

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Informatica, del Cinema e Meccatronica

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione**

Tesi di Laurea Magistrale

EtruVR - Ricostruzione in VR dell'ambiente ospitante il Sarcofago degli Sposi, Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia



**Politecnico
di Torino**

Relatore

Prof. Andrea Bottino

Co-Relatori

Dott. Francesco Strada

Prof.ssa Valeria Minucciani

Candidato

Constantin Codrut Ionescu

Aprile 2024

Indice

1.Introduzione	1
2. Stato Dell'Arte	2
2.1 Realtà Virtuale	2
2.2 Visori HMD	2
2.2.1 Caratteristiche dei Visori HMD	3
2.3 Musei e Realtà Virtuale	4
2.4 Ambienti Virtuali e Digital Twins.....	6
2.4.1 Scansione laser del Sarcofago degli Sposi.....	7
2.4.2 File .ply	7
3. Metodologia	8
3.1 Sarcofago degli Sposi: dalla nuvola di punti alla mesh VR ready	8
3.2 Realizzazione dell'Ambiente.....	21
3.3 Realizzazione degli oggetti presenti all'interno dell'ambiente.	36
3.4 Implementazione in Unity	45
4. Risultati e Discussione	61
5. Conclusioni.....	65
Bibliografia.....	66
Elenco Figure	68

1.Introduzione

In un contesto quotidiano dove le tecnologie dedicate alla Realtà Virtuale diventano sempre più presenti, performanti e sofisticate, e le persone stesse acquisiscono familiarità con gli strumenti a disposizione sul mercato, una moltitudine di realtà sentono il bisogno di abbracciare questi nuovi paradigmi: sia per integrarli nel loro contesto lavorativo e sia per proporre ai loro clienti (o pubblico) nuove modalità di fruizione dei loro prodotti.

La tesi EtruVR propone una soluzione al desiderio di abbracciare questa tecnologia in rapidissima evoluzione ed espansione da parte del Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia: andando a ricreare interamente in VR lo spazio attorno alla loro opera più famosa: Il Sarcofago Degli Sposi.

La possibilità di avere in digitale un intero ambiente, realizzato nei minimi dettagli, porta una moltitudine di vantaggi al museo, tra cui:

- La possibilità da parte di utenti in remoto di esplorare ed osservare in maniera immersiva l'area ospitante il Sarcofago.
- L'utilizzo dell'ambiente virtuale come template di prova per cambiamenti di disposizione con la possibilità di eseguire uno screening preliminare prima di apportare le modifiche nella realtà.
- Creazione di percorsi guidati ed interattivi: andando ad aggiungere elementi di gamification per rendere l'esplorazione più stimolante.

Il lavoro svolto si è concentrato principalmente sui primi due punti dell'elenco soprastante: un importante focus è stato fatto durante la realizzazione dell'ambiente, andando a ricreare minuziosamente il Sarcofago degli Sposi e l'area attorno ad esso per ottenere un risultato altamente fotorealistico garantendo una maggiore immersione dell'utente. Essendo poi l'ambiente interamente digitale, si possono effettuare varie modifiche alla sua disposizione: spostando, togliendo e aggiungendo elementi per rivoluzionare in maniera più o meno marcata lo spazio a disposizione.

Il tutto è stato eseguito tenendo sempre un occhio di riguardo al costo prestazionale che l'esperienza richiede: infatti si è cercato di ottenere il massimo risultato con il minor impiego di risorse, il che si traduce in un costo minore da sostenere per il museo: si sono infatti utilizzate tecniche e software che sono tra i più rinomati dell'industria VR, Gaming e cinematografica: queste ultime hanno permesso il trattamento di scansioni laser in altissima qualità dei reperti esposti; studio, modellazione e ottimizzazione della topologia dei vari asset; creazione di texture e materiali che rispecchiano fedelmente la realtà ed infine implementazione e ottimizzazione nel game engine affinché l'esperienza risulti fluida e piacevole alla vista.

Il risultato ottenuto è un template modulare che permetterà successivamente al museo di aggiungere o modificare feature in un ambiente VR pronto all'uso.

2. Stato Dell'Arte

In questo capitolo verranno analizzati gli scenari che vengono maggiormente adottati dai musei odierni quando essi si affacciano alle nuove realtà digitali, portando la storia antica in nuova luce: nel nostro caso la Realtà Virtuale. Verrà analizzato il significato di Realtà Virtuale e come esso viene declinato in vari ambienti di utilizzo; si parlerà quindi dell'evoluzione della tecnologia e dello stato di innovazione attuale sia dal punto di vista consumer, sia dal punto di vista di applicativi più specifici, quali mostre e iniziative museali. Si parlerà in seguito delle tecnologie utilizzate che si sono rivelate fondamentali nello sviluppo dell'applicativo richiesto dal Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia: scansioni laser dei reperti archeologici, elaborazione di file specifici (.ply), e un breve accenno ai software utilizzati di cui se ne approfondiranno i vari workflow nei capitoli successivi.

2.1 Realtà Virtuale

Con il termine “Realtà Virtuale” si intende una: *“Simulazione all'elaboratore di una situazione reale con la quale il soggetto umano può interagire”* [1]. Si fa riferimento quindi ad un campo applicativo molto più ampio rispetto a quello a cui si pensa normalmente quando si parla di realtà virtuale. Nel quotidiano è abitudine attribuire al termine realtà virtuale quegli scenari dentro i quali l'utente è completamente immerso nell'esperienza a cui prende parte tramite l'utilizzo di strumenti più o meno sofisticati quali: Visore HMD (head mounted display [il caschetto che si indossa a mo' di occhiali]) e accessori ausiliari come guanti, controller, tute, etc. Tuttavia, come accennato prima, il ramo della realtà virtuale abbraccia tutto ciò che è composto da una *simulazione + interazione*; rientrano dunque nella definizione tutti paradigmi dotati banalmente di uno schermo che permettono di acquisire una serie di input da parte dell'utente: Pc, Console, AR, XR, MR.

La tesi si concentra nello sviluppo di un ambiente e di un'esperienza indicata ad un Visore VR-HMD; dunque, da questo punto in poi, per comodità di scrittura, i termini *Visore* e *VR* faranno riferimento esclusivamente alla tecnologia indossabile HMD.

2.2 Visori HMD

Il primo prototipo di Visore indossabile risale al 1968, ideato da Ivan Southerland e realizzato dallo stesso con l'aiuto dello studente Bob Sproull alla Harvard University. Molto diverso rispetto ai visori in commercio oggi, il prototipo veniva chiamato Spada Di Damocle: il sistema era appeso al soffitto sopra la testa dell'utente. [2]

L'utente poteva guardare delle semplici forme primitive in wire-frame (senza texture) che cambiavano prospettiva quando si muoveva la testa.

