ambiente una notevole mole di dati proveniente da scansione, fotogrammetria e ricostruzione parametrica costituendo il modello di riferimento per la successiva divulgazione e rilascio.

1. Nuove tecnologie per il patrimonio digitale

Scrivono Nicholas Negroponte¹ “La tecnologia ormai fa parte della vita quotidiana delle persone, si è avuta una grossa diffusione in quanto la tecnologia che abbiamo a disposizione ha un continuo rapido sviluppo. Si hanno dispositivi sempre più compatti ma con un potere di calcolo sempre maggiore.” Questo fenomeno lo spiega bene la prima Legge di Moore che dice “la complessità di un microcircuito, misurata ad esempio tramite il numero di transistor per chip, raddoppia ogni 12 mesi (e quadruplica quindi ogni 2 anni)”, questa ipotesi Gordon Moore² la fece nel 1965 e 10 anni dopo si rilevò corretta. Viene elaborata nella sua forma definitiva alla fine degli anni 80 indicando come tempo ipotetico di incremento di capacità della tecnologia in 18 mesi, sicuramente nell’ultimo decennio si ha avuto una evoluzione nella progettazione di questa tecnologia passando da un processore che lavora singolarmente a più processori che lavorano in parallelo in modo da dare la potenza di calcolo necessaria.

L’incremento progressivo nella capacità di calcolo ha portato ad uno sviluppo nei programmi, nelle applicazioni e negli strumenti a disposizione per la computer grafica, campo generale nel quale si inquadra la ricerca proposta, indirizzata alla conoscenza e alla divulgazione attraverso le tecnologie dei beni architettonici, culturali e nello sviluppo di modalità per trasformare l’esperienza e permettere una maggiore partecipazione e apprendimento agli utenti.

Per introdurre l’universo del patrimonio digitale e della *digital transformation*, che oggi è nell’agenda di tutti i settori produttivi, è necessario riprendere le parole scritte dal professor Riccardo Migliari, il quale ha definito in modo molto eloquente ed esaustivo il rapporto tra il mondo della rappresentazione architettonica e delle nuove tecnologie in particolar modo con la realtà virtuale. Nel 2008 introduce la definizione di “prospettiva dinamica interattiva”³ spiegando che questa modalità esplorativa, rispetto a quella tradizionale che offre un unico punto di vista predefinito dal disegnatore, offre infiniti punti di vista scelti da chi esplora lo spazio, senza avere un limite al campo visivo, poiché il quadro di rappresentazione cambia con il movimento del centro di proiezione da parte del fruitore, questo limite è invece presente nella prospettiva statica perché viene delimitata in uno spazio, cioè la superficie sulla quale viene disegnata che può essere un foglio, una tela o una parete.

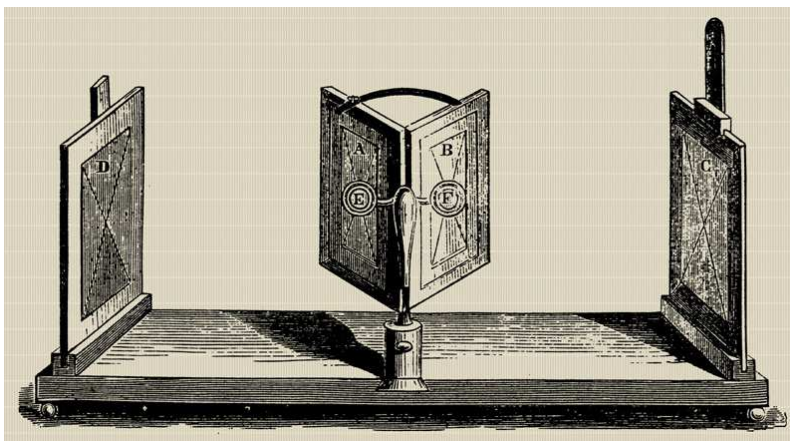
1.1 Visione stereoscopica

La visione tridimensionale del mondo che circonda l'uomo ha da sempre suscitato interesse. Molti studiosi e artisti si sono occupati della visione binoculare come ad esempio Euclide e Leonardo Da Vinci che ne parla nei suoi appunti, poi confluiti nel *Trattato della pittura*, o nel secolo successivo da Giovanni Battista della Porta e Jacopo Chimenti che affrontarono i primi esperimenti di disegni "stereografici".

Ma prima di proseguire definiamo cos'è la stereoscopia: è una tecnica che permette - attraverso disegni, fotografie e filmati - di dare allo spettatore l'illusione della tridimensionalità, tale tecnica riprende la visione binoculare del sistema visivo umano. Trova il suo impiego in svariati campi, dallo studio scientifico all'intrattenimento come ad esempio nel cinema, nella televisione e con lo sviluppo dell'informatica troviamo la visione stereoscopica utilizzata nella telefonia mobile e nei videogiochi.

La stereoscopia fu studiata dall'inglese Charles Wheatstone⁴ nel 1832, quando costruì uno strumento chiamato *Stereoscope*, brevettato nel 1838, composto da specchi e prismi che permettevano di vedere delle coppie di disegni che si differenziavano di poco nel punto di vista. Con la diffusione della fotografia Wheatstone intravede nuovi sviluppi del suo strumento e dopo aver conosciuto l'inventore e fotografo William Fox Talbot,⁵ ideatore del procedimento fotografico che permette di avere delle immagini al negativo, gli commissiona gli studi sulla "stereofotografia". C'è da dire che lo stereoscopio presentato da Wheatstone alla Royal Society di Londra non riscontrò molto successo in quanto era considerato ingombrante e complesso nel suo uso.

Più successo ebbe lo stereoscopio costruito dall'inglese David

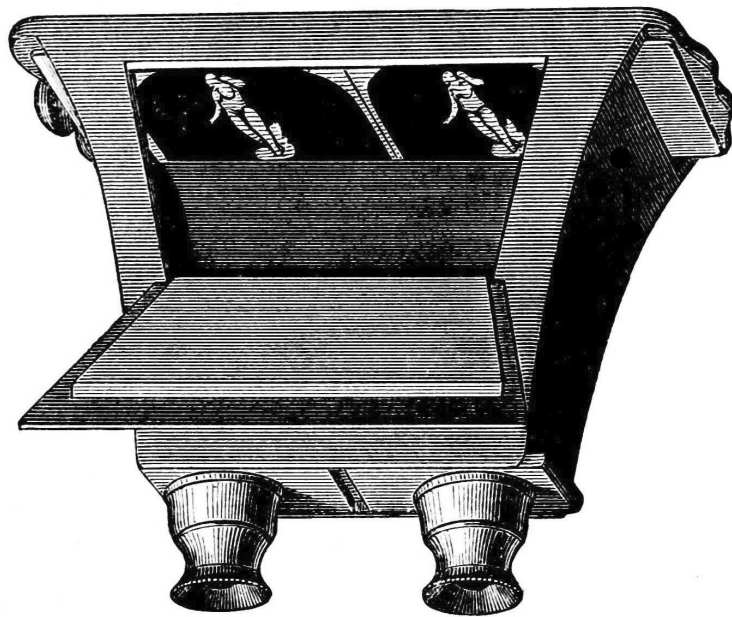


1.1_Disegno dello stereoscopio ideato da Charles Wheatstone nel 1832. Possiamo notare la posizione degli occhi contrassegnata con le lettere E-F, gli specchi (A-B) dove venivano riflesse le immagini indicate con le lettere D-C.

Brewster⁶ nel 1849, che realizzò una sorta di binocolo leggero e maneggevole dotato di specchi attraverso i quali guardare una coppia di fotografie realizzate con due fotocamere affiancate.

Si dovette aspettare solamente tre anni perché un ottico di Manchester inventasse la fotocamera binoculare conosciuta anche come fotocamera stereoscopica. Prevede due obiettivi paralleli posti a un'interasse di 6,35 cm, quanto la distanza degli occhi umani.⁷

Nel proseguo del XIX secolo e visto l'interesse suscitato da questo oggetto nella borghesia europea e americana, molte ditte



1.2_Raffigurazione dello stereoscopio portatile inventato da David Brewster. Si possono notare le dimensioni ridotte rispetto a quello visto precedentemente e si vede la diversa posizione delle immagini.



1.3_Macchina fotografica stereoscopica, 1850 circa.

inglesi, francesi e americane producono in serie lo stereoscopio di Brewster. In questo tempo si ha una evoluzione delle immagini utilizzate, si passa da fotografie in bianco e nero su cartoncino, a fotografie colorate a mano stampate su carta più leggera, poi a stampe fotografiche su lastre di vetro che vengono colorate per dare maggiore profondità alla visione.

Nel XX secolo si sono sviluppati sistemi che utilizzavano diapositive su pellicola fotografica come ad esempio il Tru-Vue⁸ e il View Master che dal 1939 viene commercializzato prima dalla Sawyer's e poi dalla Mattel (dal 1997 ad ora), presenta un visore a mascherina in plastica dove si possono utilizzare dischetti di cartoncino a supporto di 7 coppie di diapositive a colori da 16mm, i quali permettono di vedere per la prima volta dei panorami realistici a colori.

Nel nostro secolo invece si ha lo sviluppo di tutti quei sistemi digitali che permettono di visualizzare immagini stereoscopiche informatiche, infatti anche il View Master dal 2016 è passato al digitale con un visore di realtà virtuale che utilizza al suo interno lo smartphone, i contenuti possono essere attivati anche utilizzando la realtà aumentata.

Gli strumenti presentati fino ad ora permettono una visione e immersione personale, cioè sfruttabile da una persona sola alla volta.

Per coinvolgere un gruppo di persone contemporaneamente a metà del XX secolo si lavora al Cinerama.

Il nome deriva da cinema e panorama. È un sistema di proiezione cinematografica che prevede uno schermo curvo di grandi dimensioni con un rapporto di 3:1 tra larghezza e altezza (raggiunge le dimensioni di 28 m per 10 m) con una apertura di visuale orizzontale di 146° e verticale di 55 (per riprendere l'ampiezza del campo visivo umano). Su questo schermo vengono proiettati contemporaneamente tre filmati con proiettori disposti

1.4_Edizione digitale del View Master. All'interno di questo visore si inserisce un telefono, alcune applicazioni si possono attivare inquadrando un dischetto che richiama quello che veniva inserito nei primi View Master.

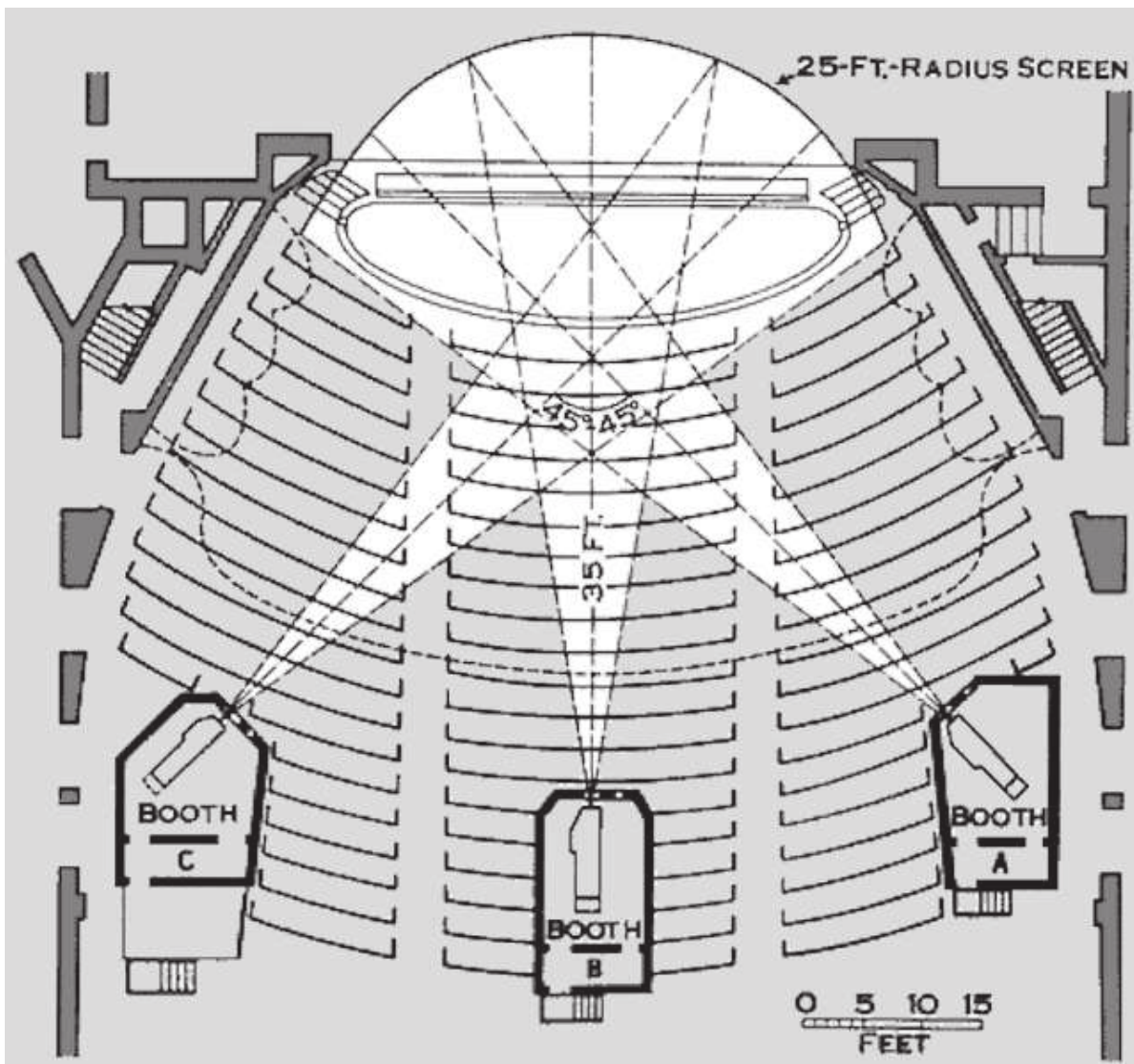


a semicerchio e sincronizzati tra loro. Le immagini replicate venivano riprese da tre cineprese disposte nelle stesse posizioni dei videoproiettori. Questo sistema fu brevettato nel 1946 da Fred Waller ma fu reso commerciale dal regista Merian C. Cooper⁹, regista di King Kong. Il primo film proiettato con questo sistema fu *This is Cinerama*¹⁰ di Lowell Thomas nel 1952 a New York e successivamente a Londra, Milano e Roma.

Da ricordare anche che prima di brevettare questo sistema Fred Waller aveva realizzato un sistema simile, con cinque cineprese, per l'aviazione americana che aveva chiamato *Gunnery Trainer*, con il quale gli avieri statunitensi si allenavano in modo da migliorare l'efficacia degli attacchi durante la seconda guerra mondiale.

Un'evoluzione di questa tecnologia è il cinema Imax e il suo esemplare più conosciuto a livello europeo è la Geode nel Parc de la Villette a Parigi. La Geode inaugurata nel 1985, ospita uno

1.5_Schema della sala di un Cinerama con la posizione dello schermo e dei tre proiettori.

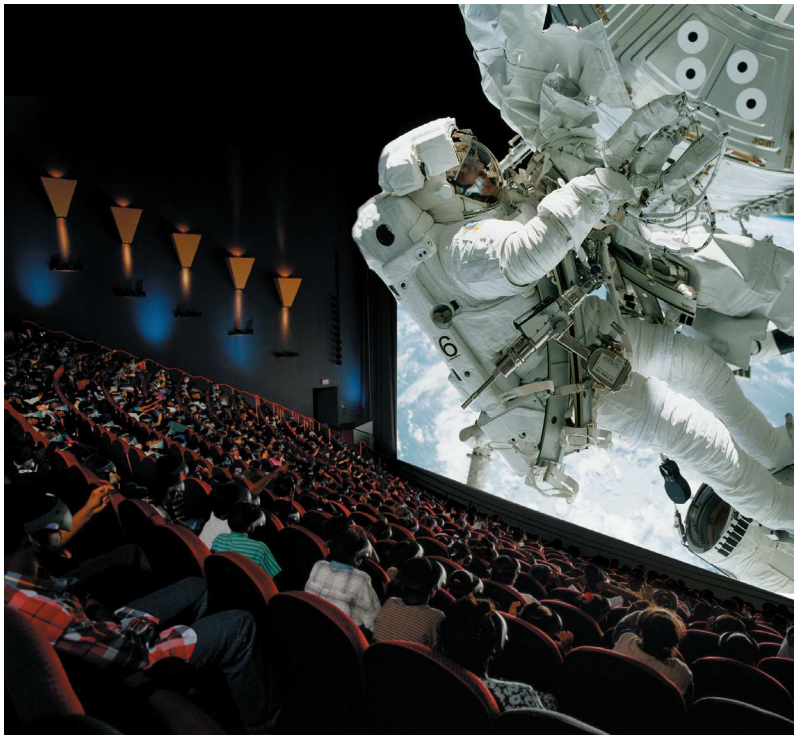


schermo sferico sul quale vengono proiettati i filmati realizzati con la tecnologia OmniMax.

Il primo sistema Imax, che riprende il concetto del Georama,¹¹ viene inventato da Graeme Ferguson, Roman Kroitor e Robert Kerr e presentato nel 1967 all'Expo di Montreal.

Il sistema presenta tre tipi di varianti: Imax, Imax 3D e l'Imax Dome-OmniMax. Questa tecnologia si basa sul fatto che lo schermo panoramico favorisce una complessità nell'impostazione della scena sia in profondità che nel senso laterale, garantisce una ripresa densa di particolare grazie l'utilizzo di una pellicola con dimensioni maggiori (70mm) rispetto a quelle in uso normalmente (35mm) e facendo scorrere la pellicola orizzontalmente invece che in verticale come nelle classiche proiezioni. Questo tipo di proiezione si adatta meglio all'occhio umano che, grazie all'ampiezza del suo campo visivo in orizzontale e al continuo movimento dell'occhio, riesce ad avere un campo d'azione di 180° in orizzontale e 90° in quello verticale.

Le prime due tipologie di Imax presentate in precedenza offrono uno schermo che può raggiungere i 27 metri di larghezza e i 20 di altezza. La tecnologia Imax 3D utilizza una camera con due lenti separate per ricreare l'occhio destro e l'occhio sinistro, le lenti sono distanti 64mm (come già ricordato, distanza media tra gli occhi umani), la registrazione avviene su due pellicole separate. La proiezione contemporanea delle due pellicole grazie all'uso di lenti polarizzate,¹² danno allo spettatore, che indossa degli occhiali, l'illusione della tridimensionalità anche su uno schermo



1.6_Visione con occhiali stereoscopici all'interno di una sala Imax 3D.



1.7_Visione all'interno di una sala Imax Dome-OmniMax.

bidimensionale. La terza tipologia, l'Imax Dome-OmniMax, presenta una cupola di ventisette metri di diametro per un totale di mille metri quadrati di superficie, la progettazione della sala consente a ogni spettatore la migliore situazione visiva e sonora. Per la realizzazione dei filmati da proiettare su questo tipo di schermo bisogna utilizzare una camera da presa che ha una lente a occhio di pesce che distorce l'immagine a 180° prima di imprimerla sulla pellicola. Lo stesso tipo di lente è posizionata sul proiettore.

Nel 2008 l'Imax ha deciso di passare dalla pellicola al formato digitale.

Tutt'ora vengono girati film (Avengers: Endgame, 2019) e inaugurate delle sale cinematografiche (Imax Roma, Aprile 2019) con questa tecnologia.

Nello stesso periodo del Cinerama viene sviluppato il Sensorama, una macchina considerata il primo prototipo di tecnologia immersiva, viene progettato nel 1957 e brevettato nel 1962 da Morton Heilig,¹³ che già nel 1955 illustrò la sua visione di un apparato capace di stimolare più sensi.

Il suo inventore definì questo nuovo sistema "teatro dell'esperienza" e venne creato in un unico prototipo.

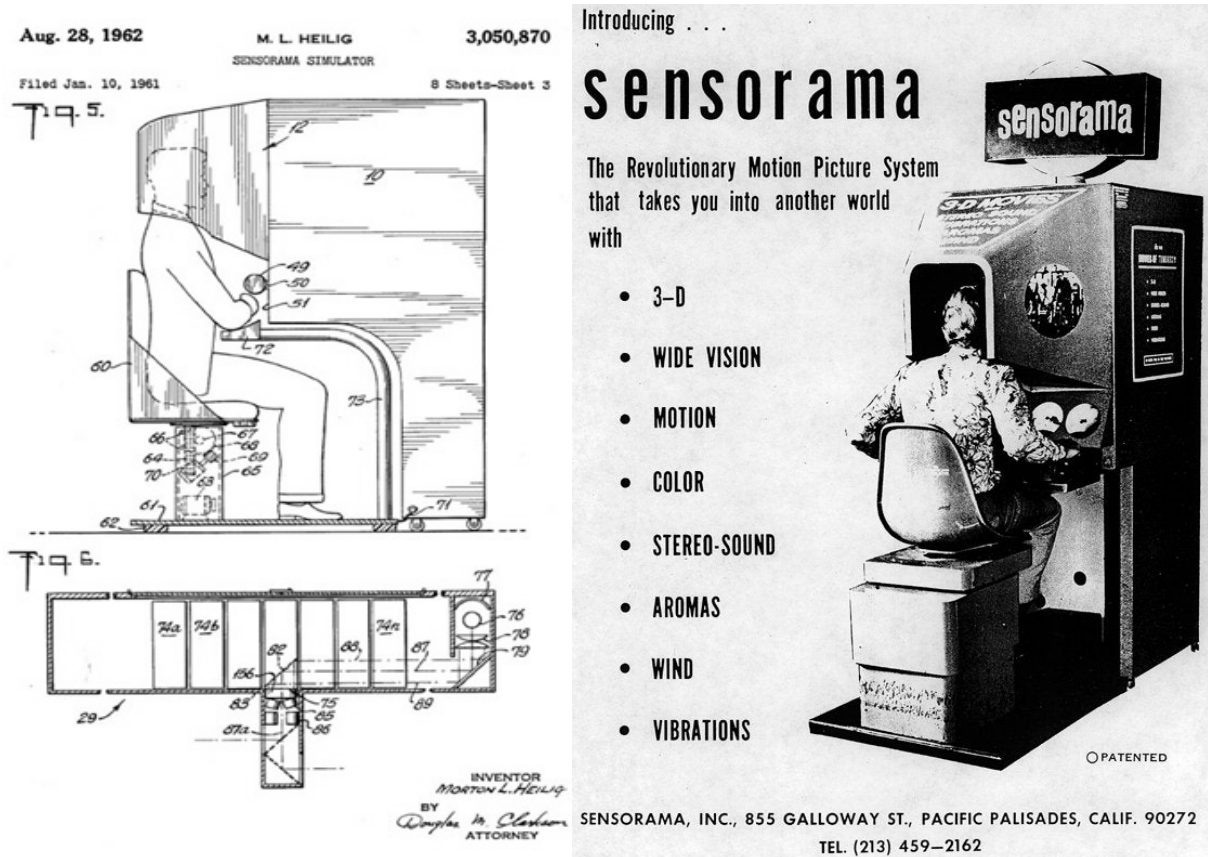
Il Sensorama era un dispositivo meccanico, che assomigliava al cabinato della sala giochi, che includeva uno schermo stereoscopico a colori, dei ventilatori che simulavano il vento sul volto, diffusori di aromi e odori, impianto audio stereofonico, una seduta dotata di contrappesi e leve che ricreavano l'ondeggiamento del corpo e un manubrio dove si appoggiavano le mani per rivivere le sensazioni tattili. Tutti

questi dispositivi venivano attivati al momento opportuno per ricreare perfettamente, attraverso tutti i sensi, l'esperienza che lo spettatore stava vivendo visualmente sullo schermo attraverso un filmato. Il progetto era considerato troppo all'avanguardia tanto da non riuscire a suscitare interesse in investitori per continuare la progettazione e per brevettarlo. Howard Rheingold,¹⁴ che lo ha provato 40 anni dopo la sua creazione, lo descrive come una cosa coinvolgente e impressionante per l'epoca.¹⁵

Oltre al sistema del Sensorama, Heilig negli anni 50 lavora a un progetto di visore portatile, noto come *head mounted display* (HMD).¹⁶ Assomigliava molto a quelli sviluppati negli ultimi anni e avrebbe dovuto usare lenti con angoli di visione orizzontale e verticale di 140°, includeva delle cuffie stereo e un foro da cui far uscire dell'aria per simulare il vento. Di questo progetto non fu mai costruito un prototipo ma ottenne il brevetto nel 1960.

Nel 2017 in Giappone è stato ripresentato al pubblico una cabina che riprende in tutto e per tutto il Sensorama sviluppato cinquant'anni prima. All'interno della cabina si trova una console di videogiochi e un visore per la visione virtuale immersiva, l'immersività non è solamente visiva ma, come il Sensorama, presenta una tecnologia che sprigiona odori, alza e abbassa la

1.8_Schema di progetto del Sensorama e la sua pubblicità.





1.9_Morton Heiling seduto al Sensorama.

temperatura all'interno della cabina fa piovere e altre esperienze sensoriali a seconda del gioco che si sceglie di sperimentare.

Dopo questa prima idea di Heilig si può considerare il primo visore di realtà virtuale quello inventato dall'informatico Ivan Sutherland¹⁷ con l'aiuto del suo allievo Bob Sproull¹⁸ nel 1968 presso l'Università dello Utah. È il primo dispositivo *head-mounted display*¹⁹, presentava un visore composto da due tubi a raggi catodici, uno per occhio, ed elementi ottici per proiettare le immagini tridimensionali generate dal computer che venivano sovrapposte a oggetti reali, quasi una sorta di realtà aumentata più che virtuale. Il dispositivo era così pesante che era sospeso su un braccio che scendeva dal soffitto, questo sistema ispirò il nome di "la Spada di Damocle", per riprendere il riferimento storico di Damocle e Dionigi I e della spada che incombeva sulla testa del primo, durante un banchetto, per ricordargli che la sua nuova posizione di tiranno lo esponeva continuamente a minacce per la sua incolumità.

Il sistema era molto basilico sia a livello di realismo che di interfaccia utente. L'utilizzatore poteva vedere un cubo in modalità *wireframe* sovrapposto a ciò che stava vedendo dal vero. La prospettiva del cubo cambiava a seconda dei movimenti della testa dell'utente che venivano tracciati dal braccio meccanico del dispositivo.

Il secondo modello costruito era molto più leggero da renderlo portatile e usava dei trasmettitori a ultrasuoni per tracciare il movimento della testa dell'utilizzatore in modo da inviare i dati relativi alla direzione dello sguardo al computer che ridisegnava in tempo reale la scena dall'esatto punto di vista.



1.10_Spada di Damocle inventata da Sutherland e dettaglio del dispositivo indossabile.

1.2 Percezione 3d e realtà virtuale (VR)

La realtà virtuale è una realtà simulata, un ambiente tridimensionale ricostruito che può essere esplorato e con il quale si può interagire usando dispositivi informatici che proiettano uno scenario realistico da sembrare vero a chi li prova. Indossando i visori ci si immerge completamente in una realtà parallela, l'immersione è data dalla visione stereoscopica.

Il termine realtà virtuale viene usato per la prima volta Jaron Lanier²⁰ nel 1987.

La realtà virtuale trova impiego in diversi ambiti. Nata per l'utilizzo in ambito militare e nel campo scientifico medicale, successivamente si è diffusa in ambito commerciale, nei videogiochi e nel cinema, negli ultimi anni il suo impiego nel

settore delle *creative industries* e nel campo culturale, divulgativo, archeologico e turistico è divenuto ormai inevitabile.

È possibile suddividere l'evoluzione della realtà virtuale in tre grandi ere, la prima è quella di invenzione che abbiamo descritto nei capitoli precedenti. La seconda è una breve parentesi negli anni 90 in cui Jonathan Waldern²¹ con un consistente contributo dall'IBM trasforma il sistema Amiga in un sistema Virtual Reality e successivamente fonda la società W. Industries' nella quale sviluppa e immette nel mercato i sistemi *Virtuality* cioè dei sistemi di realtà virtuale per le sale giochi. La sua idea fu quella di inserire della tecnologia della NASA in quella dei videogiochi. Questi sistemi offrivano una qualità dell'esperienza sicuramente ora ben superata anche dai sistemi più economici (il visore aveva due schermi con risoluzione di 276x372 px ciascuno). Waldern dopo averne venduti a bizzeffe in un paio d'anni sparì dal mercato.

La terza era della realtà virtuale è quella che si sta sviluppando a partire dagli ultimi dieci anni.

Gli apparecchi a disposizione per la visione virtuale di ambienti tridimensionali oggi giorno sono molteplici, di seguito illustreremo i diversi dispositivi disponibili sul mercato con le rispettive caratteristiche. Si possono suddividere in due macro categorie a seconda di come si può interagire con l'esperienza. I dispositivi che offrono una *virtual reality computer generated* e quelli che utilizzano la *virtual reality non interactiv*.

La VR CG (*computer generated*) si basa su modelli digitali ricostruiti al computer e permette di esplorarli liberamente. Con questi modelli e con gli oggetti si ha la possibilità di interagire, mentre la VR NI (non *interactive*) o a 360 gradi è una realtà virtuale che si basa su fotografie e video scattate e girati a 360 gradi, di luoghi reali o ricostruiti in digitale. La visione è iperrealistica ma c'è una limitazione fisica causata dall'origine dei file che riduce il movimento della testa a destra/sinistra e alto/basso, si continuerà a trovarsi sempre sulla stessa posizione senza consapevolezza in quanto le fotografie e i video sono realizzati in soggettiva e la visione sarà stereoscopica. In alcuni casi è permesso di muoversi da una fotografia o video a un'altra dando così la sensazione di movimento ma su un percorso predefinito. Questo tipo di realtà virtuale viene fruito principalmente da seduti.

La differenza di interazione e l'esperienza dell'utente dipendono da quale dispositivo viene impiegato.

Lo studio parte dalla presentazione dei dispositivi che vengono offerti oggi sul mercato differenziandoli principalmente in tre categorie, quelli che per il loro funzionamento fruttano la potenza di un computer, quelli collegati a console per il videogioco ed infine quelli che utilizzano uno smartphone.

Nella tabella sotto riportata si specificano alcuni termini utili alla comprensione del funzionamento dei dispositivi per la realtà virtuale.

Termine	Descrizione	Perché è importante
Fotogrammi al secondo (FPS)	Frequenza alla quale un sistema può visualizzare immagini consecutive	Senza un frame rate elevato e costante (superiore a 60FPS), il movimento non sembrerà corretto e si potrebbe soffrire di chinetosi.
Campo visivo	L'angolo del mondo osservabile che può essere visto	Se l'angolo di visuale è troppo stretto, si fanno rotazioni innaturali della testa.
Gradi di libertà (DoF)	Il numero di direzioni in cui l'utente si può spostare all'interno del mondo virtuale. Avanti, dietro, alto/basso e la rotazione della testa.	Più <i>Degrees of Freedom</i> ci consentono di muoversi più naturalmente in VR. Si possono avere massimo 6 DoF.
Latenza	Il tempo impiegato da un sistema per reagire e rispondere ai movimenti e ai comandi impartiti	La latenza è fondamentale quando si tratta della presenza all'interno della realtà virtuale: se il sistema non risponde in modo immediato l'immersione nel mondo virtuale non sembra reale.

Il primo dispositivo analizzato è l'*Oculus Rift*, è il primo visore di realtà virtuale che riprende e rilancia una tecnologia già esistente. Il kit contiene un visore, due sensori che tracciano l'utente per allinearli con l'ambiente virtuale e due controller. Il visore permette di regolare la distanza inter-pupillare in modo da calibrare le lenti in base agli occhi dell'utente, è possibile indossarlo anche con gli occhiali. *Oculus* è uno di quei dispositivi che non è indipendente e per funzionare ha bisogno di un computer, questo permette di avere maggiore potenza a disposizione ma ha la difficoltà di avere un cavo collegato al pc che intralcia il movimento.

Per poter funzionare al meglio ha bisogno di un computer robusto con delle specifiche tecniche molto dettagliate e un'ottima scheda grafica. Le ultime versioni del visore *Oculus Rift* che si trovano in commercio presentano all'interno della scocca del casco 20 sensori ad infrarossi che abbinati a una telecamera posta davanti all'utente sono in grado di tracciare gli spostamenti nelle tre direzioni, permette 6 gradi di libertà (DoF), dando così la possibilità all'utilizzatore di spostarsi contemporaneamente nel mondo reale e in quello virtuale. Questo rappresenta una rilevante novità rispetto alle prime versioni di questo dispositivo, che invece, poteva essere utilizzato solamente da fermi e quindi portava a problemi di *motion sickness* (chinetosi) a chi lo indossava. Il problema della nausea indotta dall'utilizzo nelle ultime versioni è stato migliorato, anche grazie utilizzando due display OLED²²



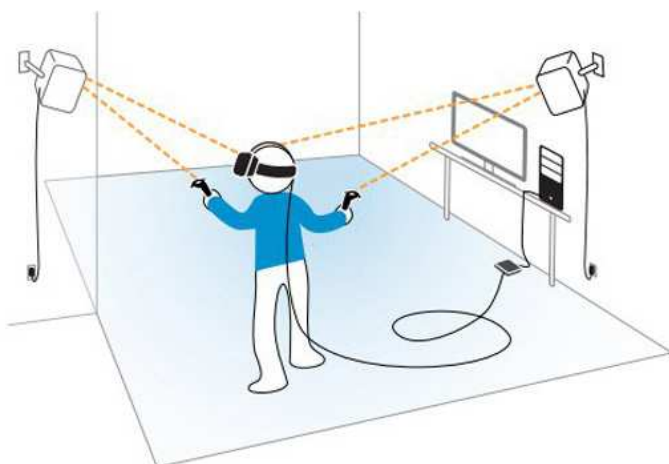
1.11_Casco e controller del sistema per la realtà virtuale Oculus Rift.

con risoluzione 1280x1440 per occhio per un totale di 2560x1440, invece che i tradizionali schermi LCD.²³ Il campo visivo di questo visore si aggira attorno a 110°.

L'ultimo nato tra i caschi di realtà virtuale ad alto livello è il sistema HTC Vive. In questo caso, oltre al visore, è dotato di due sensori da posizionare in diagonale a parete a massimo 5 m di distanza, questi permettono di tracciare i movimenti nell'ambiente reale e trasportarli nell'ambiente virtuale. L'importante è avere uno spazio ampio e senza ostacoli attorno. Supporta un ambiente massimo di azione di 4,6x4,6 m. Anche in questo visore è possibile regolare la distanza interpupillare, in più consente di regolare la distanza delle lenti dagli occhi in modo da offrire il massimo comfort a chi porta gli occhiali. Nella confezione si trovano due controller che vengono tracciati dai sensori per garantire, anche in questo caso, i sei gradi di libertà.

Attualmente l'azienda offre tre tipi di caschi, il primo, che è già sul mercato da diversi anni, monta due schermi AMOLED con risoluzione 1080x1200 (con una risoluzione totale di 2160x1200), e viene collegato al computer attraverso un cavo per la trasmissione dei dati.

Gli altri due, uno già in commercio (HTC VIVE Pro) e l'altro in prossima uscita (HTC VIVE Cosmos), montano all'interno del casco sempre due schermi AMOLED ma con risoluzione maggiore, 1440x1600 con una combinazione totale di 2880x1600, presentano



1.12_Schematizzazione dell'area di movimento e del dispositivo HTC Vive.

delle telecamere per poter vedere il mondo reale senza togliere il casco, infine quello in prossima uscita non dovrà essere collegato fisicamente al computer attraverso un cavo, quindi si avrà molta più libertà di movimento rimanendo sempre all'interno dell'area tracciata e monitorata dai sensori. Come nel caso dell'Oculus Rift il sistema funziona bene se si ha a disposizione un pc con elevate prestazioni.

L'Htc Vive, rispetto agli altri dispositivi, ha proposto la libertà di movimento nel mondo reale per muoversi all'interno del mondo virtuale, sin dalle prime edizioni.²⁴

Il terzo dispositivo è ibrido ponendosi come via di mezzo tra i modelli visti in precedenza e quelli che saranno presentati dopo da utilizzare con gli smartphone. Si trova anche nella via di mezzo per prezzo e qualità dell'immagine. Si tratta del casco *PlayStation VR* e si appoggia all'unico hardware con cui è compatibile cioè alla console per videogiochi *PlayStation 4*. Gli schermi montati all'interno del casco arrivano a una risoluzione totale di 1920x1080 vale a dire 960x1080 per occhio con un angolo di campo di 100 gradi. Il dispositivo viene collegato direttamente alla console alla quale viene collegata anche la *PlayStation Camera* per farlo funzionare. La cosa interessante, di questi tre dispositivi appena descritti, è che il sistema mentre trasmette al visore VR, continua a mandare il segnale anche al televisore o allo schermo del computer in modo da far vedere quello che vede l'utente nel casco anche a chi non lo indossa, naturalmente chi non indossa il casco non può godere della visione stereoscopica e dell'immersività.

I successivi dispositivi che andremo a descrivere fanno parte di quella categoria che utilizzano come dispositivo principale

1.13_ Qui si può vedere come altre persone possono vedere, non con visione stereoscopica, quello che l'utente sta facendo e vedendo nella realtà virtuale.



di attivazione dei contenuti 3D degli smartphone e, rispetto ai dispositivi appena visti, permettono solamente tre gradi di libertà cioè quelli di rotazione.

Il primo tra questi dispositivi e il più economico è il *Google Cardboard*, è composto da una scatola di cartone con due lenti in plastica per la visione stereoscopica. Funziona con delle applicazioni scaricate sullo smartphone che viene inserito all'interno della scatola. Vista la semplicità del dispositivo le sue funzioni sono limitate come la qualità dei prodotti che si possono fruire.

La tipologia del *Samsung Gear Vr* è simile a quello del *Cardboard*, anche in questo caso troviamo delle lenti che mostrano ciò che appare sullo schermo dello smartphone, ma notiamo una qualità costruttiva migliore, il dispositivo è realizzato in plastica, monta un accelerometro, uno giroscopio e un sensore di prossimità che permette al visore di riconoscere i movimenti della testa con precisione. L'angolo del campo visivo è di 110 gradi, come quello umano. Il suo uso è limitato con i telefoni compatibili e la qualità della visione dipende dal dispositivo che si utilizza. Nelle ultime versioni la Samsung ha introdotto un piccolo controller che consente di scegliere i contenuti da riprodurre anche indossando



1.14_ Google Cardboard, di facile reperibilità e montaggio.



1.15_Google Daydream View.

il visore. Il dispositivo funziona a batterie.

L'ultimo dispositivo per la visione della realtà virtuale che prenderemo in considerazione è il *Google Daydream View*, è molto simile in tutte le sue caratteristiche a quello precedente ma il visore è compatibile con tutti i dispositivi Android. L'esperienza virtuale dipende dalla potenza dell'hardware. Da sottolineare che entrambi questi dispositivi non hanno potenza di calcolo e lasciano fare il lavoro allo smartphone che viene connesso. Anche questo dispositivo viene azionato con un controller che può essere riposto all'interno del casco quando non viene utilizzato. Funziona attraverso la ricarica via porta Usb.

1.3 Dispositivi di realtà aumentata (AR)

I dispositivi di realtà aumentata negli ultimi periodi hanno avuto un'ampia diffusione grazie alla capacità di connettersi in modo semplice con gli altri sistemi e di reperire così informazioni e dati sempre aggiornati.

Il termine di realtà aumentata viene coniato da Thomas Caudell²⁵ nel 1992 quando ideò un sistema di avanzata tecnologia digitale per l'installazione di cavi elettrici negli aerei. Negli anni successivi questa tecnologia viene studiata e implementata in molte università e laboratori. Nel 2009 questo tipo di applicazione ha iniziato a diffondersi e spopolare in rete.

Si tratta di una tecnologia digitale che arricchisce, potenzia e "aumenta" la nostra percezione del mondo reale con una serie di contenuti digitali che ci permettono di approfondire la conoscenza di ciò che ci circonda.

La tecnologia AR riconosce i piani e gli oggetti visti dalla telecamera del dispositivo e crea oggetti in grafica 3D, li



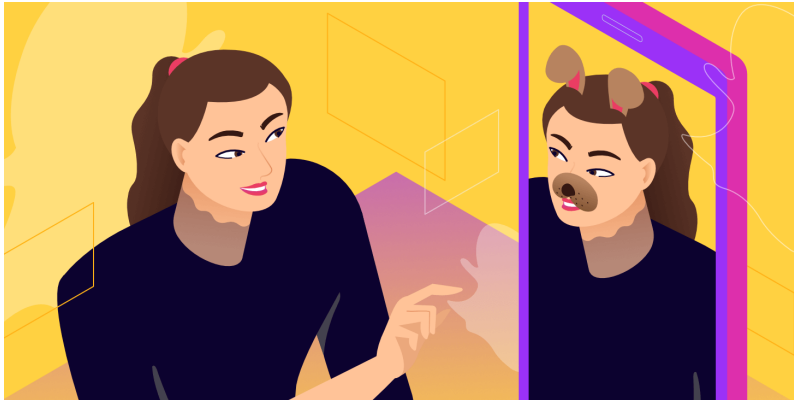
1.16_Schermo di uno smartphone con l'applicazione Pokemon go attiva.

orienta come apparirebbero dal punto di vista della telecamera, sovrapponendo infine le immagini generate a quelle del mondo reale.

Nel 2016 a rendere famosa questo tipo di visualizzazione è stata l'applicazione Pokemon Go, che per la prima volta ha dimostrato al grande pubblico la potenzialità di questa tecnologia. Adesso si sta diffondendo nel mondo commerciale, tanto che molti marchi la utilizza per far vedere al cliente la varietà delle opzioni, ad esempio esiste un'applicazione del marchio svedese Ikea; viene utilizzato anche nel mondo della divulgazione culturale.

La realtà aumentata parte da un dispositivo dotato di videocamera – smartphone, tablet o *wearable (smart glass)* – su cui è stato caricato un software di AR. Quando l'utente punta la telecamera del dispositivo e guarda un oggetto o un codice attivatore (QR Code), il software lo riconosce tramite una tecnologia di visione computerizzata, che analizza il flusso delle immagini, l'applicazione scarica le informazioni sull'oggetto dalla rete. La differenza fondamentale, rispetto alle informazioni scaricate in una pagina internet, è che le informazioni AR vengono presentate in un'esperienza 3D sovrapposta all'oggetto anziché su una pagina bidimensionale. Quello che l'utente vede sullo schermo del dispositivo è in parte reale e in parte digitale. Il principio base è quello dell'*overlay*: la fotocamera legge l'oggetto inquadrato, viene riconosciuto dal sistema che attiva un livello di comunicazione che si integra perfettamente alla realtà.

Dal 2012 fino al 2016 i providers più avanzati per lo sviluppo di realtà aumentata a livello mondiale sono *Metaio* e *Vuforia* come riconosciuto durante le maggiori conferenze su queste tematiche (ISMAE e AWE), nel 2015 *Metaio* viene acquisito da Apple e



1.17_ Esempio di realtà aumentata nell'applicazione Snapchat.

fino al giugno del 2017 l'azienda scompare, data in cui la Apple immette nel mercato *ARKit* che si integra con i sistemi operativi iOS, immediatamente Google lascia il suo software di Realtà Aumentata dal nome *AR-Core*.

Successivamente anche Facebook e Snapchat creano applicazioni per la gestione di elementi in realtà aumentata su immagini da condividere sui social network.

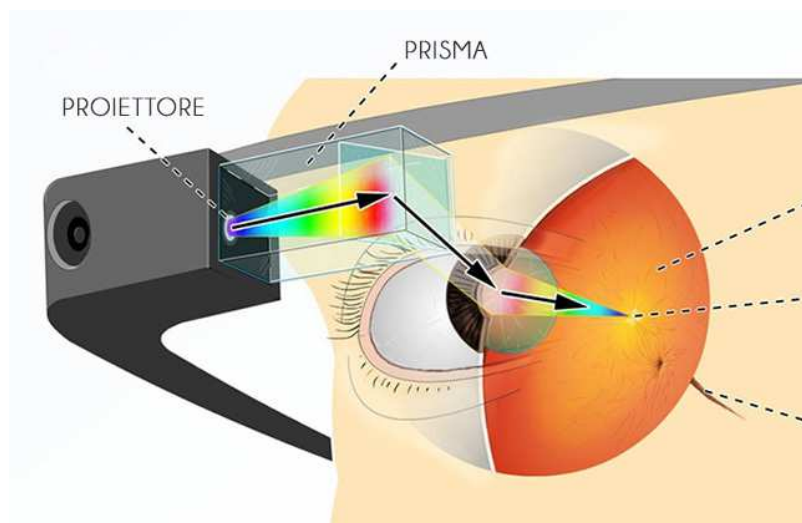
Negli ultimi saloni dedicati al mondo delle automobili sono state presentate le novità sui cruscotti montati all'interno degli abitacoli. Le ultime novità sfruttano la realtà aumentata per far vedere tutte le indicazioni del cruscotto di guida nella parte bassa del vetro da parte del conducente e per le indicazioni del navigatore.

Alla fine degli anni '90 molte aziende ripresero la tecnologia del Optical HMD vale a dire un dispositivo indossabile con la capacità di riflettere delle immagini e di vederne oltre riprendendo la tecnologia della realtà aumentata. Ci sono diverse tecnologie che possono essere utilizzate per questi dispositivi, l'evoluzione più conosciuta è quella presentata nel 2011 da Google, quando mostra al grande pubblico i Google Glass definendoli i primi



1.18_ Cruscotto di un'automobile Hyundai con indicazioni per la navigazione olografiche in realtà aumentata.

smartglass per la *Augmented Reality*. Si tratta, come detto, di occhiali dotati di realtà aumentata e di tecnologia *eye-tracking* che permettono di realizzare foto e di video con semplici comandi vocali o con il movimento dell'occhio, di dettare mail, di parlare al telefono, di richiamare immagini da pagine di siti internet e di ricevere indicazioni stradali. Questi occhiali non coinvolgono tutto il campo visivo di chi li indossa ma pongono un prisma sopra l'occhio dell'utente sul quale vengono proiettate tutte le informazioni che abbiamo sopra elencato. Vengono ritirati dal mercato in quanto denotano problemi di natura giuridica perché invadono la privacy di tutte le persone che circondano l'utilizzatore, la telecamera presente sugli occhiali non segnala la sua attivazione e le immagini che vengono registrate vengono salvate nei server di Google, e poi per problemi di natura percettiva poiché lo schermo sul quale si vedono le informazioni richieste è piccolo e di bassa risoluzione. Una nuova generazione di questo tipo di strumentazione, non più della Google, è invece molto apprezzato nel mondo medico e ingegneristico, e non è più dedicato all'utenza consumer.



1.19_Illustrazione del funzionamento dei Google Glass.

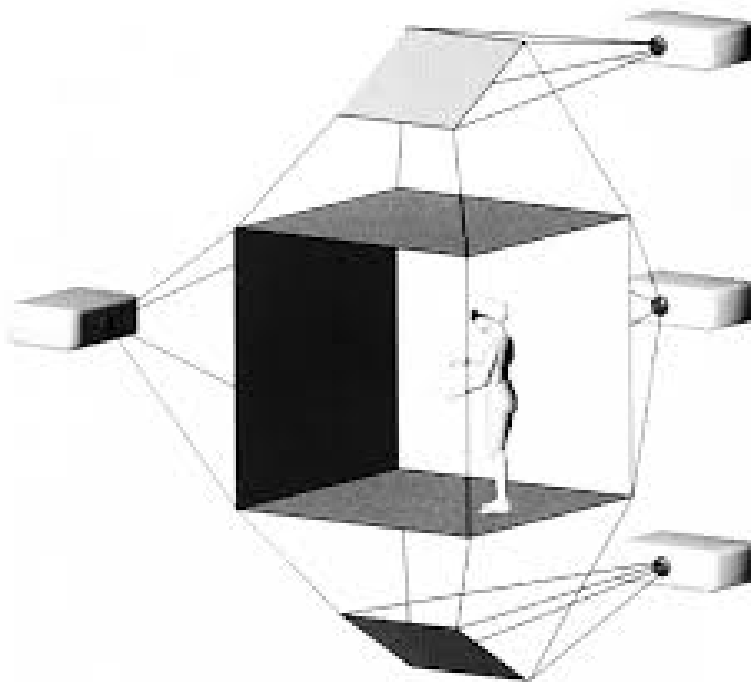
1.4 Fruizione interattiva e camera immersiva

Negli ultimi periodi si stanno sviluppando anche dei sistemi che prevedono degli spazi veri e propri di immersione, il primo che prendiamo in considerazione è il sistema Cave (*Cave Automatic Virtual Environment*), si tratta di un sistema composto da massimo 6 piani ortogonali e fissi dove vengono proiettate delle immagini stereoscopiche, in modo da avvolgere completamente il fruitore che vivrà ancora più intensamente l'esperienza con l'utilizzo di occhiali per questo tipo di visione. Il nome è un chiaro riferimento al mito della caverna di Platone, dove il filosofo contemplava la percezione, la realtà e l'illusione. L'utente all'interno della "caverna" può camminare e interagire con gli oggetti che incontra nel mondo virtuale utilizzando degli appositi controller. Questo sistema viene utilizzato in moltissimi campi di ricerca quali architettura, arte, biologia, ingegneria e medicina.

È stato presentato per la prima volta nel 1992 alla conferenza SIGGRAPH²⁶ a Chicago ed è stato sviluppato presso l'University of Illinois di Chicago dal team capitanato dal professor Daniel J. Sandin e dagli informatici Thomas DeFanti e Carolina Cruz-Neira.

Questa tecnologia è stata portata avanti, al giorno d'oggi le camere immersive sono utilizzate nella formazione di operatori e nella simulazione nel campo medicale e ingegneristico.

Il secondo sistema di questa categoria è la camera immersiva con



1.20_Schema di posizionamento dei proiettori nel Cave presentato nel 1992 dal team capitanato dal Professor Daniel J. Sandin.



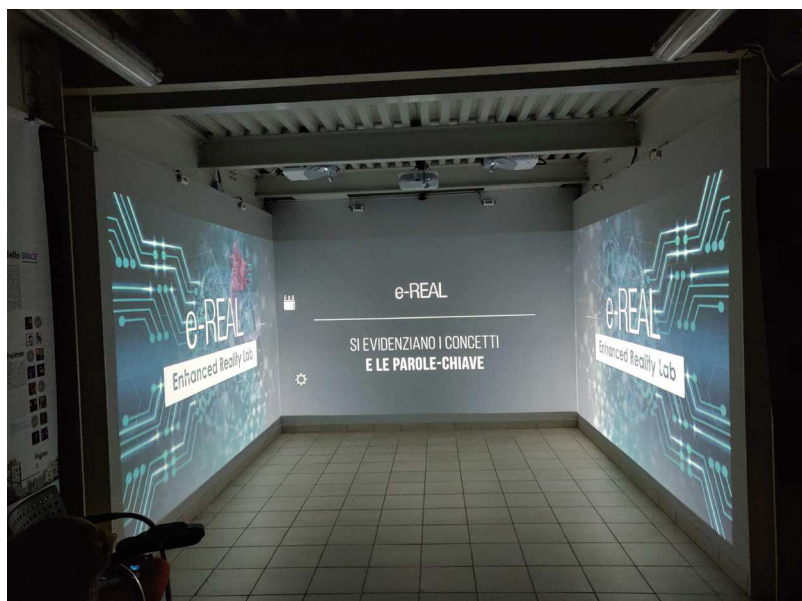
1.21_ Esempio di un Cave attuale con applicazione di indagine medicale.

il sistema *e-REAL* di *LogoNET*. Questo è un sistema, molto simile per lo spazio fisico che si viene a formare a quello precedente, creato da un'azienda privata che prevede l'utilizzo di proiezioni su delle pareti. Al di sopra delle proiezioni, su ogni parete si trovano dei sensori che tracciano il movimento delle mani sulle proiezioni. In questo caso non si ha un'interazione di movimento ma un'interazione *touch* con uno schermo gigante.

Il sistema *e-REAL* può essere utilizzato contemporaneamente da più utenti all'interno dello spazio e anche l'interazione coinvolge più persone.

È un sistema molto innovativo per gli ambienti museali e di divulgazione culturale e scientifica.

Un altro esempio di tecnologia applicata alla divulgazione e insegnamento è la lavagna interattiva multimediale (LIM) ed è il sistema tecnologico che dal 2006 va a sostituire o integrare la lavagna tradizionale nella scuola italiana ma può essere utilizzato in molteplici altri campi come ad esempio le sale riunioni. È una



1.22_ Spazio virtuale allestito all'interno del Politecnico di Milano.

lavagna con pannello elettronico sul quale vengono proiettati contenuti in modo digitale. Il docente può interagire con i temi proiettati toccandola sulla superficie con la mano o con delle penne speciali.

Ci sono varie tipologie di lavagne e si differenziano nella loro composizione e funzionamento, possono essere formate da uno schermo bianco e venire collegate al computer e al videoproiettore oppure presentare uno schermo a cristalli liquidi collegato al computer. Questo tipo di lavagna può essere utilizzata per la scrittura, il disegno, per mostrare dei contenuti di immagini e video, la particolarità di questa lavagna è la sovrapposizione di informazioni che si possono dare sia richiamandole da un database sia disegnandole o scrivendole sopra.

La lavagna digitale ha dimensioni simili a una lavagna classica, quindi con una diagonale tra i 70 e i 100 pollici (da 180cm a 250 cm circa).

Attualmente esistono 6 tipi di tecnologia base con cui le diverse lavagne gestiscono il tocco della penna elettronica o delle dita. La prima viene chiamata “a membrana resistiva”. La superficie della lavagna è rivestita da due membrane flessibili, questo rivestimento è fatto di materiale che oppone resistenza al flusso di corrente. Quando viene toccata la lavagna con uno strumento, i due strati si toccano e il variare del flusso di corrente viene interpretato come segnale di tocco che il computer elabora e restituisce il comando corrispondente. Questo sistema funziona esclusivamente con le penne elettroniche fornite insieme alla LIM.

La seconda tecnologia è quella che si basa sull’infrarosso, sul laser o sugli ultrasuoni, questi sistemi vengono presentati insieme perché il principio di fondo è molto simile ma varia la grandezze fisiche a cui fa riferimento. Il sistema si basa su coordinate xy. Ai lati della lavagna sono posti dei sensori, questi emettono dei raggi che creano un reticolo invisibile sulla superficie della lavagna interattiva. Nel momento in cui qualcosa si mette in mezzo al sistema di coordinate il flusso dei raggi si interrompe e il sistema capisce che la lavagna è stata toccata, il software restituisce il comando richiesto. In questo caso si possono utilizzare a contatto della lavagna le penne elettroniche, penne e pennarelli e anche le dita.



1.23_Esempio di lavagna interattiva multimediale utilizzata in una sala riunioni

La prossima tecnologia si basa su un sistema composto da una o più telecamere in alta definizione che registrano quanto avviene sulla lavagna capendo dove viene toccata e reagendo con il comando impartito per questo motivo si chiama a tecnologia ottica.

Il quarto tipo di lavagna viene denominata a tecnologia capacitiva: in questo caso il sistema capta la diversità di capacità elettrica della superficie durante il tocco con un pennarello o con il dito e quindi la lavagna si comporterà di conseguenza.

Il penultimo sistema si basa sul funzionamento elettromagnetico: questo sistema funziona esclusivamente con la penna magnetica che viene fornita; la quale, con il suo sistema magnetico, altera la superficie della lavagna decifrando l'input che l'utente impartisce alla lavagna.

L'ultima tecnologia base che prendiamo in considerazione è quella che si basa sulla tecnologia *Anoto*, che è la prima penna digitale inventata in Svezia nel 1999. Il suo funzionamento si fonda su una griglia di punti molto piccoli e fitti che viene chiamata *pattern*, la posizione della penna su di esso viene monitorata attraverso una telecamera interna dello strumento, questa informazione viene trasmessa al sistema che capisce come la persona sta interagendo con la lavagna digitale e restituisce il comando voluto.

1.5 Mixed Reality (MR)

La Mixed Reality è l'ultima evoluzione delle tecnologie presentate in precedenza ed è una fusione delle due tecnologie (AR-VR). Con questo termine Mixed Reality si fa riferimento a due visioni differenti, il primo più semplice consiste nella visione di realtà aumentata che attraverso l'attivazione di alcuni link proposti attivano delle immagini o video a 360° da visualizzare con la realtà virtuale, il tutto utilizzando uno smartphone. La seconda versione di mixed reality è più complessa e ancora in via di sviluppo. Consente di interagire con lo spazio fisico supportati dall'intelligenza artificiale. Questa tecnologia dà la possibilità di interagire e manipolare oggetti in ambienti sia fisici che virtuali, la *mixed reality* consente al fruitore di vedere e immergersi nel mondo intorno a lui anche mentre interagisce con un ambiente virtuale usando le mani agevolando così un percorso di conoscenza e di esperienza, dando consistenza alle informazioni trasmesse.

Non è più la semplice sovrapposizione di informazione, come nella realtà aumentata, ma un'interazione che permette di aprire, spostare, chiudere, mettere contenuti digitali nella realtà, aiutando così l'utente a muoversi nello spazio non immaginando solamente

ma agendo in modo più corretto e informato.

I dispositivi più adatti a fruire della *mixed reality* sono degli occhiali creati per lo scopo in quanto, rispetto agli smartphone o tablet, consentono di avere le mani libere per interagire con il mondo aumentato e soprattutto hanno una maggiore potenza di calcolo integrata.

Esistono due tipi di realtà mista: la prima è quella che inizia con il mondo reale, gli oggetti virtuali che vengono sovrapposti al mondo reale possono interagire con esso, può essere considerata una forma avanzata di realtà aumentata. Il secondo tipo di realtà mista prevede l'immersione in un mondo virtuale che si sovrappongono agli oggetti reali con i quali l'utente può interagire. Attualmente ci sono in commercio due tipi di dispositivi che utilizzano questa tecnologia. Il primo che andremo ad analizzare sono gli *HoloLens* della Microsoft. Si tratta di un dispositivo a lenti, e non a schermi, senza cavi che monta all'interno il sistema operativo Windows 10. Le lenti utilizzano sensori avanzati, un display ottico 3D ad alta definizione ed un sistema di scansione spaziale dei suoni che consentono a chi li indossa di poter utilizzare gli applicativi di realtà aumentata attraverso un'inedita interfaccia olografica con la quale poter interagire mediante lo sguardo, la voce o il gesto delle mani. Tra i vari sensori gli *HoloLens* utilizzano una telecamera di profondità con un campo di visuale di 120°x120° e dei sensori che hanno la possibilità di catturare video, catturare suono.

Inoltre la Microsoft ha studiato una tecnologia di tracciamento inverso della prospettiva, questa tecnologia sincronizza il movimento della testa in funzione di punti sensibili dell'ambiente come può essere un angolo fra due pareti e garantisce un tracciamento molto accurato.

1.24_Uso degli HoloLens di Microsoft.





1.25_Kit di Magic Leap One.

L'alto costo di questo dispositivo lo rende utilizzabile solamente nel campo della ricerca medica e dell'industria. Nel 2017 viene pubblicata un'applicazione per creare dei layout di impianto industriale riprendendo, per certi versi, il primo scopo per cui erano stati creati dei dispositivi per la realtà aumentata.

L'altro dispositivo sul mercato sono i *Magic Leap One*, si tratta di una mascherina "*lightwear*" che ha sei telecamere volumetriche e speaker collegati ad un *lightpack* cioè uno processore grafico spaziale portatile e molto potente. Uno dei principali investitori è Google.

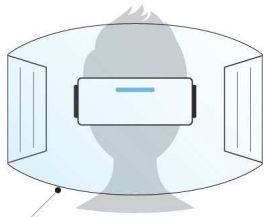
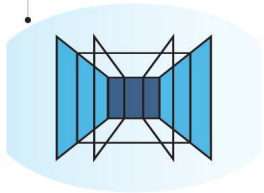
Stanno mettendo a punto una tecnologia, Light Field Display, che proietta direttamente nella retina i contenuti aumentati utilizzando così le proprietà naturali dell'occhio umano per la messa a fuoco e per il controllo della luce, arrivando a rendere indistinguibili i contenuti digitali da quelli reali.

Questa tecnologia è nella fase di test, si vedrà in futuro se avrà successo e diffusione.

Infine riportiamo uno schema delle diverse tecnologie presentate in questo primo capitolo.

VIRTUAL REALITY (VR)

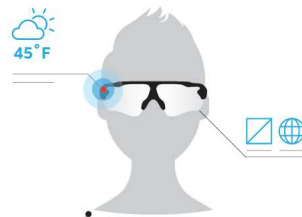
Completely digital environment



Fully enclosed, synthetic experience with no sense of the real world.

AUGMENTED REALITY (AR)

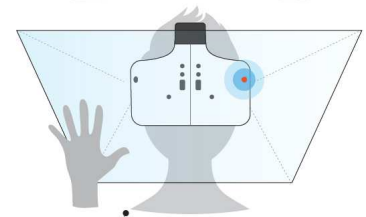
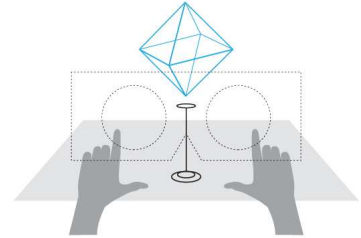
Real world with digital information overlay



Real world remains central to the experience, enhanced by virtual details.

MERGED REALITY (MR)

Real and the virtual are intertwined



Interaction with and manipulation of both the physical and virtual environment.

1.26_Parallelo delle diverse dinamiche di visione e relativi dispositivi.

Realtà virtuale e caschi per la visione immersiva e stereoscopica, realtà aumentata con l'uso degli smartphone o di occhiali e mixed reality.

1 Negroponte N., 1995, *Essere digitali*, Milano, Sperling, 267 p.

2 Gordin Earle Moore imprenditore e informatico statunitense cofondatore della Intel nel 1968.

3 Migliari R., 2008, *Prospettiva dinamica interattiva. La tecnologia dei videogiochi per l'esportazione di modelli 3D di architettura*, Roma, Edizioni Kappa, 239 p.

- 4 Charles Wheatstone (1802-1875) fisico e inventore britannico, oltre ad inventare lo stereoscopio ricopre un ruolo fondamentale nello sviluppo della telegrafia e dello strumento musicale quale il symphonium.
- 5 William Henry Fox Talbot (1800-1877), inventa la tecnica della carta salata e la calotipia. Nel 1844-46 pubblica *The Pencil of Nature*, primo libro illustrato con fotografie originali su carta salata.
- 6 David Brewster (1781-1868) fisico e inventore scozzese, conosciuto nell'ambito scientifico principalmente sugli studi di polarizzazione, riflessione e rifrazione della luce.
- 7 Brevetto n° 2064 depositato nel 1852 da John Benjamin Dancer (1812-1887) inventore britannico di strumenti scientifici, di apparecchi fotografici e della microfotografia.
- 8 Compagnia dell'Illinois fondata nel 1931 e acquisita nel 1951 dalla Sawyer's già proprietaria del sistema stereoscopico View-Master. Fu la prima a commercializzare delle diapositive stereoscopiche in sezione di pellicola fotografica di 35mm in bianco e nero da visualizzare con il sistema di visori ad avanzamento orizzontale.
- 9 Merian Caldwell Cooper (1893-1973) regista, sceneggiatore e produttore cinematografico statunitense.
- 10 Documentario di durata di 115 minuti realizzato dal regista Merian C. Cooper per presentare il sistema Cinerama, la proiezione del film era preceduta da un'introduzione di 12 minuti nella quale Lowell Thomas, attore e presentatore, raccontava la storia delle immagini arrivando alla presentazione di un nuovo sistema di comunicazione che avrebbe rivoluzionato la tecnica del racconto cinematografico. Il documentario mostrava delle riprese in soggettiva di alcune montagne russe, scene dell'Aida riprese alla Scala di Milano, i canali di Venezia, le cascate del Niagara, paesaggi del West e degli spezzoni di corrida spagnola. Il giorno dopo la prima proiezione il *New York Times* ne parla in prima pagina.
- 11 Il georama si può considerare un'attrazione geografica nella quale all'interno di una costruzione sferica si può osservare una rappresentazione, solitamente era dipinta, della terra. Essa era rappresentata rovesciata, vista dall'interno. Il primo georama fu quello brevettato da Charles-Francois-Paul Delanglard nel 1825 e presentato al pubblico nel 1826 a Parigi.
- 12 Esistono due tipi di occhiali utilizzati in questa tecnologia per la visione tridimensionale: gli occhiali con lenti polarizzate (sistema passivo) consentono all'occhio destro di vedere solamente il frame destro e all'occhio sinistro l'altro, sarà poi il cervello a fondere le immagini e percepire l'effetto stereoscopico della profondità ma non consentono l'inclinazione della testa; gli occhiali con schermi a cristalli liquidi (sistema attivo) lavorano in sincronia con il proiettore.
- 13 Morton Leonard Heiling (1926-1997) regista, direttore della fotografia, inventore e cameraman statunitense. Si diploma negli anni 1948-50 al Centro Sperimentale di Cinema di Roma
- 14 Howard Rheingold (1947), critico letterario, sociologo e saggista statunitense. Ha coniato il termine Comunità Virtuali.
- 15 Rheingold H., 1993, *La realtà virtuale*, Bologna, Baskerville S.r.l., 547 p
- 16 Traduzione letteraria in italiano "schermo montato sulla testa"
- 17 Ivan Edward Sutherland (1938) informatico americano considerato il padre della computer grafica, nel 1988 riceve il Premio Turing dalla Association for Computing Machinery per l'invenzione del programma Sketchpad, creato nel 1962 mentre studiava al MIT, nel 2012 riceve il premio Kyoto nella categoria Advanced Technology.
- 18 Robert Fletcher Sproull (1945) informatico americano, conosce Ivan Sutherland mentre sta per conseguire la laurea in fisica presso l'Università di Harvard.
- 19 Schermo montato sulla testa
- 20 Informatico, matematico e compositore statunitense.
- 21 Jonathan D. Waldern ha sviluppato questo sistema dopo la sua tesi di dottorato di ricerca.
- 22 Acronimo di Organic Light Emitting Diode, è una tecnologia che permette di creare degli schermi a colori che hanno la capacità di emettere luce propria e non come gli schermi LCD che hanno bisogno di essere illuminati da una fonte di luce esterna.
- 23 Tutti i dati tecnici sono stati desunti dal sito della *Oculus Rift*
- 24 Tutti i dati tecnici sono stati presi dal sito di HTC Vive.
- 25 In quel momento Thomas Caudell lavorava presso la Boeing e inventa un paio di occhiali per potere sovrapporre un diagramma degli impianti generato dal computer alle pareti interne dell'aereo.
- 26 Cruz- Neira C., 1992, *The Cave Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment*, in "Communication of the ACM", vol 55 n°6, pp. 65-72

2. Gorizia e il suo Castello. Analisi, evoluzione storica e ricostruzione 3D

2.1 Stato di fatto e condizioni attuali di utilizzo

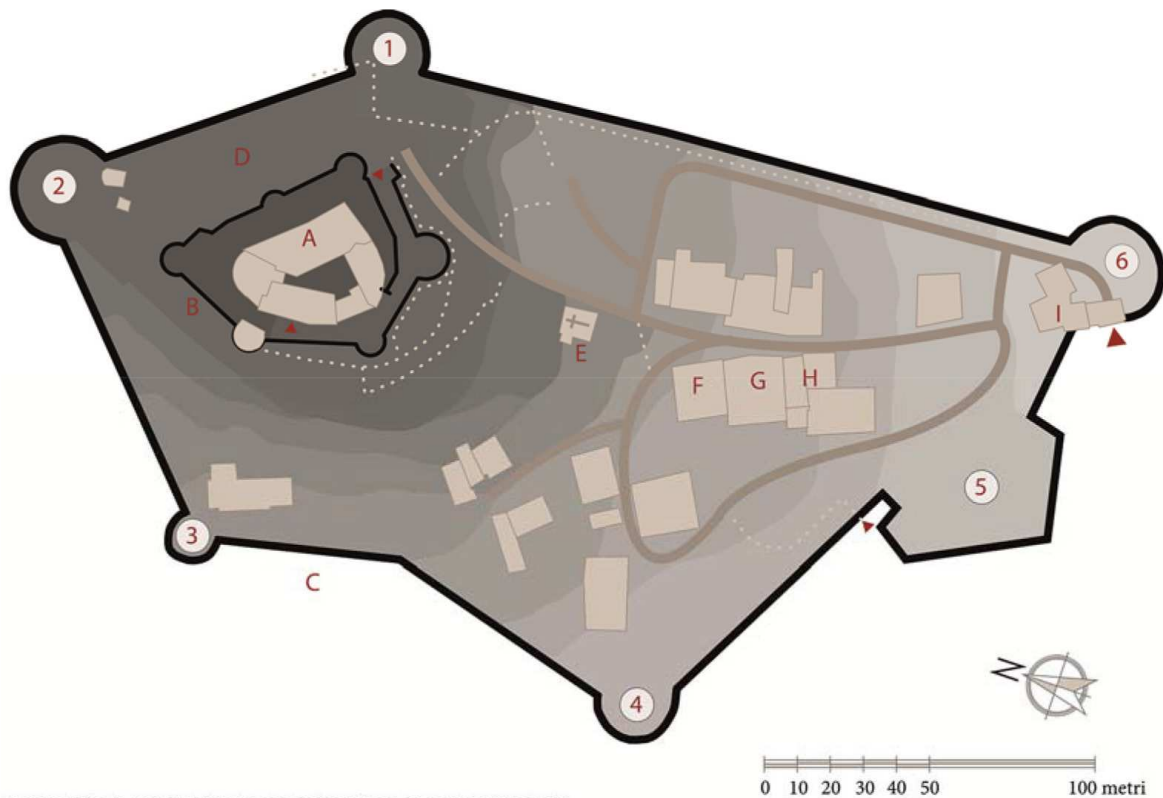
Il Castello costituisce per la città di Gorizia il monumento principale, esso domina la città e tutta la valle dell'Isonzo dall'alto del suo colle isolato, caratterizzando il volto e riassumendo la storia complessa di questo territorio. Per questo motivo il Castello di Gorizia è stato scelto come caso di studio di questa ricerca.

L'edificio, dall'aspetto di fortezza possente, è il frutto dei lavori di restauro, che si conclusero nel 1937, da parte di Guido Cirilli sotto la supervisione del soprintendente all'arte medievale e moderna del Veneto orientale, Ferdinando Forlati e del direttore del Museo della Redenzione di Gorizia Giovanni Cossar e da suo fratello Ranieri Mario.

La fortificazione è composta da una cinta muraria esterna e dal vero e proprio maniero, il tutto edificato in blocchi di arenaria. L'alta cinta muraria è costellata di finestre e feritoie e viene interrotta da 5 torrioni e una torre detta Torre dell'Orologio che si affaccia proprio sulla città. Si entra a sud-est attraversando una porta sovrastata dalla scultura del Leone Marciano la quale viene attribuita tradizionalmente a Giovanni da Campione, arrivata a Gorizia da Venezia nel 1508, e che venne collocata in questa posizione il 25 aprile 1919 come primo segno di rinascita dopo la Grande Guerra e come testimonianza dell'italianità della città. Nella ricostruzione dopo la Prima Guerra Mondiale vengono anche inseriti degli elementi di difesa tipici del periodo medievale,



2.1_Vista dall'alto del castello di Gorizia e del suo borgo.



LEGENDA CASTELLO DI GORIZIA E SUO BORGO

- | | | |
|--|----------------------------|--------------------|
| ① Bastione Covacia | A Castello | G Casa Tasso |
| ② Bastione Zeresàr o Fiorito | B Cinta muraria interna | H Casa Dornberg |
| ③ Bastione Verginio | C Cinta muraria esterna | I Porta Leopoldina |
| ④ Bastione Coloredo | D Piazzale delle Milizie | ▲ Ingresso |
| ⑤ Baluardo Nuovo poligonale o Italiano | E Chiesa del Santo Spirito | |
| ⑥ Bastione della Porta | F Casa Formentini | |

2.2_Pianta con gli edifici principali del Borgo Castello.

se si alza lo sguardo una volta varcata la porta si nota l'apertura dalla quale poteva essere calata una grata per impedire l'accesso e due pozzi dai quali poteva essere gettata olio e pece bollente sugli invasori.

Per giungere alla parte edificata si prosegue lungo una salita protetta dalla cinta muraria esterna la quale in sommità viene percorsa dal camminamento di ronda.

Alla fine della salita si apre, nel Palazzo dei Conti, l'ingresso principale, un portone ligneo profilato di pietra bianca, che attraverso un corridoio a volta, dove si trova una scala, porta alla corte centrale, da tutti conosciuta come Corte dei Lanzi, dove si possono notare i tre principali corpi architettonici che formano il maniero e i due corpi di collegamento.

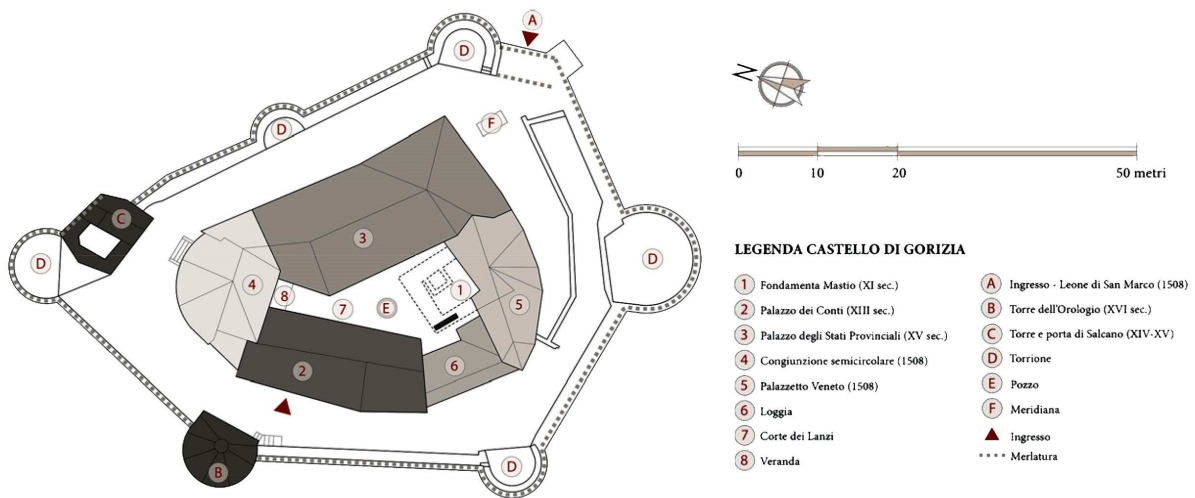
I tre principali corpi sono, a meridione, il Palazzo dei Conti costruito alla fine del XIII secolo, a settentrione il Palazzo degli



2.3_Porta d'ingresso al maniero sovrastata dal Leone Marciano collocato in questa posizione il 25 Aprile 1919.

Stati Provinciali risalente al 1400, a oriente il cinquecentesco Palazzetto Veneto con al piano terra un elegante loggia, mentre i due corpi di collegamento sono un corpo semicircolare tra il Palazzo dei Conti e il Palazzo degli Stati Provinciali, dove trova posto la scala per salire ai piani superiori prima in pietra e poi in legno, e una loggia che prosegue sul lato meridionale, l'edificio più antico. All'interno della Corte dei Lanzi vi trovano posto un pozzo che forniva l'acqua al castello ed è profondo una cinquantina di metri, le fondamenta e una parte del mastio considerato il primo insediamento sul colle. Nello spazio che sovrasta l'entrata alle mura del castello è collocata una meridiana.

Il palazzo dei Conti si sviluppa su tre piani, nel percorso museale allestito, al piano terra si trovano la sala da pranzo e le cucine, al primo piano la sala del Conte e all'ultimo piano una sala didattica. Anche gli altri due edifici si innalzano per tre piani; il Palazzetto Veneto al piano terra, come detto, ospita una loggia con un'uscita attraverso una porticina al percorso esterno, al primo piano ospita la sala della musica, all'ultimo piano sono ospitate delle sale chiuse al pubblico. In un angolo troviamo una scala per salire



2.4_Denominazione dei singoli edifici che compongono il maniero.

ai piani superiori, e come la scala principale, la prima rampa in pietra e la seconda in legno.

Al piano terra del palazzo degli Stati Provinciali trova posto la sala dei cavalieri o delle carceri, dove troviamo la ricostruzione di una cella, e la sala della tortura. Al secondo piano troviamo l'ampio salone a doppia altezza degli stati provinciali con la ricostruzione della decorazione degli stemmi delle famiglie che facevano parte del consiglio, e una sala di collegamento. Al terzo piano trova posto la cappella con un'interessante volta a carena rovesciata.

Al terzo piano del palazzo degli Stati Provinciali, del palazzetto Veneto e della loggia di collegamento tra quest'ultimo e il palazzo dei Conti si può ripercorrere un cammino di ronda.

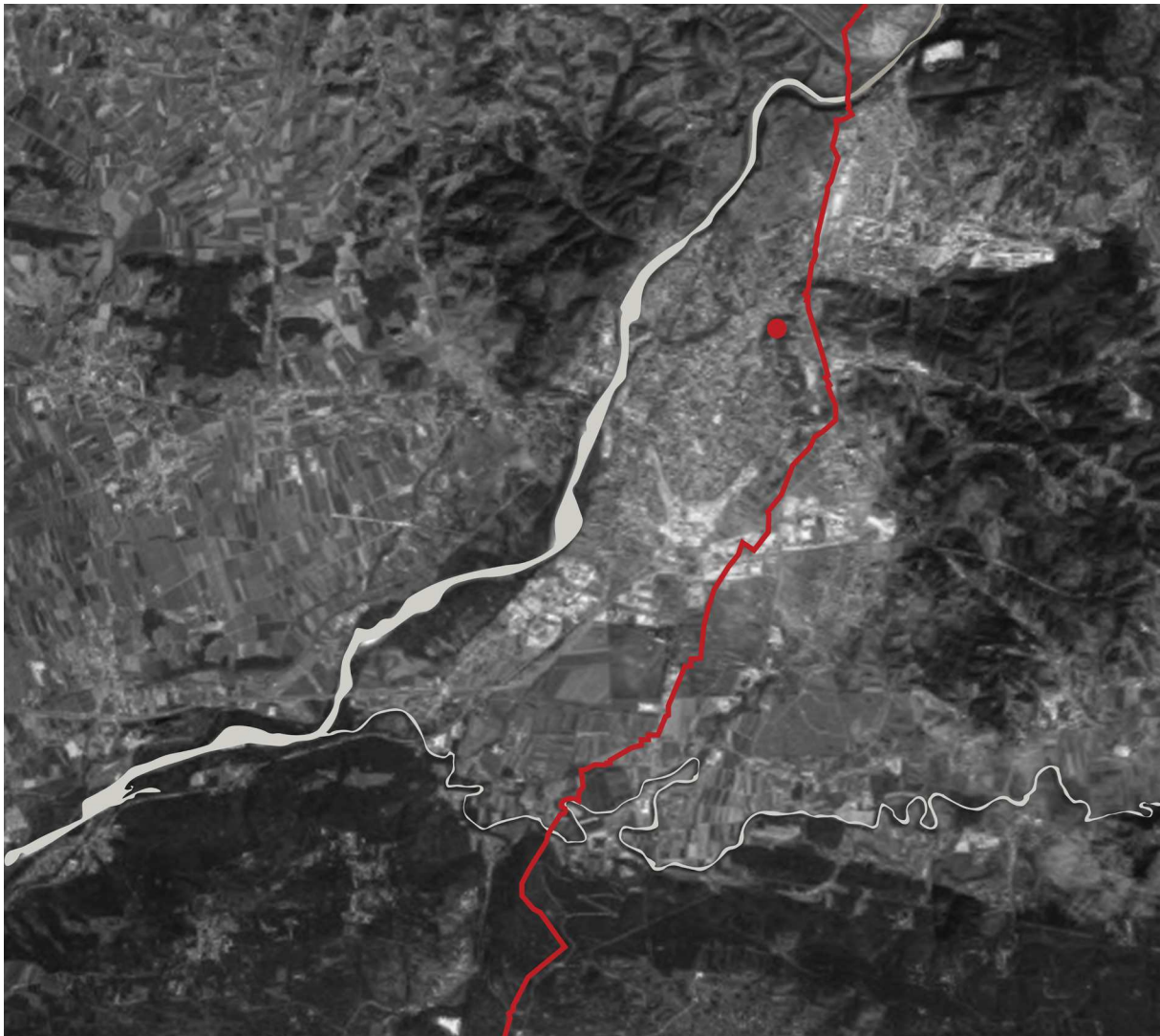
Nelle prossime pagine percorreremo l'evoluzione dell'edificazione del Castello di Gorizia riportate nei numerosi volumi inerenti il maniero consultati presso la Biblioteca statale Isontina di Gorizia, le biblioteche civiche Hortis e di Storia e Arte di Trieste, nelle biblioteche di Storia e Storia dell'arte e di Architettura dell'Università degli Studi di Trieste, e nei documenti iconografici che si possono visionare negli archivio tecnico del Comune di Gorizia, nell'archivio di Stato di Gorizia, nell'archivio storico degli ex Musei Provinciali di Gorizia e nell'archivio disegni della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio del Friuli Venezia Giulia.

2.2 Castello: analisi e ricostruzione grafica delle fasi di sviluppo storico

Gorizia si trova in un sistema collinare tra le valli dell'Isonzo e del Vipacco e si posiziona al confine con la Slovenia, questa è una posizione che già gli antichi romani ritenevano strategica infatti insediano nei dintorni alcuni centri abitativi di modesta entità, a nord est dell'attuale Gorizia sviluppano *Castrum Silicanum*, che diede origine all'attuale Solkan, un sobborgo di Nova Gorica nella vicina Slovenia, e *Pons Aesontii*, attuale località di Mainizza che si trova nella pianura a sud-ovest di Gorizia.

L'inizio della storia della città di Gorizia risale al 28 aprile 1001, data della bolla emanata a Ravenna con cui l'imperatore Ottone III concede al Patriarca di Aquileia Giovanni IV la metà di un villaggio denominato *Goriza* e la metà del castello di Solcano.

2.5_Inquadramento territoriale del castello di Gorizia rispetto al fiume Isonzo e al fiume Vipacco.



“Domus et donamus cum omni jure Johanni Patriarchae et Ecclesiae Aquilejensi medietatem unius Castelli dicti Silicani et medie unius vilae quae sclavonica lingua vocatur Gorizia [...]”

Come si può leggere da quanto riportato dalla bolla papale, Gorizia era una villa che sorgeva sopra un’altura dalla quale prende il nome, infatti il termine sloveno *Goriza* significa montagna.

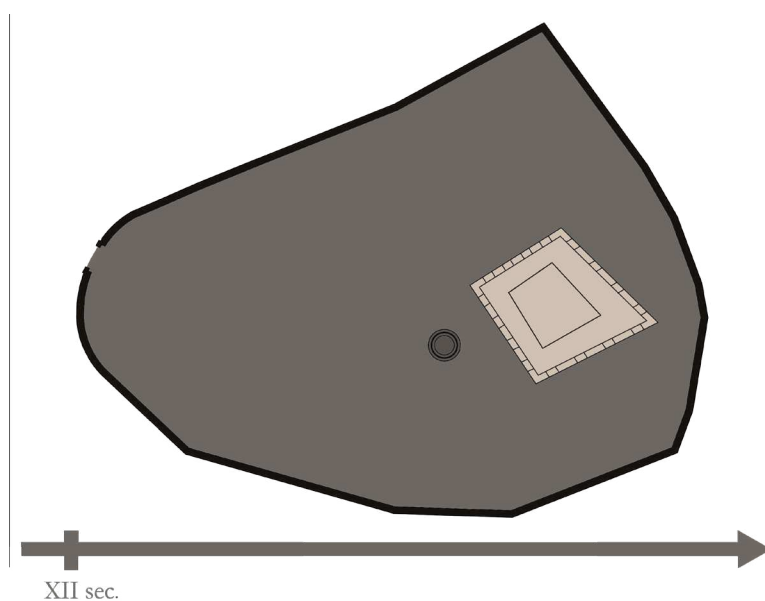
Il documento successivo che ci informa sulla storia di Gorizia è quello del 1117 nel quale viene nominato un certo Mainardo con il titolo di conte, e da fonti documentali è sicuramente il capostipite della dinastia che governò Gorizia fino al 1500, con questo si dà l’inizio della storia di Gorizia città-castello.

Non ci sono testimonianze per ipotizzare l’aspetto originario del primo insediamento sul colle che ora ospita il castello. Tuttavia è possibile credere dell’esistenza di una costruzione quadrangolare considerato il ritrovamento delle fondazioni ancora visibili all’interno della corte centrale.

“esse rilevano una limitata ed irregolare pianta quadrangolare, che fa supporre l’esistenza di un mastio, probabilmente non dissimile dalle coeve opere fortificate disseminate sul territorio friulano. Sorta a scopo essenzialmente difensivo, la struttura era dotata di magazzini nella parte inferiore- fatto accertato dalle esplorazioni condotte nel 1923- e nei piani superiori, di ristretti locali destinati alle milizie. All’interno era incluso il vano scale”²

L’ipotetica ricostruzione del primo insediamento sul colle di Gorizia è stata fatta dagli storici esperti considerando la forma delle già citate fondamenta ritrovate nella Corte dei Lanzi e i documenti di costruzioni simili rinvenute nel resto del Friuli.