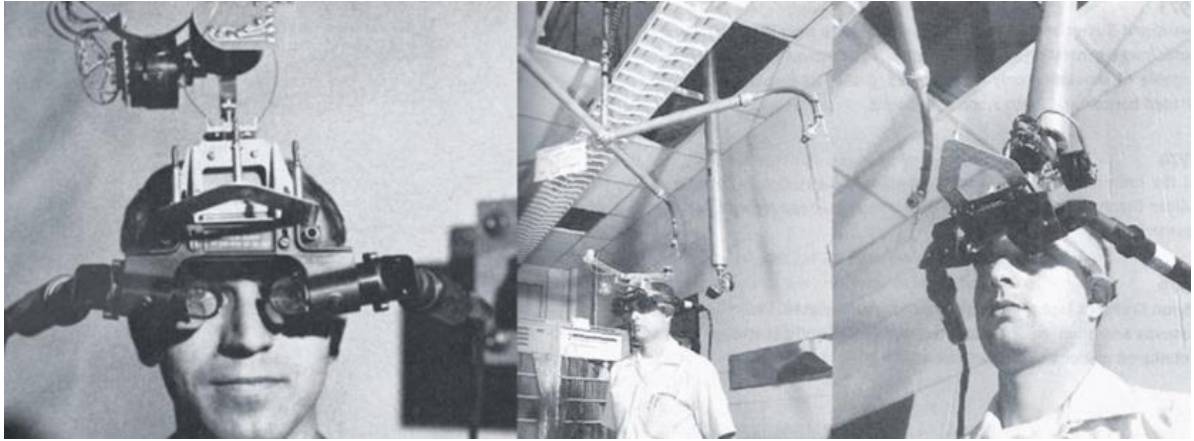


Figura 1: Primo prototipo di HMD "Spada di Damocle"

Negli anni a seguire gli investimenti e le attenzioni che questa nuova tecnologia ricevette furono notevoli: dagli impegni militari nel 1979 ai primi sistemi VR di intrattenimento ludico negli anni 90. Ed è proprio in questo settore che vennero a galla le limitazioni della tecnologia ai tempi disponibile. Causando un vero e proprio flop della tecnologia VR con il caso Nintendo, storica casa di sviluppo di videogiochi giapponese. Da quel momento vi fu un rallentamento nello sviluppo dei visori, dettato principalmente dalle limitazioni tecnologiche. Soltanto nel 2012, circa 20 anni dopo, i sistemi indossabili VR ritorneranno a fare clamore con il lancio di una campagna su Kickstarter richiedente fondi per lo sviluppo dell'Oculus Rift. Il suo successo fu enorme: la tecnologia fece passi in avanti sufficienti a garantirne un funzionamento fluido e piacevole. Negli anni successivi tutte le major companies del mondo cominciarono a lavorare sui propri dispositivi indossabili: Sony, Microsoft, Apple, Google Htc, Samsung etc, creando una corsa allo sviluppo per inserirsi in un mercato in forte crescita. [3]

2.2.1 Caratteristiche dei Visori HMD

Rispetto al primo prototipo citato precedentemente (Spada di Damocle) i Visori attualmente in commercio hanno delle caratteristiche che ne permettono un utilizzo comodo e soddisfacente. Sebbene vi siano molti modelli, e che essi differiscono sia dal lato hardware e lato software per lo sviluppo, in questo capitolo si analizzano le caratteristiche principali ed essenziali affinché un visore sia utilizzabile.

- **Peso:** facilmente intuibile, siccome i visori vanno indossati come un paio di occhiali, il loro peso non deve essere un ostacolo al loro utilizzo: un peso elevato può causare una pressione costante sul collo dell'utente che a lungo andare crea problemi alla postura. Il peso medio di un visore si aggira attorno ai 580gr.[4]
- **Schermi:** I visori sono dotati di uno schermo per occhio, che mostrano la stessa immagine ma leggermente diverse per creare un effetto 3D stereoscopico. La risoluzione degli schermi varia da modello a modello, ma generalmente maggiore è la risoluzione di ogni singolo schermo tanto più sarà efficace l'immersione dell'utente durante l'esperienza. Importante è anche la quantità di frame che essi sono in grado di generare al secondo: per avere un'esperienza fluida il minimo al di quale non bisognerebbe scendere è di 60 frame per secondo. Sul mercato vi sono soluzioni che permettono di ottenere un aggiornamento dell'immagine che tocca anche i 120 frame per secondo, a discapito però della risoluzione finale dell'immagine.

- Lenti: ogni visore è dotato di un paio di lenti, poste davanti agli schermi che concentrano la luce facendo apparire gli schermi lontani invece di trovarle davanti a pochi cm di distanza. Molte lenti utilizzate inoltre ingrandiscono l'immagine affinché non si notino i bordi degli schermi riuscendo così a coprire l'intero campo visivo dell'utente. È anche vero che questa fase introduce delle distorsioni nell'immagine finale, risolvibili a lato software.

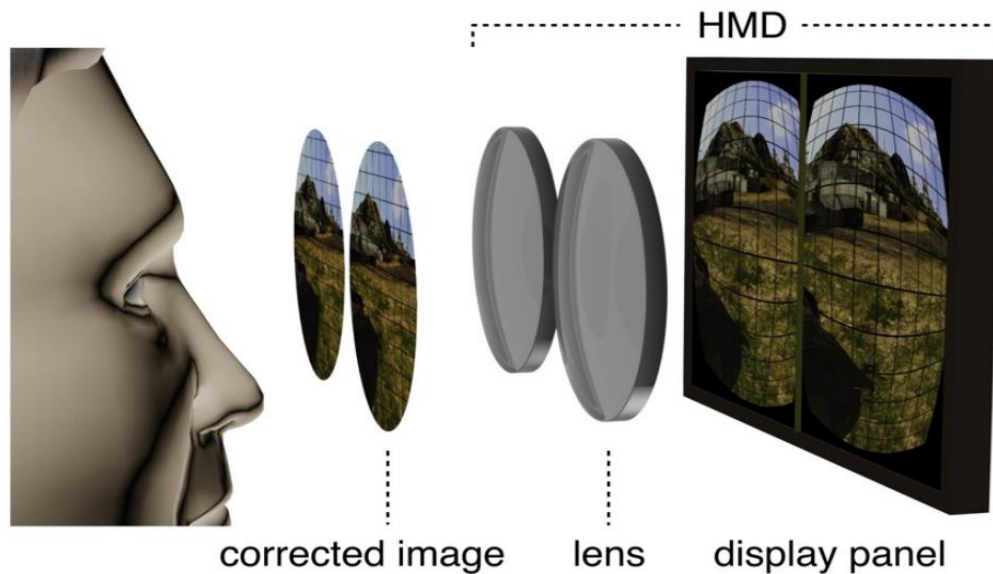


Figura 2: Distorsione e Correzione Lenti in VR [5]

Molti visori inoltre mettono a disposizione la possibilità di regolare la posizione delle lenti per adattarsi alla messa a fuoco dell'utente. [6]

- Sensori di posizione: Ogni visore deve essere in grado di calcolare in ogni istante la corretta posizione e il corretto orientamento dell'utente affinché i suoi movimenti siano coerenti nello spazio digitali all'interno del quale egli si sta muovendo. Una delle soluzioni più comunemente implementate, a livello hardware, è la presenza di un magnetometro che comunica al visore la corretta posizione del Nord Magnetico per determinare il corretto orientamento dell'utente, e una serie di accelerometri che invece calcolano le varie inclinazioni della testa.