Gli storici descrivono il mastio *“sviluppato su più piani, con una serie di finestre arcuate ai piani superiori provvisti di bertesche. Quest’ultime appaiono sorrette da due sostegni presumibilmente in legno, come pure l’intera incastellatura soprastante”³.*



2.6_Ipotesi del Mastio – primo insediamento sul colle di Gorizia

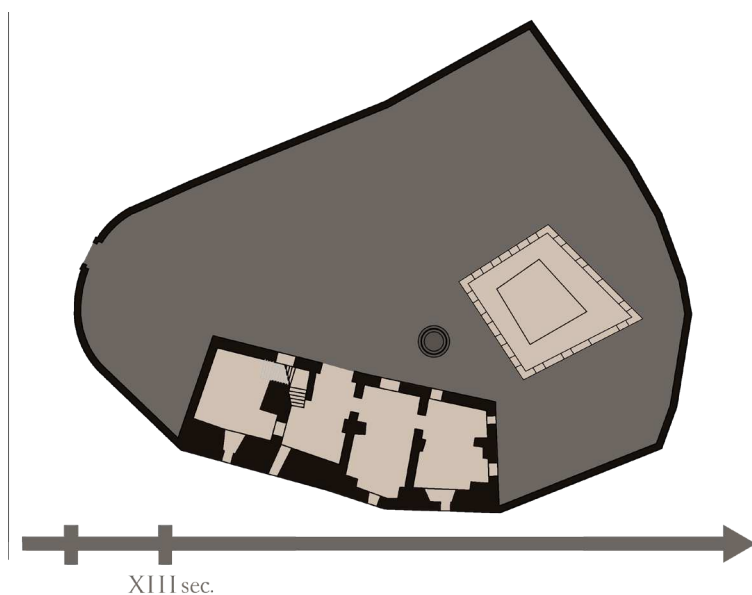
2.7_Situazione dei possedimenti dei Conti di Gorizia nella metà del 1200. A sinistra della Contea di Gorizia si estendeva la Serenissima e a destra l'Impero Austriaco.



Nei 150 anni successivi Gorizia e i suoi conti hanno un forte potere su un ampio territorio che comprende il goriziano, la Carinzia il Tirolo e questa espansione porta a una definizione della fisionomia di Gorizia.

Con il conte Alberto II attorno al 1210, l'originale insediamento si è espanso dalla città alta lungo il versante meridionale della collina ai cui piedi si viene a creare una piazza, l'attuale piazza Cavour, dedicata al mercato settimanale e ai traffici, attorno alla quale vengono costruite delle logge, dei magazzini e delle botteghe. Contemporaneamente all'espansione della città il Castello subisce delle trasformazioni e viene ampliato e ristrutturato, l'isolato mastio viene inglobato in una struttura più articolata, viene costruito ex novo il Palazzo dei Conti, la facciata esterna viene costruita in continuità con la cinta difensiva e si

2.8_Ipotesi del castello nel XIII secolo, epoca della costruzione del Palazzo dei Conti.





2.9_Riproduzione del sigillo del Comune di Gorizia concesso alla città dal Conte Enrico II nel 1307. Nella rappresentazione raffigurata all'interno si può osservare quella che può rappresentare il mastio, primo insediamento sul colle.

sviluppa parallelamente alla città bassa, il piano dedicato alla sala del consiglio (secondo piano) viene caratterizzato dalle aperture a bifora con colonnina senza base e capitello di marmo rosa di Verona e sormontate da archetti a tutto sesto in tufo. A questa sala si saliva dal pianoterra dalla scala in pietra ancora esistente.

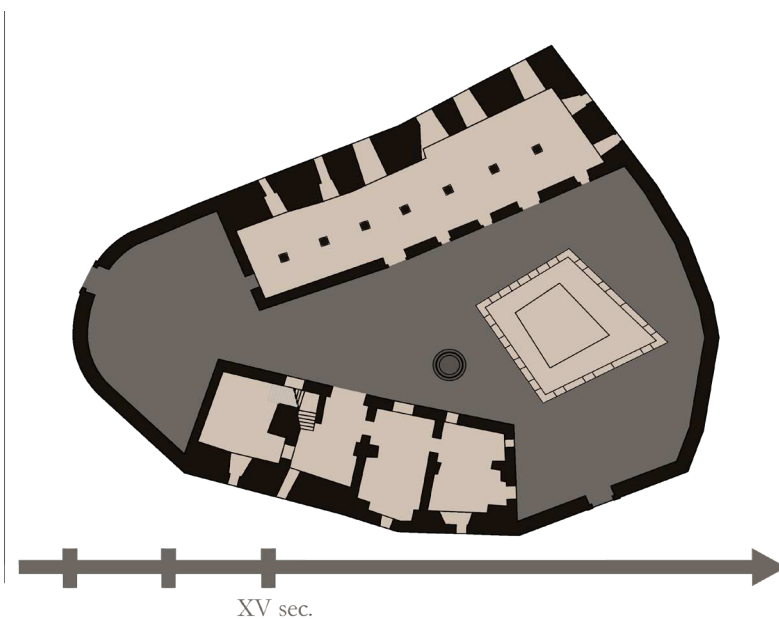
La forma e la distribuzione dei vani odierna di questo edificio rispecchia ancora quella originale tranne per l'ingresso monumentale aperto dopo la sua costruzione.

Nel testo del Medeot⁴ viene riportato che contemporaneamente al palazzo dei Conti viene costruita anche una cappella nel luogo dove nascerà il palazzetto veneziano nel 1500.

La datazione della costruzione di questa palazzina al XIII secolo viene confermata da una fonte iconografica del 1307 di grande importanza per la storia della città goriziana, quando, anche se in forma schematica, viene rappresentato un brano della vita del borgo medievale sul sigillo donato dal Conte Enrico II alla città per celebrare la concessione della libertà comunale all'abitato superiore.

Sigillo nel quale vengono rappresentate le mura; corredate da due torrioni uno a settentrione, che corrisponde alla attuale Porta di Solcano, e uno a meridione, di questo si sono trovate le tracce durante i restauri nelle vicinanze dell'attuale ingresso alla cinta muraria del castello ma non sono state lasciate alla luce; che accerchiavano le case, un edificio dominante corrispondente al palazzo dei Conti rappresentato da una costruzione con merlatura ghibellina e con finestre al primo piano con arco a tutto sesto, in secondo piano si può notare il mastio.

Alla morte del Conte Enrico II nel 1323 gli Asburgo e la Serenissima si fronteggiavano per la supremazia sull'alto Adriatico, per avere



2.10_Ipotesi dell'insediamento del castello nel XV secolo con la costruzione della prima versione del Palazzo degli Stati Provinciali.

il controllo sia sul piano militare che commerciale, questo stato di conflitto proseguirà anche nei secoli successivi.

Durante il XV secolo Gorizia, pur combattendo delle guerre sul territorio friulano, riesce a mantenere la propria indipendenza grazie all'appoggio asburgico e riesce a sottrarsi all'annessione delle terre aquileiesi alla Serenissima avvenuta nel 1420. Questa perdita di territori non si sentì molto a Gorizia in quanto la vita dei Conti si era trasferita definitivamente nella sede del castello di Bruck a Lienz. Il Castello di Gorizia rimaneva così, sede del governo e come tale si andava ad ampliare, infatti in questo periodo viene costruito il Palazzo degli Stati Provinciali addossato alla cinta orientale. Presenta una pianta rettangolare irregolare, con una spessa muratura in blocchi di arenaria sia nella muratura esterna che quella verso la corte triangolare che viene a formarsi, con un'altezza pari a quella del Palazzo dei Conti che esisteva già. L'ingresso era costituito da un portale con arco in tufo (oggi ingresso alle prigioni).

Al piano terra trovava posto un ampio salone con copertura di doppio ordine parallelo di volte basse sorretti e da sette pilastri ottagonali. Il salone era dedicato ad ospitare banchetti e ricevimenti. Il livello superiore si sviluppava per una altezza di due piani e ci si accedeva tramite una scala a chiocciola in pietra. Questo piano era occupato dalla maestosa Sala degli Stati Provinciali in cui venivano indette le adunanze della rappresentanza parlamentare. Il 12 aprile 1500 muore nella sua residenza di Lienz l'ultimo conte di Gorizia, Leonardo, il quale aveva stipulato dei patti ereditari con Massimiliano d'Asburgo in modo da sanare le precarie condizioni economiche della città. Quando il re asburgico viene a sapere della morte del Conte impartisce l'ordine ai capitani della Corniola, Carinzia e Trieste di occupare i territori, molto probabilmente queste disposizioni erano già pronte in modo da entrare in azione prima di qualsiasi avanzata da parte della Serenissima che si trova così davanti a fatti già compiuti; con questi avvenimenti gli Asburgo e i Veneziani si trovano senza terre cuscinetto tra loro e arrivano nuovamente alle armi. Siamo nel 1508 e i veneziani guidate da Bartolomeo D'Alviano riescono a conquistare il castello di Gorizia, la loro intenzione era quella di avere un avamposto in grado di fronteggiare la occasionale minaccia turca e quella costante da parte dell'impero asburgico. In questo breve periodo i veneziani abbattano le strutture che consideravano obsolete e cominciano a edificare altre più consone alle esigenze del tempo. Il castello comincia ad assumere così un aspetto più unitario ma l'impegno per il mantenimento delle truppe e di questo territorio si dimostra più gravoso del previsto, appena dopo tredici mesi di dominio Venezia restituisce la città ai suoi dominatori precedenti, dopo il trattato di Cambrai,⁵ come viene scritto nell'ordine impartito al proprio provveditore in loco *“restituire alla Cesarea Maestà quella terra et le altre tolte L'anno preterito”*.

In quegli anni furono redatti dei trattati sul posizionamento delle linee di confine tra i territori, in particolare si fa riferimento al trattato di Cambray e quello di Worms (1521), ma in nessuno di questi due veniva codificato il limite del confine del territorio sul quale insisteva Gorizia, così nel 1518 l'allora capitano di Gorizia, Giorgio d'Eck, chiede all'imperatore Massimiliano I di fortificare il castello, richiesta riformulata dagli Stati Provinciali nel 1529 in una missiva indirizzata all'arciduca Ferdinando, che come riporta Mario Cossar, “[...] poiché Gorizia è la chiave della Carintia, della Corniola e del Carso, supplichiamo l’Altezza Vostra di somministrare i mezzi per rifare le mura della fortezza, che si trovano in cattivo stato, potendo in pochissimi anni essere rimesse e eguagliate a quel pezzo, dai veneziani costruito, come ancor per terminare le torri che da Massimiliano erano state cominciate, senza cui questa piazza resterebbe tanto debole da una parte, quanto forte dall'altra”.⁶

Questa missiva ci fa capire l'entità dei lavori iniziati dai veneziani nei loro tredici mesi di dominio e continuati dall'imperatore Massimiliano I, tra la fine del 1500 e l'inizio del secolo successivo il castello cambia la sua fisionomia, diventa un unico corpo architettonico compatto per rispondere principalmente alle funzioni di difesa.

Durante questi lavori di fortificazione viene abbattuto l'alto mastio, in quanto diventa un punto debole per il tipo di attacchi che le nuove strategie di guerra prevedevano, e vengono costruiti due corpi di collegamento tra il Palazzo dei Conti e quello degli Stati Provinciali: a sud viene costruito un edificio con un elegante loggiato e viene denominato Palazzetto veneto, mentre a nord viene edificato un edificio semicircolare nel quale viene aperta una porta d'ingresso verso la Porta di Solcano. I lavori da parte degli Asburgo si prolungano per diversi decenni durante i quali vengono rinforzate ed elevate le cinte murarie esterne, vengono eretti dei bastioni meridionali e viene costruita l'unica porta di accesso alla cittadella fortificata, la Porta Leopoldina inaugurata nel settembre del 1660 in occasione della visita dell'imperatore

2.11_Porta Leopoldina – a sinistra un'immagine storica dove si notano degli edifici abbattuti, a destra la porta come si presenta adesso.



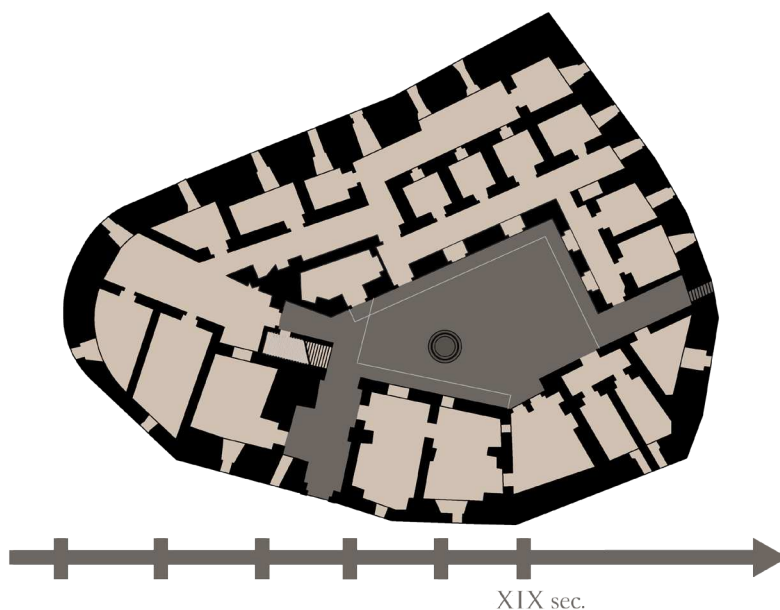
Leopoldo I che viene ricordata nella lapide con epigrafe in latino “ANNO:D.NI: MDCLX / AVG.^{MO}: LEOPOLDO / ROM: IMP: GER: HVN: BOH: REGE / ARCHID: AVS: DUCE: BURG: ξ / COMITE: GORITLÆ / FEL: REGNANTE / MVNIMENTV.HOC / VIX.NON.NOVITER.EXTRVCTVM / ET.IN.HANC: ALTIOREM / AMPLIOREM.Q. FORMAM. ERECTVM / J.6. EST. 6.O”⁷

Queste operazioni di fortificazioni si conclusero tra il XVII e il XVIII secolo, proprio quando inizia un lungo periodo di pace per la contea di Gorizia.

Il castello nel 1700 assume la funzione di sede di guarnigioni militari e per un breve periodo del 1800 nel piano terra del Palazzo degli Stati Provinciali vengono ricavate poche celle, confermando il suo aspetto e ruolo di castello saldo e ben munito come lo descrive Antonio Dall’Agata nel 1728 “*Gorizia ha un castello cinto da forte mura, con un palazzo nella parte più alta a guisa di rocca, dove suol abitare il Capitano, che ordinariamente è uno dei più cospicui Cavalieri del Paese. È posto questo Castello su un altura d’un colle, chè d’ogni parte riguarda la Città in tal guisa, che pare che l’arte, non la natura l’abbia sì ben collocato. Il giro della città insieme e del Castello s’estende circa tre miglia, ed entro si vedono belle fabbriche ed abitazioni, strade e piazze ben regolate e sempre un numeroso popolo, che le scorre?*”⁸

Durante la seconda metà del 1700 e tutto il 1800 la vita cittadina di Gorizia si sposta dal Castello alla città che si sta pian piano sviluppando ai suoi piedi. Si spostano anche tutte le sedi degli organi amministrativi. Nel 1883 Giuseppe Formentini⁹ scrive in un articolo “*le torri e i bastioni crollavano e i merli e le feritoie coperte*

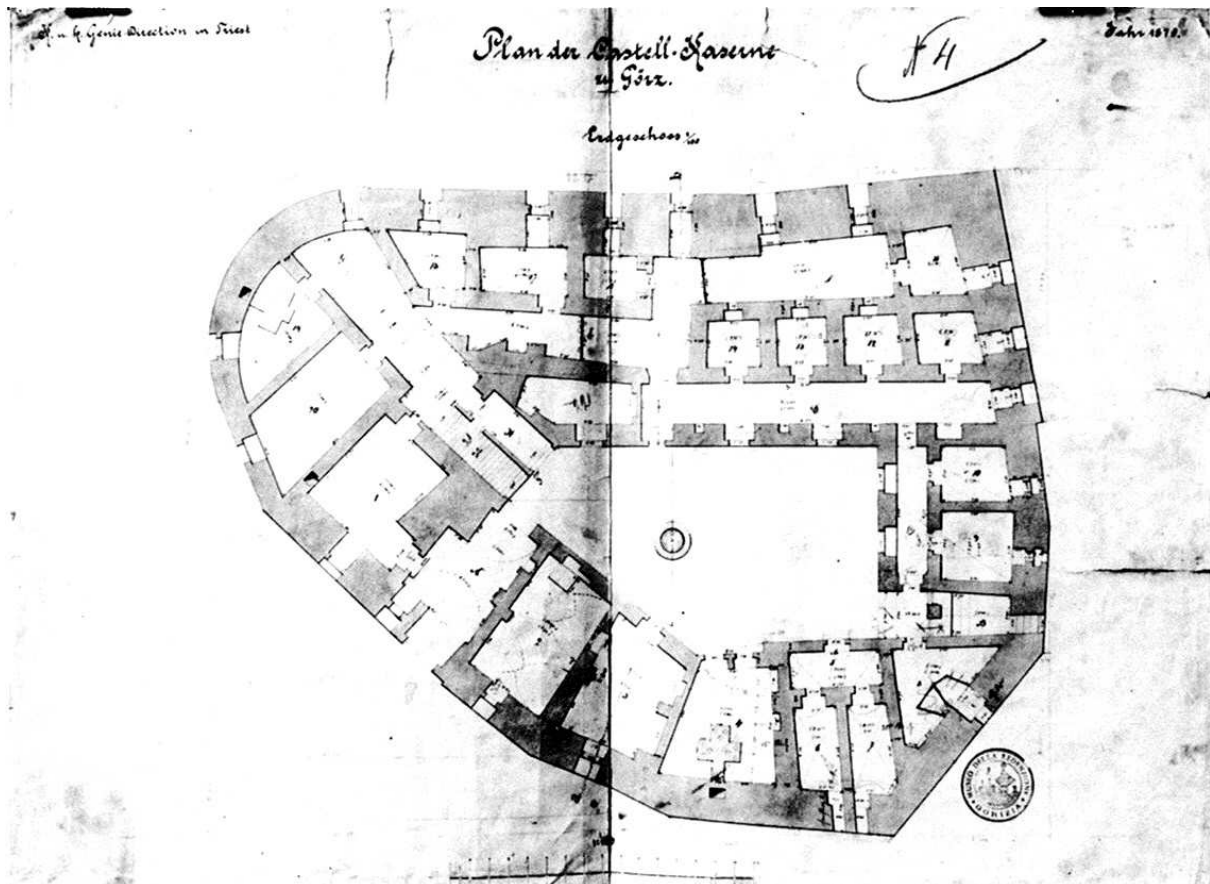
2.12_Ipotesi dell’insediamento del castello nel XIX secolo, periodo nel quale sono state effettuate le modifiche per ospitare la caserma dell’esercito austriaco. Si può notare il cambiamento della posizione della scala principale, la costruzione delle celle al piano terra del Palazzo degli Stati Provinciali e la proiezione dei ballatoi prospicienti la corte interna.

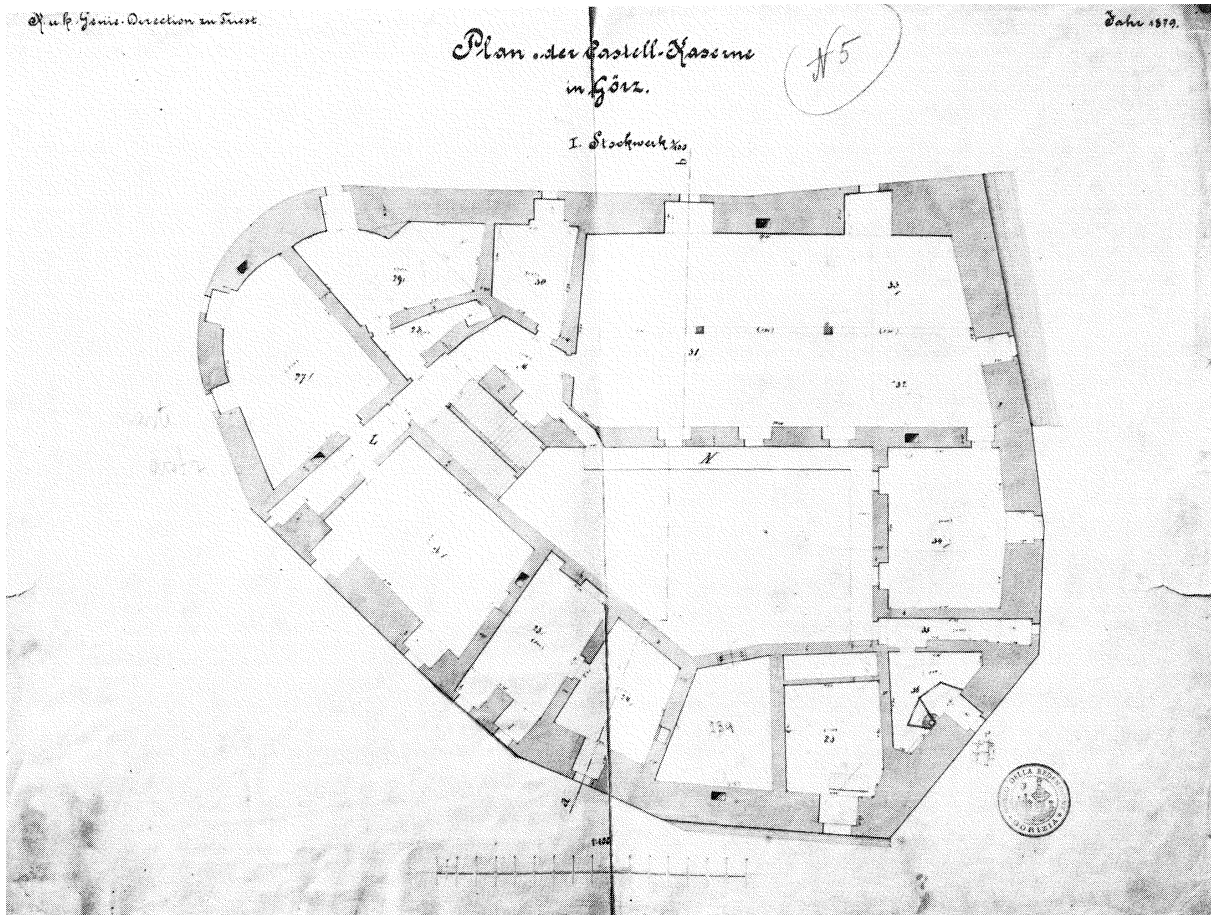


*di vetuste edere più non si distinguevano e parassiti e spinose allignavano ovunque: sinché nel 1850 al governo venne la felice idea di praticarvi un radicale restauro e ridurre quel fabbricato a qualche pratica utilità adattando pure i bastioni a difesa. Il palazzo propriamente detto fu convertito in caserma e in abitazione del suo comandante, tolte di là furono le carceri e trasportate in città, e sui bastioni furono collocati pezzi di grosso calibro*¹⁰. Come riporta il conte, nel 1850 il castello viene completamente restaurato e viene confermato il suo uso come caserma ed abitazione del comandante, questa funzione la si deduce già da l'editto emanato il 3 gennaio 1760 dal Generale Antonio di Portogallo, Conte della Puebla dove indica il comportamento dei soldati che si trovavano in castello nello scorgere un principio di incendio in città.

I lavori di restauro vengono avviati nel 1850 dal Primo Tenente del Corpo del Genio militare Arnoldo Voegli Holhalb¹¹ e poi ripresi da Antonio Tabai e sono documentati nelle planimetrie eseguite al "K.u.K. Militär Bau Direction zu Triest" datate 1872¹² e nei rilievi fatti sempre dal "K.u.K. Militär Bau Direction zu Triest" e depositati nel 1879.¹³ In questi disegni si possono notare la scala principale costruita in cemento armato in posizione di chiusura tra il palazzo dei Conti e palazzo degli Stati Provinciali, e dei ballatoi sorretti da mensole che percorrono le facciate interne

2.13_ "Piano del Castello – Caserma di Gorizia" – questa è la situazione del piano terra del castello rilevata dal "K.u.K. Militär Bau Direction zu Triest" nel 1879 – conservato nell'Archivio Storico Provinciale.





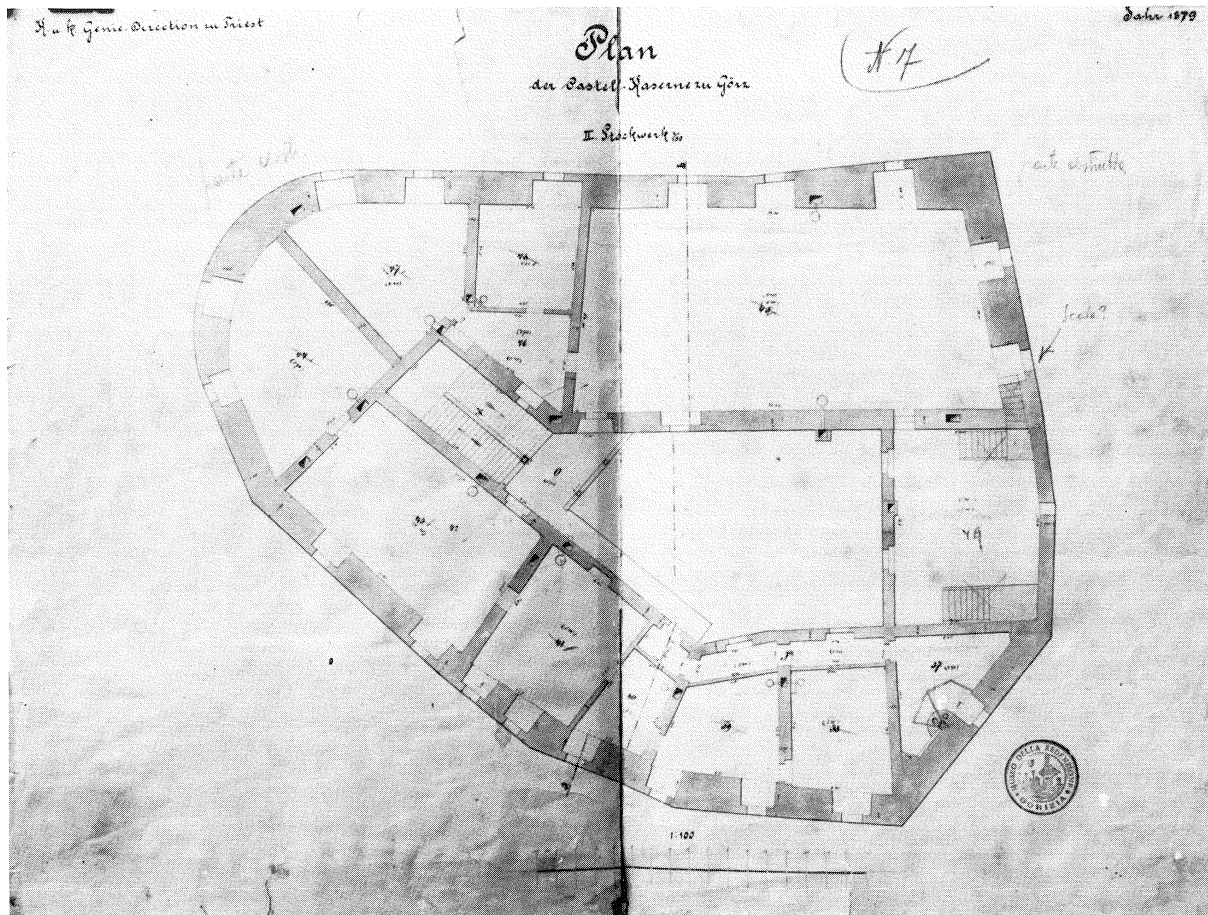
del palazzo dei Conti, lungo il secondo piano, e del palazzo degli Stati Provinciali, lungo il primo piano. Questi ballatoi si possono notare anche nelle fotografie che furono scattate subito dopo la fine del conflitto della Prima Guerra Mondiale.

Della situazione del maniero prima e durante il conflitto ci parla anche una missiva inviata nel 1924 dall'architetto Guido Cirilli alla Direzione Generale delle Belle Arti di Roma dove si possono capire ulteriori trasformazioni avvenute agli edifici che compongono il complesso del castello durante la presenza del Comando Militare austriaco al suo interno. In questa missiva precisa che si trattava di un "massiccio, uniforme, scialbo edificio", descrive l'edificio centrale senza alcuna nota di pregio dal punto di vista architettonico, sottolinea il fatto che era formato da un muro perimetrale altissimo con innumerevoli finestre rettangolari di diverse dimensioni e disposte in modo monotono, l'intero edificio aveva una copertura in eternit rifatta nel 1911.

Durante la prima Guerra Mondiale il territorio di Gorizia e provincia fu per molto tempo sotto assedio e fortemente segnato sia sotto l'aspetto umano che dal punto di vista dei danni al patrimonio architettonico e ambientale.

La notizia della dichiarazione di guerra si diffonde a Gorizia

2.14_ "Piano del Castello – Caserma di Gorizia" – questa è la situazione del piano primo del castello rilevata dal "K.u.K. Militär Bau Direction zu Triest" nel 1879 – conservato nell'Archivio Storico Provinciale.



2.15_“Piano del Castello – Caserma di Gorizia” – questa è la situazione del piano secondo del castello rilevata dal “K.u.K. Militär Bau Direction zu Triest” nel 1879 – conservato nell’Archivio Storico Provinciale.

il 23 maggio 1915, da questo giorno fino alla fine della guerra la città viene colpita prima dall’esercito italiano e poi, dopo la conquista del territorio da parte di quest’ultimi, dagli austriaci. Grazie a un testo di carattere storico sul conflitto che ha portato alla conquista di Gorizia da parte dell’Italia possiamo sapere la storia del castello in questo periodo. L’edificio è stato colpito per la prima volta dall’esercito italiano otto mesi dopo l’inizio del conflitto in città e nel territorio circostante, “23 gennaio 1916 Gorizia Nuovi bombardamenti sulla città. Viene preso di mira il castello”.¹⁴ Successivamente l’esercito italiano colpisce il castello il 27 febbraio “la mattina di questa giornata di domenica si apre con un violento bombardamento del castello. Attorno alle sette di mattina diverse granate lo colpiscono, senza però provocare danni eccessivamente gravi né troppe vittime”.¹⁵ Il maniero viene colpito nuovamente il 5 luglio. L’8 agosto 1916 Gorizia viene conquistata dagli Italiani e con il giorno 11 agosto sulla città e sul suo castello cominciano a cadere le bombe austriache, questi attacchi non risparmiano l’edificio ferendolo pesantemente nella parte rivolta a nord-est.

Ranieri Mario Cossar nella sua relazione datata 1937 per il restauro scrive “aveva l’aspetto di un colosso mortalmente ferito in pieno.



2.16_Cartolina storica con rappresentazione del castello di Gorizia datata 1912.

L'edificio centrale colpito da quattro proiettili di 305mm, squarciato in più parti, sconnesso in tutte, sembrava che da un momento all'altro dovesse crollare unitamente ai suoi torrioni. Le fenditure si aprivano ovunque con un crescendo fantastico. Ciò che la guerra aveva ancora rispettato, le intemperie lo condannavano all'estrema distruzione".¹⁶

Subito dopo il conflitto che segna così fortemente il castello comincia un'ampia discussione su cosa fare di quanto rimasto del castello. Vennero fatte tre proposte da parte di storici e tecnici esperti: la prima voleva mantenere il maniero con le sue ferite di guerra come monumento a ricordo di quanto subito su tutto il territorio, una seconda proposta prevedeva la ricostruzione del castello secondo il suo ipotetico assetto pre-conflitto mondiale, l'ultima proposta lo voleva ricostruire in modo da farlo diventare simbolo di una città liberata, rinata. Vinse quest'ultima proposta con l'idea di crearne al suo interno un Museo del Risorgimento per affermare l'appartenenza al territorio italiano sin dalle origini della civiltà goriziana.

Nel 1919 la Direzione Militare Lavori della Venezia Giulia inizia le indagini e l'iter per la ricostruzione del Castello, il primo pensiero, come detto, è stato quello di ricostruire il castello nella sua conformazione anteguerra ma nel corso dello sgombero delle macerie e degli scavi compiuti nel cortile centrale, negli ambienti del piano terra e all'esterno del corpo centrale vengono alla luce importanti elementi da modificare l'idea di ricostruzione del castello. A questo punto interviene l'Ufficio Belle Arti per portare il suo contributo nel progetto di ripristino che si basa sulla messa in valore di tutti gli elementi costruttivi e architettonici di una certa rilevanza venuti alla luce durante gli scavi e i sondaggi, dando così a ogni corpo il proprio carattere ma ottenendo un insieme logico e armonico.

“Ed ecco che dai lavori d'esplorazione apparvero in gran luce degli elementi antichi dianzi nascosti e sotto gl'intonaci, o nei muri o sottoterra. Così



2.17_Il castello semi distrutto dai bombardamenti della prima Guerra Mondiale.

2.18_Immagini della Corte dei Lanzi dopo le distruzioni della Prima Guerra Mondiale.

si scoperse che la enorme massa muraria, che appariva una volta come costruzione unica e coeva, consisteva invece di varie costruzioni di epoche differenti, conglobate nella massa attuale. Si riconobbero i confini dei singoli corpi separati, apparvero la merlatura, nuove porte, nuove finestre, nuove scale, pilastri, le fondamenta di un torrione. E così il Castello si spogliò della sua veste brutta ed ostile, con cui l'Austria l'aveva a forza camuffato. Apparsi in evidenza tutti quelli nuovi elementi, era ovvio che una ricostruzione del Castello non dovesse procedere rifacendo il suo aspetto immediato di anteguerra, ma dovesse bensì tener conto dei capisaldi importantissimi per l'architettura ne serbava.

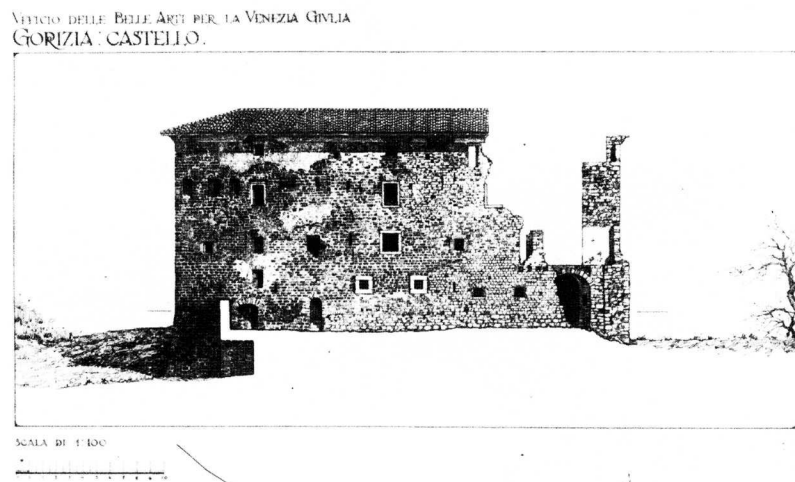
Gli elementi appartengono peraltro ad epoche diverse, e diversi sono gli aspetti che nell'andare del tempo, nello stile e nella loro funzione. Perciò i criteri che si adopereranno, non saranno quelli di voluto ripristino in una data epoca, ma bensì quelli che vaglieranno storicamente ogni singola epoca venuta qui a ... Oggi s'intende per restauro anzitutto consolidamento e la posa in evidenza degli elementi d'importanza storico-artistica, dove ogni periodo storico sarà equivalente. Il problema di tale ripristino dovrà nel caso del Castello, conciliarsi con le esigenze di futuro Museo, a cui sarà adibito".¹⁷

Rilievo del 1920

Prima del progetto di ripristino sono stati eseguiti numerosi e dettagliati rilievi dei ruderi del castello dopo i bombardamenti avvenuti durante la Prima Guerra Mondiale. Contemporaneamente si realizza anche una ampia e accurata campagna fotografica.

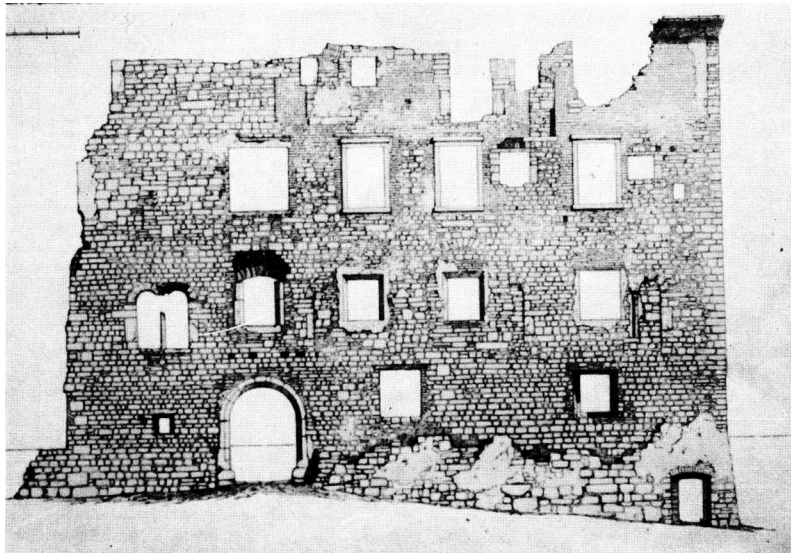
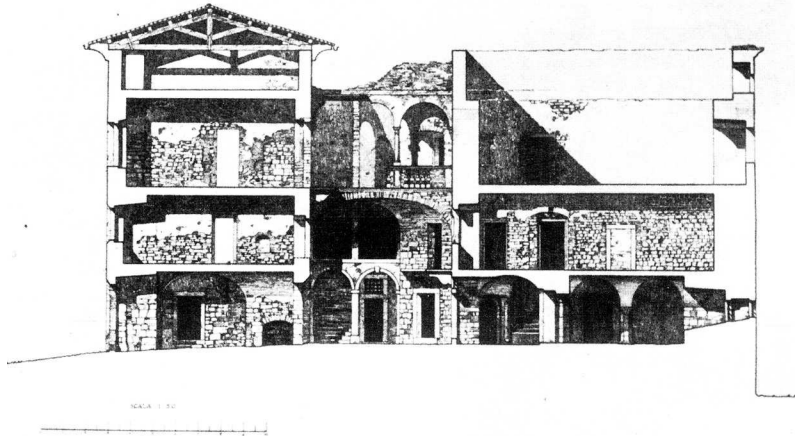
Le tavole dei rilievi effettuati dall'architetto Alberto Riccoboni sono conservati presso l'archivio disegni della Soprintendenza Archeologica Belle Arti e Paesaggio del Friuli Venezia Giulia.

Le tavole rappresentano i prospetti e le sezioni dell'edificio con i segni delle distruzioni causate dai bombardamenti, le piante con la distinzione delle strutture delle diverse epoche e alcune tavole di particolari delle facciate e della cinta muraria.



2.19_Tavole del rilievo effettuato nel 1920 dall'Arch. Riccoboni. Sono rappresentate due facciate.

UFFICIO DELLE BELLE ARTI PER LA VENEZIA GIULIA
GORIZIA - CASTELLO.



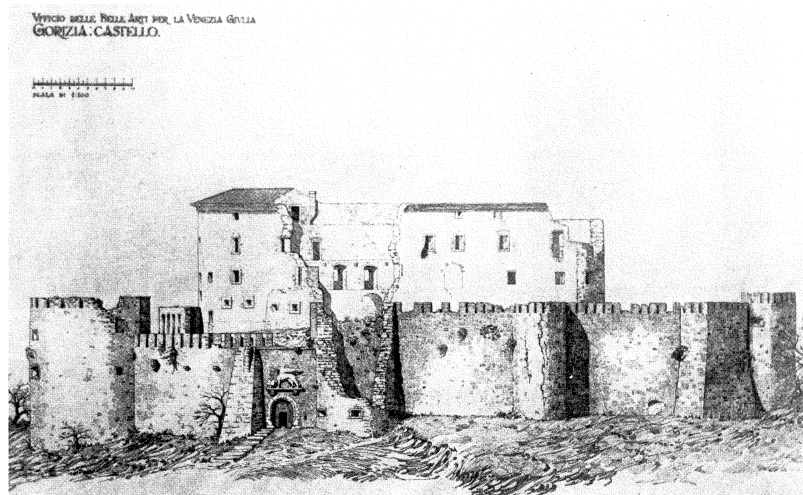
2.20_Tavole del rilievo effettuato nel 1920 dal arch. Riccoboni. Sono rappresentate una sezione sul cortile interno e un particolare di una facciata.

Progetto di ripristino

Dopo un lungo lavoro di analisi dell'architettura rimasta, il 9 ottobre 1924 viene inviato alla Direzione Generale delle Belle Arti, da parte dall'architetto Guido Cirilli – Capo ufficio Belle Arti di Trieste che stava per lasciare l'incarico, il progetto per il ripristino del castello di Gorizia. Il progetto comprendeva 14 piani, 17 tavole, 48 fotografie e una relazione nella quale vengono descritti i lavori da eseguire e tutto l'iter che ha portato a questo progetto.

Nella relazione viene descritto l'aspetto e la funzione del castello prima dello scoppio della guerra mondiale, le sue sorti durante il conflitto, l'inizio dei lavori con la formazione della Commissione, il rilievo sopracitato e lo sgombero delle macerie. Viene descritto

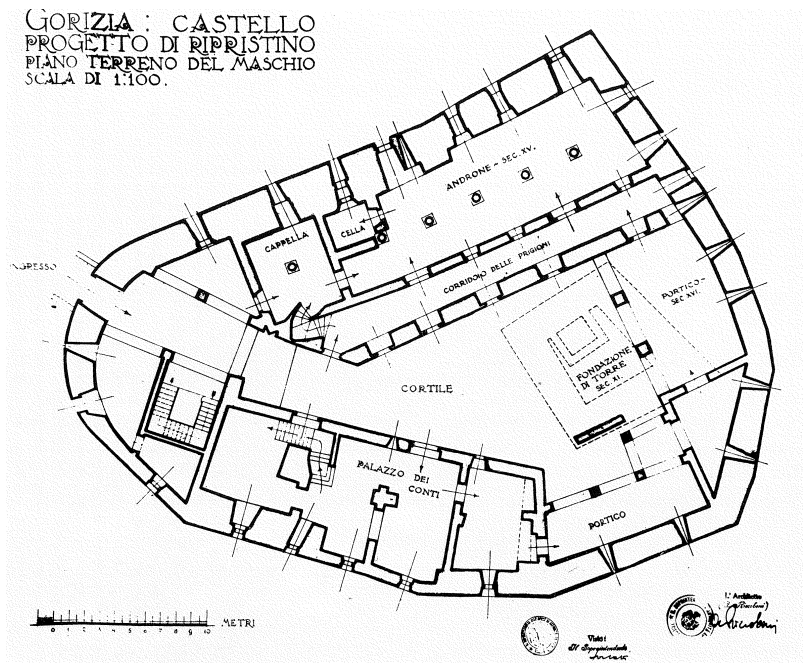
2.21_Tavole del rilievo effettuato nel 1920 dal arch. Riccoboni. La tavola rappresenta la cinta muraria esterna, si può notare come sia già presente il Leone Marciano.



il lavoro di ricerca avviato dopo i rinvenimenti fatti durante l'asportazione e la messa in sicurezza del rudere, indentificando, così, le diverse epoche di costruzione e le modifiche apportate ai singoli edifici.