2.3 Musei e Realtà Virtuale

L'obiettivo principale del panorama museale mondiale è quello di preservare valorizzare e trasmettere la cultura nei modi più efficaci possibili: una metodologia che sin dall'antichità si è dimostrata efficace è quella di puntare sulla familiarità che il pubblico ha con una qualsiasi modalità, in questo caso, di apprendimento ed interazione con l'ambiente circostante. Si può dire che i musei, essendo sempre stati punti di interesse principali per scuole ed istituti accademici, hanno seguito anche l'evoluzione della didattica: un esempio sono i musei basati sul modello costruttivista, che pongono il visitatore al centro dell'esperienza e ne permettono l'interazione con lo spazio espositivo, creando connessioni significative con il bagaglio di conoscenze pregresse del visitatore. Un esempio è il Museo delle Scienze Principe Filippo a Valencia – Spagna, che propone lungo tutto il suo percorso esperimenti interattivi. [7]

Andando invece ad osservare un ambiente espositivo ove l'interazione è più limitata, o completamente rilegata all'atto visivo, sorgono diverse sfide per aumentare il coinvolgimento del visitatore. Qui entrano in gioco le esposizioni che si avvalgono di strumenti digitali che sfruttano a loro vantaggio le migliori caratteristiche che la realtà virtuale può offrire, utilizzando strumenti che oggi giorno la maggior parte dei visitatori ha sempre con sé: smartphone, tablet e in casi più specifici il Pc. Un esempio sono le attività proposte al Museo della Specola, a Bologna: a partire dal 2018 il museo ha proposto varie attività che si possono svolgere utilizzando la realtà aumentata, utilizzando il proprio smartphone come portale per accedere ad informazioni aggiuntive dei reperti in esposizione, esse sono sia visive che uditive, e lasciano la totale libertà al visitatore di scegliere il percorso che più gli si aggrada. Un'altra esperienza in realtà virtuale che il museo propone è l'esplorazione del museo utilizzando il proprio pc (visitabile al sito <http://virtuale.oapa.inaf.it/SpecolaVirtuale.html>): esplorazione si avvale di fotografie a 360° esplorabili attraverso dei pulsanti posti nella sezione inferiore dello schermo; in aggiunta è possibile interagire con l'ambiente cliccando sui vari elementi evidenziati con dal simbolo "i". Questa esperienza è stata resa disponibile durante il lockdown nel 2020, ed è stato un espediente utilizzato da molte altre istituzioni culturali per portare la cultura nelle case delle persone; inoltre, il risultato ottenuto non è oneroso dal punto di vista computazionale: le risorse necessarie vengono soddisfatte anche da smartphone di fascia media.

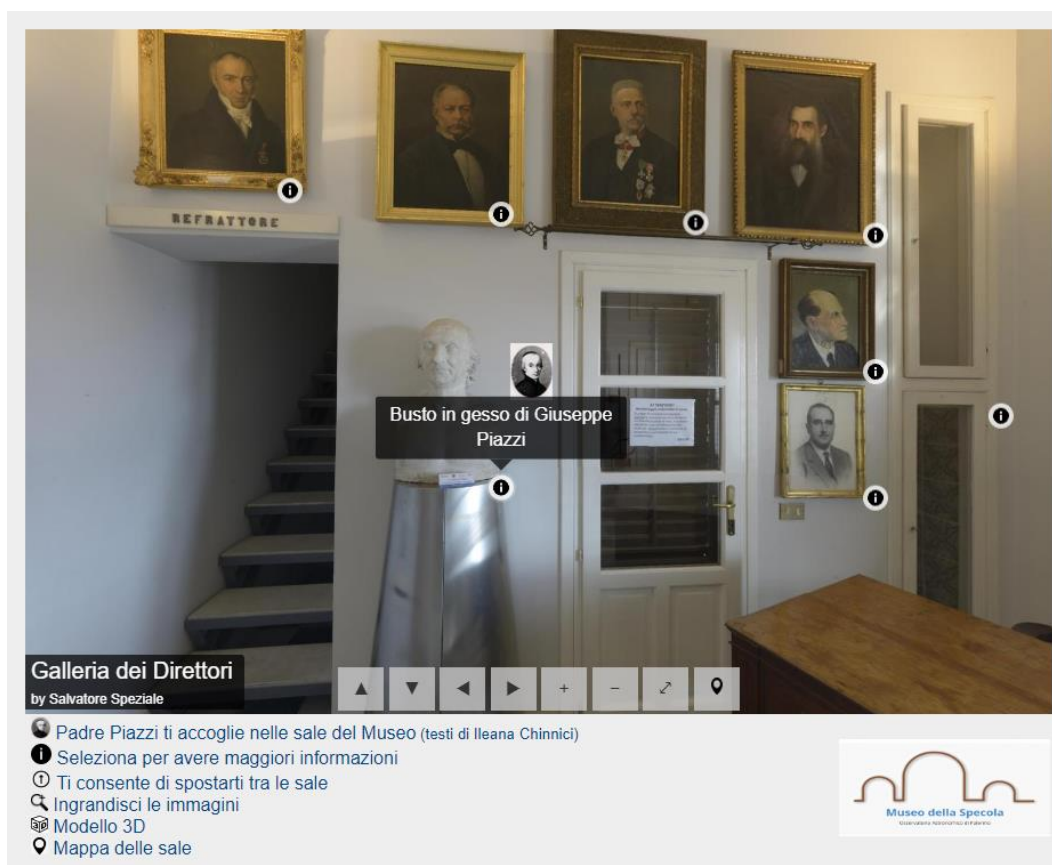


Figura 3: Esperienza Interattiva Museo della Specola

È evidente, tuttavia, la limitazione immersiva che essa comporta: il movimento nell'ambiente è 'statico' e preimpostato nella sua linearità; è possibile spostare lo sguardo nei limiti dell'immagine 360 e proseguire nel percorso utilizzando i pulsanti; l'utente inoltre non è completamente immerso nell'ambiente ma egli osserva soltanto una piccola finestra digitale, circondata dall'ambiente reale nel quale l'utente si trova. [8]

2.4 Ambienti Virtuali e Digital Twins

Avendo chiare le limitazioni di esperienze di esplorazione utilizzando uno schermo, il prossimo passo logico per aumentare l'immersione è quella di utilizzare un Visore indossabile che isoli l'utente dallo spazio 'esterno' e lo trasporti nello spazio dell'esperienza. Per realizzare un ambiente virtuale ed un'esperienza efficace, oltre a tenere in conto le limitazioni hardware dettate dalle specifiche dei singoli visori, è necessario utilizzare tecniche e sistemi che producono il massimo risultato visivo con la minor richiesta di risorse computazionali. Questo, oltre a tradursi in un minor costo economico da parte dell'istituzione culturale (nel nostro caso del Museo Nazionale Etrusco), ne può permettere inoltre la fruizione anche a quegli utenti che possiedono un loro Visore a casa.

I vari procedimenti e tecniche utilizzate per la realizzazione dell'applicativo EtruVR verranno trattate in dettaglio nei relativi capitoli; di seguito si daranno invece delle buone pratiche da adottare per ottenere una resa visiva soddisfacente durante la costruzione dell'ambiente e degli elementi al suo interno.

Misure accurate dell'ambiente: per rendere l'esperienza in VR il più possibile vicina all'esperienza reale bisogna ricreare l'ambiente avvalendosi di misure corrette: per l'ambiente si possono utilizzare piantine in CAD ufficiali da cui estrarre misure precise dell'ambiente che si intende ricreare; per gli elementi presenti al suo interno bisogna innanzitutto catalogare gli elementi in ordine di priorità visiva, questa determinerà la cura durante la realizzazione dei vari modelli: gli elementi centrali dell'esperienza necessiteranno di attenzioni maggiori rispetto ad elementi di contorno che attireranno in maniera minore l'attenzione dell'utente. Attenzione: non si vuole assolutamente dire che gli altri elementi non siano importanti, anzi, la buona riuscita e realismo di un'ambiente in VR è dato dal contributo di tutti gli elementi al suo interno, semplicemente nel caso di oggetti le cui specifiche sono difficilmente ottenibili (ad esempio prese, piccoli pannelli, videocamere ecc.) bisogna procedere utilizzando il maggior numero possibile di reference dell'ambiente stesso (foto, close up, immagini 360 ecc) per avere chiaro il rapporto di misure al loro interno.

Nel caso di oggetti complessi e dettagliati, che sono i protagonisti dell'esperienza, la creazione del modello digitale basandosi soltanto su reference e immagini è sì possibile, ma controproducente: sia dal punto di vista del tempo impiegato per ottenere un buon risultato, sia dalla perdita di dettagli che possono sfuggire nelle immagini. Qui entrano in gioco i Digital Twin: letteralmente gemelli digitali, che presentano in formato digitale una vera e propria copia di un oggetto/sistema su cui effettuare simulazioni e ricerche approfondite senza aver bisogno dell'oggetto reale [9]. Vi sono diverse tecniche grazie alle quali è possibile digitalizzare un oggetto:

- Fotogrammetria: consiste nello scattare un elevato numero di fotografie dell'oggetto di interesse che verranno elaborate da un software specifico e daranno come risultato un modello 3d abbastanza dettagliato, preservando inoltre le informazioni di colore.
- Scansione laser: questa tecnica consiste nell'utilizzare sofisticate macchine in grado di rilevare la distanza di un punto da essa e posizionarla correttamente in uno spazio 3d digitale. Il risultato finale ottenuto generalmente dopo numerose scansioni dell'oggetto è una nuvola di punti che verrà in seguito elaborata da software dedicati. A differenza della fotogrammetria, la scansione laser non incorpora le informazioni di colore, ma genera un modello digitale altamente fedele a quello reale.

2.4.1 Scansione laser del Sarcofago degli Sposi

Le due tecniche elencate sopra sono state impiegate per ricreare un digital twin de Sarcofago degli Sposi, punto centrale di EtruVR, in particolare è stato fornito il modello realizzato da CNR-ISTI di Pisa, che ha utilizzato una scansione laser a corto raggio in coppia con la fotogrammetria da cui è stata in seguito estrapolata la texture del sarcofago. [10] La nuvola di punti risultante è stato il punto di partenza del progetto EtruVR la cui elaborazione verrà trattata nei capitoli successivi.



Figura 4: Rilevazione Fotogrammetria Sarcofago Degli Sposi

2.4.2 File .ply

Le scansioni laser danno come output un insieme di punti che prende il nome di ‘nuvola di punti’; ciascun punto ha 3 coordinate che lo collocano precisamente nello spazio digitale generato dalla scansione. Il risultato viene generalmente salvato in un file di tipo Polygon File Format (.ply), conosciuto anche come Stanford Triangle Format. Questo specifico formato è utilizzato per salvare le informazioni esatte di un singolo oggetto digitale: un tipico file ply, che può essere a sua volta definito in formato ASCII o binario, consiste di una lista di triplette (x,y,z) che definiscono i vertici e le relative posizioni; è possibile inoltre aggiungere informazioni come: facce, spigole, colori e proprietà dei materiali, ma siccome il formato ply è nato dalla necessità di avere un modo per scambiare informazioni di oggetti tra i vari software di modellazione presenti in commercio, dove ognuno ha il proprio formato di proprietà, si tende ad inserire nei file ply soltanto le informazioni di vertici, facce e spigoli, lasciando vuoti i campi di colore e materiale che vengono gestiti dai vari motori di rendering.[11]

Nonostante vi sia la possibilità di aprire direttamente i file ply nei vari software di modellazione 3D come Blender, Maya, C4D ecc, si preferisce utilizzare un software dedicato ed ottimizzato nella gestione e visualizzazione di file contenenti nuvole di punti, questo software si chiama MeshLab, software sviluppato in Italia da ISTI-CNR di Pisa dal 2005. [12]

3. Metodologia

In questo capitolo verrà elencato tutto il processo e la pipeline adottata per ottenere il risultato finale a partire dalla prima nuvola di punti del Sarcofago degli Sposi, alla creazione di una mesh game-ready e successive texturizzazioni, andando a toccare tutte le metodologie utilizzate per ottenere asset di alta qualità garantendo buone prestazioni in run-time. Si parlerà quindi della creazione dell'ambiente virtuale nel game engine Unity e di tutte le accortezze adottate per ottenere un risultato fotorealistico.

3.1 Sarcofago degli Sposi: dalla nuvola di punti alla mesh VR ready

Come accennato nei capitoli precedenti, il file fornito da cui è partita la realizzazione del progetto è stato un file ply contenente la nuvola di punti del Sarcofago degli Sposi: la nuvola è composta da circa 6 milioni di vertici e presenta delle imperfezioni quali: assenza del fondo (oggetto 3d non chiuso) e la mancanza di due piedi del sarcofago. Prima di poter agire direttamente sull'oggetto bisogna generare una mesh meno pesante ed eseguire dei passaggi di 'pulizia' per ottenere in output una mesh che sia già ottimizzata e pronta all'uso utilizzando il software MeshLab.

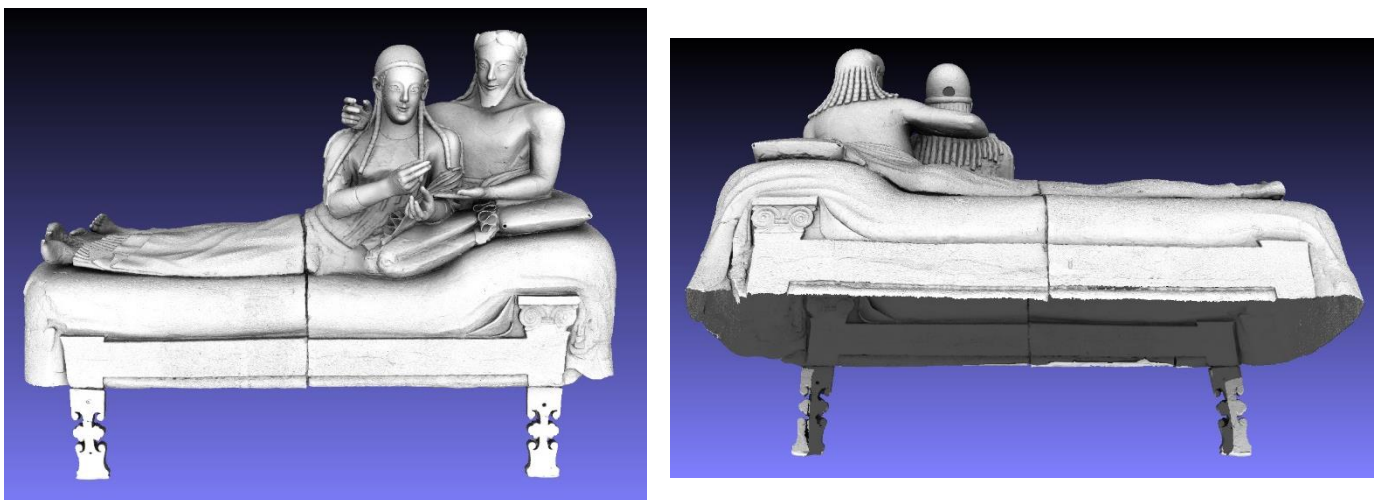


Figura 5 Nuvola Punti Sarcofago degli Sposi con errori (sx)