Il capo ufficio delle Belle Arti Guido Cirilli descrive i lavori di consolidamento già effettuati in quella data scrivendo: "1° Demolizione dei tetti, già in parte abbattuti. – 2° Demolizione di murature sopraelevatesi oltre le costruzioni originarie e gravanti oltre misura sulle murature antiche. Demolizione di murature di ridosso e demolizione di pareti divisorie. Aperture di porte ostruite, liberazione delle arcate obliteate. – 3° Demolizione di aggiunte di epoche recenti quali la grande scala in cemento

2.22_Tavole del progetto di ripristino dell'architetto Forlati. La tavola rappresenta il piano terra del castello, si nota come l'attuale ingresso principale era ipotizzato in modo diverso.



armato, i ballatoi, le celle delle prigioni ecc, se ne è conservata una come ricordo storico. – 4° Ricostruzione di volte, di murature, di arcate ecc. Copertura delle volte al piano terreno con piano in cemento, onde rafforzare e salvaguardare le volte stesse. – 5° Parziale ricostruzione di largo tratto della cinta bastionata e di un torrione tondo. – 6° Puntellazioni varie e altre opere accessorie”¹⁸. Proseguendo la lettura viene descritto il progetto di restauro, la destinazione del castello a museo, la sospensione dei lavori nel 1923 e quali sarebbero i mezzi adeguati per la ripresa e la continuazione dei lavori.

In un documento datato 1932, che il soprintendente Forlati (il successore di Cirilli) e il suo braccio destro l'architetto Riccoboni inviano al Ministero dell'Istruzione - Direzione Generale Antichità e Belle Arti di Roma, viene descritto l'aggiornamento del progetto di restauro che si prestano a cominciare

I lavori cominciano due anni dopo, nel 1934, e vengono conclusi con l'inaugurazione il 7 settembre 1937.

Nel corso di tre anni dedicate ai lavori, parte per parte, il castello fu ricostruito secondo una veste unitaria medievale caratterizzata dall'impiego della pietra a vista, che sicuramente aveva già perduto nel corso del 1600 come si evince dalle raffigurazioni dell'epoca. I lavori di restauro avevano conferito al complesso del castello una nuova aura che divenne immediatamente parte integrante della città e simbolo dei contrasti e delle trasformazioni che aveva subito.

2.3 Rilievo architettonico

Successivamente all'analisi storica dei testi e dei documenti, per conoscere e comprendere in modo esaustivo un bene architettonico è fondamentale studiarlo, attraverso la misura ed il rilievo delle sue parti, in modo da comprendere le sue forme generatrici, le caratteristiche spaziali e le tecniche costruttive.

Per una conoscenza profonda della tipologia architettonica si ricorre necessariamente alla rappresentazione per scomposizione e aggregazione delle componenti e alla realizzazione di modelli interpretativi. Attraverso il rilievo, come già avvenuto con l'opera di documentazione del castello effettuata da Riccoboni, è possibile ricostruire le molteplici vicende subite dal manufatto, evidenziarne la struttura portante, cogliere gli elementi caratteristici e quelli anomali, traducendo così l'edificio nelle sue rappresentazioni critiche. Queste rappresentazioni, che siano rappresentazioni grafiche bidimensionali (pianche, prospetti e sezioni), modelli fisici o modelli digitali con la finalità delle illustrazioni fotorealistiche,

ovvero applicazioni di realtà aumentate o, come nel nostro caso, delle ambientazioni digitali di realtà virtuale, sono simulazioni critiche dell'oggetto di studio.

Si rappresentano così solo le componenti fondamentali per la comprensione del caso di studio, tralasciando le informazioni superflue e ridondanti. Il rilievo, quindi, assume un ruolo fondamentale per la conoscenza critica dell'edificio analizzato e fa parte del processo conoscitivo propedeutico alle fasi successive. Sul fronte metodologico ogni processo di rilievo ha uno scopo finale e il metodo e la strumentazione utilizzata dovrà essere finalizzata al suo obiettivo specifico; la scala di riduzione o di rappresentazione degli elaborati finali costituisce un parametro fondamentale per la pianificazione ottimale delle attività e della strumentazione da impiegare in modo indirizzare il grado di dettaglio per la misura degli elementi.

Per eseguire un buon rilievo utilizzando la strumentazione tradizionale bisogna seguire, come ricordato dal Mario Docci¹⁹ e dal Carlo Bianchini²⁰ nei loro scritti, tre passi fondamentali: la prima fase tratta del progetto di rilievo nel quale viene programmato l'intero processo tenendo conto degli obiettivi, delle caratteristiche del bene e degli strumenti a disposizione, viene considerata una fase soggettiva in quanto le decisioni prese cambiano da rilevatore a rilevatore; il secondo passo è l'acquisizione dei dati, il rilevamento delle misure. Questa, a differenza della precedente, è una fase oggettiva. Infine l'ultima fase, si tratta della rappresentazione, anche in questo caso ci troviamo di fronte a delle scelte soggettive in quanto il tipo di rappresentazione finale dipende dagli obiettivi prefissati a inizio lavoro, dalla scala di riduzione e dalla sintesi del lavoro, dal modello restituito che sia bidimensionale o tridimensionale. Tutto ciò deve permettere la riconoscibilità e la lettura del manufatto.

Nella fase di misurazione si redigono degli eidotipi per registrare i dati rilevati ed è in questo momento che si deve operare una selezione dei punti fondamentali che andranno misurati che poi andranno a formare la restituzione. Questa fase necessita di uno studio preliminare nel quale riconoscere le caratteristiche architettoniche dell'edificio al fine di discretizzare da subito l'impianto architettonico.

La trasformazione digitale del processo di rilievo avvenuta negli ultimi decenni ha portato all'introduzione e alla integrazione di tecnologie e metodologie innovative per le attività di acquisizione ed elaborazione dei dati. Gli strumenti a nostra disposizione ora portano il rilevatore a procedere in maniera nettamente diversa rispetto ai processi spiegati in precedenza e utilizzati nel rilievo tradizionale. Le nuove tecnologie, come ad esempio il laser scanner o lo scanner a luce strutturata o la fotogrammetria digitale, portano a delle fasi di rilevamento in qualche modo invertite, la fase di apporto critico viene spostata nella fase di elaborazione

e restituzione grafiche. L'utilizzo di queste strumentazioni riduce notevolmente le attività operative sul campo a fronte della possibilità di registrare una enorme quantità di dati che potrebbero anche essere inutili al fine del rilievo o addirittura rallentare le fasi successive. Queste metodologie cambiano la programmazione, la tempistica e il modo di operare consentendo maggiore rapidità durante la campagna di rilievo mentre la fase di elaborazione e postproduzione richiede una notevole dose di abilità negli strumenti CAD per l'ottimizzazione e finalizzazione dei dati e delle rappresentazioni possibili.

2.3.1 Problematiche di misura e rappresentazione

Sicuramente di natura diversa rispetto a quello eseguito nel 1920 da parte dell'architetto Riccoboni è il rilievo portato a compimento durante questa ricerca.

Si sono effettuati principalmente tre campagne di rilievo integrando diverse strumentazioni, la prima utilizzando il laser scanner ovvero l'acquisizione di nuvole di punti dense, l'altra utilizzando uno scanner a microfotografie e l'ultima impiegando la fotogrammetria; la prima tecnologia è stata utilizzata per rilevare l'intero mastio mentre gli altri metodi e strumenti sono stati utilizzati per rilevare oggetti all'interno degli edifici o dei dettagli.

2.3.2 Applicazione di tecnologie di laser scanner

Il laser scanner è un dispositivo elettro-ottico meccanico che attraverso una successione di scansioni permette di rilevare degli oggetti nelle tre dimensioni, sono a disposizione tre tecnologie di funzionamento (triangolazione, variazione di fase, tempo di volo) per l'acquisizione dei punti da rilevare. Ogni tecnologia ha caratteristiche diverse e va scelta a seconda del tipo di rilievo da fare. I sistemi a triangolazione sono utilizzati per le scansioni nell'industria e nella meccanica in quanto hanno una altissima precisione (sull'ordine di 0,01 mm) ma a breve distanza. Le altre due tecnologie vengono utilizzate in campo architettonico e territoriale, prevedono l'individuazione della distanza del punto rilevato e dall'emettitore laser. Garantiscono una precisione del millimetro.

2.23_Scanner Laser 3D Faro CAM2
in azione all'interno di una sala del
castello.



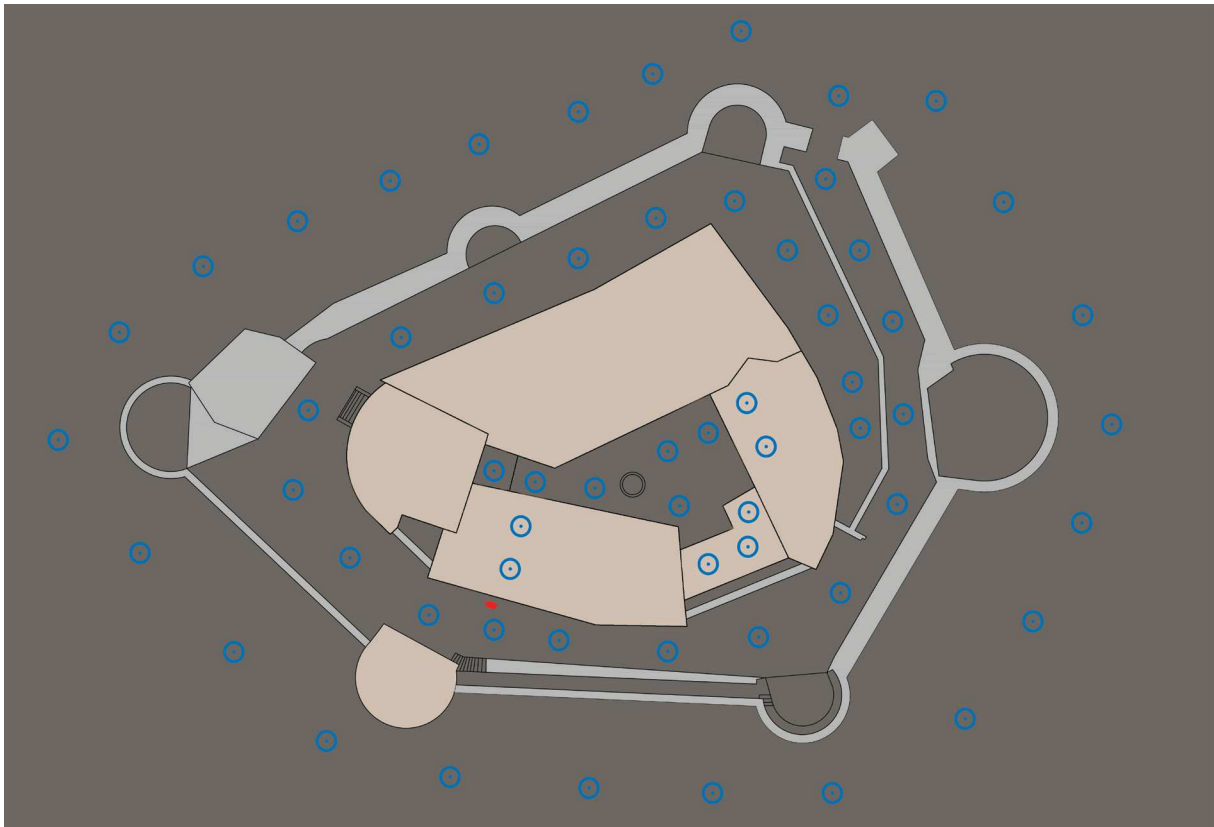
2.24_Immagine di una fase della
campagna di rilievo esterno alla cinta
muraria del maniero.



La metodologia di ricerca ha l'obiettivo di validare il procedimento di rilievo che utilizza lo scanner laser per una raccolta accurata e massiva di dati 3D laddove la complessità geometrica e morfologica del complesso architettonico non permette di usare efficacemente altri metodi. Questo approccio di acquisizione 3D è stato la base per la verifica dei rilievi e dei disegni recuperati negli archivi ed è stata la base di partenza per la ricostruzione del modello tridimensionale utilizzato nelle fasi finali di questa ricerca.

Per il rilievo è stato utilizzato uno scanner laser 3D Faro CAM 2 Focus 3D che consente di rilevare nuvole di punti dense con una accuratezza di circa 2mm a 10m di distanza.

Per prima cosa si è progettata la campagna di rilievo impostando



2.25_Posizionamento delle scansioni all'esterno della muratura, nel percorso all'interno della cinta e all'interno della corte, programmate durante la fase di progettazione del rilievo.

Nella Pagina accanto

2.26_Posizione delle 22 scansioni all'esterno della cinta muraria del maniero, si può notare come non sia stato possibile effettuare scansioni attorno a tutto l'edificio a causa di un cantiere e per la presenza di alberature che impediscono la vista ovvero la scansione.

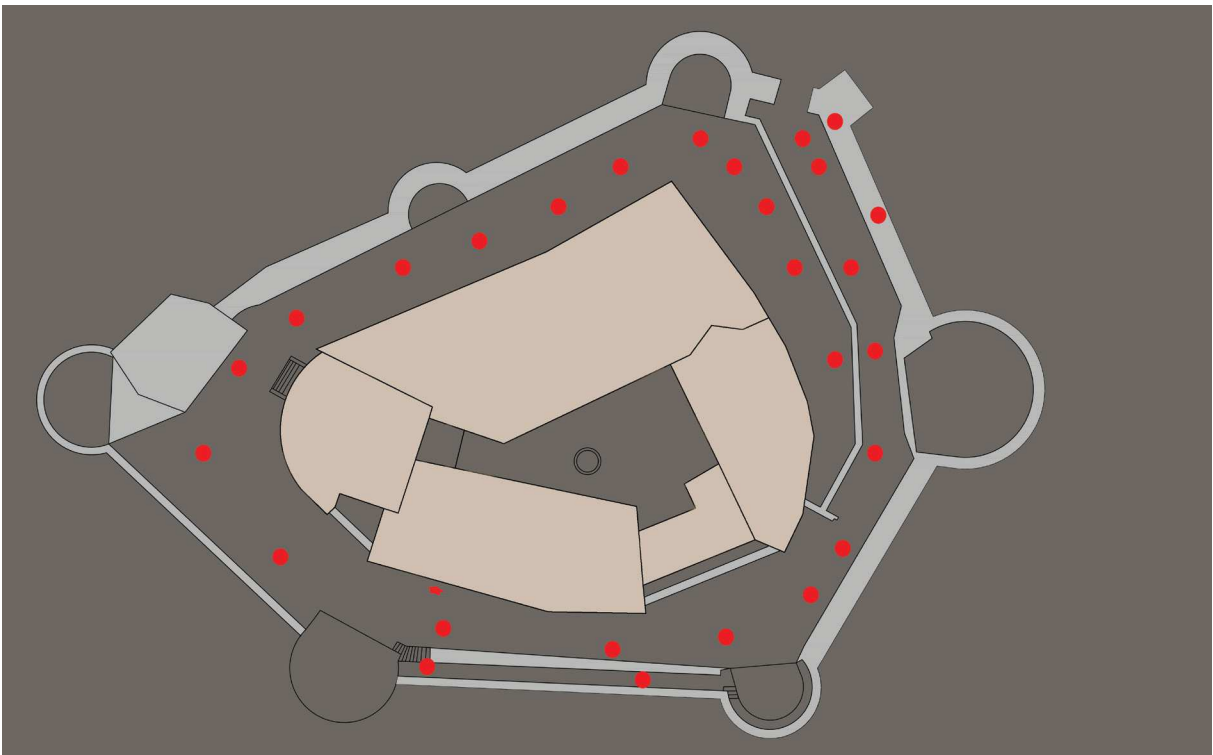
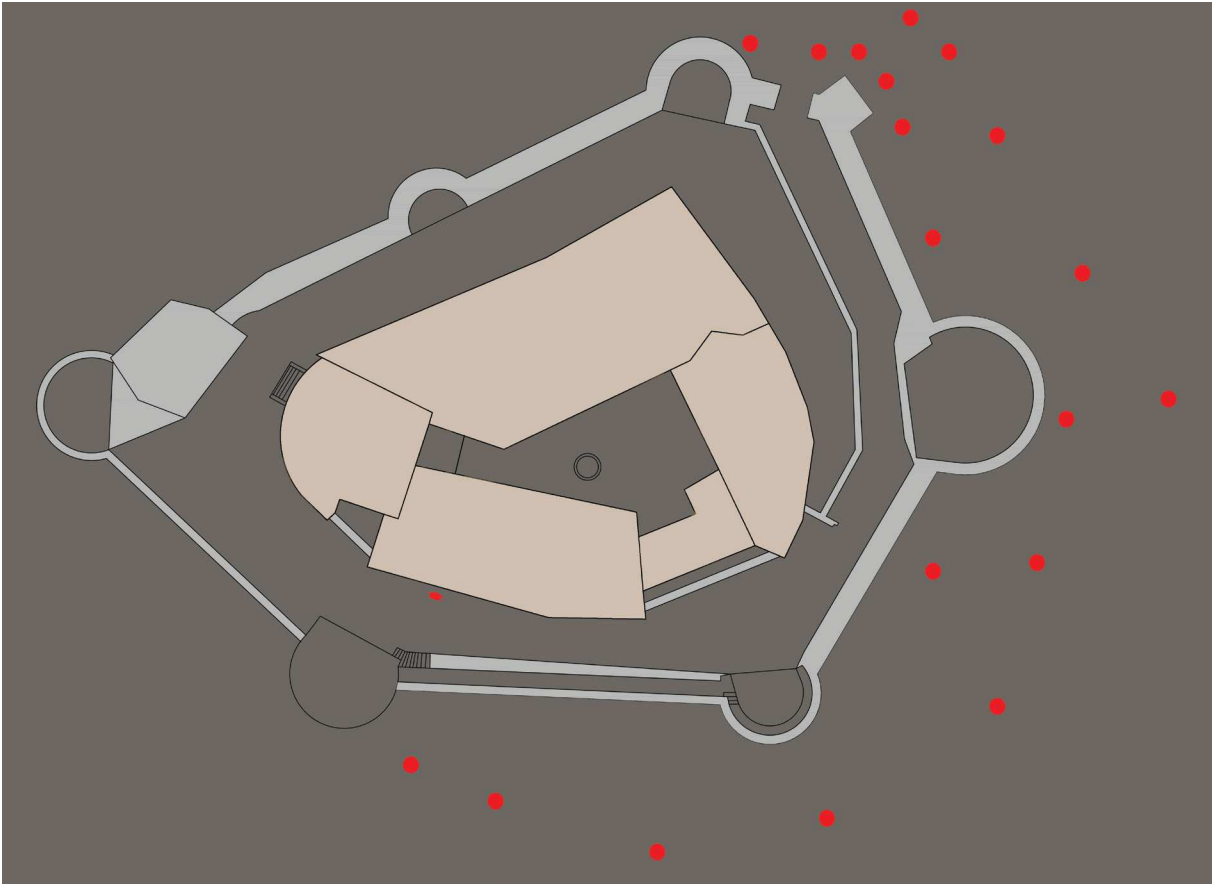
2.27_Posizione delle 30 scansioni all'interno della cinta muraria del castello.

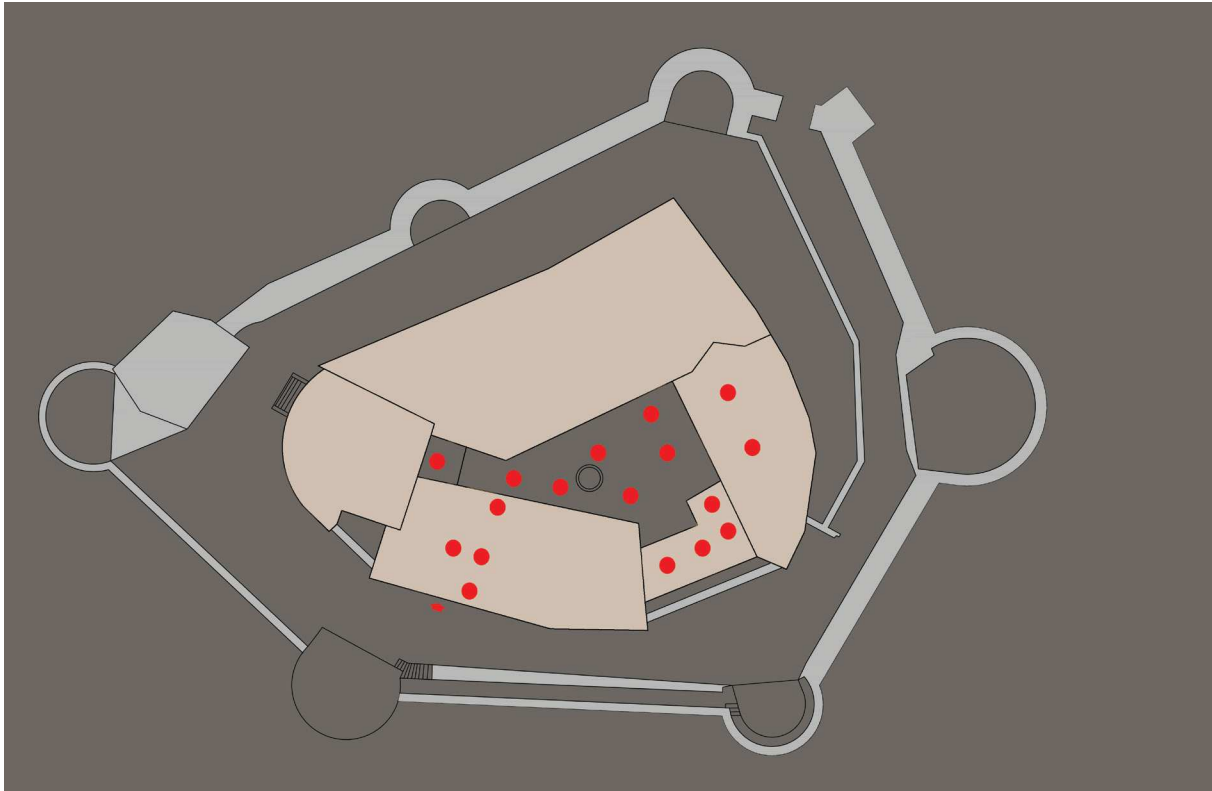
di effettuare le riprese con lo strumento attorno a tutta la cinta perimetrale del castello, all'interno delle mura e all'interno della Corte dei Lanzi. successivamente si sono fatti dei test in loco per affinare la campagna di rilevamento e verificarne l'efficacia nelle particolari e complesse condizioni operative, durante il primo sopralluogo si è visto che alcune parti non erano raggiungibili a causa di un cantiere in corso o a causa della vegetazione che impedisce di vedere il maniero, si è così dovuto limitare il numero delle acquisizioni della cinta di difesa del maniero.

Durante la campagna di rilevamento sono state registrate 71 scansioni utili alla finalità del rilievo, così suddivise: 22 attorno alle mura del castello principalmente nei pressi dell'ingresso e come si può vedere dalle immagini successive, 30 all'interno delle mura e 17 all'interno della Corte dei Lanzi.

Ogni nuvola registrata ha rilevato circa 8.000.000 punti per una dimensione finale della cartella di archivio che varia dai 140 ai 180 MB ciascuna, questa cartella contiene oltre ai dati 3D anche tutte le informazioni di tipo accessorio per potere gestire e visualizzare la nuvola di punti, all'interno si trovano dati sulla ripresa di immagini panoramiche (lo strumento è equipaggiato con una camera RGB), *texture* e base-dati cromatiche.

Si può facilmente dedurre come un numero elevato di scansioni porta a una quantità notevole di dati da gestire in fase di elaborazione.





Nome	Ultima modifica	Tipo	Dimensione
greyMap0	14/06/2016 15:19	File	1 KB
greyMap1	14/06/2016 15:19	File	1 KB
sGreyMap0	14/06/2016 15:19	File	1 KB
sGreyMap1	14/06/2016 15:19	File	1 KB

Nome	Ultima modifica	Tipo	Dimensione
Calib	14/06/2016 15:19	File	548 KB
Dist0	14/06/2016 15:19	File	1 KB
Dist0.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	1 KB
Dist1	14/06/2016 15:19	File	1 KB
Dist1.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	1 KB
DistCalib	14/06/2016 15:19	File	1 KB
Grey0	14/06/2016 15:19	File	1 KB
Grey0.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	1 KB
Grey1	14/06/2016 15:19	File	1 KB
Grey1.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	1 KB
Log	14/06/2016 15:19	File	152 KB
MirrorIndex0.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	54 KB
MirrorIndex1.hls	14/06/2016 15:19	File-HLS	54 KB
Params	14/06/2016 15:19	File	166 KB
ReferencePicture	14/06/2016 15:19	File	13 KB
ScanDataStream0	14/06/2016 15:15	File	65.540 KB
ScanDataStream1	14/06/2016 15:19	File	64.657 KB
Signature	14/06/2016 15:19	File	1 KB

Bitmaps	27/06/2018 16:08	Cartella di file	
Scans	27/06/2018 16:08	Cartella di file	
.classid	14/06/2016 15:19	File CLASSID	1 KB
Main	14/06/2016 15:19	File	167 KB
Scan_045.flv	12/11/2018 09:50	File FLS	0 KB

La facilità e la velocità con la quale si registrano i punti durante un rilievo con lo scanner 3D porta a dover analizzare e selezionare una quantità di dati di notevole dimensione, per lo scopo finale di questa ricerca si è dovuto procedere a una pulizia e discretizzazione del materiale.

Per la registrazione e l'allineamento delle scansioni effettuate si è utilizzato il programma Autodesk Recap.

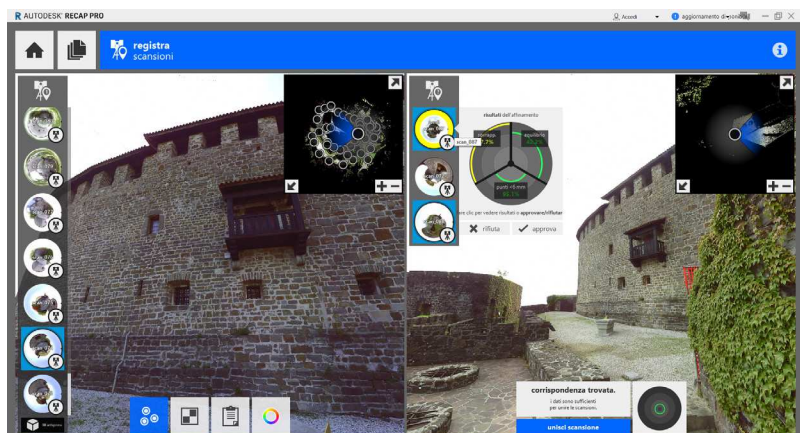
Il programma prevede l'importazione delle singole nuvole e il successivo allineamento per coppie attraverso l'individuazione automatica o suggerita dall'operatore dei punti omologhi.

Solamente nel caso di due scansioni acquisite nel piano superiore

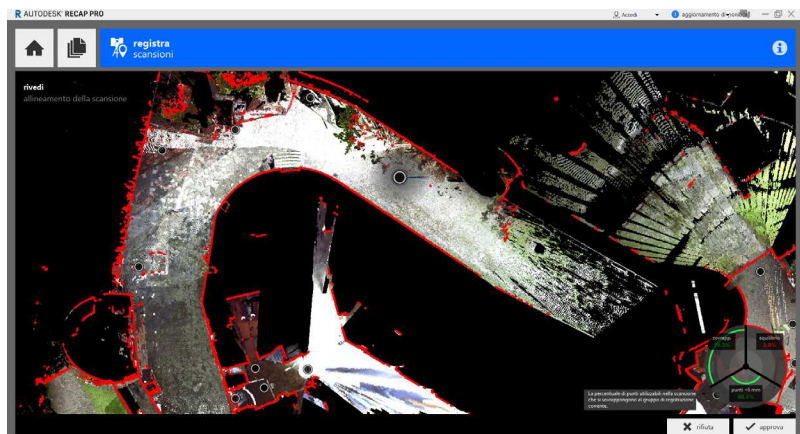
Nella Pagina accanto 2.28_Schema delle 17 stazioni di ripresa effettuate all'interno della Corte dei Lanzi.

2.29_Nella figura è riportata la composizione informatica di nuvola di punti registrata dallo scanner con i dati sull'immagine panoramica e la successione di cartelle che vanno a comporre quella finale dove sono contenute tutte le informazioni di ogni singola scansione.

2.30_Schermata del software per l'allineamento delle nuvole.



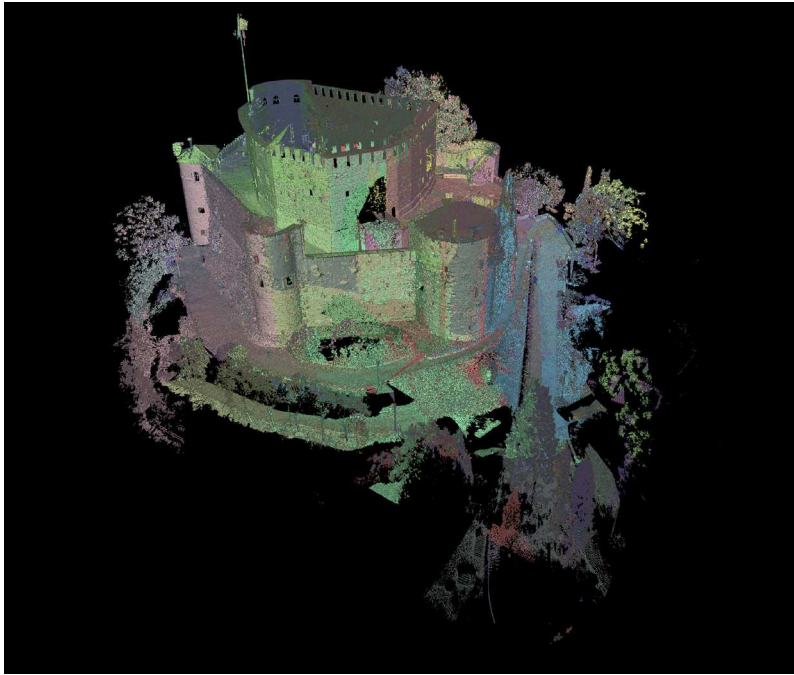
2.31_Sovrapposizione delle nuvole in fase di allineamento



della loggia all'interno della Corte dei Lanzi, non è stato possibile allinearle al resto della nuvola.

Per questione di grandezze dei file di lavoro in un primo momento si è deciso di allineare le nuvole della parte esterna e della corte dei Lanzi in due progetti separati.

Una volta allineate le scansioni all'esterno e all'interno della cinta muraria le nuvole sono state analizzate per comprendere quali parti erano utili e necessarie allo scopo di realizzare un modello tridimensionale del castello di Gorizia. Sono stati rilevati



2.32_Nuvola di punti complessiva con le diverse scansioni. Si può notare come sia stato registrato tutto l'ambiente circostante del Borgo Castello, in virtù della portata del sensore dello scanner che può arrivare in condizioni ottimali a registrare punti fino a circa 200 metri.

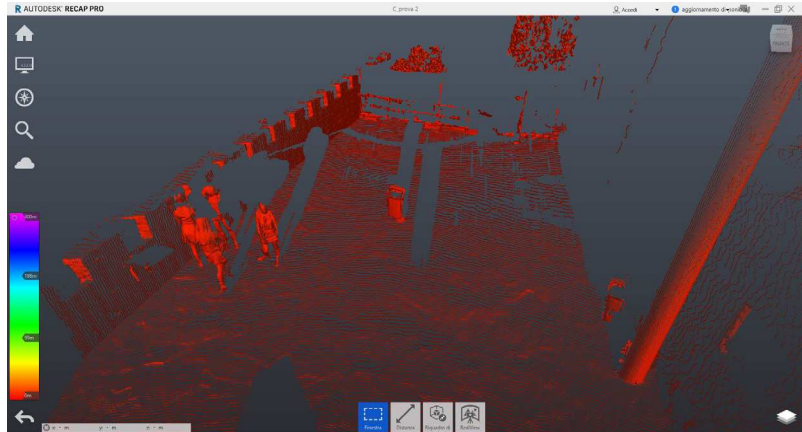
numerosi gli elementi estranei, influenti o sfornanti ai fini del rilievo come cavi sospesi, volatili, alberature, letti erbosi, persone che possono essere stati ripresi dello strumentosa nella fase di misurazione dei punti o nella fase di acquisizione delle immagini per l'applicazione delle *texture*.

Queste zone possono essere di due tipi: dei punti tridimensionali che vanno a creare delle zone d'ombra all'interno della nuvola dovuti a degli ostacoli fisici che si trovavano nel campo di ripresa durante la registrazione della nuvola di punti; o delle zone di punti che sono collocate giuste nello spazio ma che sono alterate nella *texture*, questo è dato da un ostacolo durante lo scatto delle

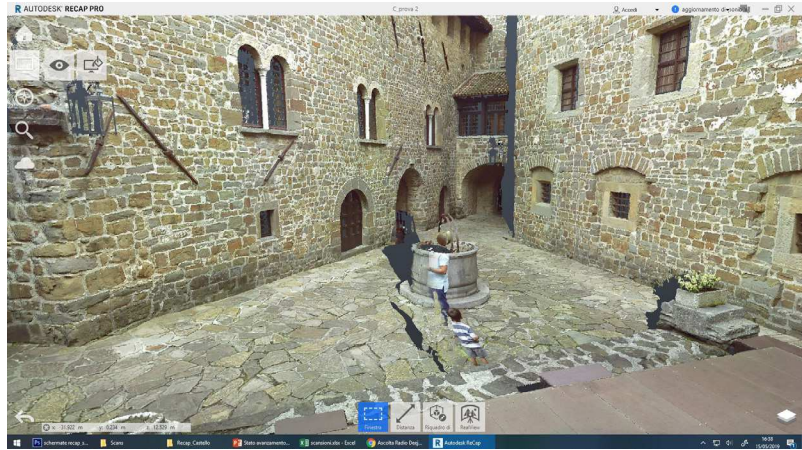


2.33_In questa visione della nuvola sono stati evidenziati in bianco tutti i punti che fanno parte dell'intorno e non sono utili all'individuazione della geometria del castello.

2.34_In questa visione della nuvola si vedono gli elementi di disturbo, questi punti tridimensionali vanno eliminati per non creare degli elementi che non fanno parte dell'architettura analizzata.



2.35_In questo caso si vedono le immagini di alcune persone che vengono "adagiate" sulla geometria del pozzo.



immagini con le quali si associano dei valori RGB ai punti spaziali, ma che si sono spostati in fase di acquisizione dei punti. Entrambe le situazioni, che possono essere considerate temporanee, sono da eliminare perchè andrebbero a disturbare la creazione della geometria o della successiva applicazione delle *texture*.

Per risolvere questo problema bisogna analizzare, valutare e lavorare le singole nuvole, facendo attenzione, soprattutto nel caso di elementi di disturbo nelle *texture* ma non nella posizione nello spazio, di non cancellare delle porzioni necessarie per la formazione della geometria dell'elemento.

Riportiamo nelle seguenti tabelle la quantità, nell'ordine del milione, dei punti che compongono le diverse nuvole utilizzate per la creazione della nuvola di insieme, si può notare come le diverse nuvole di punti utilizzate per l'allineamento cambiano, in alcuni casi anche notevolmente, la quantità dei punti una volta puliti da tutti quelli che andavano a modificare sia la geometria degli elementi architettonici che la *texture*. possiamo prendere ad esempio la nuvola numero 43 che passa da 7,98 milioni di punti a 3,89 milioni di punti.

NOME FILE C_PROVA 2_2			NOME FILE C_ESTERNO_16-40_56-68			
pulito da punti						
SCAN	16	13.60 M	SCAN	16	11.56 M	
SCAN	18	11.45 M	SCAN	18	9.19 M	
SCAN	19	8.84 M	SCAN	19	8.54 M	
SCAN	20	9.54 M	SCAN	20	8.24 M	
SCAN	21	8.74 M	SCAN	21	7.37 M	
SCAN	22	7.06 M	SCAN	22	5.19 M	
SCAN	23	8.13 M	SCAN	23	6.71 M	
SCAN	24	7.31 M	SCAN	24	6.56 M	
SCAN	25	8.94 M	SCAN	25	7.94 M	
SCAN	26	7.40 M	SCAN	26	6.76 M	
SCAN	27	8.86 M	SCAN	27	8.31 M	
SCAN	28	11.96 M	SCAN	28	9.37 M	
SCAN	29	11.48 M	Portico	SCAN	29	11,41 M
SCAN	30	10.10 M	portico/salita	SCAN	30	10.09 M
SCAN	31	8.93 M	salita	SCAN	31	8.85 M
SCAN	32	8.98 M	salita	SCAN	32	8.95 M
SCAN	33	8.95 M	salita	SCAN	33	8.88 M
SCAN	34	11.94 M	salita	SCAN	34	11.29 M
SCAN	35	10.47 M	salita	SCAN	35	10.07 M
SCAN	36	10.38 M	salita	SCAN	36	10.35 M
SCAN	37	6.97 M	ingresso	SCAN	37	5.27 M
SCAN	38	7.76 M	ingresso	SCAN	38	6.16 M
SCAN	39	6.91 M	ingresso	SCAN	39	5.59 M
SCAN	40	9.34 M	ingresso	SCAN	40	4.60 M
SCAN	56	7.47 M	camminamento	SCAN	56	7.35 M
SCAN	57	7.41 M	camminamento	SCAN	57	7.39 M
SCAN	58	7.82 M	esterno	SCAN	58	6.50 M
SCAN	59	8.26 M	esterno	SCAN	59	6.98 M
SCAN	60	11.77 M	esterno	SCAN	60	10.20 M
SCAN	61	8.57 M	esterno	SCAN	61	7.54 M
SCAN	62	9.31 M		SCAN	62	8.59 M
SCAN	63	9.91 M		SCAN	63	9.75 M
SCAN	64	8.55 M		SCAN	64	8.09 M
SCAN	65	8.52 M		SCAN	65	8.12 M
SCAN	66	8.66 M		SCAN	66	8.47 M
SCAN	67	7.77 M		SCAN	67	7.73 M
SCAN	68	8.41 M		SCAN	68	8.33 M

2.36_Tabella riassuntiva delle scansioni registrate per rilevare la parte della cinta muraria e della zona intorno agli edifici del castello. In questa tabella è stato registrato il numero di punti, nella grandezza del milione, prima e dopo la pulitura dei punti che andavano a interferire sulla geometria e sulla *texture* dell'allineamento delle nuvole.

Nella pagina accanto

2.37_Tabella riassuntiva delle scansioni registrate per rilevare dei Lanzi. In questa tabella è stato registrato il numero di punti, nella grandezza del milione, prima e dopo la pulitura dei punti che andavano a interferire sulla geometria e sulla *texture* dell'allineamento delle nuvole.

NOME FILE C_PROVA 2_3						
SCAN	36	10.38 M	esterno/ingresso	SCAN	36	10.34 M
SCAN	37	6.77 M	ingresso	SCAN	37	5.23 M
SCAN	38	7.76 M	ingresso	SCAN	38	6.44 M
SCAN	38	6.91 M	ingresso	SCAN	38	6.69 M
SCAN	40	9.34 M	ingresso/cortile	SCAN	40	4.61 M
SCAN	41	8.06 M	raccordo	SCAN	41	4.48 M
SCAN	43	7.98 M		SCAN	43	3.89 M
SCAN	44	9.29 M		SCAN	44	5.29 M
SCAN	45	8.66 M		SCAN	45	5.02 M
SCAN	46	15.13 M		SCAN	46	15.00 M
SCAN	47	14.57 M		SCAN	47	14.47 M
SCAN	48	13.71 M		SCAN	48	13.64 M
SCAN	49	9.93 M		SCAN	49	9.82 M
SCAN	50	8.87 M		SCAN	50	7.95 M
SCAN	51	8.03 M		SCAN	51	6.63 M
SCAN	52	15.52 M		SCAN	52	15.46 M
SCAN	53	10.71 M		SCAN	53	10.71 M
SCAN	56	7.47 M	camminamento	SCAN	56	7.36 M
SCAN	42	13.62 M		SCAN	42	12,36 M
SCAN	71	9.69 M		SCAN	71	9.38 M
SCAN	54		loggia piano superiore	non si riescono ad allineare		
SCAN	55		loggia piano superiore			

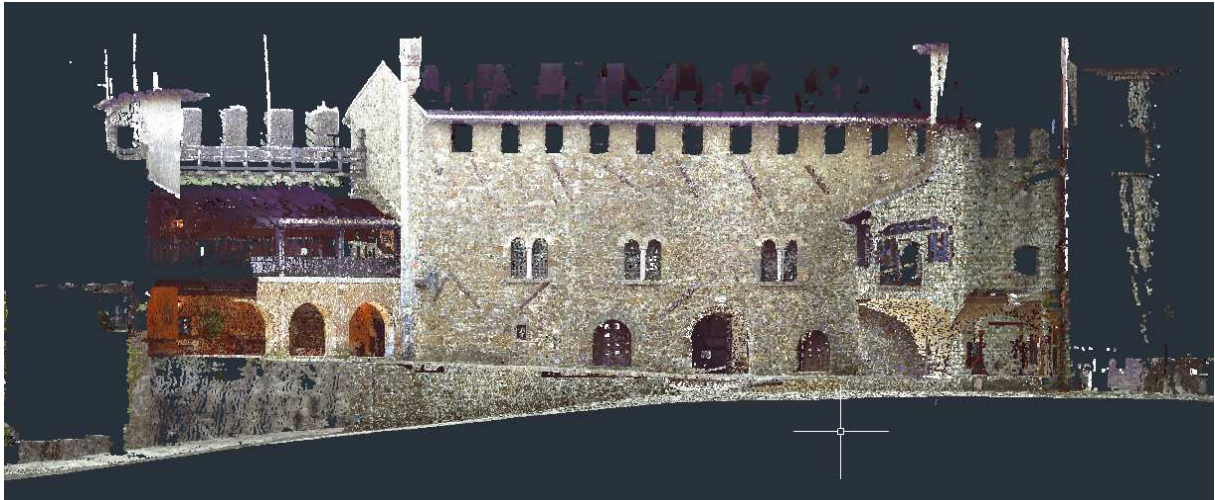
Infine per alleggerire ulteriormente le nuvole che utilizzeremo per la ricostruzione tridimensionale delle geometrie di base si è deciso di unire le diverse nuvole e decimare i punti doppi, e allargare la griglia della nuvola.

La nuvola completa, come detto in precedenza e come verrà illustrato nel proseguo della tesi, è stata utilizzata per individuare delle sezioni orizzontali e delle sezioni verticali per determinare l'andamento della muratura.

2.38_ Nella tabella di destra si può notare come varia la dimensione del file se si tengono le nuvole, pulite dai punti che non interessano, separate o si uniscono e si amplia la griglia dei punti.



	Dimensione cartella	Numero punti
Nuvole singole	19,6 Gb	544,9 M
Griglia 2cm	8,6 Gb	378,7 M
Griglia 5cm	7,8 Gb	344,9 M
Griglia 10cm	6,8 Gb	300,7 M



2.39_Sezione della nuvola di punti all'interno della Corte dei Lanzi. Si può osservare la facciata interna del Palazzo dei Conti.



2.40_In senso antiorario: frame del percorso all'interno della nuvola di punti.

2.3.3 Applicazione della tecnologia di scansione con microfotografie

La seconda campagna di rilievo eseguita durante il secondo anno di ricerca è stata realizzata utilizzando uno scanner con interpolazione automatica di microfotografie. È stato utilizzato lo scanner Sense 3D che attraverso due macchine fotografiche, una che registra la geometria e una la cromia, genera, a differenza della scansione laser, una mesh tridimensionale, in più presenta un raggio laser che utilizza per la determinare la grandezza dell'oggetto scansionati. Questo tipo di tecnologia riesce a sfruttare bene le sue potenzialità per oggetti di piccole medie dimensioni e che si trovano in ambienti ben illuminati con luce diffusa. Lo scanner è stato utilizzato per analizzare alcuni oggetti della collezione esposta all'interno del castello, in modo particolare due porta ceri in legno che si trovano al secondo piano.

Si è deciso di testare le diverse modalità di scansione che propone il software di supporto. Le opzioni principali sono “oggetto” o “persona” a loro volta offrono delle possibilità, nel caso

2.41_A sinistra una immagine del soggetto rilevato – a destra fase di lavoro con l'utilizzo dello scanner Sense 3D.





Statistiche e ombreggiatura

Deseleziona tutto

Dati mesh

<input checked="" type="checkbox"/> Triangoli	137.778
Vertici	111.544
Set UV 0	No
Set UV 1	No
Colori vertice	No
ID materiale	1

2.42_In questo caso si è scelta l'opzione oggetto grande, si può vedere come è stato possibile rilevare tutta la statua all'interno della nicchia, con un numero totale di 137.778 triangoli.



2.43_In questo caso si è scelta l'opzione oggetto medio, si può vedere come il volume imposto dal programma ha permesso di elaborare solamente la parte alta della statua e ha creato una mesh con molti più triangoli della precedente (292.240), ciò ha permesso una maggiore definizione nelle vesti e nel viso.

Statistiche e ombreggiatura

Deseleziona tutto

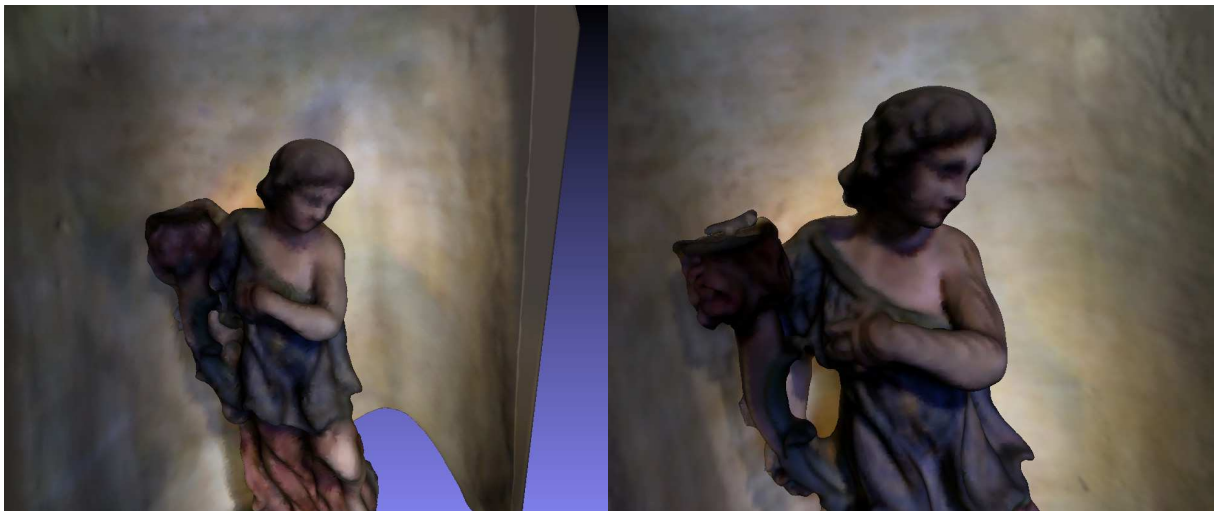
Dati mesh

<input checked="" type="checkbox"/> Triangoli	292.240
Vertici	238.299
Set UV 0	No
Set UV 1	No
Colori vertice	No
ID materiale	1

dell'oggetto si può scegliere a seconda della grandezza (piccolo, medio, grande) del manufatto da rilevare, e nel caso della persona grandezza ritratto o figura intera. A seconda della scelta fatta il programma definisce dei parametri ideali sulla distanza da mantenere tra l'oggetto e lo strumento, il volume da rilevare e la qualità della scansione (in termini di poligoni che compongono la mesh), più grande sarà il soggetto della scansione, oggetto grande o figura intera, minore sarà la qualità del prodotto finito.

Si può notare dalle immagini come lo stesso soggetto scansionato come oggetto grande e oggetto medio presenta un volume di scansione diversa, nel primo caso si è riusciti a scansionare, in un'unica volta, tutta la statua portacero; mentre nell'altra scansione si è ripreso dalla testa alla vita. Anche il numero di poligoni che compongono le due mesh è molto diverso, nel caso della scansione di oggetto medio si ha una mesh composta dal doppio dei poligoni rispetto all'altra. questo sicuramente fa comprendere bene la definizione della scansione.

2.44_Differenza di qualità geometrica nel dettaglio anatomico tra due opzioni di scansione.



2.3.4 Rilievo 3D attraverso fotomodellazione SfM

La terza metodologia di acquisizioni di dati tridimensionali utilizzata è stata la fotomodellazione. Anche questa tecnica, come la precedente, è stata utilizzata per il rilievo di alcuni elementi all'interno del castello.

Mostreremo l'esempio del resto del mastio che troviamo all'interno della Corte dei Lanza.

La *Structure from Motion* è una tecnica che permette di ricreare un



2.45_Campionamento fotografico utilizzato per la realizzazione del modello tridimensionale del resto del mastio all'interno della Corte dei Lanzi.

modello tridimensionale attraverso l'interpolazione di immagini fotografiche scattate secondo delle precise linee guida.

Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata una macchina fotografica reflex Canon EOS 600D con obiettivo Tamron zoom 18-270. Tutte le immagini campionate sono state salvate in formato RAW con una risoluzione di 5184 x 3456 dpi con un peso di circa 24 MB a immagine.

Viene utilizzato il formato Raw perché offre una migliore qualità e la possibilità di effettuare il bilanciamento del bianco a posteriori su tutte le immagini contemporaneamente, se durante la campagna di rilievo fotografico si è fotografata la carta colore con le stesse condizioni ambientali e con le stesse impostazioni della macchina fotografica delle immagini scattate all'oggetto da rilevare.

Come spiegano Livio De Luca nel suo testo²¹ e Pedro Cabezos²² bisogna mantenere degli accorgimenti durante la ripresa di tutta la serie di fotografie per ogni soggetto. L'ideale sarebbe

impostare la macchina fotografica con una velocità di otturazione rapida in modo da evitare di scattare fotografie mosse, mantenere il diaframma piuttosto chiuso per avere una buona profondità di campo e mantenere un numero di ISO bassa in modo da minimizzare il rumore.

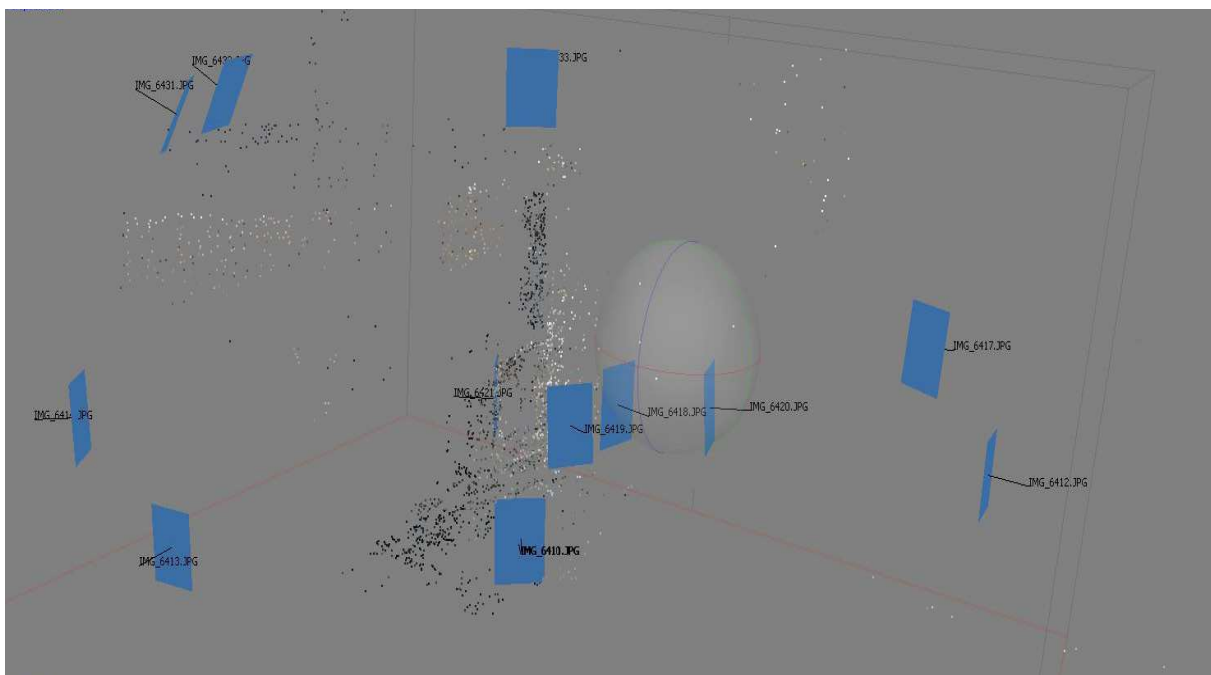
In seguito alla campagna di rilievo fotografico si è passati all'elaborazione delle immagini utilizzando alcuni software di *Image-Based Modeling*, nello specifico sono stati utilizzati Photoscan della Agisoft e Recap Photo della Autodesk.

I due programmi hanno delle caratteristiche diverse fondamentali che riguardano il controllo da parte dell'operatore sulle fasi di lavoro e di qualità del prodotto. Tra i due software utilizzati Photoscan dà la maggior libertà di intervento in quanto si seguono le singole fasi di interpolazione e elaborazione. Al contrario Recap Photo non dà nessuna possibilità di controllo in quanto l'elaborazione viene fatta direttamente dai server della società Autodesk.

Per l'utilizzo delle immagini all'interno di programma si è dovuto convertire dal formato RAW in formato TIF comportando così un incremento nel peso del file (52 MB).

Per l'elaborazione con il software prodotto dalla Agisoft sono state utilizzate 18 immagini realizzate secondo la tecnica a raggi convergenti, indicata da Livio De Luca nel suo testo "La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie" come tecnica

2.46_Elaborazione della nuvola sparsa e posizionamento delle immagini fotografiche per la realizzazione.



ottimale per rilevare oggetti isolati. Prevede di fotografare a diverse distanze da terra ruotando attorno all'oggetto e scattando delle immagini che ricoprono il 30% dell'immagine precedente.

All'interno del programma sono state eseguite le fasi di lavoro suggerite: allineamento delle immagini che porta alla creazione di una nuvola sparsa, elaborazione di una nuvola densa, costruzione della *mesh* ed infine applicazione della texture. Per ogni fase è possibile decidere la qualità del prodotto.

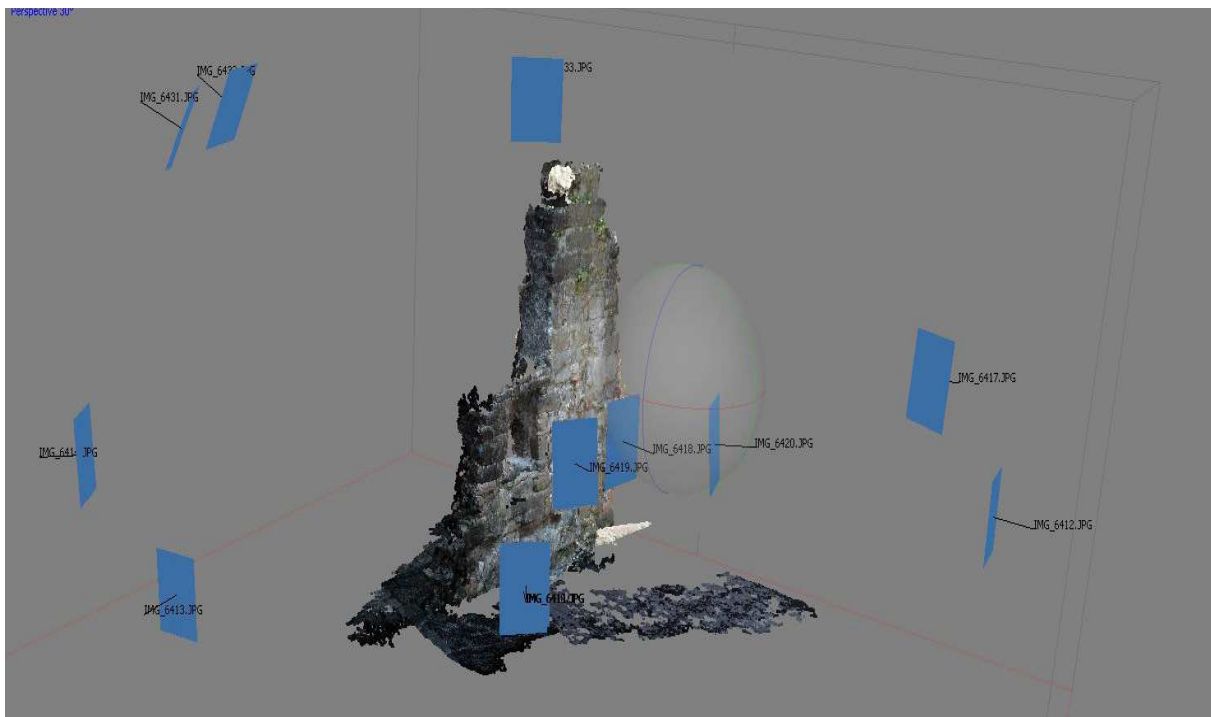
In questo caso sono state utilizzate tutte le impostazioni di media qualità.

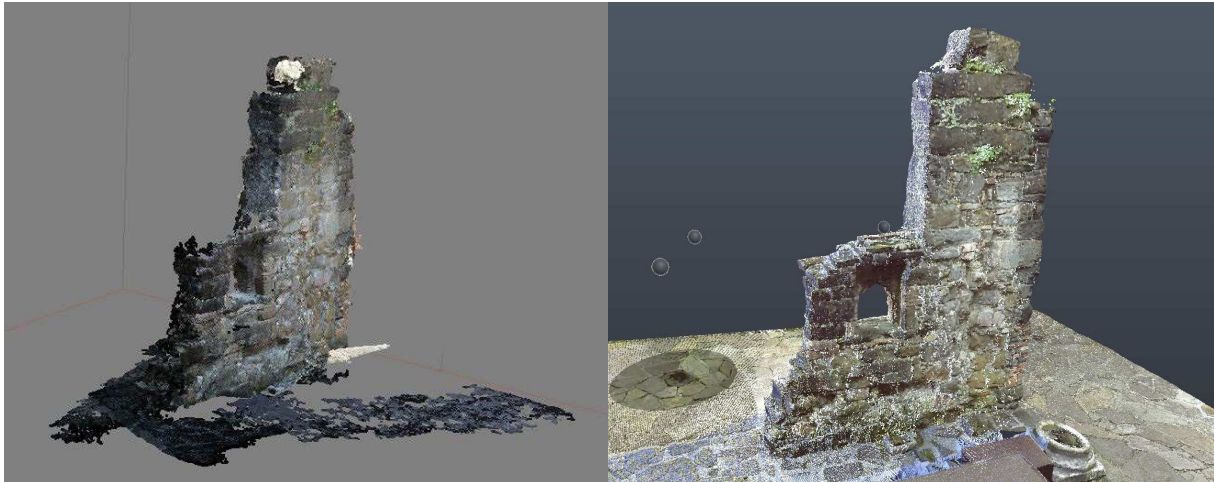
Con l'allineamento delle immagini inserite, il software analizzati i punti omologhi ha creato una nuvola sparsa composta da 3545 punti che fanno parte non solo del muro che faceva parte del mastio, primo insediamento sul colle del castello, ma anche del loggiato inquadrato come scena. Anche in questa fase è già individuabile la geometria dell'apparato architettonico.

Per l'elaborazione successiva, creazione di una nuvola densa, si è scelto di limitare l'area di analisi a il solo mastio, per questo si sono cancellati i punti della nuvola sparsa che andavano ad individuare una prima geometria del porticato. Impostando una qualità media per l'interpolazione dei punti per la creazione della nuvola densa, il programma ha realizzato una nuvola composta da 948.154 punti.

2.47_Elaborazione della nuvola densa e posizionamento delle immagini fotografiche per la realizzazione.

Possiamo mettere a confronto la nuvola di punti realizzata attraverso la fotomodellazione e la stessa porzione della nuvola di punti acquisita con il laser scanner. La stessa porzione di nuvola di punti da scansione ha 1.790.849 punti.





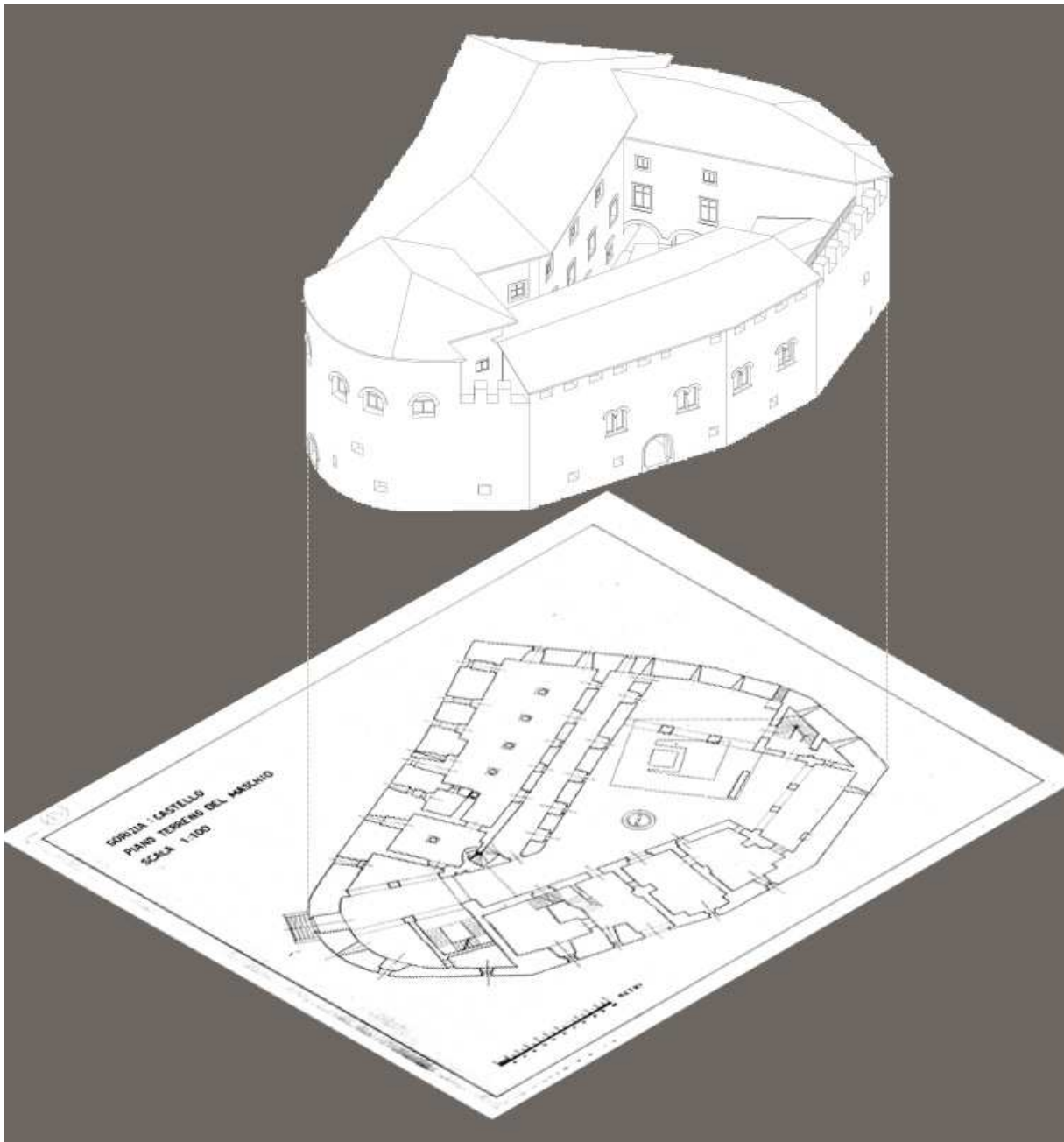
2.48_Elaborazione della nuvola densa e posizionamento delle immagini fotografiche per la realizzazione.

2.4 Ricostruzione virtuale del modello architettonico master

Contemporaneamente al lavoro di rilievo e di elaborazione dei dati acquisiti con le diverse metodologie è stata realizzata una modellazione booleana del castello seguendo utilizzando i documenti reperiti presso gli archivi consultati al fine di realizzare il modello architettonico master.

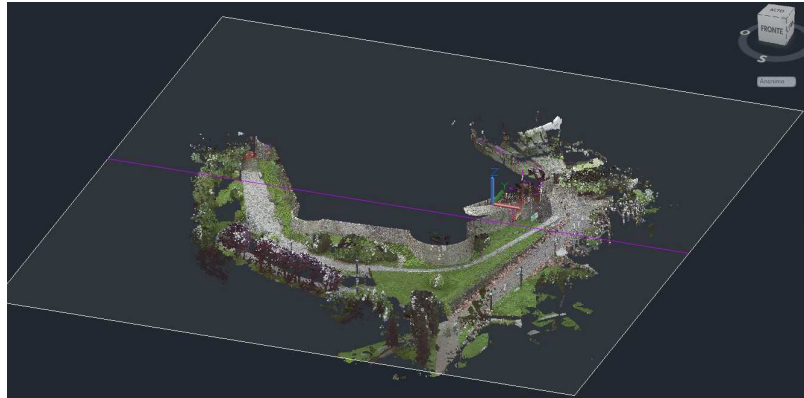
I disegni di rilievo dell'Architetto Riccoboni e, come riportato nei capitoli precedenti, si avevano a disposizione i disegni del progetto di ripristino che non differiscono con la situazione in essere.

Per la modellazione della cinta muraria, invece, ci si è basati quasi esclusivamente sul rilievo effettuato con il laser scanner, realizzando delle sezioni orizzontali e verticali della nuvola di punti per poi definire le geometrie di base che vanno a comporre la muratura, i bastioni.

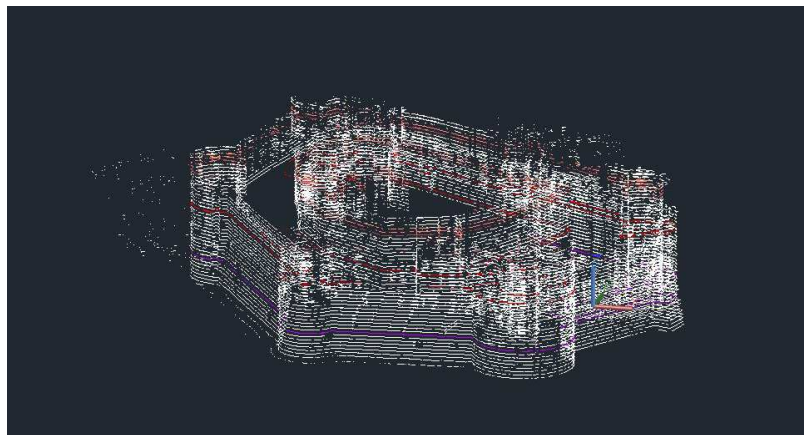


2.49_Assonometria della ricostruzione del castello attraverso la modellazione booleana in riferimento ai disegni del progetto di ripristino del 1930 provenienti dagli archivi di Gorizia e Trieste.

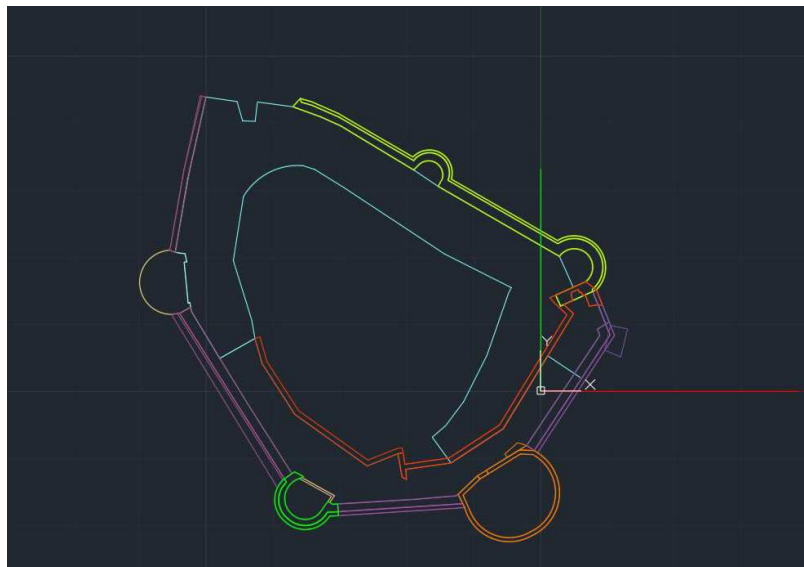
2.50_Sezione orizzontale della nuvola di punti per creare le linee di riferimento per la costruzione della cinta muraria.

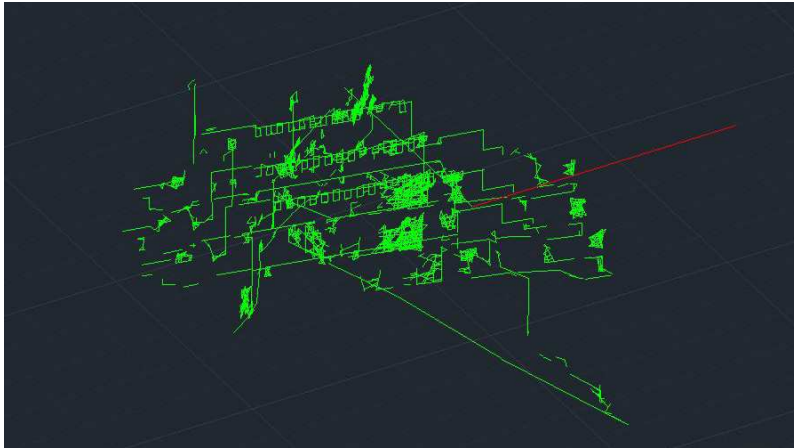


2.51_Insieme delle sezioni orizzontali della nuvola di punti.



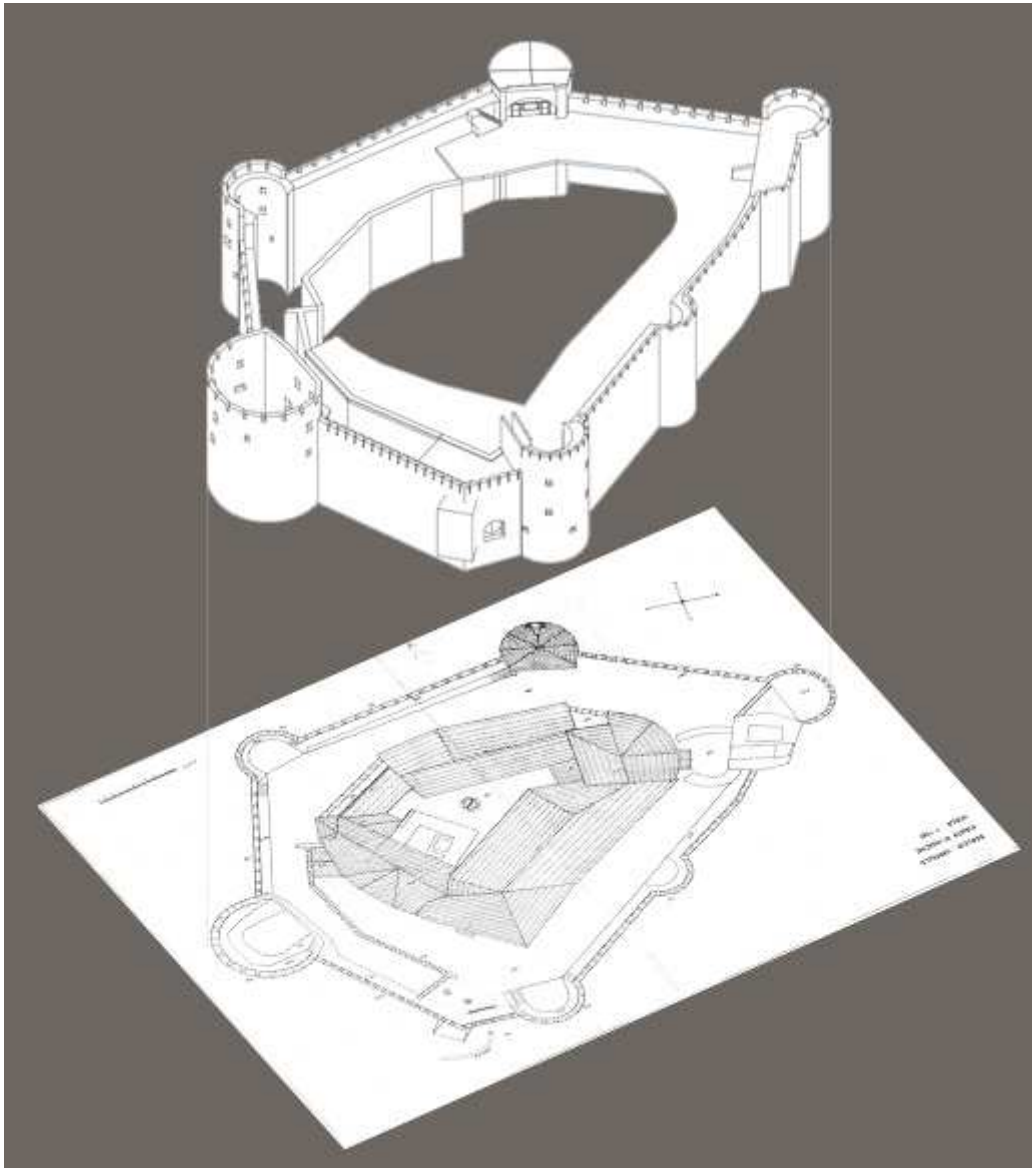
2.52_Attraverso le diverse sezioni della nuvola di punti sono stati ricostruiti i diversi apparati murari che vanno a comporre la cinta, e le due aree di superfici che formano le aree esterne.





2.53_Sezioni verticali della nuvola di punti realizzate perpendicolarmente alle diverse murature per determinare l'andamento sul piano verticale e per misurare le altezze.

2.54_Assonometria della ricostruzione della cinta muraria attraverso la modellazione booleana in riferimento alle sezioni verticali e orizzontali ricavate dalla nuvola.



2.5 Discretizzazione del modello

Successivamente al lavoro di elaborazione dei dati ricavati dalle diverse campagne di rilievo e alla modellazione booleana si è elaborato il modello finale da utilizzare nel programma dedicato alla creazione dell'interazione.

Come verrà spiegato più avanti, per rendere fluida e realistica l'immersività nell'ambiente virtuale, si necessita di lavorare con un modello leggero ma ricco di dettagli significativi. Per questo motivo si è scelto di utilizzare come base del modello finale quello ricostruito attraverso la modellazione booleana con l'inserimento di alcuni dettagli, difficili da replicare con quel tipo di modellazione, ma necessari a caratterizzare l'edificio esplorabile, creando così un modello ibrido.

Uno degli elementi caratteristici dell'edificio è il Leone Marciano che sovrasta il portone di ingresso alla cinta muraria del castello. Per poter inserire questo dettaglio si è deciso di utilizzare la porzione di nuvola densa che lo identificava e trasformandola in una superficie.

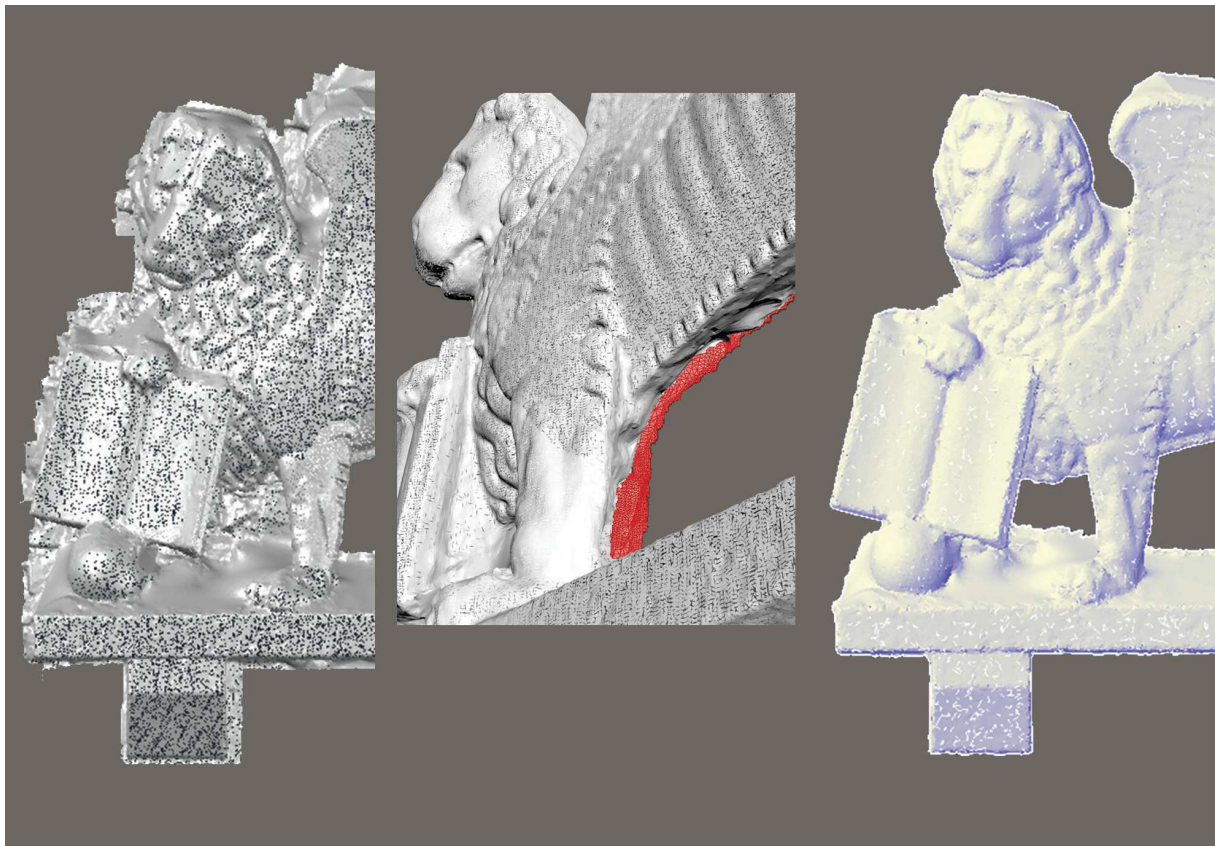
La porzione di nuvola del Leone è composta da punti densi che si trovano in 11 scansioni differenti ed è composta da 1.617.381 punti.



2.55_Porzione di nuvola densa che va a comporre il Leone Marciano.

2.56_Lavorazione della *mesh* ricavata dalla nuvola di punti del leone marciano, chiusura dei punti, decimazione delle facce, pulitura delle parti che non definiscono la geometria della figura del leone.

Da questa porzione di nuvola si è ottenuta una superficie che conta 660.049 triangoli con molte parti mancanti, quindi si è proceduto, prima di tutto alla chiusura delle facce mancanti, in un secondo momento si sono decimate le facce e per ultima cosa si è pulito ulteriormente il modello da tutte le porzioni che non servivano. Il modello finale del leone utilizzato è composto da 165.082 facce. Il modello ibrido così definito è pronto per le lavorazioni specifiche per le successive lavorazioni necessarie a rendere efficiente il modello per la navigazione in tempo reale in ambiente immersivo.



- 1 Valdemarin I., 1959, *La chiesa e la parrocchiale dei Santi Ilario e Taziano di Gorizia*, Gorizia. In questo volume l'autore riporta la versione contenuta nel volume "Memorie, trattati di pace, donazioni a patriarchi ed altre cose... concernenti cose del Friuli" conservato presso la Biblioteca Civica di Gorizia.
- 2 Mausan Dan M. Delneri A. (a cura di), 1991, *Il castello di Gorizia e il suo Borgo*, Mariano del Friuli: Edizioni della Laguna S.r.l., 82 p
- 3 Tomadin M., *I restauri novecenteschi del castello dalla conoscenza della fabbrica al progetto di restauro*, in Pillon L. (catalogo a cura di), 1995, *Gorizia, un viaggio nel tempo*, Mariano del Friuli: Edizioni della Laguna S.r.l., p.34
- 4 Medeot M., 1989, *Castello di Gorizia*, Gorizia: Cooperativa Aziendale dipendenti Ospedale Psichiatrico Provinciale, p. 8
- 5 La Lega di Cambrai, fu formata nel dicembre del 1508 contro la Repubblica di Venezia dalle maggiori potenze europee, ne fecero parte Massimiliano I D'Asburgo (Imperatore del Sacro Romano Impero), Luigi XII di Francia (RE di Francia, Duca d'Orléans), Ferdinando II d'Aragona (re di Napoli e re di Sicilia), papa Giulio II (sovrano dello stato Ecclesiastico), Alfonso I d'Este (duca di Ferrara), Carlo II (duca di Savoia), Francesco II di Gonzaga (marchese di Mantova) e Ladislao II (re d'Ungheria). Si stipulò un trattato per la spartizione dei domini veneziani ai paesi che partecipanti alla Lega in particolare all'Impero Austriaco vennero assegnati Treviso, Vicenza, Verona, il Friuli e l'Istria.
- 6 Cossar Ranieri M., 1937, *Gorizia e il suo castello. Leggenda, storia e arte*, Udine: Edito dal Comune di Gorizia, p. 72
- 7 "Nell'anno del Signore 1660, regnando felicemente Leopoldo augustissimo imperatore romano germanico, re d'Ungheria e di Boemia, Arciduca d'Austria, Duca di Borgogna e Conte di Gorizia, quest'opera di difesa, edificata da non poco, fu eretta in questa forma più alta e più ampia" traduzione dell'epigrafo da parte di Elisa Trani in Malni Pascoletti M., 2008, *La cittadella fortificata di Gorizia e la porta Leopoldina tra guerra e arte*, Gorizia: Italia Nostra Sezione di Gorizia ONLUS, p.62
- 8 In AA.VV. *L'immagine di Gorizia*, Gorizia 1974
- 9 Giuseppe Formentini Floreano (1832-1894) storico e studioso goriziano.
- 11 Tomasi L., 1985, *La sezione dei Beni Culturali: Il restauro del castello di Gorizia*, Gorizia: Arti grafiche Campestrini, 195 p
- 12 Ora depositate presso l'Archivio Storico Provinciale
- 13 Depositati nell' Archivio Storico Provinciale
- 14 Gallarotti A. Romoli A., 2016, *L'assedio di Gorizia 1915-1916. Una tragedia dimenticata dalla storia*, Udine: Gaspari editore; p.91
- 15 *Ivi*; p. 103
- 17 Estratto dal verbale della visita da parte della Commissione Speciale
- 18 Lettera di accompagnamento a "Progetto di ripristino del castello di Gorizia" scritta dal Capo Ufficio Belle Arti Guido Cirilli in data 1 ottobre 1924
- 19 Docci M., 2014, *Per una teoria del rilevamento architettonico. La fusione della teoria della misura con la teoria dei modelli*. In Carlevaris L., Filippa M. (a cura di.), "Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo". Roma: Gangemi Editore, 480 p.
- 20 Bianchini C., 2014, *Survey, Modeling, Interpretation as multidisciplinary components of a knowledge system*. SCIRES-IT, vol. 4, issue 1, pp. 15-24.
- 21 De Luca L., 2011, *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Palermo, Dario Flaccovio Editore.
- 22 Pedro Manuel Cabezas Bernal, "Tecniche fotografiche per la fotogrammetria automatizzata". Lezione organizzata dal dottorato di Ingegneria civile, ambientale e Architettura dell'Università degli Studi di Trieste in interateneo con l'Università degli Studi di Udine a Gorizia in data 8 gennaio 2018

3. Trasformare l'esperienza del patrimonio. La rappresentazione interattiva per l'accesso senza barriere alla conoscenza

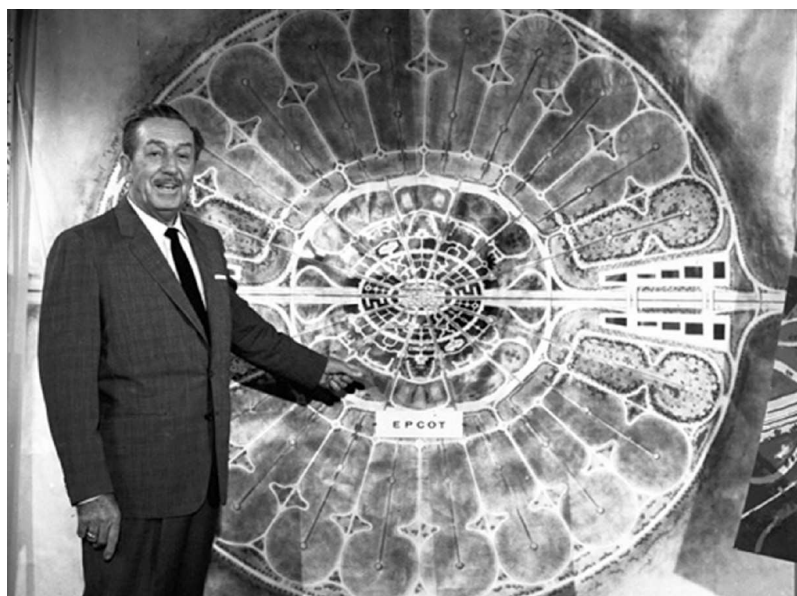
3.1 Rappresentare l'esperienza del patrimonio

L'esperienza porta alla conoscenza e quindi all'arricchimento della persona, le giovani generazioni imparano in modo diverso rispetto all'approccio tradizionale di un "osservatore passivo", tendono a essere degli "utenti attivi della cultura"¹.

Per questo motivo il visitatore sta diventando sempre di più il protagonista nei percorsi museali e nelle attività culturali. Una volta il ruolo di conservazione, tutela e ricerca specialistica di una istituzione museale prevalevano sulla divulgazione culturale delle loro collezioni, ora sta prendendo sempre più piede l'idea di coinvolgere l'utente nel percorso museale, in modo da fargli vivere un'esperienza, provocare delle emozioni, un'impronta visuale e culturale che permane anche dopo la visita. I musei non possono più essere definiti "un edificio o un luogo in cui sono conservate e visualizzate opere d'arte, esemplari scientifici o altri oggetti di valore permanente". Il museo passa da essere presentatore di oggetti a sito per esperienze culturali e di accesso alla conoscenza. Questo spostamento, negli Stati Uniti, è cominciato da circa quindici anni, mentre l'Italia sta avvenendo negli ultimi anni, prima nelle mostre temporanee e ora nelle esposizioni permanenti. I musei non vengono visitati solo fisicamente, e quindi con la necessità di creare contenuti esperienziali in loco, ma anche da remoto principalmente attraverso i siti web ed i servizi esperienziali che si possono attivare.