Le operazioni eseguite in ordine sono state:

1. Point Cloud Simplification: questa operazione permette di semplificare la nuvola di punti corrente basandosi su un parametro di qualità inserito dall'utente, il numero inserito con indice di qualità del samplig è di 1.000.000
2. Surface Reconstruction: Screened Poisson: questa operazione permette di unire i vertici ottenendo una superficie poligonale. [13] Anche qui si possono inserire vari parametri che guidano la qualità dell'output finale: il più significativo è il Reconstruction Depth, che per il sarcofago è stato messo uguale a 16 per preservare il maggior numero di dettagli superficiali.

3. Normalize Vertex Normals: questa operazione permette di avere le normali uniformi puntanti tutte nella giusta direzione, garantendo una corretta visualizzazione della mesh nel software di modellazione 3D.

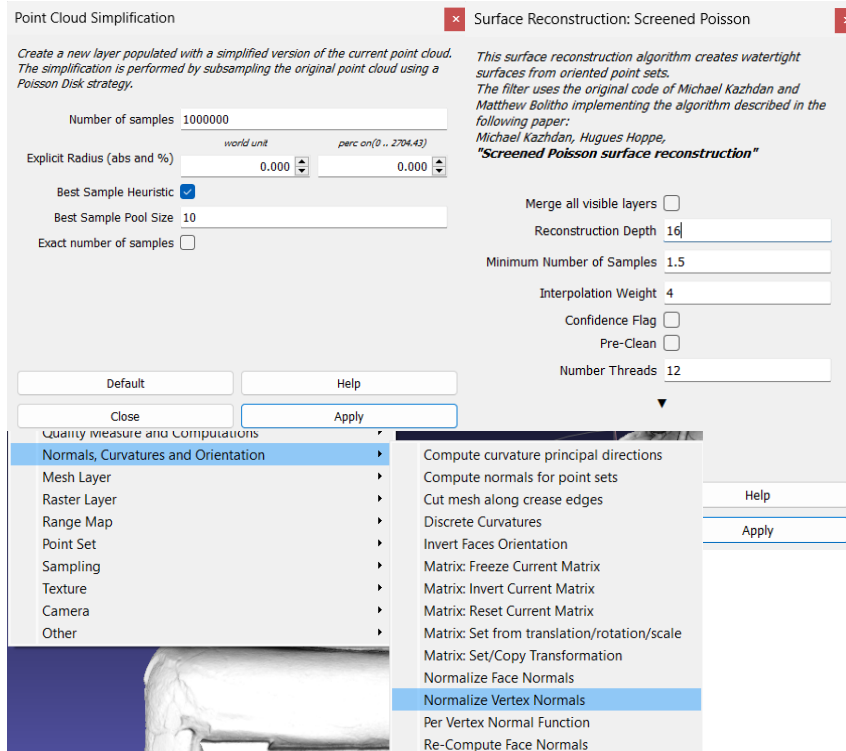


Figura 6: Le Tre operazioni eseguite in MeshLab

Una volta ottenuta la mesh semplificata e normalizzata, si esporta in formato .obj per essere corretta e rifinita.

Il software scelto per eseguire tutte le operazioni di correzione, pulizia della topologia e successive modellazioni è Maya, software leader nell'industria cinematografica, gaming e vfx. Maya è un software che fa della modellazione e animazione i suoi punti di forza, proponendo tool e operazioni ottimizzate per ottenere risultati ottimi.



Figura 7: Sarcofago degli sposi importato in Maya con errori

Il primo passo è stato quello di eliminare gli artifici ottenuti in fase di ricostruzione tramite Poisson: esso ha infatti chiuso il fondo del sarcofago in maniera imprecisa; bisogna inoltre aggiustare il bordo inferiore, correggere i piedi del sarcofago e aggiungere i due mancanti.

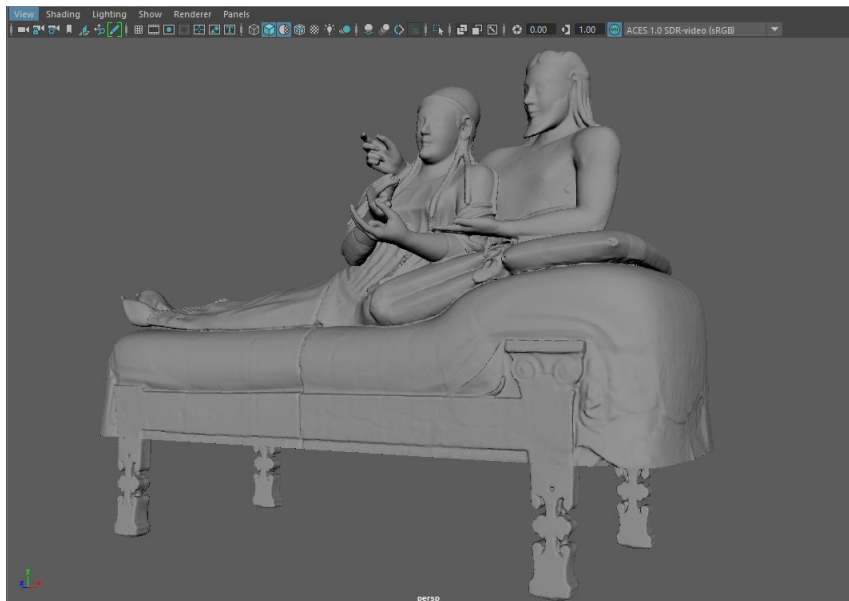


Figura 8: Sarcofago corretto

Ottenuto un risultato soddisfacente, si procede con la fase di retopology della mesh: nello stato attuale la disposizione delle facce, che viene chiamata topologia della mesh, seppure rispetta la regola di avere ogni suo poligono composta da quadrilateri, non è ordinata; i vari spigoli non seguono un direzione conforme alla superficie, e, seppure non si evincono errori di rendering, una topologia disordinata non permette vari interventi in modo facile: ad esempio il necessario UV mapping, cruciale nella fase di texturing.