Secondo Maggie Burnette Stogner i visitatori possono essere classificati in tre tipologie di approccio al percorso museale: il tipico ruolo passivo, dove il visitatore passeggia per la mostra come spettatore/osservatore, con un ruolo moderatamente attivo dove partecipa alla narrazione come viaggiatore nel tempo, ed infine in un ruolo altamente attivo, dove l'utente può interagire con le informazioni.²

Già dalla metà dell'ottocento i musei utilizzavano degli ambienti ricostruiti attraverso le tecniche sceniche teatrali per contestualizzare oggetti storici con atmosfere coinvolgenti per il visitatore. Il primo che su larga scala utilizzò il coinvolgimento e l'esperienza come punto focale è stato Walt Disney che nel 1955 aprì in California il primo Disneyland, un parco a tema dove i visitatori erano immersi nei giochi e nella storia che si stava svolgendo attorno a loro portando all'interno dell'esperienza la componente emotiva.



3.1_ Walt Disney e il progetto di EPCOT acronimo di *Experimental Prototype Community of Tomorrow*, una città utopica progettata da lui stesso.

Le tecnologie nei musei sono riconosciute come opportunità per la conservazione, lo studio, ma soprattutto, la comunicazione e la diffusione della conoscenza del patrimonio immateriale e materiale. Questo viene ribadito dalla Convenzione per la protezione del patrimonio culturale immateriale di Parigi del 2003 che definisce il patrimonio culturale immateriale come *“le pratiche, le rappresentazioni, le espressioni, le conoscenze, le abilità - nonché gli strumenti, gli oggetti, i manufatti e gli spazi culturali ad essi associati - che le comunità, i gruppi e, in alcuni casi, gli individui riconoscono come parte del loro eredità culturale”*.

In numerosi musei vengono introdotte trasformazioni sostanziali dell'offerta culturale trasformando la visita in una occasione di fruizione ed. Queste innovazioni possono utilizzare diverse strategie di “engagement”, molte delle quali integrano soluzioni tecnologiche con molteplici sfaccettature attuative.

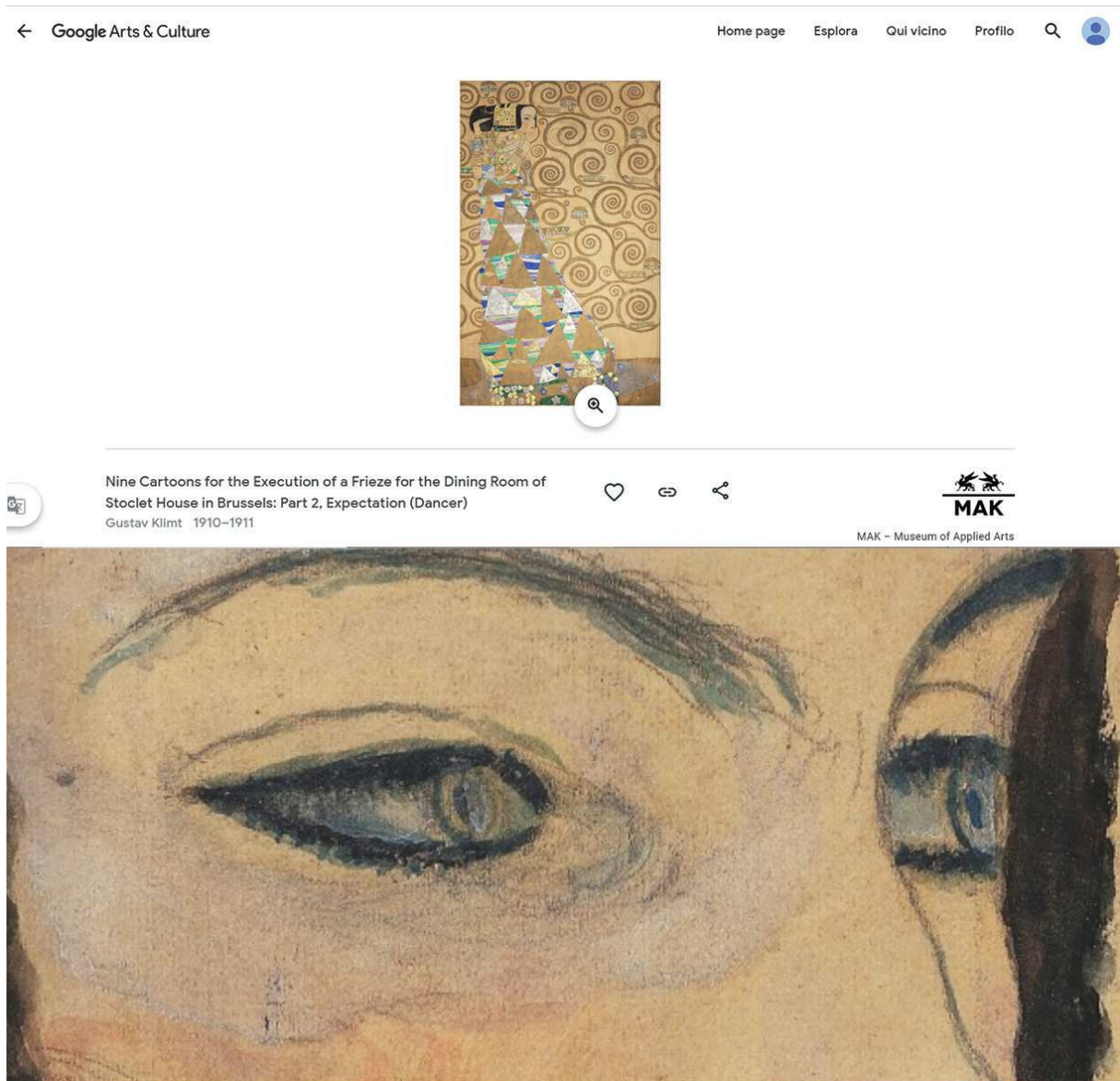
Cambiano le parole chiave con cui vengono allestiti i percorsi museali: entrano a gran voce termini come immersività, esperienza, interattivo, dinamico e narrazione guidata; per soddisfare le richieste da parte del visitatore vengono utilizzate nuove tecnologie multimediali come contenuti audiovisivi ad alta definizione, effetti sonori avvolgenti, film in stereoscopia, immagini olografiche, realtà aumentata, spazi interattivi anch'essi con la possibilità della stereoscopia (realtà virtuale) e anche simulazioni e giochi. I visitatori sono attratti dal museo come esperienza multisensoriale, vogliono essere coinvolti sia dal punto di vista emozionale che dal punto di vista della conoscenza e della cognizione.

Un'altra modifica che si sta attuando nei musei riguarda il comune e diffuso servizio di audioguida, la quale viene sostituita da tour multimediali da utilizzare su smartphone, tablet, i contenuti

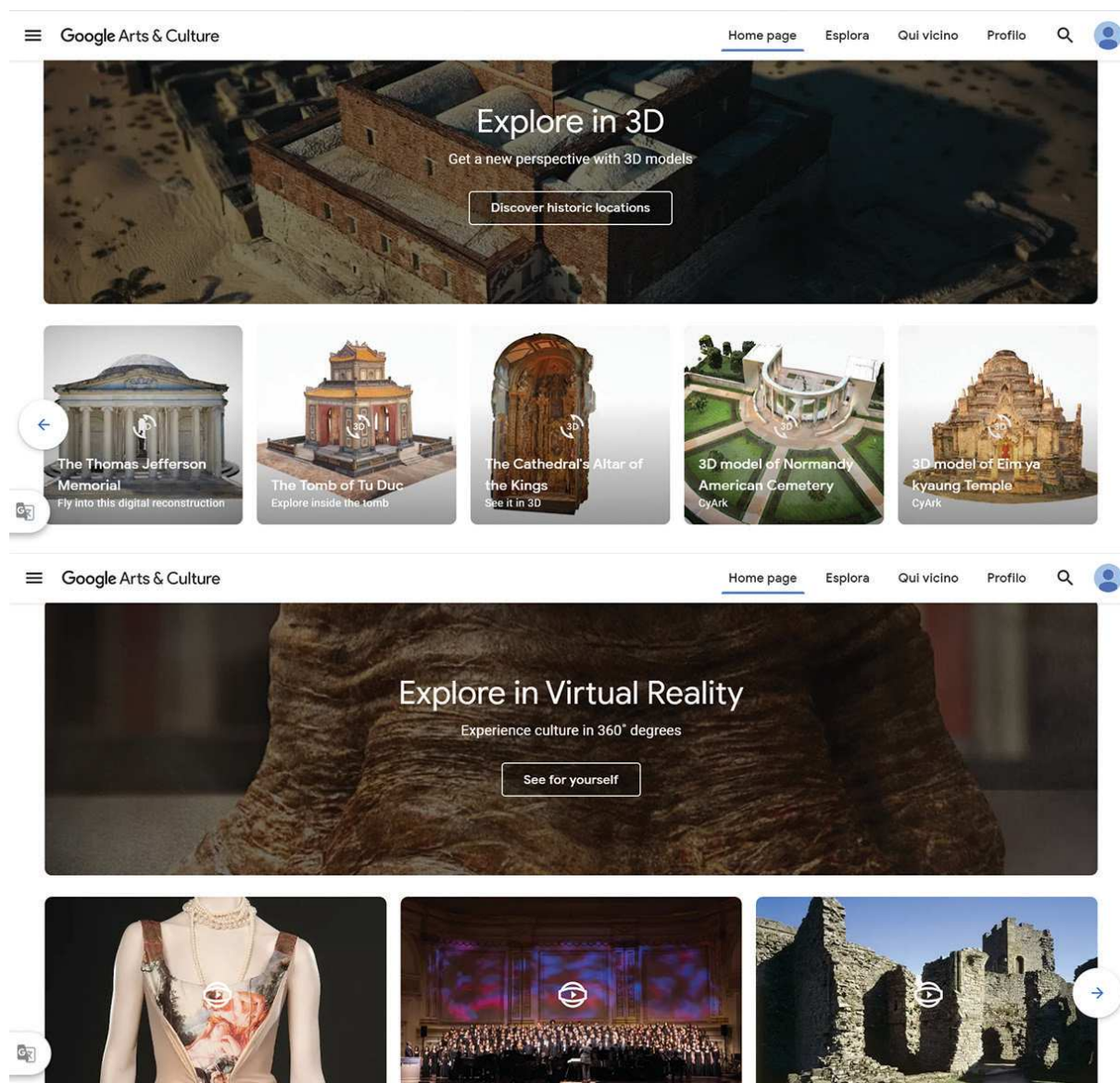
possono essere attivati attraverso localizzatori GPS o QR-code e a richiesta del visitatore, il vantaggio per gli allestitori è la facilità di modificare in poco tempo le informazioni date.

Si trasforma l'accesso ai contenuti museali, oltre alla visita in loco. Molti istituti americani, in Italia questa pratica è ancora poco diffusa, danno la possibilità di estendere l'esperienza della visita anche attraverso la piattaforma web offrendo dei contenuti aggiuntivi. Le opere d'arte, oltre che attraverso i siti web di molti musei, si possono vedere nella sezione che Google ha dedicato all'arte e alla divulgazione. Nelle pagine di *Google Arts & Culture* è possibile visitare e vedere architettura, musei e collezioni navigando in percorsi di fotografie a 360°, le opere d'arte vengono offerte con immagini ad altissima risoluzione.

3.2_ *Google Arts & Culture*. Quadro di Gustav Klimt che può essere apprezzato ad altissima definizione.



Trasformare l'esperienza del patrimonio. La rappresentazione interattiva per l'accesso senza barriere alla conoscenza



3.3_Google Arts & Culture. Proposta di due tipi di esperienze che l'utente può provare, l'interazione con dei modelli tridimensionali o delle visite in realtà virtuale.

Un'altra strada percorsa sul fronte dell'esperienza museale è quella di poter personalizzare la visita a seconda degli interessi, delle proprie conoscenze e del grado di approfondimento delle spiegazioni. In molti musei queste opzioni vengono già date da percorsi differenziati presenti all'interno dei tablet o applicazioni per smartphone, nella loro differenziazione vengono considerati a priori dei macro gruppi di utenti (es: visitatori normali, famiglie o chi fa una visita rapida). Il Getty Museum di Los Angeles offre la possibilità di scegliere da casa le opere artistiche che si vogliono vedere e approfondire al momento della visita viene consegnato un dispositivo con predefinito il percorso personalizzato. Ci sono ancora due aspetti importanti che coinvolgono il nuovo modo di approcciarsi all'esperienza museale. Il primo riguarda la

volontà da parte del fruitore di condividere con altri la propria esperienza attraverso le varie piattaforme di social network. I musei presenti sui social invitano i visitatori a condividere la propria esperienza di visita. L'ultimo aspetto che coinvolge le nuove tecnologie nel mondo museale e il desiderio dei visitatori di poter creare anche loro qualcosa così sono nate delle gallerie virtuali dove vengono esposte le opere realizzate dai visitatori utilizzando degli applicativi di simulazione.

I processi di innovazione digitale per coinvolgere il pubblico nell'esperienza museale si stanno sviluppando talmente rapidamente che in alcuni casi hanno provocato una reazione da parte di molti critici sul tema dell'equilibrio tra l'istituzione culturale e l'attuazione delle dinamiche di coinvolgimento e divertimento che alcune soluzioni espositive inducono.

I nuovi linguaggi dei media creano opportunità per contribuire e ampliare la conoscenza democratica dei beni culturali e artistici attraverso l'accesso universale ai contenuti presenti sul web.

Ci soffermeremo sulle esperienze museali immersive per decifrare al meglio il panorama esistente.

L'elemento fondamentale per un'esperienza culturale immersiva è la narrazione. La narrativa è un importante strumento immersivo in sé e per sé, una narrazione immersiva efficace non solo modella l'allestimento della mostra ma fornisce un ponte tra le esperienze di vita del visitatore e gli oggetti che rappresentano un altro luogo e tempo. La cosa più importante per il visitatore è questa connessione personale.

La narrazione immersiva attira il pubblico nella narrazione di un altro tempo e luogo, ci si immerge in un mondo alternativo in cui dimentichiamo le distrazioni e le preoccupazioni della nostra vita quotidiana, siamo assorti nello stile e nella vita del mondo che ci viene proposto, se ne diventa parte "Dato il giusto tipo di immagini la nostra mente può entrare empaticamente nello schermo e l'esperienza che ne risulta è profondamente immersiva".³

I fruitori portano le proprie esperienze di vita all'interno della narrazione immersiva vivendo ognuno l'esperienza in modo diverso.

Hein afferma che "partecipazione attiva della mente all'apprendimento e riconoscimento che il processo di apprendimento non è una semplice aggiunta di elementi in una sorta di banca dati mentali, ma una trasformazione di schemi in cui lo studente svolge un ruolo attivo e che implica dare un senso a una serie di fenomeni presentati alla mente",⁴ se l'esperienza viene accompagnata da un personaggio tanto più è attivo il ruolo di questa figura tanto sarà coinvolto il visitatore nella narrazione della mostra. Come detto in precedenza, attraverso l'uso delle nuove tecnologie multimediali i visitatori possono personalizzare la loro esperienza in base ai loro interessi, bisogni e capacità,

“ogni visitatore è un individuo unico, ognuno in grado di avere una vasta gamma di esperienze molto diverse tra loro”⁵ questo è quello che ci sottolinea e ricorda Falk.

Maggie Burnette Stogner classifica l'uso dell'immersione all'interno dei musei in cinque diversi modi: l'immersione esperienziale, quella narrativa, la teatrale, l'interattiva e come ultima quella virtuale. Molte mostre e musei usano delle combinazioni tra questi generi di immersività.

L'immersione esperienziale senza narrativa è puramente sensoriale, può stimolare una connessione emotiva, l'autrice porta l'esempio della sua esperienza all'interno di una cella della prigione di Alcatraz dove la guida, un ex detenuto, le aveva suggerito di provare a chiudersi per qualche minuto.

L'immersione narrativa accompagna con una voce narrante il visitatore all'interno degli ambienti espositivi progettati per fornire connessioni contestuali con i manufatti.

Un esempio di questo tipo di immersione narrativa è quella realizzata dallo studio italiano Studio Azzurro⁶ per il padiglione italiano all'EXPO 2010 di Shanghai intitolata *Sensitive City* e si riferisce alla tradizione delle città immaginate (la Città del Sole di Tommaso Campanella⁷, le Città Invisibili di Italo Calvino⁸) con l'intenzione di considerarle delle città non solo come fantasia letteraria ma che potrebbero esistere veramente. L'installazione prevede un ambiente sensibile che accoglie il visitatore che toccando con una mano il viandante verrà accompagnato in un racconto del suo viaggio attraverso le città. L'ambiente sensibile è costituito da 11 videoproiettori, 2 mac-pro e 7 mini-mac, 4 proiettori ologramma, 6 scene teatrali e un sistema interattivo.



3.4_ *Sensitive City*, Shanghai, Padiglione Italia EXPO 2010, installazione di un ambiente sensibile del gruppo Studio Azzurro. Gli spettatori diventano parte integrante dell'opera attraverso il tocco dell'immagine dei viandanti e ascoltare la loro storia. Fonte dell'immagini Studio Azzurro.



Un altro esempio di questo tipo di immersione è la mostra *Real Pirates: the Untold Story of the Whydah, from Slave Ship to Pirate Ship*, la mostra inaugurata nel 2007 è itinerante per tutti gli Stati Uniti svela la storia della prima nave pirata scoperta negli USA e racconta le storie degli schiavi e dei pirati, e della scoperta del relitto al largo della costa di Cape Cod oltre trecento anni dopo il naufragio. L'allestimento colloca dei manufatti come sul fondo dell'oceano, all'interno di una ricostruzione della nave, figure realistiche rappresentano il Capitano Sam Bellamy e membri dell'equipaggio, video ad alta definizione, musica, voce narrante si combinano per contestualizzare i manufatti e fornire una ricca esperienza immersiva.

Il terzo tipo di immersione, secondo la divisione di Burnette Stogner, è quella teatrale dove la tecnologia di video ad alta risoluzione e l'audio digitale si combinano per creare delle esperienze immersive che vengono utilizzate per immergere i visitatori nella vita e nei tempi di un altro ambiente. Sono delle installazioni che vengono poste all'inizio della mostra per connettere i visitatori con i manufatti che vedranno più avanti. Per questo tipo di esperienza vengono utilizzati cinema IMAX, IMAX-3D e OMNIMAX già presentati nel primo capitolo di questo testo.

3.5_Mostra *Real Pirates: the Untold Story of the Whydah, from Slave Ship to Pirate Ship*, inaugurata per la prima volta nel 2007 presso il Franklin Institute di Philadelphia.

3.6_“Fulltone” teatro circolare all'interno dell'American Indian Museum.



Un esempio è il “*Fulldone*” all'interno dell'American Indian Museum a Washington DC dove è stato installato nel 2004 un teatro circolare da 120 posti, l'attenzione dei visitatori è rivolta contemporaneamente a tre livelli di contenuti: la buca per il fuoco che si trova al centro, gli schermi video a livello degli occhi e lo schermo a cupola sopra.

La penultima immersione che viene analizzata è quella di tipo interattiva, il potenziale di questa immersione interattiva e partecipativa è eccezionale, sposta in il ruolo del visitatore da passivo ad attivo, la nuova tecnologia porta a un fruitore sempre più partecipativo e contributivo e spostano l'esperienza di visita con contenuti a più livelli. Un esempio di questa immersione interattiva è la mostra organizzata dal Museo del memoriale dell'Olocausto degli Stati Uniti a Washington DC dal titolo “Dalla Memoria all'Azione”, dove è stata introdotta una combinazione di tavoli tattili multiutente con schermi dove venivano proiettati video delle testimonianze, il visitatore attraverso il tocco su questi schermi può approfondire i racconti visti e può salvare le informazioni di maggior interesse per inviarle prima al sito del museo e poi accedervene e condividerle in un secondo momento. L'ultimo tipo di immersività che affrontiamo è quella virtuale che beneficia per la sua rapida crescita dalle industrie di videogiochi, animazione e parchi a tema, le esperienze di realtà virtuale hanno il vantaggio di estraniarsi dal luogo e dal tempo di dove si trovano, consentono al visitatore di esplorare ambienti ricostruiti digitalmente (siti storici, archeologici, città, edifici, etc.) basati su dati reali, queste esperienze verranno descritte meglio nel prossimo paragrafo.

3.7_Mostra “Dalla Memoria all'Azione” presso il Museo del Memoriale dell'Olocausto. Sono presenti dei tavoli dove è possibile interagire con i contenuti proposti.



3.2 Ambienti di navigazione immersiva ed interattiva per il patrimonio culturale

Più comunemente chiamati *virtual cultural heritage*, gli ambienti virtuali per la navigazione immersiva e interattiva sono quegli ambienti ricostruiti digitalmente che rappresentano luoghi storici, artistici, architettonici e paesaggistici per poi utilizzarli per la conoscenza culturale.

Ambiente virtuale (VE – *virtual environment*) è l'espressione per indicare quei modelli tridimensionali navigabili e interattivi che derivano dalla simulazione in tempo reale di un luogo, edificio o ambiente; può essere una rappresentazione realistica dell'oggetto di studio quanto una ricostruzione astratta e semantica di ciò che viene rappresentato. Il VE, quindi, a seconda delle relazioni che intercorrono tra il materiale di partenza e il risultato della simulazione, può essere definito iper-realistico, verosimile, ipotetico, immaginario o astratto. Gli ambienti virtuali, come già accennato nel primo capitolo, possono riguardare molteplici discipline, vengono utilizzati per simulazioni nel campo scientifico, design industriale, prototipazione, *training* medico, nell'industria dell'intrattenimento, addestramento di piloti e soldati, simulazioni di piani di emergenza, cura per patologie psico-fisiche.

Noi ci occuperemo esclusivamente ambienti virtuali che rappresentano luoghi e monumenti di interesse storico-artistico. Questo tipo di modelli assumono una dicitura specifica e sono i *cultural virtual environment* (CUVE). In questa disciplina il sapere umanistico e la tecnologia si uniscono fino a diventare elementi complementari per la comunicazione digitale dei beni culturali.

L'unicità di questa forma di simulazione è la possibilità di rappresentare contemporaneamente, e su una stessa piattaforma, una pluralità di informazioni provenienti da fonti di natura diversa, in questo modo si possono integrare in un unico sistema di visualizzazione elementi di diversa natura, quali rappresentazioni iconografiche, fotografie storiche, testi antichi, informazioni stratigrafiche o storiografiche. Questa molteplicità di informazioni che si possono inserire richiedono una varietà di capacità teoriche e tecniche.

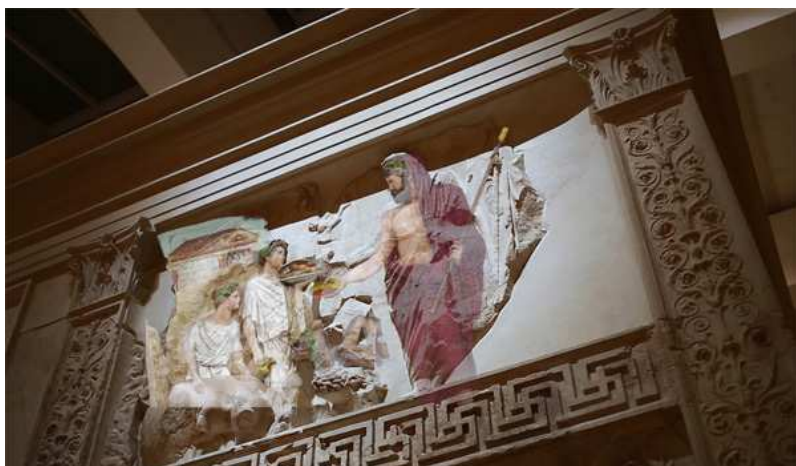
La creazione di questi ambienti virtuali comporta la gestione di enormi moli di dati (metadati e paradata) che vengono mediati per poi integrarsi con contenuti mediali (grafica, testo, audio, video), inseriti nella simulazione tramite le tecniche di *compositing*. La maggior parte delle esperienze in ambienti virtuali culturali offrono una simulazione caratterizzata dalla visualizzazione spaziale e un'interazione esperienziale tra il fruitore e l'ambiente simulato.

Nella costruzione di un ambiente simulato bisogna tenere conto delle indicazioni raccolte nel 2005 nella *London Charter*⁹ redatta a

seguito degli sforzi congiunti di operatori del settore quali istituti scientifici, musei, associazioni e fondazioni dedite alla tutela del patrimonio. I principi promulgati a Londra stabiliscono l'obbligo di una chiara comunicazione culturale in ogni sua fase e che sia comprensibile dagli utenti. Ad esempio vi è l'indicazione di specificare quali elementi all'interno della ricostruzione virtuale siano certi e quali frutto di ipotesi e supposizioni. Un corretto approccio alla ricostruzione virtuale prevede una fedeltà alle fonti storiche.

La validità e la correttezza delle informazioni e del processo comunicativo sono gli elementi chiave che differiscono i CUVE da altre rappresentazioni digitali di luoghi o eventi del passato, ci si riferisce a ricostruzioni 3D utilizzate nel settore video ludico, cinematografico o per la divulgazione televisiva.

Il primo esempio che possiamo apportare per far comprendere al meglio l'immersività virtuale è l'esperienza che un visitatore può provare presso l'Ara Pacis con l'applicazione "L'Ara com'era",



3.8_“L'Ara com'era” esperienza immersiva di realtà virtuale e realtà aumentata che fa vedere al visitatore come si presentava l'altare della pace di Augusto ai tempi dei romani.

una visita immersiva e multisensoriale dove personaggi, gesti, divinità e animali si animano in 3D per illustrare le origini della famiglia di Augusto, il tutto può essere fruito in realtà aumentata e realtà virtuale. Con la combinazione di riprese cinematografiche, ricostruzioni in 3D e computer grafica, il visitatore viene immerso in un ambiente a 360° dove può ammirare l'Ara Pacis con i suoi colori originali. Per godere di questa esperienza si utilizzano dei visori con all'interno un device che permette, attraverso la fotocamera, di avere una fusione tra elementi reali e elementi virtuali.

Un altro esempio che proponiamo è la mostra itinerante "Modigliani Opera", dedicata all'artista italiano e che ha avuto come prima tappa la Reggia di Caserta. La mostra si sviluppa in quattro sale studiate per immergere i visitatori nella vita e nelle opere del pittore soprattutto grazie alla stanza in dove sono presenti delle postazioni per la realtà virtuale, la sala oleografica e un'arena dotata di uno schermo a 360°

3.9_ "Modigliani opera" mostra dedicata all'artista Amedeo Modigliani. Il visitatore è accompagnato in un percorso immersivo tra realtà virtuali, personaggi olografici e uno schermo a 360° dove viene trasmesso un docufilm sul artista.



3.3 Esperienza immersiva nel Castello di Gorizia e nella sua storia

A seguito dell'analisi di esempi di ambienti immersivi per promuovere il patrimonio culturale appena descritti passeremo ad illustrare il lavoro di ideazione e realizzazione dell'esperienza immersiva virtuale all'interno della ricostruzione del castello di Gorizia, applicazione finale di questa tesi di dottorato.

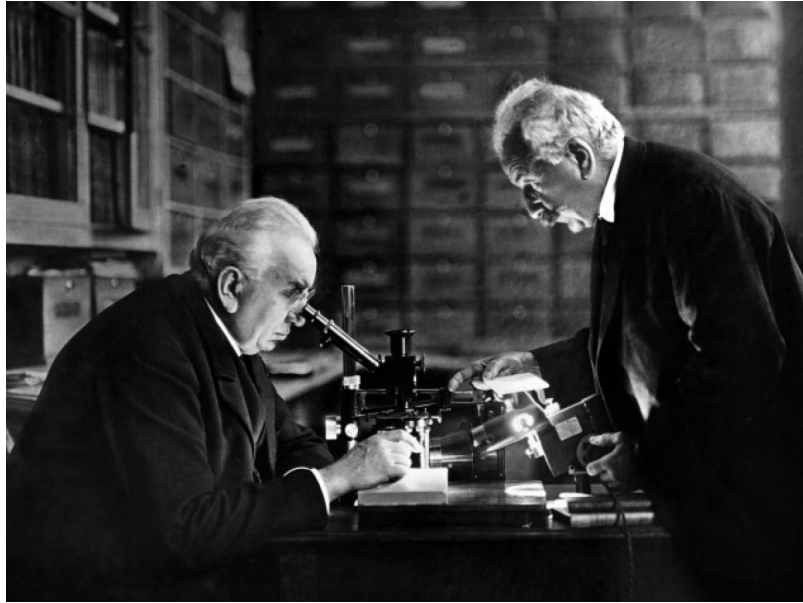
Dopo aver analizzato storicamente il caso studio, e aver definito tridimensionalmente, mediante programmi di modellazione parametrica, la forma architettonica anche attraverso l'analisi dei disegni reperiti negli archivi e integrati con i rilievi effettuati durante questo periodo di ricerca, come spiegato nel capitolo precedente, si è passati alla realizzazione e programmazione dell'applicazione immersiva.

La fruizione virtuale immersiva di tale ricostruzione digitale è stata resa possibile attraverso l'utilizzo del software *Unreal Engine*, un motore grafico che sta alla base dell'ambientazione e programmazione di videogiochi, utilizzato anche in campo architettonico, culturale, di animazione, video e educazione. Esso fornisce l'infrastruttura per la creazione di ambienti interattivi, all'interno del software si possono innestare varie funzioni: motori di rendering, di gestione dell'audio, di gestione della programmazione, di animazione, ha eccellenti risultati a livello grafico e visivo.

Unreal Engine non è l'unico software di questo genere, ma è quello più adatto al nostro uso e alle nostre competenze, in quanto è dotato di un'interfaccia visuale di programmazioni di tipo "a nodi" chiamata *Blueprint Visual Scripting*, che necessita di una preparazione di base di programmazione informatica e non di studi specifici nel settore, il sistema è simile ad alcune funzioni presenti in programmi di modellazione 3D e rendering per la gestione dei materiali.

Prima di affrontare le tematiche riguardanti il processo di lavoro svolto all'interno di questo software è necessario fare delle precisazioni in merito a dei concetti base riguardanti il rendering. Quando si parla di rendering ci si riferisce al tempo necessario affinché il computer svolga tutti i calcoli per realizzare, come risultato finale, una immagine che prende il nome di frame.

I principali aspetti che influiscono maggiormente sul tempo di calcolo sono tre: la luce, cioè il modo in cui viene calcolata ed il numero di fonti luminose presenti nella scena; le geometrie 3D che riguardano il numero di poligoni reali¹⁰, non da cui sono formati, e la presenza di modificatori geometrici; ultimo aspetto che influisce sul tempo di calcolo del rendering è la risoluzione cioè il numero di pixel dal quale deve essere formata l'immagine finale.



3.10_I fratelli Lumière al lavoro mentre osservano una pellicola di un film.

Sapere quanto tempo impiegherà un'operazione di calcolo è un aspetto importante in quanto permette di capire il tipo di rappresentazione che è possibile realizzare.

Già i fratelli Lumière, con l'invenzione delle macchine da presa nel 1895, scoprirono che l'occhio umano non percepiva differenza tra una singola immagine e una sequenza di immagini se queste ultime venivano proiettate con velocità superiore a 24 immagini al secondo.

Per elaborare un video render è quindi necessario realizzare almeno 24 immagini per creare 1 secondo di video. Il tempo di un video render si ottiene dal prodotto tra il tempo necessario per ogni frame per 24 volte e il numero di secondi della durata del video.

Il tempo di un video render può essere quindi riassunto attraverso la seguente formula:

$$\text{tempo di video render} = \text{tempo render del frame} \times 24 \times \text{tempo secondi video}$$

Un rendering di qualità fotorealistica, realizzato con un motore di render CPU, su una macchina con ottime prestazioni computazionali, impiega mediamente tra i 40 e i 90 minuti per frame con una risoluzione di 1920 x 1080 pixel. Se, ad esempio, lo scopo è realizzare un video render della durata di 3 minuti in formato full HD, il tempo necessario per la sua realizzazione sarà di 2880 ore. Con questa tecnica di calcolo, risulta quindi quasi impossibile realizzare video render di questa qualità con una singola macchina. È perciò assolutamente necessario far lavorare in parallelo più processori in maniera da dimezzare i tempi per ogni processo utilizzato. Se si considera inoltre la necessità di muovere velocemente il punto di ripresa della scena, il numero di

frame necessario sale a 30 per secondo. Da queste considerazioni risulta quindi chiaro come il metodo di rendering basato su CPU non possa garantire delle tempistiche sufficienti per realizzare prodotti di animazioni o a scopo videoludico. Diversamente, i rendering basati su GPU possono realizzare una quantità di fps nettamente superiore che è solitamente autolimitata a 120 frame al secondo. È quindi possibile realizzare facilmente e con una singola macchina prodotti di animazione e cosa ancora più interessante si possono creare delle interazioni in *real-time*.

Le tecniche di rendering si dividono in due categorie distinte: il render su base CPU e il render su base GPU. La differenza sostanziale tra queste due categorie sta nel metodo in cui il software effettua i calcoli, sfruttando o il processore (CPU) o la scheda grafica (GPU).

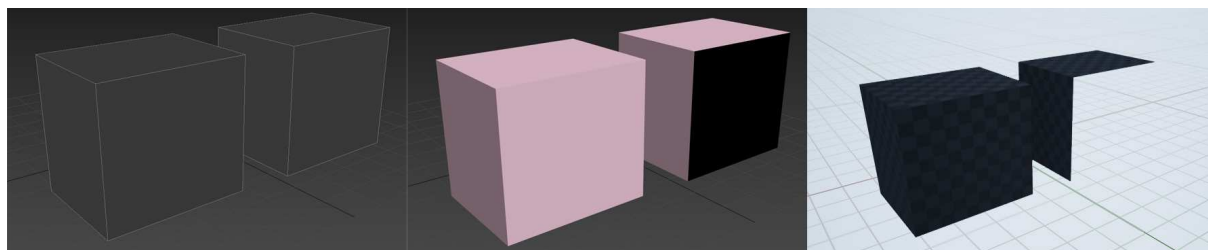
Nel caso della CPU, il tempo di render sarà molto lungo ma permetterà di ottenere un risultato finale di ottima qualità, in quanto i calcoli svolti avranno una precisione molto elevata.

Nel caso della GPU invece, i tempi di render verranno ridotti di molto e il risultato finale sarà nettamente inferiore rispetto alle immagini realizzate con un motore di render basato su CPU.

Il software utilizzato per la gestione finale e per l'interazione con il modello del castello di Gorizia rientra nella categoria GPU render. Quando si parla di GPU render, la tecnica che viene utilizzata solitamente è chiamata *Forward render*, mentre quella utilizzata dal software *Unreal Engine* si definisce *Deferred Render*. Le differenze tra queste due tipologie di calcolo riguardano principalmente il metodo in cui vengono elaborate le geometrie e il modo in cui viene calcolata la luce.

Per spiegare le differenze di calcolo delle geometrie si ricordano innanzitutto i concetti alla base di un modello 3D e della sua definizione/composizione. La forma base di un modello tridimensionale generato in ambiente virtuale è data dalla sua geometria più piccola, ovvero da triangoli generati dall'unione dei vertici (*vertex*) attraverso dei segmenti (*edge*). Questo processo è definito *Tessellation*. Maggiore sarà il numero di triangoli maggiore sarà il dettaglio del modello, ma conseguentemente aumenterà anche il suo peso e quindi la gestione da parte del software. Queste figure vengono solitamente mostrate nelle modalità di visualizzazione *Wireframe* o *Edges faces*.

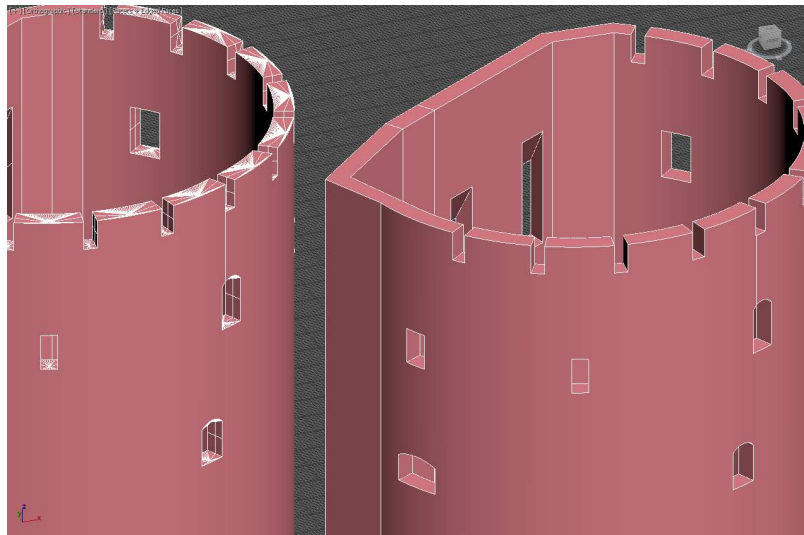
3.11_Lo stesso cubo rappresentato in 3D studio max e in *Unreal*, si può notare come le facce con la direzione della normale invertita (cubo di destra) in 3D Studio Max vengano visualizzate più scure mentre in *Unreal* (ultima immagine) non vengano visualizzate.



L'ultima fase per la creazione del modello tridimensionale e la realizzazione di una superficie di spessore infinitamente piccolo chiamata poligono cioè il riempimento di ciascuna triangolazione. Ultimato questo processo, il modello può essere definito tridimensionale e prende il nome di Mesh 3D.

Ognuna delle superfici create avrà una proprietà detta *Normal* che corrisponde ad un vettore uscente da ogni triangolo riempito e che indicano meno la sua esistenza. Una mesh renderizzata con un vettore negativo non verrà visualizzata, in quanto per il processo di calcolo non esiste.

I modelli 3D che sono costruiti con un alto numero di triangoli o *tessellation* sono definiti *High poly*, mentre quelli con un basso numero di triangoli vengono definiti *Low poly*. Per raggiungere un buon risultato bisogna trovare il punto di equilibrio tra numero di triangoli che formano l'oggetto e il suo peso poligonale.

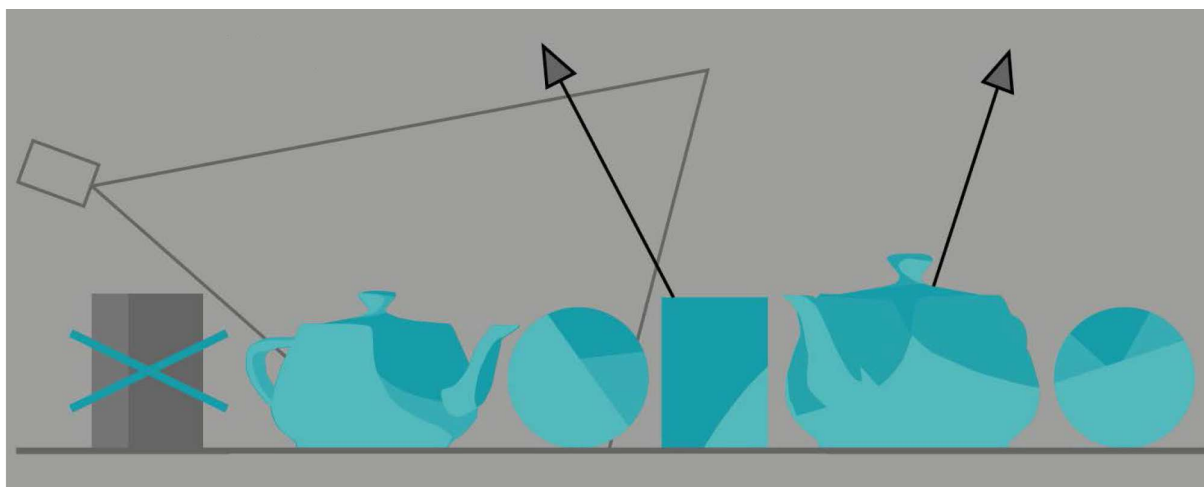


3.12_Mastio del castello di Gorizia - differenza tra un modellazione *high poly* e modellazione *low poly*.

Alla base della procedura di rendering, come per il mondo reale, è fondamentale la presenza della luce. Senza illuminazione infatti non è possibile rendere visibile il modello tridimensionale e le texture su di esso applicate. È quindi la luce che determina cosa viene visualizzato in un processo di rendering ed il metodo con cui viene calcolata determina aspetto e modalità di illuminazione delle geometrie.

Nel caso del *Forward render* la luce viene calcolata su ogni superficie delle geometrie presenti per il numero di luci applicate nella scena. Questo significa che più elevato è il grado di dettaglio di una geometria, maggiori saranno i calcoli che il software dovrà eseguire e di conseguenza farà aumentare il tempo necessario per realizzare il rendering.

La differenza sostanziale tra il *Forward* e il *Deferred rendering* è che il primo calcola la luce e la geometria per tutti gli elementi presenti nel campo visivo della scena, mentre il secondo calcola



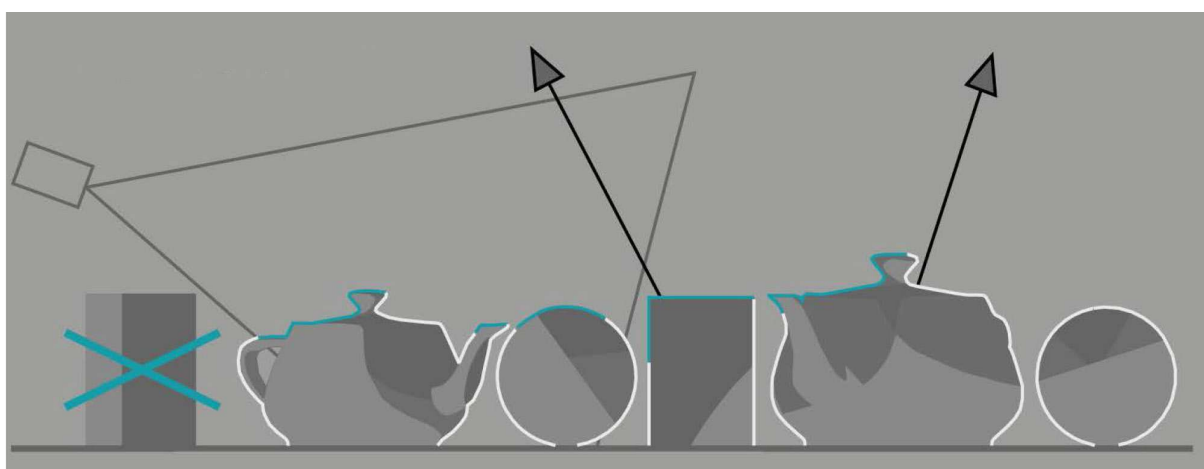
3.13_Schema di calcolo delle geometrie eseguito con la modalità di *Forward render*, in questo caso la luce viene calcolata per tutte le geometrie presenti nella scena, i tempi di calcolo sono consistenti.