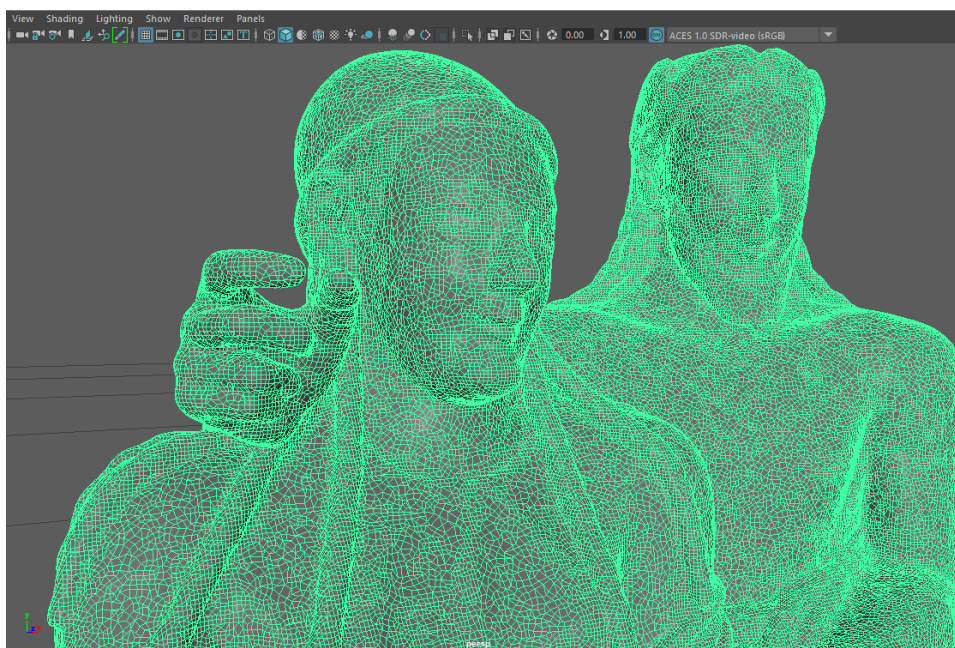


Figura 9: Topologia Sarcofago Disordinata e Non Uniforme

È possibile ottenere una topologia corretta mantenendo lo stesso livello di dettaglio utilizzando la funzione di Retopology presente in maya: questa funzione studia la forma della mesh a partire da quella originale e ricrea la topologia cercando di preservare i livelli di dettaglio.

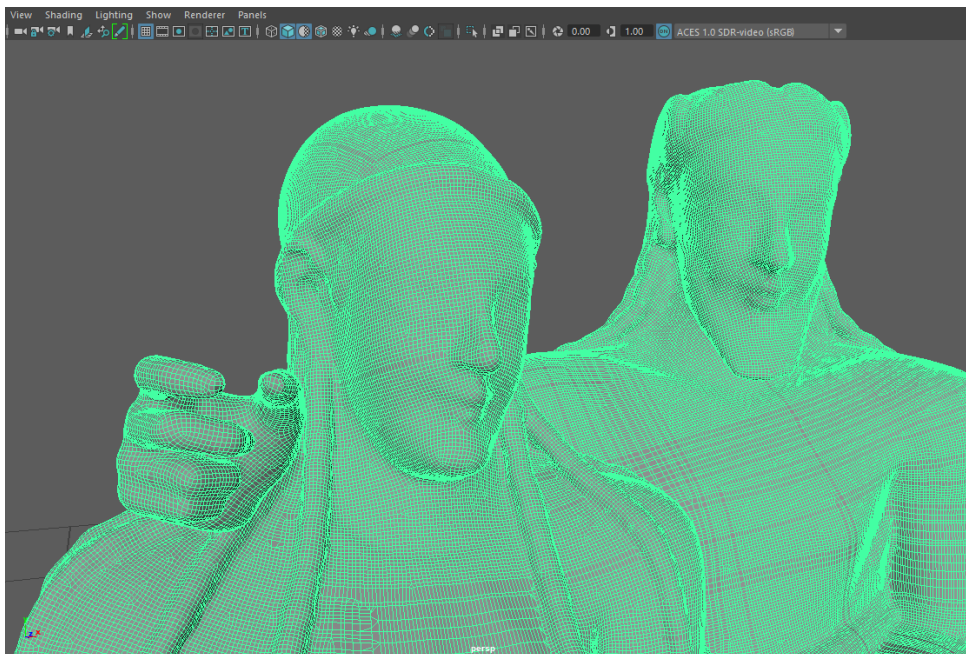


Figura 10: Topologia Sarcofago Ordinata e Uniforme

Successivamente si può iniziare a ridurre il numero di facce ove possibile. Anche qui Maya presenta una comoda funzione di Reducing che permette di individuare zone con vertici e spigoli superflui che può eliminare mantenendo i dettagli superficiali. Questa operazione è fondamentale per ottenere una mesh più leggera, alleggerendo i costi computazionali successivi.

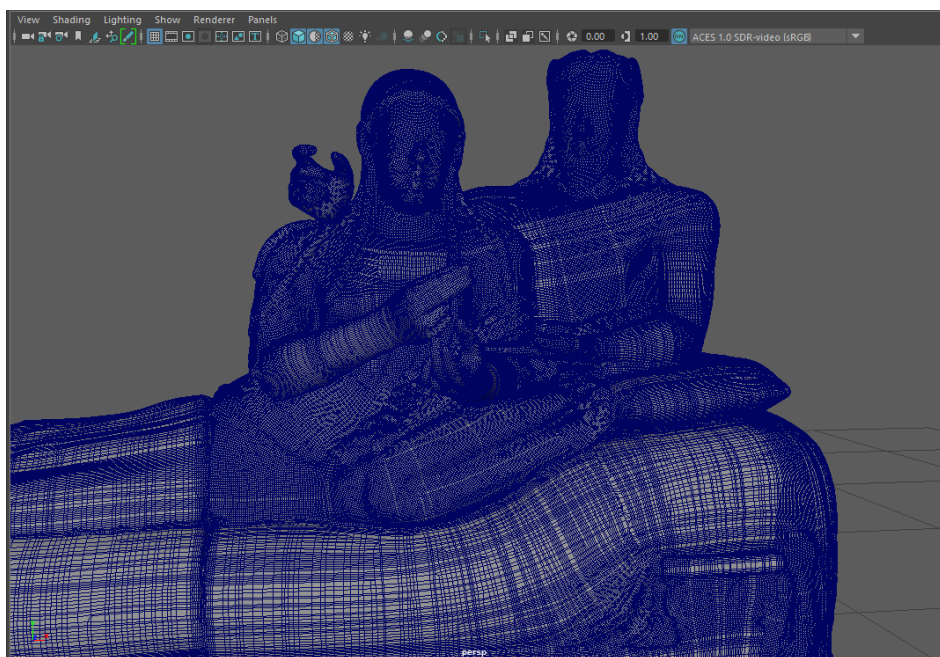


Figura 11: Mesh Finale Sarcofago

Una volta ottenuto il modello pulito e ridotto si può procedere con mappatura UV: eseguire la mappatura UV di un oggetto significa attribuire le coordinate della sua superficie 3D su un

piano in 2D per poter in seguito applicare texture e materiali in maniera corretta, ottimizzandone i costi computazionali nelle successive fasi di rendering.