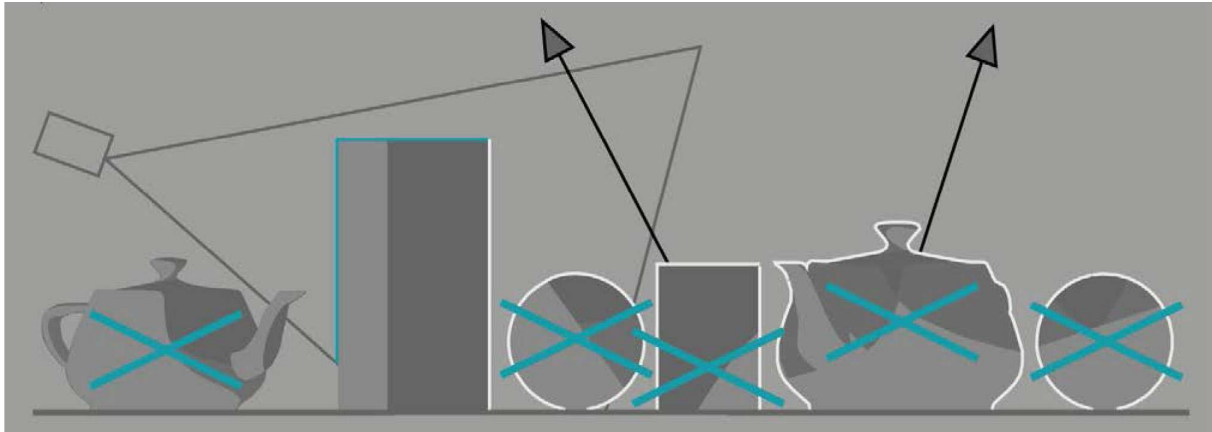
esclusivamente le superfici che sono visualizzate nel campo visivo. Questo secondo metodo comporta una drastica diminuzione del numero di poligoni calcolati e, di conseguenza, una riduzione di termini di tempo di calcolo. Possiamo riassumere che per effettuare il calcolo di render il *Forward rendering* moltiplica il numero di geometrie inquadrate dalla camera per il numero di luci presenti nella scena, mentre il *Deferred rendering* moltiplica il numero di pixel per il numero di luci.

La più grande criticità del *Deferred render* deriva dal suo principale punto di forza, ovvero il calcolo delle geometrie. Calcolando esclusivamente i poligoni inquadrati dal campo visivo si vanno a perdere alcuni elementi che potrebbero essere molto importanti al fine del rendering.

3.14_Schema di calcolo delle geometrie eseguito con la modalità di *Deferred render*, in questo caso la luce viene calcolata solamente per le geometrie visibili della scena.

Consideriamo per esempio che un parallelepipedo sia posto davanti a un sfera e ne copra completamente la visuale. La sfera non verrà renderizzata e, nel caso essa devii in maniera particolare la luce tramite una riflessione, questo dettaglio andrà a perdersi. Un secondo problema si verifica quando un parallelepipedo sia





fatto di materiale trasparente. Anche in questo caso la sfera non verrà renderizzata falsando il risultato finale.

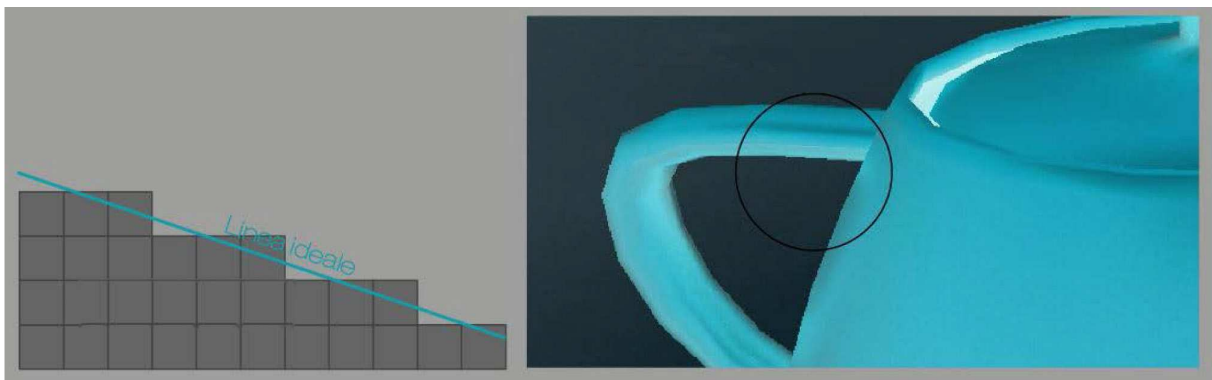
L'unica soluzione per entrambe le problematiche è il cambio di tecnica di render esclusivamente per gli elementi trasparenti e per i materiali estremamente riflettenti, utilizzando per essi il *Forward render*.

Un'altra grande criticità è la presenza di *aliasing* dovuta alla bassa precisione del calcolo. L'*aliasing* è un'imperfezione all'interno dell'immagine che genera una scalettatura in presenza di forme curvilinee. Il fenomeno è dovuto alla forma quadrata dei pixel ed alla loro disposizione. Infatti quando una geometria devia dalla linea di pixel, per rappresentarlo si genera una diagonale e quindi una disomogeneità nello spessore reale. Maggiore è il numero di pixel dal quale è formato il frame minore è l'effetto di *aliasing* che sfocano il bordo mescolando il colore dei pixel tramite un processo di campionatura e colorazione. Questi processi sono molto pesanti, poiché si applicano in fase di post processing.

Continuiamo ora con il processo di modellazione 3D del castello. Come spiegato in precedenza si sono utilizzati diversi software e tecniche di modellazione, la fase iniziale di ricostruzione è avvenuta in ambiente AutoCAD, dove sono state definite con precisione le geometrie bidimensionali ed è stata sviluppata una

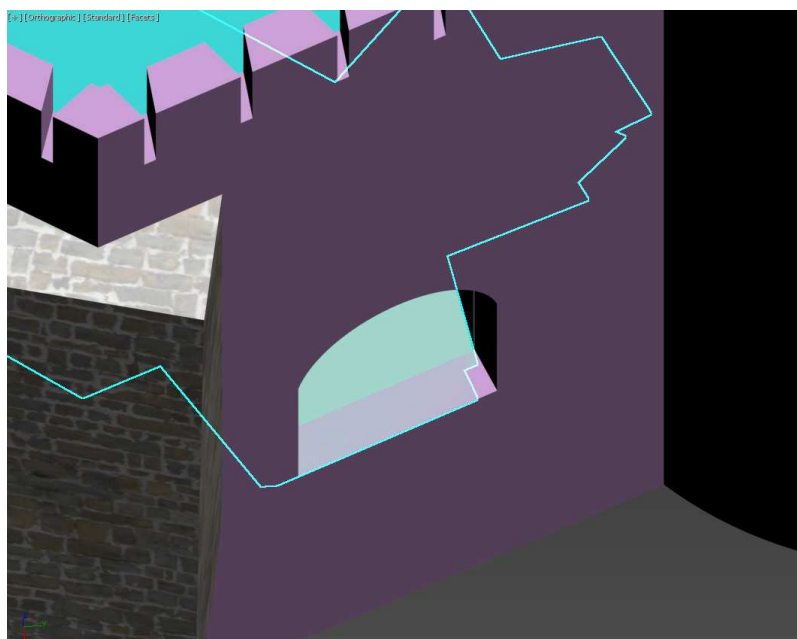
3.15_Schema di calcolo delle geometrie eseguito con la modalità di *Deferred render*, nel caso un oggetto o copra altri che potrebbero riflettere la luce e influire la scena o sia trasparente, questo tipo di render non calcolerà la geometria degli oggetti che si trovano nascosti dal primo, andando a modificare il risultato finale.

3.16_Imperfezione delle linee inclinate o curve data dalla conformazione quadrata dei pixel, questo fenomeno viene chiamato *aliasing*.



modellazione 3D preliminare delle volumetrie principali che definiscono l'opera architettonica.

La problematica della modellazione CAD è che i vari modelli 3D presentano svariate sovrapposizioni poligonali, le quali, inserite all'interno del programma *Unreal* generano un fenomeno detto *Flickering*, questo disturbo comporta un tremolio costante della mesh dovuta all'incapacità del software di gestire due poligoni che occupano lo stesso volume. Questa problematica prende il nome di *Overlaps*. Per evitare queste problematiche di sovrapposizione, l'intero 3D deve essere corretto e alleggerito di tali superfici/poligoni ridondanti. Quest'operazione avviene importando il modello all'interno del programma di grafica vettoriale tridimensionale e animazione, nel nostro caso è stato utilizzato 3Ds Max, dove dopo averlo convertito in un oggetto definito *Editable Poly*, è possibile eliminare tutti i poligoni le cui facce sono sovrapposte. Con questa operazione si alleggerisce ulteriormente il modello iniziale. All'interno di questo programma sono state svolte anche alcune operazioni di trasformazione con il semplice spostamento di vertici, segmenti e poligoni.



3.17_Nel modello, prima di importarlo nel software *Unreal Engine* bisogna fare una attenta pulizia di tutte quei poligoni che si sovrappongono altrimenti darebbero fastidiosi problemi di sfarfallio.

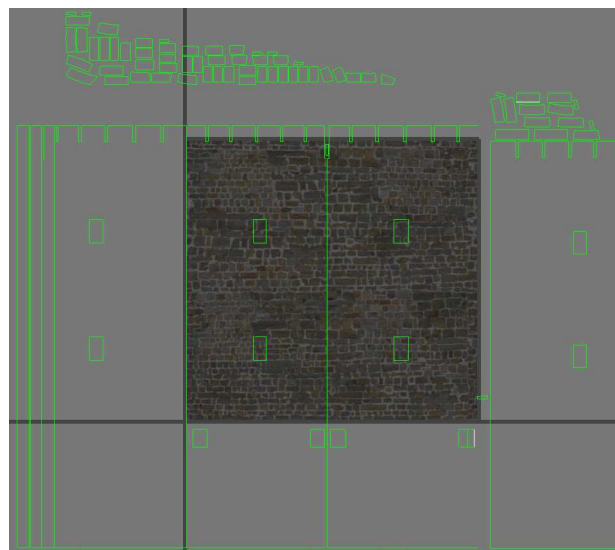
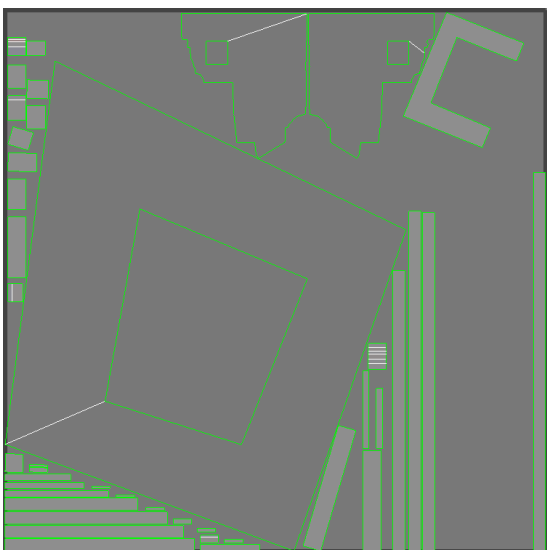
La composizione delle geometrie del modello (numero di poligoni) è importante anche per la definizione delle ombre per questo motivo con l'utilizzo del *Deferred rendering* è necessario utilizzare modelli definiti in *Low poly*. Per non dover calcolare in tempo reale tutte le ombre che compongono la scena, il programma *Unreal Engine* pre-calcola in una fase definitiva *Built* le ombre dell'intera scena. Queste informazioni vengono salvate in una texture apposita collegata al modello 3D. Minore è il numero di poligoni del quale una mesh è composta, minore sarà il grado di

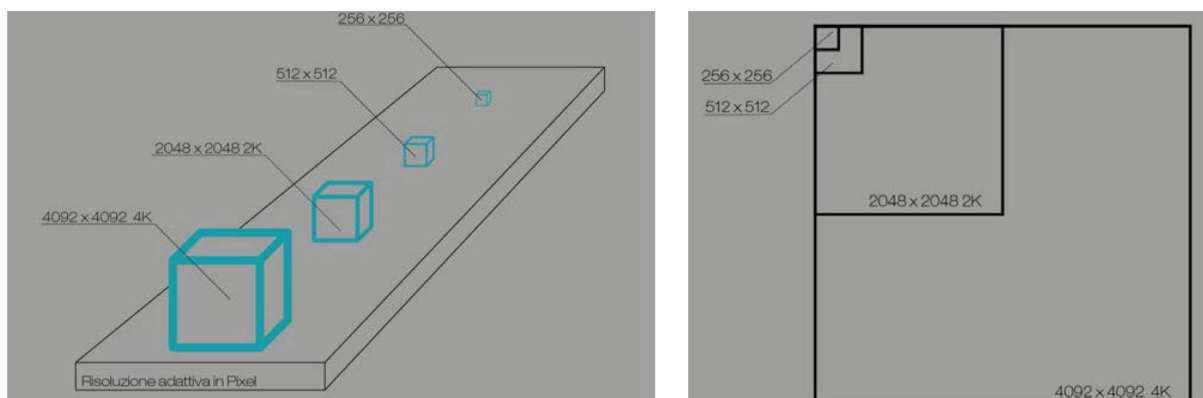
dettaglio necessario affinché l'ombra sia proiettata correttamente. Una volta ultimato il processo di modellazione 3D all'interno del programma di grafica vettoriale, è necessario realizzare un'operazione definita *Unwrap*, ovvero rendere una superficie tridimensionale bidimensionale e posizionare i vari poligoni sul piano cartesiano. Per fare ciò le facce del modello devono essere separate le une dalle altre, rompendo la mesh in gruppi di poligoni. Minore è il numero di distaccamenti della mesh minore sarà la presenza di imperfezioni in fase di calcolo. Per la realizzazione delle ombre come precedentemente affrontato, *Unreal* effettua il salvataggio delle stesse all'interno di apposite texture che hanno il nome di *UV map*. La risoluzione delle texture è proporzionale al dettaglio delle ombre ottenuto. Ciò è reso possibile grazie al processo di disegno delle ombre che avviene tramite la campitura di pixel. Minore è la dimensione di questi, maggiore è il dettaglio raggiungibile nel disegno.

L'*UV map* è utilizzato sia per il salvataggio delle ombre che per le texture del modello. Risulta molto difficile far coesistere le due caratteristiche nella medesima *UV map*, rendendo il processo di *texturing* molto più complesso rispetto a quello di un tradizionale render CPU.

Una scorretta procedura di *unwrapping* può portare a dei pessimi risultati di illuminazione e generare la problematica dello *Shadow Bleeding*, che avviene quando due poligoni sono troppo ravvicinati nella *UV map* e condividono quindi alcuni pixel utilizzati per il disegno delle ombre. Quello che succede è che un'ombra proiettata su una delle superfici si tratterà in parte anche sul poligono adiacente nella *UV map* generando macchie o linee che non dovrebbero esserci. È perciò necessario svolgere un'accurata operazione di *unwrapping* mantenendo tutti i poligoni distanziati

3.18_Due modalità di uso del modificatore *Unwrap* di 3d Studio Max, la prima per creare la mappa per il calcolo della luce e il secondo per il dimensionamento della texture rispetto all'elemento.





3.19_ Se l'oggetto è posto in lontananza si può applicare una texture di minore definizione in modo da non pesare sul complesso del modello.

tra loro e dal bordo della mappa stessa, occupandone più spazio possibile.

Passiamo ora a parlare dei materiali utilizzati all'interno della scena e della loro composizione.

Solitamente quando si parla di materiali si pensa alla texture ma in questo caso dobbiamo parlare di *shaders*.

Una texture è un'immagine raster di formato compresso o non compresso, composta da un certo numero di pixel suddivisi in 4 canali. Gli elementi chiave che la caratterizzano possono essere riassunti in tre categorie: dimensioni, canale, compressione. Le dimensioni sono espresse in pixel. Un'immagine con un grande numero di pixel risulta molto definita ma allo stesso tempo molto pesante. La corretta risoluzione dipende dalle necessità della texture stessa. Una texture che viene vista in maniera molto ravvicinata necessita di grandi dimensioni (ad esempio 4092x4092 px, conosciuto come 4K), mentre una texture che fa parte di un elemento di lontananza potrà avere dimensioni nettamente inferiori come ad esempio 512x512 px. Risparmiare risoluzione delle texture è un aspetto fondamentale per garantire una corretta ottimizzazione e quindi una buona fluidità di FPS in quanto il peso di tutte le texture visualizzate grava sulla memoria video della scheda grafica.

I canali colore di una immagine sono 4 ovvero RGB e il canale Alpha. L'RGB è l'insieme dei tre colori base della computergrafica ovvero Red, Green e Blue. Ognuno può variare in 256 tonalità per un totale di 4.294.967.295 colori in un sistema 32 bit. Il canale aggiuntivo ha il nome Alpha, a differenza degli RGB non ha funzione di colorazione ma rappresenta l'esistenza o meno della texture in base ad una scatola che va da 0 (non esiste) a 256 (esiste). Questo canale costituisce un aspetto fondamentale per la realizzazione di maschere di ritaglio.

Infine vi è la compressione che è data dal formato di salvataggio delle texture. Vi sono due categorie di file: i formati compressi con perdita di dati, come ad esempio il .JPEG, e quelli, si compressi, ma senza la perdita di dati come i file .PNG. La sostanziale differenza tra le due tipologie di formato è che quello



3.20_Immagine Albedo che verrà utilizzata per creare lo *shader* applicato alla muratura del castello.

compresso senza perdita di dati permette il salvataggio di alcune informazioni che consentono modifiche di post-produzione nonché il salvataggio del canale Alpha. Un esempio di formato non compresso utilizzato nella scena è l'HDRI, una immagine sferica che contiene oltre i canali RGB e il canale Alpha anche le informazioni sull'illuminazione.

Gli *Shaders* sono i veri materiali che vengono applicati ai modelli tridimensionali e sono composti da più *texture* alle quali impostiamo diverse proprietà attraverso la regolazione di diversi parametri.

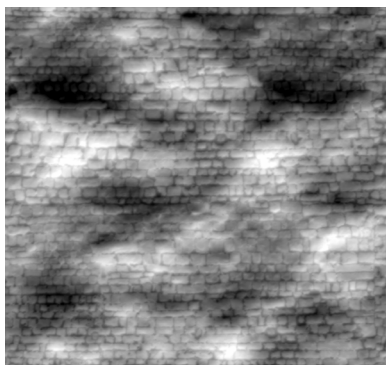
All'interno del software di *Unreal* ci sono due tipi di *shader*: i *Master* e gli *Instance*. I primi sono degli shader primari ai quali vengono applicate le texture e servono a regolarne il comportamento per fare ciò è necessario creare dei parametri tramite la programmazione. Gli *instance* derivano dai master e permettono di svolgere le regolazioni programmate. Questi ultimi sono quelli che vengono applicati poi ai modelli.

Le texture che vengono utilizzate all'interno degli *shader* sono principalmente quattro e vengono così identificate: Albedo, *Reflection/specular texture*, *Bump* e *Displacement texture* ed infine *Normal texture*.

L'Albedo è l'immagine a colori del materiale che vogliamo rappresentare, è solitamente una fotografia o una scansione ed è composta dai canali RGB. Esso costituisce il componente principale di uno *shader* ed è il primo che viene visualizzato. Per



3.21_Reflection map che verrà utilizzata per la definizione dello *shader* applicato alla muratura del castello.



3.22 Immagine in scala di grigi ricavata attraverso programmi di fotoritocco dalla immagine Albedo, questa verrà utilizzata sia per la definizione *Bump* sia per quella *Displacement* all'interno della programmazione dello *shader* applicato alla muratura del castello.

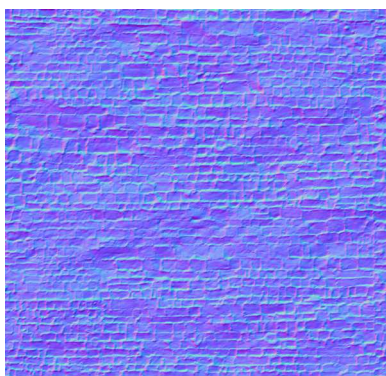
una corretta visualizzazione la texture deve essere omogenea nella sua rappresentazione e non variare di tonalità altrimenti queste variazioni cromatiche si vedranno chiaramente durante le varie ripetizioni della texture stessa. Nel caso in cui non sia necessario utilizzare una texture albedo, essa viene sostituita con un colore parametrico o in casi particolari dal Pixel color, una tecnica di colorazione diretta dalla mesh.

La *Reflection/specular texture* è un'immagine su scala di grigi che rappresenta il modo in cui la luce verrà riflessa. I toni scuri indicano un punto di non riflessione mentre i toni chiari individuano quelli di alta riflessione. In questo caso il canale utilizzato è l'Alpha ma non è necessario che la texture lo contenga, infatti sarà il software a riconoscere automaticamente le tonalità di grigio e a convertire in informazioni Alpha. La *Reflection map* è molto importante per raggiungere un risultato fotorealistico, ma non sempre necessaria: infatti nei casi di elementi in lontananza, che non siano di grande importanza per la luce, non è necessario utilizzare questa mappa. Per la sua realizzazione solitamente si utilizzano programmi di fotoritocco e si converte la texture Albedo in scala di grigi riducendo la precisione ed aumentandone il contrasto.

Il *Bump* e la *Displacement texture* hanno la funzione di generare una tridimensionalità nell'immagine. La *bump map* genera delle ombre nei punti più scuri della texture generando così una finta tridimensionalità e quindi un effetto di profondità. Essa non è sempre molto efficace in quanto non rispetta le informazioni date dal sistema di illuminazione della scena, ma genera le ombre esclusivamente in base alla texture. Mentre il *displacement* è una tecnica di tridimensionalità reale, infatti la mesh del modello sulla quale viene applicata questa texture subisce un processo di *tessellation* e di successiva estrusione o intrusione.

In questo caso il risultato è nettamente superiore in quanto la tridimensionalità è vera e non illusa, nonché rispetta l'illuminazione della scena. Le principali problematiche del *displacement* sono la poca precisione e il peso eccessivo in termini di prestazioni. L'estrusione che viene effettuata sulla *mesh* è di bassa precisione poiché le informazioni sono prese dalla texture e sono quindi legate alla sua risoluzione. L'aumento di tassellazione della *mesh* comporta un incremento di due o tre volte il numero di poligoni del modello originale. Non è quindi possibile utilizzare una *displacement map* per ogni modello 3D di una scena. Entrambe le tecniche sono accumulate dalla loro texture di provenienza ovvero una immagine in scala di grigi che non contiene il canale Alpha.

La *Normal texture* svolge la funzione, come la tipologia precedente, di creare una tridimensionalità allusiva. A differenza della precedente però è molto più efficiente in quanto non genera poligoni aggiuntivi ma riesce a creare delle ombre che siano coerenti con l'illuminazione generale. Ciò è possibile grazie alla



3.23 Esempio di *Normal map* utilizzata nel materiale per il campionamento la muratura del castello

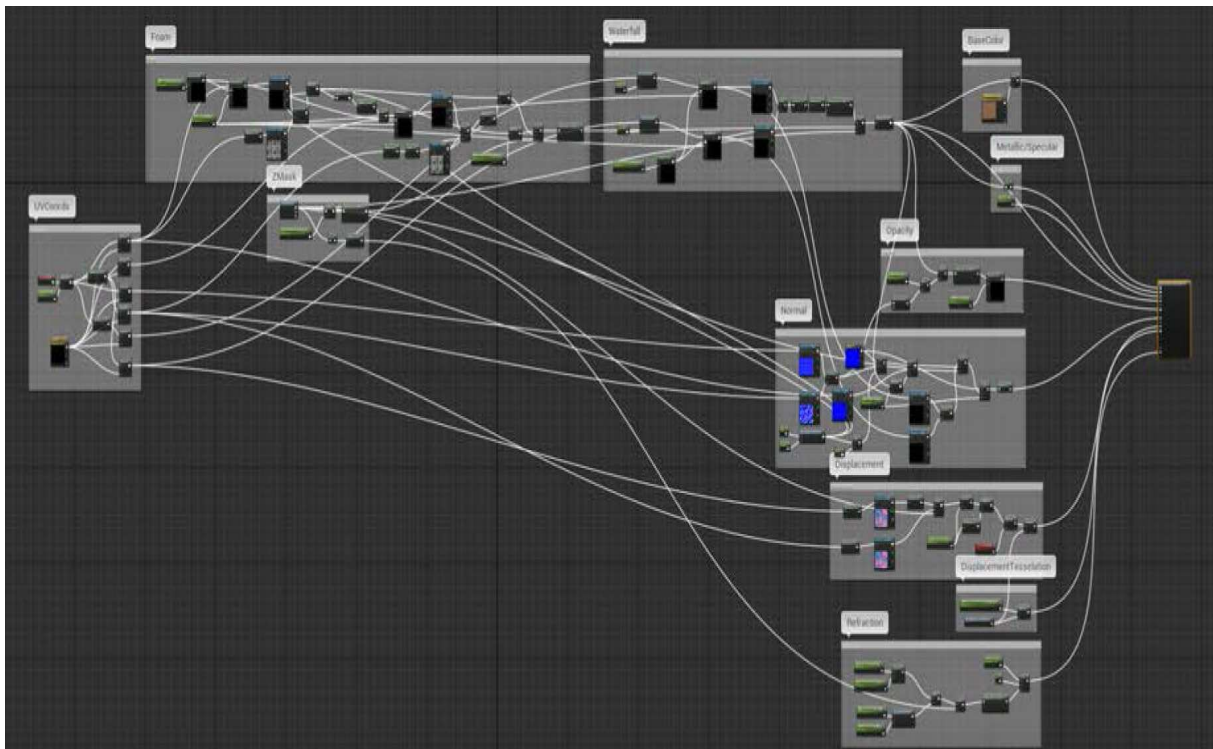
caratteristiche di questa texture di combinare tutti i canali RGB per il salvataggio delle ombre della texture stessa. A differenza della *Bump map* dove le ombre sono monodirezionali, nella *Normal map* le ombre provengono da 360° e vengono utilizzate solo nell'angolazione in cui la camera le guarda.

Per realizzare una *Normal map* è necessario utilizzare software specifici che compiono una operazione di estrusione e di rendering a 360°. La *Normal* risulta inadeguata esclusivamente se utilizzata in un modello visto da molto vicino poiché apparirà piatto.

Uno dei punti deboli delle texture comuni è sicuramente la loro ripetitività. Questa avviene quando una texture, applicata più volte su uno stesso elemento, genera la ripetizione di alcuni schemi che difficilmente si verificherebbero nella realtà. In particolare, nel caso di rappresentazione di elementi naturali il problema delle ripetizioni è un aspetto molto importante che può essere risolto utilizzando le texture procedurali. Questa tipologia di texture è realizzata tramite l'ausilio di un software ed è basata su algoritmi matematici che non presentano ripetizioni. Tuttavia la loro generazione molto complessa ed allo stesso tempo fornisce un risultato casuale e di conseguenza difficilmente controllabile.

Vi è, infine, una tecnica più avanzata denominata *Quilting* nella quale la texture originale viene analizzata e campionata e viene generata una nuova immagine, la quale è composta da parti

3.24_Esempio della complessità della programmazione di uno *Shader* procedurale



della texture originale ma randomizzate. Il risultato per elementi naturali è di grande impatto, ma tuttavia l'applicazione della stessa a geometrie regolari non è fattibile.

Passiamo a un altro tema fondamentale quando si parla di ambienti immersivi, l'illuminazione è parte integrante del coinvolgimento del visitatore.

Il processo di illuminazione è stato realizzato completamente all'interno del software *Unreal Engine*. Tale procedimento avviene tramite l'applicazione dell'algoritmo di *Light Mass* alle geometrie presenti nella scena.

Le tipologie di luce che il programma riesce a calcolare sono due: la luce diretta e la luce indiretta. Per la luce diretta è possibile inserire fonti luminose come la *Direct Light*, che viene solitamente utilizzata per riprodurre i raggi solari; le *Portal Light* che vengono utilizzate per spingere la luce all'interno dell'edificio, e infine le *Point Light* che sono delle fonti di luce isolate da impiegare per simulare l'illuminazione artificiale.

Per quanto riguarda la resa della luce indiretta si può utilizzare l'*Atmospheric Fog* che simula la luce riflessa dal terreno e la *Sky Light* che riproduce la luce riflessa dall'atmosfera.

Il parametro di riferimento delle luci dirette è l'intensità. Mentre quello delle luci indirette è il numero di rimbalzi che la luce compie. Quest'ultimo migliora notevolmente la qualità generale della scena portandola ad un livello fotorealistico. Un alto numero di rimbalzi comporta tuttavia ad un maggiore tempo di calcolo, e quindi necessario trovare il giusto compromesso tra qualità e prestazioni.

Utilizzando *Unreal*, che ricordiamo è un software di animazione, ogni oggetto e fonte luminosa presente nella scena può avere la proprietà di essere statico o dinamico. Definire un oggetto dinamico significa dargli la possibilità di essere mosso all'interno della scena. Oggetti e luci si suddividono in tre possibili categorie di movimento: statico, dinamico e mobile. Tale proprietà influenza sia il livello di qualità del progetto che il peso in termini di prestazioni.

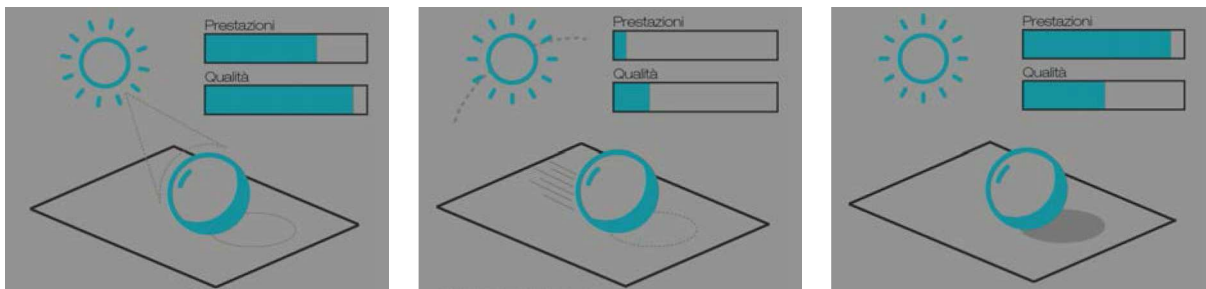
Oggetti e fonti luminose di tipo statico non prevedono la possibilità di movimento all'interno della scena, è quindi possibile per il software pre-calcolare tali elementi in maniera da diminuire il tempo di elaborazione inoltre è possibile notare come oggetti di tipo statico producano ombre e riflessi di qualità molto elevata ma senza la possibilità di alcuna interazione.

Gli oggetti e le fonti luminose di tipo dinamico hanno caratteristiche simili a quelli di tipo statico, ovvero sono tutti elementi pre-calcolati e non danno possibilità di essere mossi all'interno della scena ma permettono alcune interazioni. Tramite tale tecnica è possibile realizzare degli script, ovvero eventi pre-impostati ma che avvengono con interazione da parte dell'utente.

Un esempio è una luce che viene accesa con la pressione di un interruttore. Le interazioni possibili hanno come unico vincolo l'impossibilità di movimento dell'elemento dalla posizione scelta in partenza. A livello qualitativo l'illuminazione generata da luci dinamiche è di qualità superiore a quella statica in quanto è possibile attivare l'effetto del *Distance Field*, il quale consiste nella sfumatura dei contorni delle ombre con l'allontanarsi dall'oggetto che la proietta. Tale effetto è caratteristico dell'illuminazione naturale ed è dovuto alla presenza della luce riflessa. Sul piano delle prestazioni, gli elementi dinamici non hanno un grande impatto, ma sono sicuramente più esigenti rispetto agli elementi statici.

In ultimo gli oggetti e fonti luminose di tipo mobile hanno la possibilità di movimento illimitato all'interno della scena. Il calcolo della luce e delle relative ombre avviene per questa tipologia in tempo reale senza alcun tipo di pre-calcolo. Tale tecnica è solitamente utilizzata negli ambienti dei videogiochi dove la maggior parte degli elementi sono in movimento.

Sul piano delle prestazioni, gli elementi mobili sono estremamente impattanti in quanto la GPU deve svolgere una costante operazione di rendering rallentando i processi di caricamento. Ciò significa che questa tecnica non può essere utilizzata per ottenere un alto numero di FPS. Qualitativamente le luci mobili



sono nettamente inferiori rispetto alle controparti statiche e dinamiche. L'algoritmo di calcolo della *Light Mass* non riesce ad essere preciso quanto negli altri due casi.

La problematica principale degli oggetti in movimento è il passaggio da zone illuminate a spazi in ombra, in quanto l'algoritmo di *Light Mass* potrebbe non riuscire a calcolare abbastanza velocemente la corretta illuminazione. Si genereranno così ombre con artefatti e male illuminate. Risulta quindi chiaro che una illuminazione di tipo *movable*, come ad esempio un ciclo giorno notte, non sia adatto ad un progetto di visualizzazione architettonica.

In conclusione, il processo di illuminazione statico o dinamico viene svolto in una fase di pre-calcolo detta *Built*. Tale operazione viene svolta dalla CPU come un tradizionale rendering basato su CPU. I tempi necessari per tale calcolo variano dal numero

3.25_Schematizzazione della differenza di prestazioni e qualità delle tre definizioni che si possono dare a oggetti e luci, in ordine sono rappresentati i comportamenti di *static light*, *stationary light* e *movable light*.

di fonti luminose, oggetti che necessitano la costruzione delle ombre e dalla dimensione della scena illuminata.

Unreal Engine, come più volte ricordato, nasce come software per prodotti videoludici e solo successivamente è stato adattato per la realizzazione di visualizzazioni architettoniche. La sua caratteristica di *game engine* permane anche all'interno dei progetti architettonici e può essere utilizzata per realizzare interazioni che non sarebbero possibili con i tradizionali software di rendering. Le interazioni base vengono definite da delle leggi fisiche che all'interno del programma vengono definite collisioni, con l'inserimento delle collisioni definisco dei comportamenti degli elementi o delle interazioni, più semplicemente devo dare questa definizione al pavimento per poterci camminare sopra.

Con l'apertura di un nuovo progetto si può scegliere la modalità che si vuole utilizzare per la realizzazione del prodotto. Si può scegliere tra due possibilità, quella di programmazione C++ o una più semplice che utilizza un'interfaccia detta *Blueprint*. Quest'ultima viene utilizzata maggiormente dai non programmatori e permette di utilizzare e combinare gli *script* precedentemente realizzati per svolgere interazioni e creare eventi all'interno del progetto. Questi *script* svolgono la funzione di moduli di programmazione che vengono visualizzati sotto forma di nodi. Per la realizzazione di qualunque elemento programmabile vengono utilizzati tali nodi i quali vengono connessi gli uni agli altri per realizzare stringhe di programmazione vere e proprie. Alcuni esempi di programmazione sono gli *shaders* nei quali sono utilizzati numerosi nodi per dare alle texture determinate caratteristiche e renderli leggibili al motore grafico. Un altro esempio di programmazione sono le interazioni che si possono realizzare con l'ambiente di gioco. È infatti possibile creare eventi che alterino la scena e che questi siano dovuti a delle azioni svolte dall'utente. Un esempio sono gli interruttori anche detti *Trigger*, visibili o no, i quali permettono all'utente in gioco di attivare una determinata azione che è stata precedentemente programmata. L'accensione di una luce o l'apertura di una porta ne è un ottimo esempio.

Le interazioni con la scena possono anche fornirci delle informazioni in più su quello che stiamo visionando.

Vi sono poi elementi di programmazione che regolano la visualizzazione stessa. La possibilità di utilizzare un casco VR è data proprio da tali elementi di programmazione. Per la realizzazione dell'esperienza in realtà virtuale è necessario svolgere un lavoro di programmazione in maniera che all'avvio dell'applicazione l'utente possa usufruire correttamente del visore e possa muoversi ed interagire nella scena.

Dopo aver dato alcune nozioni base del programma *Unreal Engine* illustreremo il lavoro eseguito all'interno di questo programma per realizzare l'esperienza immersiva e interattiva all'interno del

caso studio, il castello di Gorizia.

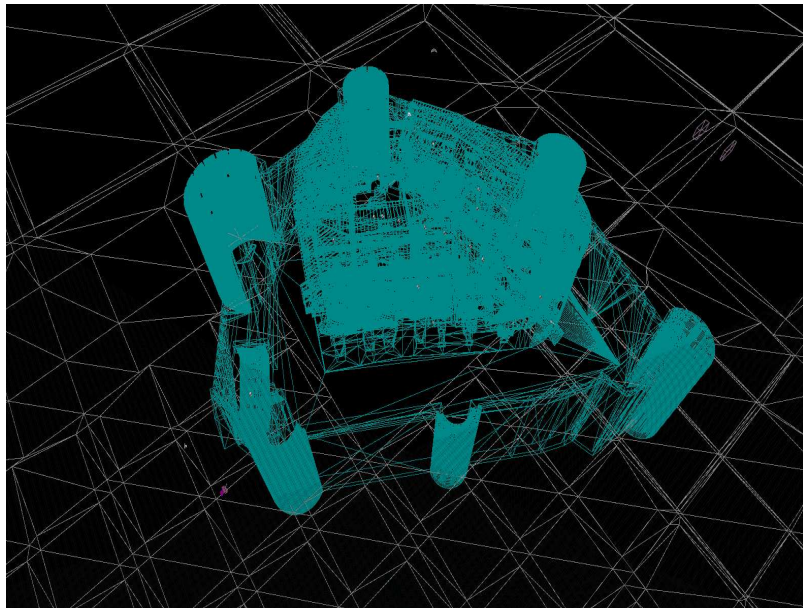
Data la complessità del progetto e del software utilizzato, si è reso necessario seguire un rigido metodo di lavoro, in maniera da raggiungere il risultato senza che si generassero gravi errori tecnici e di rappresentazione.

Una volta completata la fase di modellazione tridimensionale, si è posta la prima problematica di esportazione. Per far sì che *Unreal Engine* riconoscesse correttamente tutti i modelli 3D, è stato scelto il metodo di esportazione tramite il formato Autodesk FBX i singoli elementi che andranno a comporre il complesso architettonico; il formato FBX mantiene alcune caratteristiche assegnate alle geometrie al interno del programma di modellazione vettoriale come ad esempio le informazioni di *Unwrap*, le caratteristiche di posizionamento dei materiali, eventuali percorsi attribuiti ad una telecamera e le coordinate cartesiane degli oggetti. A seguito dell'inserimento e del giusto posizionamento all'interno

3.26_Visualizzazione del modello tridimensionale all'interno del programma *Unreal Engine 4* senza l'applicazione dei materiali.

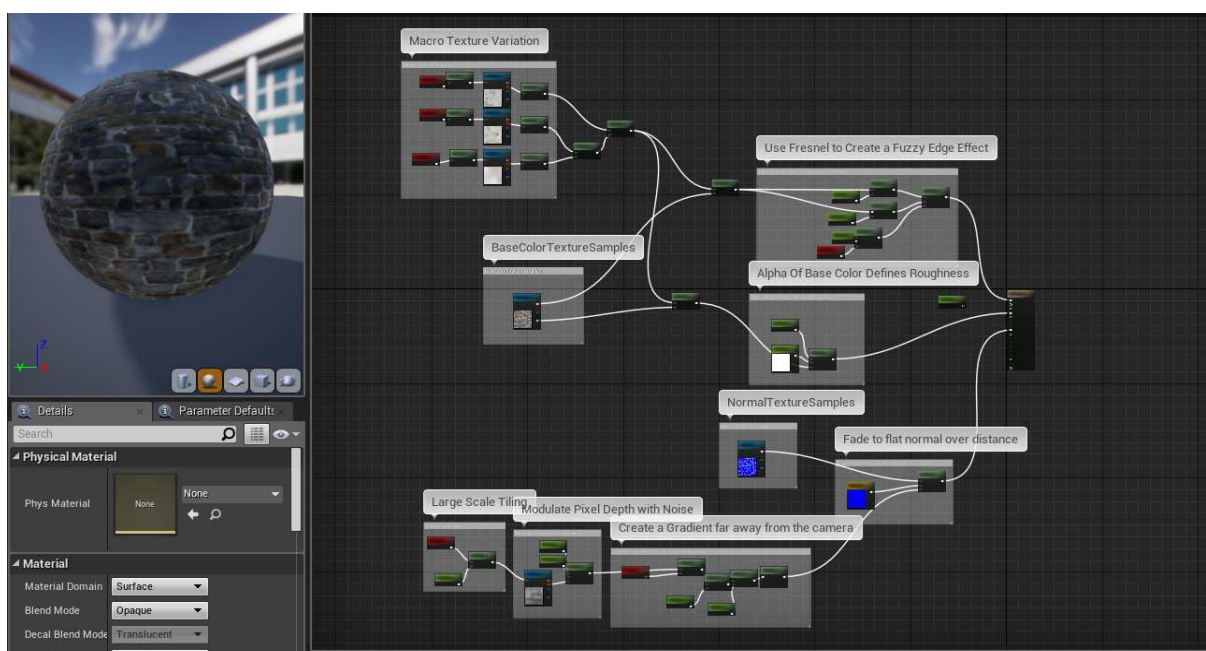


3.27_Rappresentazione in *wireframe* in ambiente *Unreal Engine*



del piano cartesiano del modello tridimensionale del castello di Gorizia all'interno del software *Unreal*, si è proceduto, prima con la modellazione del terreno circostante, e poi con tutta una serie di operazioni che aggiungono caratteristiche ai diversi elementi, come ad esempio il sistema di collisioni.

Si è scelto di modellare il terreno in questo ambiente in quanto la modellazione di questo elemento in altri programmi avrebbe apportato un gran numero di poligoni all'interno del modello, questa operazione è stata svolta utilizzando la funzione specifica proposta dal programma, la quale permette di estrarre, scavare o livellare un piano, in modo da dare la tipica imperfezione del

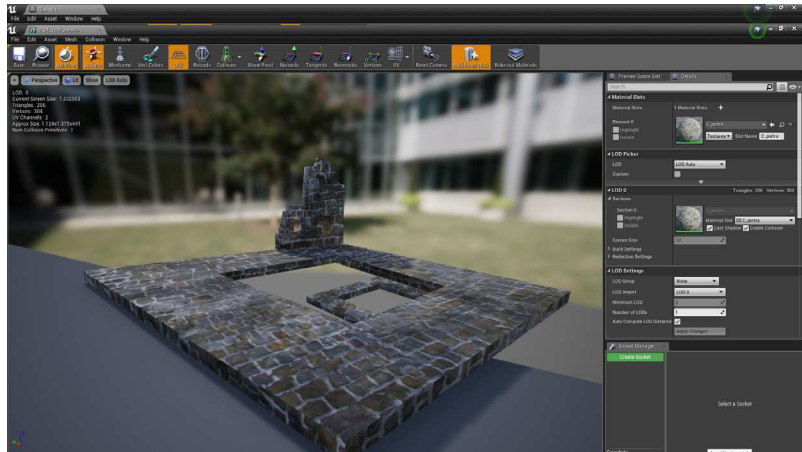


3.28_ Interfaccia di *Unreal Engine* per la creazione di uno *shader*, nello specifico viene creato il materiale per la muratura del castello.



3.29_ modello del castello con la texture della muratura esterna applicata.

3.30_ Interfaccia di *Unreal Engine* per la gestione delle caratteristiche di ogni materiale.



terreno.

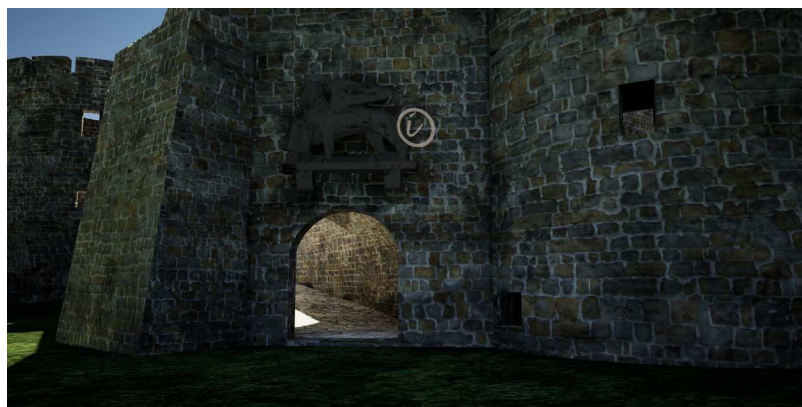
Una volta sistemati tutti gli elementi al proprio posto si sono creati i materiali e assegnati ai diversi elementi.

Ogni elemento può essere selezionato e da questa interfaccia gli si possono attribuire le qualità dei materiali e del loro comportamento all'interno della scena

Ultima tutta la messa a punto del modello dal punto di vista grafico e visivo con l'inserimento dei materiali, la posizione delle luci e il loro calcolo, l'attribuzione del comportamento di interazione tra l'utente e ogni singolo oggetto attraverso la scelta di tipo di collisione.

Si è passato alla progettazione delle azioni che un visitatore può fare per conoscere a pieno l'edificio del castello e la sua storia si è previsto di inserire dei bottoni che attivano un'informazione, una curiosità sul luogo o sul oggetto prescelto.

3.31_ Ingresso al castello, qui si trova la posizione di partenza della visita immersiva e interattiva. Durante la visita si potranno trovare le indicazioni per le interazioni.



3.32_ Durante la visita si potranno leggere delle informazioni attivando l'icona (i).



3.33_ Attivando l'icona (i) si attiveranno delle box con delle informazioni.



3.34_ Anche nella Corte dei Conti si troveranno delle informazioni.

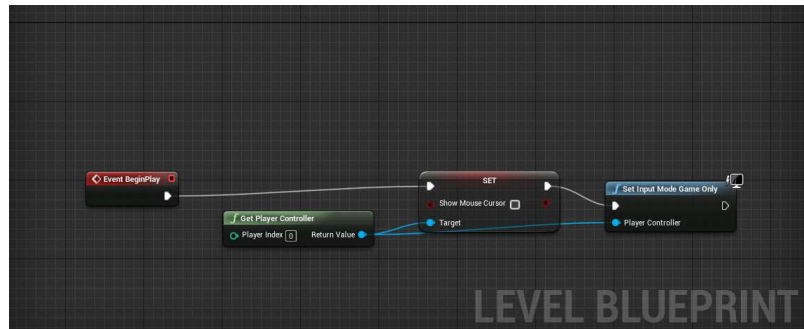


Un esempio è la possibilità di vedere l'unico apparato iconografico che rappresenta il mastio murario primo insediamento sul colle del castello di Gorizia.

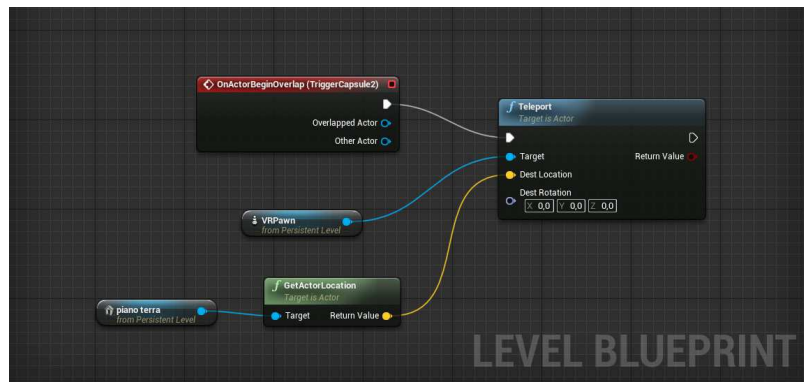
Tutte queste interazioni aggiunte lungo il percorso di visita hanno la necessità di essere programmate attraverso il *Level Blueprint*.

Si è deciso di operare principalmente su due diversi prodotti: il primo è una applicazione per desktop dove la navigazione avviene attraverso gli input dati da tastiera, il secondo prevede l'immersione stereoscopica utilizzando un casco per la realtà

3.35_Level Blueprint per l'avvio della navigazione interattiva per l'applicazione a tastiera.



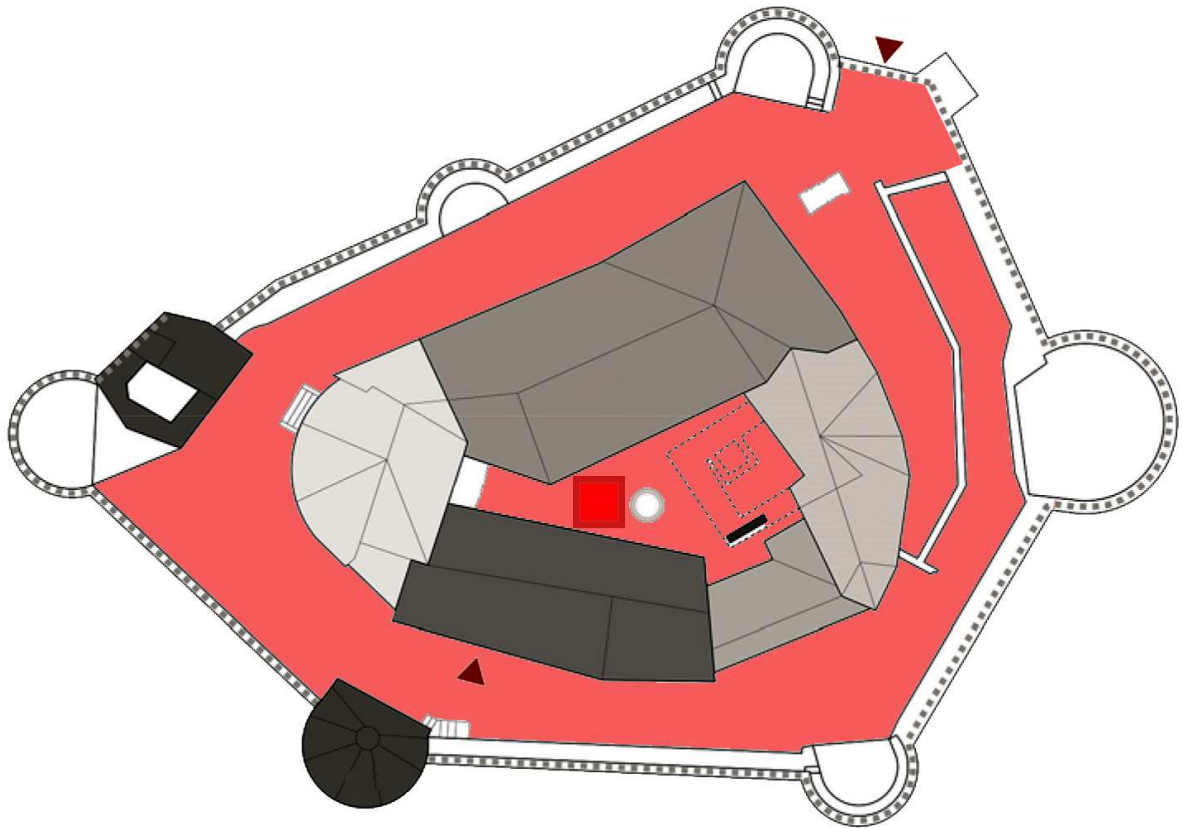
3.36_Level Blueprint per l'avvio della navigazione interattiva per l'applicazione in realtà virtuale immersiva.



virtuale. Queste diverse possibilità sono state scelte per la varietà di fruitore che possono avere. La prima può essere distribuita ad un maggior numero di utenti, visto che la sua fruizione non necessita di particolari strumentazioni o alte prestazioni computazionali del dispositivo informatico utilizzato. La seconda, si potrebbe considerare più di nicchia, in quanto necessita di una particolare strumentazione, potrebbe essere inserita all'interno della visita di un museo per la città di Gorizia, o in una postazione dedicata nel castello stesso. Una terza possibilità di sviluppo di questa applicazione di navigazione interattiva in *real-time*, per il castello di Gorizia, prevede la navigazione in una in camera immersiva. Quest'ultima tipologia di divulgazione culturale consente a più persone contemporaneamente di vivere l'esperienza ed interagire con il modello tridimensionale.

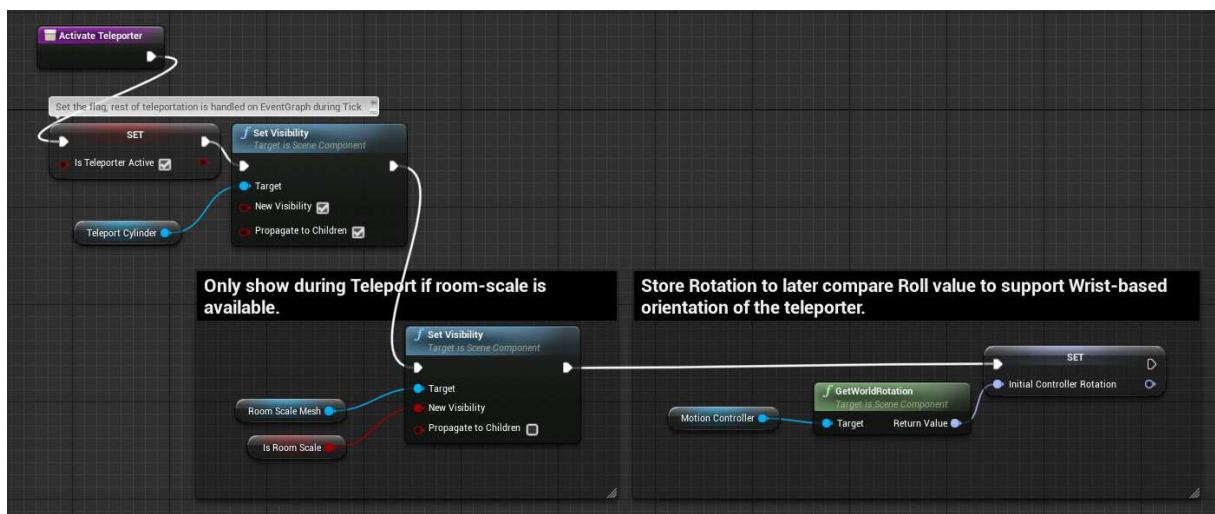
Per ogni applicazione è prevista una programmazione differenziata in quanto la navigazione e l'interazione avvengono in modo differente.

Ad esempio quando si compila l'applicazione per l'immersione con il caso di realtà virtuale, è necessario programmare il tipo di spostamento possibile all'interno della scena, come spiegato nel primo capitolo il visore di realtà virtuale dà la possibilità all'utente di muoversi in uno spazio delimitato nel quale verranno tracciati i suoi movimenti da due telecamere. Risulta chiaro che lo spazio necessario per il movimento libero è limitato dalla tecnologia stessa, in questo caso lo spazio previsto è di 3m x



3.37_ Le zone campite di rosso sono quelle dove è permesso muoversi, il quadrato all'interno della Corte dei Lanzi corrisponde alla zona di libertà di movimento anche nel mondo \

3m. Nella visualizzazione architettonica virtuale si dispone di aree nettamente superiori e si viene a creare la problematica della differenza di movimento tra spazio reale e spazio virtuale, l'area adibita alla navigazione nel mondo virtuale sarà sempre maggiore rispetto allo spazio per il libero movimento nello spazio reale. Esplorare tutta l'area del castello avendo a disposizione solamente 9 mq di area calpestabile risulterebbe impossibile. È quindi



stato necessario impostare un ulteriore metodo di spostamento all'interno dell'ambiente virtuale, questo metodo viene definito Movimento con Teletrasporto, con il suo utilizzo il visitatore tramite i due controller a sua disposizione potrà indicare la posizione nella quale vuole spostarsi. Questa tecnica non fa altro che spostare l'area di navigazione da un punto all'altro e spostando nel nuovo punto la libertà di movimento reale.

Il punto di forza è la totale assenza di chinetosi, problematica affrontata nel primo capitolo quando si parlava dei dispositivi per la realtà virtuale, il punto di debolezza, invece, è la complessità nello svolgere questo movimento, potrebbe non essere intuitivo utilizzare questa procedura per gli utenti meno avvezzi all'uso dei video giochi.

Nella pagina accanto in basso:

3.38_Level Blueprint per il controllo del movimento di teletrasporto all'interno del mondo virtuale.



3.39_Utente durante l'utilizzo del casco per la navigazione immersiva .





3.40_Tour virtuale nel castello di Gorizia.

1 Howe N., Strauss W., 2006, *Millennials and the pop culture: Strategies for a new generation of consumers in music, movies, television, the Internet, and video games*. Great Falls, VA: LifeCourse Associates.

2 Burnette Stogner M., 2011, *The Immersive Cultural Museum Experience – Creating Context and Story with New Media Technology*, in “The International Journal of the Inclusive Museum” Volume 3, Number 3.

3 Coulter-Smith, G. 2006. *Deconstructing Installation Art*, Chapter 2 “Immersion in a field of distance” CASAID Publishing.

4 Hein, G. E. 1995. *Learning in the Museum*, p23.

5 Falk, J.H. Proceedings of CMT2009/A/003, The Learning Tourist: The Role of Identity-Related Visitor Motivations, p38.

6 Studio Azzurro è stato fondato nel 1982 da Fabio Cirifino, Paolo Rosa e Leonardo Sangiorgi.

7 Tommaso Campanella (1568-1639) filosofo, teologo, poeta e frate domenicano italiano, autore dell'opera a carattere utopico “La città del Sole” dove descrive una città ideale, utopia.

8 Italo Calvino (1923-1985) scrittore italiano, autore de “Le città invisibili” pubblicato nel 1972 dove vengono raccontate 55 città surreali, immaginate.

9 <http://www.londoncharter.org/index.html>

10 Poligoni reali: poligoni visibili sia dall'utente che dal software di modellazione.

4. Conclusioni

Le applicazioni realizzate come prodotti finali di questa ricerca per la valorizzazione e la divulgazione del patrimonio isontino, nello specifico del castello di Gorizia, rispecchiano le indicazioni prescritte nella *London Charter*.

Il patrimonio culturale ricostruito all'interno di un ambiente di navigazione immersiva permetterà la facile comprensione dell'architettura secondo le sue complesse trasformazioni subite dall'edificio nel corso della sua storia.

Ognuno dei prodotti realizzati si rivolge a un diverso target di utenti, riuscendo così a coprire un ampio pubblico, con la possibilità di usufruirne all'interno di spazi allestiti temporanei o permanenti, per le applicazioni di realtà virtuale stereoscopica e per le camere immersive, o in remoto attraverso l'applicazione per desktop.

L'applicazione sperimentale, e per certi motivi innovativa, del software di *game engine Unreal Engine 4* nel campo della documentazione immersiva di un bene culturale è risultata un efficace protocollo operativo per realizzare un progetto esperienziale, inoltre è un ottimo strumento per programmare la gamma di interazioni che il visitatore può fare; sicuramente è un ambiente grafico che necessita di una approfondita preparazione nella programmazione e la gestione di un sistema a nodi.

Altro aspetto riguarda la caratteristica del modello 3D proveniente dall'integrazione dei molteplici rilievi architettonici, eseguiti nel corso della ricerca, che nel caso studio, ha rappresentato un obiettivo complesso, al limite delle condizioni operative e della operatività strumentale. La notevole quantità di dati raccolti nella fase di rilievo ha richiesto l'adozione di una procedura specifica per la ottimizzazione delle informazioni e dei parametri necessari alla fase della modellazione degli ambienti da utilizzare poi all'interno del motore grafico. I dati raccolti durante le scansioni sono stati utilizzati per completare la modellazione tridimensionale del castello, come ad esempio la cinta muraria, e alcune parti sono state fondamentali per aumentare il dettaglio di qualità realistica del modello, sicuramente l'esempio più significativo è il Leone Marciano posizionato sopra il portone d'ingresso.

La documentazione conservata nell'archivio tecnico del Comune di Gorizia, all'archivio di Stato di Gorizia, all'archivio storico degli ex Musei Provinciali di Gorizia e l'archivio disegni della Soprintendenza di Trieste, messa a confronto con i dati registrati durante la fase di acquisizione con le diverse tecnologie di scansione, ha consentito l'approfondita conoscenza dell'oggetto

di studio e della sua storia e la validazione scientifica dei risultati grafici.

I procedimenti impiegati in questi anni di ricerca, nella fase di acquisizione dei dati in quella di modellazione e in quella di gestione del modello tridimensionale in ambiente virtuale, sono sicuramente dei riferimenti disciplinari per poter realizzare applicazioni di ambienti per la navigazione immersiva e interattiva del patrimonio architettonico, ampliando così la gamma di pubblico: alle giovani generazioni che sono già vicine al mondo digitale ma spesso distanti da quello culturale.

5. Bibliografia

5.1 Nuove tecnologie per la visualizzazione digitale

- Amoruso G., 2019, *Digital Technology for Knowledge, Design and Experimental Education for Culture*, In Scuderi A. & Salvetti F. (a cura di), "Digital and Cultural Heritage in Italy. Innovative and Cutting-Edge Practices" Milano: FrancoAngeli, pp. 12-22.
- Brewster D., 1856, *The stereoscope, its History Theory and Construction*, London: Murrey
- Cruz- Neira C., 1992, *The Cave Audio Visual Experience Automatic Virtual Enviroment*, in "Communication of the ACM", vol 55 n°6, pp. 65-72
- Dotto E., Bosco S., 2018, *Eyecad VR, un software per la visualizzazione immersiva e interattiva dell'architettura*, in R. Salerno (a cura di) "Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In) Tangible representation", Roma: Gangemi, pp. 525-530
- Lévy P., 1999, *Il virtuale*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 149 p.
- Luigini A., 2019, *Il foglio, lo schermo e lo stereoscopio digitale. Ovvero lo specchio, la retina invertita e la fine della rappresentazione*, in P. Belardi (a cura di) "Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte", Roma: Gangemi, pp. 137-142
- Maldonado T., 1992, *Reale virtuale*, Milano: Feltrinelli
- Migliari R., 2008, *Prospettiva dinamica interattiva. La tecnologia dei videogiochi per l'esportazione di modelli 3D di architettura*, Roma, Edizioni Kappa, 239 p.
- Mitchell W. J., 1992, *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post-Photographic Era*, Cambridge (MA), London: The Mit Press.
- Mitchell W. J., 1997, *La città dei bits. Spazi, luoghi e autostrade informatiche*, Milano, Electa, 103 p.
- Montagna L., 2018, *Realtà virtuale e realtà aumentata. Nuovi media per nuovi scenari di business*, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.a., 264 p.
- Negroponete N., 1995, *Essere digitali*, Milano, Sperling, 267 p.
- Pittoni A., Somaini A., 2016, *Cultura visuale. Immagini, sguardi, media, dispositivi*, Torino: Einaudi.
- Rheingold H., 1993, *La realtà virtuale*, Bologna, Baskerville S.r.l., 547 p.
- Scuderi A. Salvetti F., 2019, *Digitalization and Cultural Heritage in*

- Italy. Innovation and Cutting-Edge Practices*, Milano, Franco Angeli s.r.l., 89 p.
- Senatore L.J., *La realtà aumentata: una riflessione critica sul senso della rappresentazione in un mondo "iperreale"*, in R. Salerno (a cura di) "Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation", Roma: Gangemi, pp. 1429-1436
- Sutherland i., 1965, *The Ultimate Display*, in "Proceeding of the IFIO Congress", 2, pp.506-508

5.2 Gorizia e il suo Castello. Analisi, evoluzione storica e ricostruzioni 3D (cap. 2.1-2.2)

- Amoruso G., Cochelli P., Riavis V., 2018, *Il castello di Gorizia, analisi geometrica e rilievo con tecnologie avanzate*, in Marotta A., Spallone R. (eds.) "Defensive architecture of the Mediterranean" vol.9, Politecnico di Torino, pp. 933-939,
- Bozzi C.L., 1929, *Gorizia nell'età napoleonica*, Gorizia: Paternolli, 276 p.
- Bozzi C. L., 1958, *Il Castello di Gorizia*, Gorizia: edito dal Comune, 32 p.
- Canciani M., Cecili F., Gallo M., Persiani C., 2018, *La porta Tiburtina delle Mura Aureliane a Roma: dal rilievo 3D alla ricostruzione virtuale delle fasi storica*, in R. Salerno (a cura di) "Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation", Roma: Gangemi, pp. 381
- Coronini Cromber G., 1959, *Burg Görz*, Gorizia: edito dal Comune, 31 p.
- Cossar Ranieri M., 1937, *Gorizia e il suo castello. Leggenda, storia e arte*, Udine: Edito dal Comune di Gorizia, 232 p.
- Cossar Ranieri M., 1941, *Il castello di Gorizia nella storia e nella leggenda*, Trieste: Tipografia L. Smolar e Nipote.
- Furlani F., 1968, *Come Gorizia non divenne veneziana*, Gorizia: Edizioni della Cassa di risparmio di Gorizia, 20 p.
- Gallarotti A. Romoli A., 2016, *L'assedio di Gorizia 1915-1916. Una tragedia dimenticata dalla storia*, Udine: Gaspari editore, 175 p.
- Italia Nostra sezione di Gorizia (a cura di), 1973, *Gorizia Viva. I secoli e le ore della città*, Gorizia: Edizioni della Cassa di Risparmio di Gorizia.
- Klainsecek W., 1995, *Giovanni Cossar e il suo castello per Gorizia*, in "Borc San Roc" VII, PP. 29-34
- Lasciac A., 1916, *Come l'impronta del Leon di S. Marco si trova sul*

- castello di Gorizia*, Roma: Danesi, 15 p.
- Malni Pascoletti M., 2008, *La cittadella fortificata di Gorizia e la porta Leopoldina tra guerra e arte*, Gorizia: Italia Nostra Sezione di Gorizia ONLUS, 84 p.
- Marcuzzi E., 1938, *Gorizia e il suo Castello*, in “Sul Mare”, n. XIV anno 12, 39 p.
- Mausan Dan M. Delneri A. (a cura di), 1991, *Il castello di Gorizia e il suo Borgo*, Mariano del Friuli: Edizioni della Laguna S.r.l., 82 p.
- Medeot M., 1989, *Castello di Gorizia*, Gorizia: Cooperativa Aziendale dipendenti Ospedale Psichiatrico Provinciale, 47 p.
- Morassi A., 1923, *Il restauro del castello di Gorizia*, in “Architettura e Arti Decorative”, n. II
- Pillon L., 1991, *Ottocento goriziano (1815-1915): una città che si trasforma*, Udine: Editrice Goriziana, 283 p.
- Pillon L. (catalogo a cura di), 1995, *Gorizia, un viaggio nel tempo*, Mariano del Friuli: Edizioni della Laguna S.r.l., 153 p.
- Spangher L., Tavano S., 1989, *Gorizia in posa*, Gorizia: Editrice Goriziana, 199 p.
- Tomasi L., 1985, *La sezione dei Beni Culturali: Il restauro del castello di Gorizia*, Gorizia: Arti grafiche Campestrini, 195 p.
- Tavano S., 1978, *Il castello di Gorizia e il suo borgo*, Gorizia: Libreria Adamo, 158 p.
- Tavano S., 1986, *Gorizia. Storia e arte*, Reana del Rojale (UD): Chiandetti Editore, 334 p.
- Tavano S., 1994, *Medioevo goriziano, 1001-1500*, Gorizia: Editrice Goriziana, 252 p.
- Valdemarin I., 1959, *La chiesa e la parrocchiale dei Santi Ilario e Taziano di Gorizia*, Gorizia.
- Zimmermann F. X., 1976, *Il castello*, in “Della principesca contea di Gorizia e Gradisca”, Gorizia: Adamo editore, pp. 97-102

5.3 Gorizia e il suo Castello. Analisi, evoluzione storica e ricostruzioni 3D (cap. 2.3-2.5)

- Aiello D., D'Agostino G., Galizia M., Garozzo R., Santagai C., 2019, *Reale vs virtuale: strumenti digitali per la documentazione e la valorizzazione della chiesa S. Maria del Suffragio in Acireale, Catania*, in P. Belardi (a cura di) “Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte”, Roma: Gangemi, pp. 243-250.

- Amoruso G., Sdegno A., 2013, *Le prospettive nel Sacro Monte di Ossuccio. Il rilievo strumentale con il laser scanner 3D e note sul trattamento dei dati analitici / 'Perspective' in the Sacro Monte di Ossuccio*, in Conte A., Filippa M. (a cura di), "Patrimoni e siti Unesco. Memoria, misura e armonia.", Roma: Gangemi, pp. 31-37.
- Baglioni L., Inglese C., 2015, *Il rilievo integrato come metodo di studio: il caso di San Bernardino a Urbino*, in "Disegnare Idee Immagini" n. 51, pp.34-45.
- Balzani M., Maietti F., 2017, *Architectural Space in a Protocol for Integrated 3D Survey aimed at the Documentation, Representation and Conservation of Cultural Heritage*, in "diségno" n.1, pp. 113-122
- Battini C., 2012, *Rilievo digitale e restituzione. Concetti base ed esempi*, Firenze, Alinea editrice, 112 p.
- Battini C., Vecchiattini R., 2018. *Immagini HDR per la documentazione tridimensionale dei manufatti storici*, in R. Salerno (a cura di), "Rappresentazione materiale/immateriale - Drawing as (in) tangible", Roma: Gangemi, pp. 311-318.
- Benedetti B., 2013, *Il concetto e l'evoluzione del museo come premessa metodologica alla progettazione di modelli 3D*, in Valzano V., Bartolomei C., (a cura di) *SCIRES-IT*, 3(issue 1), pp.87-140
- Bertocci S., Parrinello S., 2017, *The drawing of Hadrian's Villa in Tivoli. Extensive survey for heritage documentation*, in "Disegnarecon", vol. 10, n. 19, pp. 1.1-14
- Bertocci S., Bini M., 2012, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara: Città Studi
- Bianchini C., 2012, *Rilievo e metodo scientifico*, in Filippa M, Carlevaris L. (a cura di), "Elogio della teoria, Roma: Gangemi, pp. 391-399.
- Bianchini C., 2014, *Rilievo 2.0: nuove tecnologie, nuovi strumenti, nuovi rilevatori?* in Gianfebiaggi P, Vernizzi C (a cura di), "Italian survey & international experience", Roma: Gangemi
- Bianchini C., 2014, *Survey, Modeling, Interpretation as multidisciplinary components of a knowledge system*. *SCIRES-IT*, vol. 4, issue 1, pp. 15-24.
- Brusaporci S., 2011, *Modelli digitali per la rappresentazione dell'architettura*, in "Disegnarecon", vol. 4, n. 8, pp. 107-115
- Brusaporci S., 2013. *Modellazione e rappresentazione digitale per i beni architettonici* in Brusaporci S., (a cura di), "Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano", Roma: Gangemi, pp. 18-24.
- Brusaporci S., 2014, *Issue of historic town surveying: visualizing urban*

- values*, SCIRES-IT, 4(issue 2), pp. 63-80.
- Brusaporci S., 2015, *On Visual Computing for Architectural Heritage*, in Brusaporci S. (a cura di), "Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation" Vol. I, Hershey: IGI Global, pp. 94-123
- Cabezos-Bernal P. M., Cisneros-Vivó J. J., 2013, *La restituzione fotogrammetrica 2D/3D di elementi architettonici e l'integrazione dei modelli virtuali sulle fotografie dell'intorno reale, mediante programmi CAD, software liberi e fotocamere convenzionali*, in "Disegnarecon", vol. 6, n. 12, pp. VI 1-11
- Cabezos-Bernal P. M., Rossi A., 2017, *Tecniche di musealizzazione virtuale. Galleria 3D per la fruizione dell'architettura romanica*, in di Luggo A., Giordano P., Florio R., Papa L. M., Rossi A., Zerlenga O., . . . Cirafici A. (a cura di), "Territori e frontiere della rappresentazione", Roma: Gangemi, pp. 597-604
- Cardaci A., Versaci A., 2013, *L'innovazione nel rilievo fotografico per la conoscenza, la documentazione e la fruizione dei beni culturali*, in "Disegnarecon", vol. 6, n. 12, pp. XVIII 1-10
- Cardaci A., Liuzzo M., Versaci A., 2015, *The role of drawing in the conservation project: the case study of the Lombardy castle in Enna*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 14, pp.8.1-13
- Centofanti M., 2010, *Della natura del modello architettonico*, in Brusaporci S. (a cura di), "Sistemi informativi integrati per la tutela la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico e urbano", Roma: Gangemi, pp. 43-54.
- Centofanti M., 2018, *The Scientific Dimension of the Digital Model*, in "disegno" n.2, pp. 57-66
- Cigola M., 2015, *Digital Tools for Urban and Architectural Heritage*, in Brusaporci S. (a cura di), "Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation" Vol. I, Hershey: IGI Global, pp. 403-423
- Cipriani L., Fantini F. 2015, *Modelli digitali da 'Structure from Motion' per la costruzione di un sistema conoscitivo dei portici di Bologna*, in "Disegnare Idee Immagini" n. 50, pp. 70-81.
- Cundari C., 1983, *Fotogrammetria architettonica*, Roma: Kappa
- De Luca L., 2011, *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Palermo, Dario Flaccovio Editore.
- DeLuca L., 2011, *Verso la caratterizzazione semantica di rappresentazioni digitali di artefatti architettonici: linee programmatiche di ricerca*, in "Disegnarecon", vol. 4, n. 8, pp. 90-106
- Docci M., 1989, *Disegno e rilievo: quale didattica?* in "Disegnare idee

- immagini”, 37-54
- Docci, M., Migliari, R., 1992, *Scienza della Rappresentazione*, Roma: NIS.
- Docci M., Maestri D., 1994, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Bari: Laterza.
- Docci M., 2014, *Per una teoria del rilevamento architettonico. La fusione della teoria della misura con la teoria dei modelli*. In Carlevaris L., Filippa M. (a cura di.), “Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo”. Roma: Gangemi Editore, 480 p.
- Empler T., 2013, *Universal Design: ruolo del Disegno e Rilievo*, in “Disegnare Idee Immagini” n. 46, pp. 52-63
- Fatta F., 2015, *Communication, Technology and digital Culture for the Conservation and Enhancement of the Architectural Heritage*, in Brusaporci S. (a cura di) “Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation” Vol. II, Hershey: IGI Global. pp. 446-475.
- Filippucci M., 2010, *Nuvola di Pixel. La fotomodellazione con software liberi per il rilievo d'architettura*, in “Disegnarecon”, vol. 3, n. 6, pp. 150-163.
- Gaiani M., 2012, *Per una revisione critica della teoria del rilievo dopo l'avvento dei mezzi digitali*, in Filippa M., Carlevaris L. (a cura di), “Elogio della teoria”, Roma: Gangemi, pp. 375-382.
- Gaiani M., 2015, *Color Aquisition, Management, Rendering and Assessment in 3D Reality-Based Models Construction*, in Brusaporci S. (a cura di) “Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation”, Hershey: IGI Global, pp. 1-43.
- Guidi G., Russo M., Beraldin J-A., 2010, *Acquisizione 3D e modello poligonale*, Milano, McGraw-Hill, 464 p.
- Inzerillo L., Santagati C., Di Paola F., 2013, *Ricostruzione di una scena urbana 3D utilizzando VisualSfM*, in “Disegnarecon”, vol. 6, n. 12, pp. XIX 1-8
- Ippoliti E., Meschini A., Sicuranza F., 2015, *Digital Photogrammetry and Structure from Motion for architectural Heritage: Comparison and Integration between Precedures*, in Brusaporci S. (a cura di) “Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation” Vol. I, Hershey: IGI Global, pp. 124-181.
- Ippolito A., 2007, *Dalla nuvola di punti alla superficie. Analisi e problematiche*, in Chiavoni E. P. (a cura di) “Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli

- virtuali dell'architettura della città", Roma: Gangemi, pp. 32-43.
- Lerma J. L., Cabrelles M., Navarro S., Fabado S., 2013, *Dalla fotografia digitale alla fotogrammetria per i Beni Culturali*, in "Disegnarecon", vol. 6, n. 12, pp. II 1-8
- Lo Turco M., Piumatti P., Rinaudo F., Tamborrino R., 2018, *B.A.C.K. TO T.H.E. F.U.T.U.R.E. Modelli Informativi & Musei Virtuali*, in Salerno (a cura di) "Rappresentazione materiale/immateriale - Drawing as (in) tangible", Roma: Gangemi, pp. 667-674.
- Maiolatesi A., 2019, *La tutela del patrimonio storico-architettonico. Le mura e i torrioni di Fermo tra rilievo e rappresentazione parametrica*, in P. Belardi (a cura di) "Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte", Roma: Gangemi, pp. 769-778
- Manferdini A. M., Russo M., 2015, *From survey to high definition representations of a continuous architectural space. The case study of the Pomposa Abbey complex*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 14, pp.1.1-12
- Mele G., Maniglio G., 2015, *The nonagon as a tool for the drawing of the Roman Theatre of Lecce*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 15, pp. 16.1-15
- Mele G., Rovo F., 2015, *The survey and the analysis as guidelines for the reutilization of the Palazzo Baronale of Pisignano (LE)*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 14, pp.10.1-15
- Meschini A., *Expanded Cultural Heritage Representation: Digital Applications for Mixed-Reality Experiences*, in Ippolito A., Cigola M. (a cura di), "Handbook of research on emerging technologies for digital preservation and information modeling", Hershey: IGI Global, pp. 256-287.
- Meschini A., Feriozzi R., 2017, *Dal rilievo laser scanner al modello 3D di manufatti scultoreo-architettonici: la Santa Casa della Basilica di Loreto. Proposta di metodo per l'elaborazione di superfici complesse*, in di Luggo A., Giordano P., Florio R., Papa L. M., Rossi A., Zerlenga O., . . . Cirafici A. (a cura di), "Territori e frontiere della rappresentazione", Roma: Gangemi, pp. 683-692.
- Paris L., 2015, *Fotogrammetria 2.0*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 12, pp.17.1-9
- Paris L., Valenti G. M., 2015, *The Borromini's helicoidal staircase in Barberini Palace: scan laser survey and parametric modeling*, in "Disegnarecon", vol. 8, n. 15, pp. 11.1-11
- Quattrini R., Malinverni E. S., Clini P., Nespeca R., Orlietti E., 2015, *From TLS to HBIM: high quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture*, in "International Archives

- of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, 40, 5/W4, pp. 367-374
- Remondino F., 2011, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, in “Disegnarecon”, vol. 4, n. 8, pp. 90-98
- Ruffino P. A., 2018, *Communication and visualisation methodologies for UNESCO sites*, in Salerno R. (a cura di) “Rappresentazione materiale/immateriale - Drawing as (in) tangible”, Roma: Gangemi, pp. 1397-1402.
- Russo M., Manferdini A. M., 2015, *Integrated Multi-Scalar Approach for 3D Cultural Heritage Acquisitions*, in Brusaporci S. (a cura di), “Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation” Vol. I, Hershey: IGI Global, pp. 337-360.
- Russo M., 2019, *Fotomodellazione 2020: viaggio di sola andata?* in P. Belardi (a cura di) “Riflessioni. L’arte del disegno / Il disegno dell’arte”, Roma: Gangemi, pp. 997-1002, ISBN 978-88-492-3762-7
- Sgrosso A., 1979, *Note di Fotogrammetria applicate all’architettura*, Napoli: Lithorapid.

5.4 Trasformare l’esperienza del patrimonio. La rappresentazione interattiva per l’accesso senza barriere alla conoscenza

- Abt C., 1970, *Serious Games*, New York: Viking Press, 196 pp.
- Apollonio F. I., 2012, *Architettura in 3D. Modelli digitali per i sistemi cognitivi*. Milano: Bruno Mondadori.
- Basso A., 2018, *Dentro le Carceri di Piranesi: il virtuale come documentazione attraverso l’esplorazione grafico-percettiva*, in R. Salerno (a cura di) “Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation”, Roma: Gangemi, pp. 909-918
- Bertocci S, Bua S., Parinello S, Picchio F., 2014, *Montepulciano 3D: modelli virtuali per l’urbanistica e lo sviluppo dell’ambiente urbano*, in “Disegnarecon”, vol. 7, n. 13, pp. V 1-20
- Bonancini E., 2011, *Nuove tecnologie per la fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale*, Roma, Aracne,
- Brunelli M., 2014, *Heritage interpretation. Un nuovo approccio per l’educazione al patrimonio*, Macerata: EUM
- Brusaporci S. (a cura di), 1994, *Sistemi informativi Integrati per la tutela, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico e urbano*, Roma: Gangemi Editore, ISBN: 978-88-492-1860

- Burnette Stogner M., 2011, *The Immersive Cultural Museum Experience – Creating Context and Story with New Media Technology*, in “The International Journal of the Inclusive Museum” Volume 3, Number 3.
- Pescarin S., Fanini B., Ferdani D., Lucci Baldassarri G., Caroli L., 2011, *Archeologie virtuali, realismo interattività e performance: dalla ricostruzione alla fruizione on line*, in “Disegnarecon”, vol. 4, n. 8, pp. 44-55
- Cervellini F., Rossi D., 2011, *Comunicare emozionando. L'edutainment per la comunicazione intorno al patrimonio culturale*, in “Disegnarecon”, vol. 4, n. 8, pp. 62-70
- Celentano M. G., 2010, *Interfacce e sistemi a realtà virtuale per un apprendimento esperienziale*, in “Italian Journal Of Educational Research
- Cipriani L., Dresseno A., Agostini P., Fantini F., *Game engine per comunicare e valorizzare città e territorio: il progetto pilota “Chiuro, dal passato, il futuro”*, in R. Salerno (a cura di) “Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation”, Roma: Gangemi, pp. 1035-1042
- Duke R. D., 1974, *Gaming, the Future's Language*, New York: Wiley, 223 pp.
- Empler T., Caldarone A., Fusinetti A., 2019, *Leonardo da Vinci: divulgazione delle sue opere attraverso i Serious Game*, in P. Belardi (a cura di) “Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte”, Roma: Gangemi, pp. 1553-1562
- Empler T., 2018, *Traditional Museums, virtual Museums. Dissemination role of ICTs*, in DISEGNARECON, vol. 11, n. 21, pp.13.1-19
- Empler t., 2014, *Tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC) nella divulgazione dei beni culturali. La galleria prospettica di palazzo Spada*, in Valenti g. m. “Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio”, Roma: Sapienza Università Editrice, pp. 887-916
- Ferrari F., Medici M., 2017, *The Virtual Experience for Cultural Heritage: methods and Tools Comparison for Geguti Palace in Kutaisi, Georgia*, in “International and Interdisciplinary Conference IMMAGINI? Image and Imagination Between Representation, Communication, Education and Psychology”, 1:932, pp.1-10
- Howe N., Strauss W., 2006, *Millennials and the pop culture: Strategies for a new generation of consumers in music, movies, television, the Internet, and video games*. Great Falls, VA: LifeCourse

- Associates.
- Incerti M., Iurilli S., 2018, *Architettura e immagini della delizia estense di Schifanoia: la complessità dei contenuti attraverso il digitale*, in R. Salerno (a cura di) "Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation", Roma: Gangemi, pp. 623-630
- Ippoliti E. Meschini A., 2010, *Dal "modello 3D" alla "scena 3D". Prospettive e opportunità per la valorizzazione del patrimonio culturale architettonico e urbano*, in "Disegnarecon", vol. 3, n. 6, pp. 77-91
- Ioannides M., Magnenat-Thalmann N., Papagiannakis G. (eds.), 2017, *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*, Cham: Springer International Publishing
- Jerald J., *The VR book: Human-centered design for virtual reality*, Morgan & Claypool
- Juul J., 2005, *Half Real. Video Games Between Real Rules and Fictional Worlds*, Cambridge (MA): The MIT Press, 244 pp.
- Merlo A., Fantini F., *I sistemi di ottimizzazione image based per la gestione dei modelli 3D a scala urbana*, in Lavoretti G. (editor) "Il castello di Pietrabuona, Materiali per la ricerca", Pisa: Edizioni ETS, pp. 159-165
- Meschini A., 2011, *Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo*, "Disegnarecon", vol. 4, n. 8, pp. 14-24
- Meschini A., Rossi D., Feriozzi R., 2016, *La Basilica in una scatola. Proposta per una Wunderkammer contemporanea*, "Disegnarecon", vol. 9, n. 17, pp. 1.1-10
- Meschini A., Feriozzi R., 2019, *Videogames ed espressione creativa: i mondi virtuali modulari*, in P. Belardi (a cura di) "Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte", Roma: Gangemi, pp. 1287-1296
- Michael D., Chen S., 2005, *Serious Games, Games that Educate, Train and Teach*, Boston (MA): Thomson Publishing, 312 pp.
- Mongiello G., Vedoscia C., Tavolare R., Riglietti D., 2018, *Digital techniques for the representation of virtual tours of urban architectural heritage*, in "Disegnarecon", vol. 11, n. 21, pp. 18.1-6
- Parrinello S., Bercigli M., Bursich D., 2017, *From survey to 3d model and from 3d model to "videogame". The virtual reconstruction of a Roman Camp in Masada, Israel*, in "Disegnarecon", vol. 10, n. 19, pp. 11.1-19
- Parrinello S., Picchio F., Bercigli M., 2016, *The 'migration' of reality in virtual scenarios: databases and documentation systems for the musealization of complex environments*, in "Disegnarecon", vol. 9, n. 17, pp. 14.1-8

- Pettoello G., 2016, *Multisensory Museum. A proposal for personalized virtual knowledge of the Vulci Archaeological Park*, in “Disegnarecon”, vol. 9, n. 17, pp. 10.1-11
- Rossi D., Meschini A, Feriozzi R., Olivieri A., 2018, *Cose dell'altro mondo: la realtà virtuale immersiva per il patrimonio culturale*, in Luigini A, Panciroli C. (a cura di) “Ambienti digitali per l'educazione all'arte e al patrimonio”, Franco Angeli editore, 352 pp.
- Rossi D., 2018, *Brand New: panorama. L'immagine continua per il disegno della realtà virtuale*, in R. Salerno (a cura di) “Rappresentazione Materiale/Immateriale. Drawing as (In)Tangible representation”, Roma: Gangemi, pp. 1389-1396
- Rossi D., Olivieri A., 2019, *First Person Shot: la prospettiva dinamica interattiva negli ambienti virtuali immersivi*, in P. Belardi (a cura di) “Riflessioni. L'arte del disegno / Il disegno dell'arte”, Roma: Gangemi, pp. 977-984