Le operazioni principale dell'UV mapping sono:

1. Cut: comando che permette di tagliare gli spigoli selezionati separando i poligoni
2. Stitch: comando che permette di unire (letteralmente cucire) due spigoli, unendo di conseguenza i poligoni.
3. UV Unwrap: comando che permettere di srotolare le superfici 3d so un piano 2d coerentemente ai tagli fatti. Utilizzando questo comando vengono evidenziati eventuali errori dovuti nella maggior parte dei casi a “allungamenti” o “contrazioni” della superficie, causati principalmente da tagli o eseguiti nelle zone sbagliate, oppure in quantità minima. Talvolta si possono evidenziare artefatti di questo genere quando non vengono confermati e azzerati rapporti di scala dell'oggetto: in Maya questa operazione viene eseguita con il comando Freeze Transforms, che rende a tutti gli effetti l'oggetto in scala 1:1 rispettivamente nello spazio di lavoro del software.
4. UV Layout: una volta ottenute le superfici proiettate nello spazio 2D occorre disporle nell'area UV dedicata. Questo spazio è un'area quadrata dentro la quale vanno posizionate le varie superfici con la regola generale di occupare la massima area possibile senza che queste superfici si accavallino. È buona pratica inoltre lasciare un padding, cioè un piccolo spazio tra le superfici e il bordo dell'area 2D, nell'ordine di qualche pixel, onde evitare tagli netti evidenti in fase di applicazione.

Maya propone il proprio UV editor dedicato a queste operazioni, ed oltre alle principali, ne mette a disposizione altre che velocizzano il lavoro, come ad esempio il layout mantenendo le proporzioni delle varie superfici, utile per poi avere una UV map uniforme.

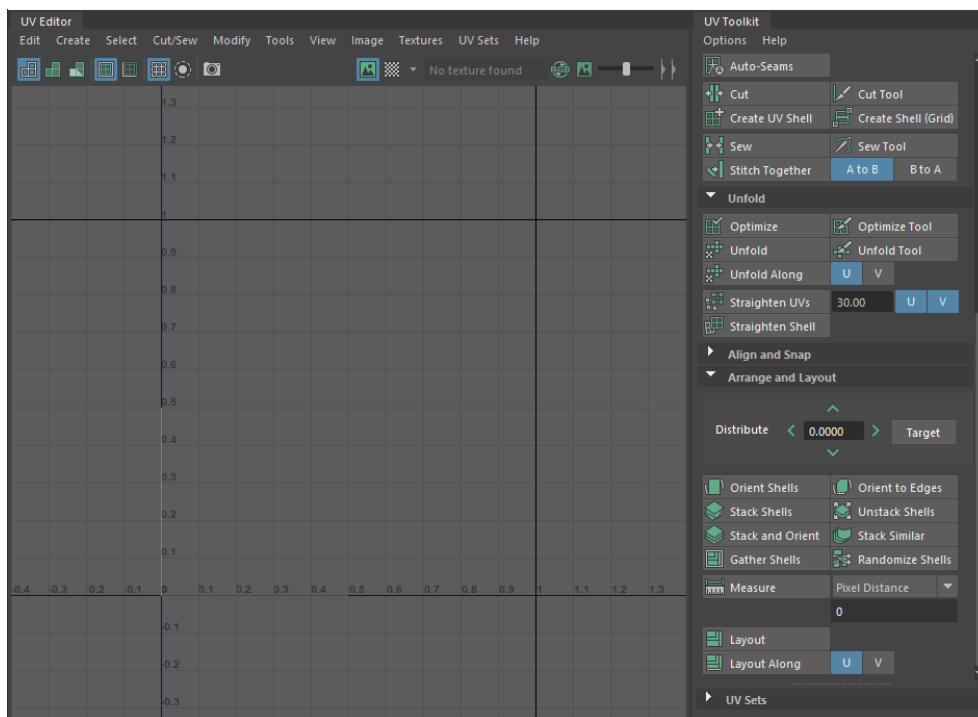


Figura 12: UV Editor in Maya

Nel caso del sarcofago, una figura complessa e “organica” [vengono denominate così gli oggetti 3d che hanno forme morbide, la cui origine è attribuibile appunto al mondo organico, la controparte invece prende il nome di “Hard Surface”, indicando gli oggetti di origine artificiale, connotati da spigoli molto evidenziati, geometria rigida e ben definita, saper distinguere e lavorare con queste due tipologie di oggetti è necessario per ottenere un buon risultato], bisogna tenere conto dello sviluppo della sua superficie, in modo da effettuare dei tagli in posti logici. Da notare inoltre che il Sarcofago non è un pezzo unico, ma è formato da vari blocchi che sono stati assemblati: dunque il lavoro di taglio e separazione delle superfici viene aiutato dalla costruzione del sarcofago stesso: sono stati infatti eseguiti tagli seguendo le varie componenti. Il risultato ottenuto consiste di diverse superfici 2d, che vengono chiamate UV shell nell’industria, mappando l’intera superficie del sarcofago in un piano 2d.



Figura 13: UV Shell del Sarcofago

Successivamente bisogna preparare l’oggetto per l’esportazione destinata a Substance Painter per la creazione e mappatura delle texture e in seguito per essere inserito nel game engine Unity. Oltre ad aver resettato i rapporti di scala, necessario anche per la mappatura UV, occorre assegnare alle superfici un ID Materiale: queste permetterà a Substance di riconoscere e creare i vari texture sets per l’oggetto. In Maya vi è la possibilità di assegnare diverse tipologie di materiali che si comportano in maniera differente, tuttavia per la pipeline adottata è irrilevante questa scelta, quindi si è scelto il Lambert con un colore visibile; in particolare per il sarcofago si sono creati 3 materiali diversi per 3 uv sets diverse: abbiamo la parte superiore, principale del sarcofago costituito da un suo materiale collegato al suo uv set; i piedi hanno un loro materiale collegato al rispettivo uv set, così come il fondo del sarcofago.

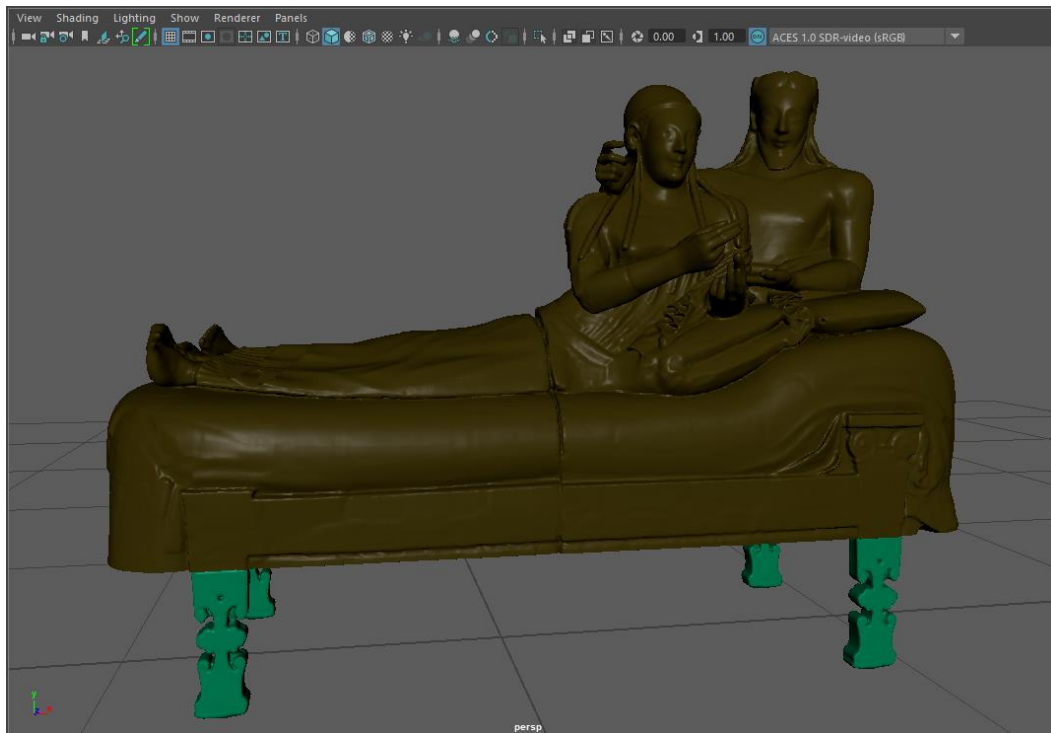


Figura 14: Sarcofago con Materiali Assegnati

Infine, bisogna scegliere il formato giusto di esportazione: dovendo lavorare in un game engine l'unica scelta è di usare il formato FBX: questo formato è largamente utilizzato nell'industria e rientra nella categoria di formati standard, cioè comprensibili dalla maggior parte dei software e ottimizzato per i game engine. [14]

Il risultato finale è una mesh dettagliata del Sarcofago, contenente le informazioni di materiale e UV set, dalle dimensioni ridotte.

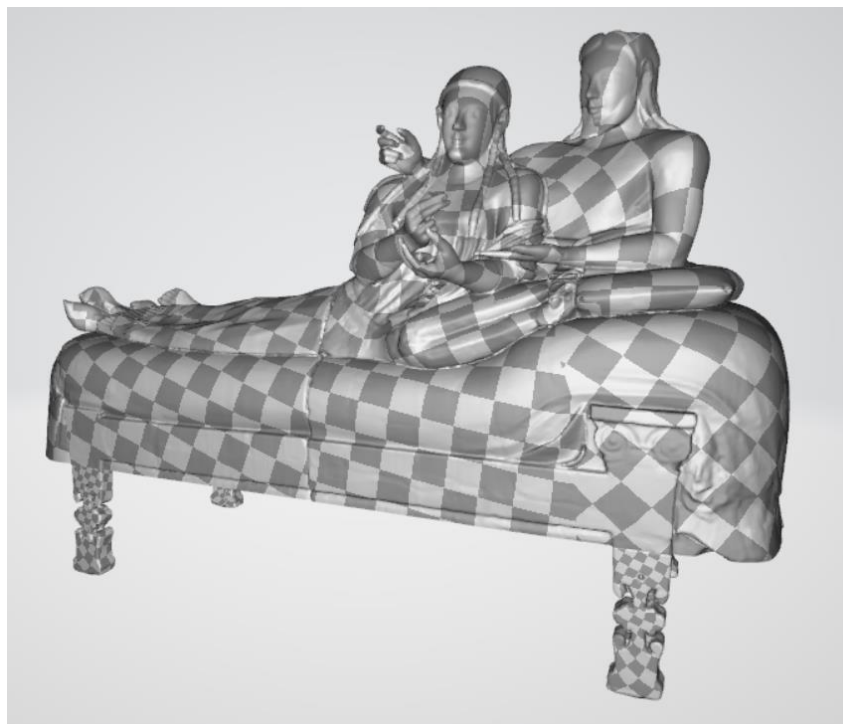


Figura 15: Sarcofago Esportato in FBX

Importando l'oggetto in Unity, il risultato è incompleto: infatti ciò che si vede è soltanto una mesh grigia e priva di dettagli, a meno di quelli superficiali dati dalla geometria. Per completare il Sarcofago bisogna assegnarli una texture: cioè realizzare delle immagini coerenti con i relativi UV Sets creati precedentemente per ridonarli le caratteristiche del materiale e colore.

Il software utilizzato per eseguire questa operazione è Substance Painter, software standard utilizzata dai professionisti dell'industria che permette la creazione di texture utilizzando moderni strumenti di pittura. Esso inoltre adotta una metodologia di lavoro non distruttiva: ogni azione viene registrata ed è possibile cambiarne i parametri in qualsiasi momento senza intaccare il lavoro svolto lavorando con una struttura a layer. Permette inoltre la creazione di texture procedurali gestibili da parametri e mostra il risultato in tempo reale con luci ed ombre.

Per prima cosa bisogna creare un nuovo progetto scegliendo il file contenente il Sarcofago, in questa fase è essenziale scegliere la risoluzione su cui lavorare: la risoluzione influenzerà il risultato finale in fase di output con una qualità più o meno alta in base alla scelta effettuata. Per quanto riguarda il Sarcofago, essendo l'oggetto centrale dell'esperienza VR si è scelta la massima risoluzione possibile: 4k (4096 x 4096 pixel).

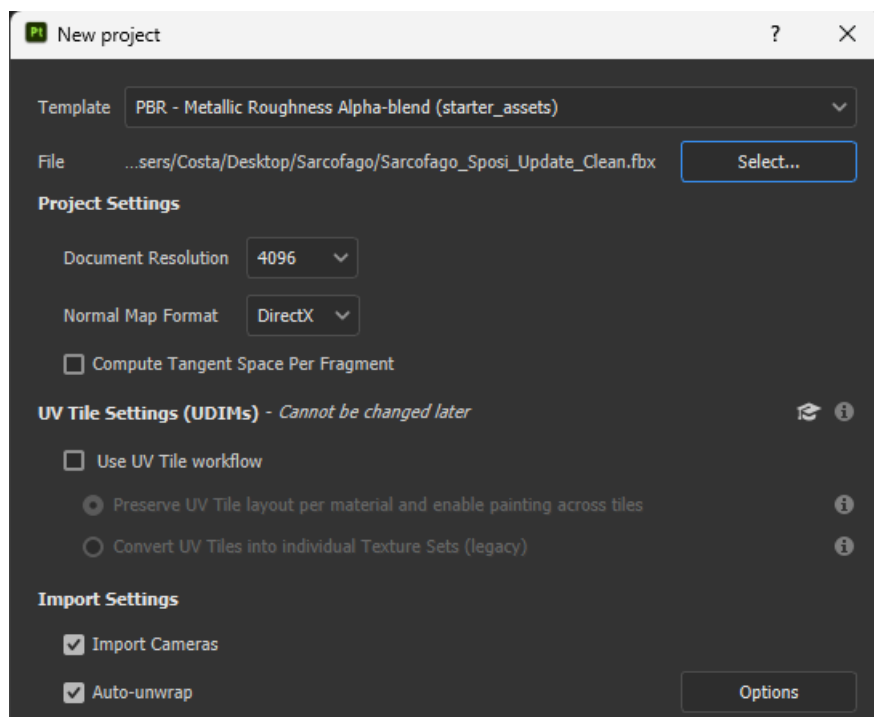


Figura 16: Creazione setup Sarcofago in Substance Painter

Una volta completato il setup si può procedere con la creazione del materiale: la base è terracotta con una leggera lucentezza. Per ogni materiale creato substance offre la possibilità di avere attivi vari canali quali: base color, roughness, metallic, height, normal, luminosity, opacity, ciascuno che influenza un determinato aspetto del materiale. Per ogni canale attivo Substance riserva un determinato slot di memoria in GPU, quindi è consigliato disattivare i canali inutilizzati: per la terracotta si tengono attivi soltanto il canale base color e roughness: il primo dà l'informazione di colore base, il secondo ne gestisce la lucentezza generale.

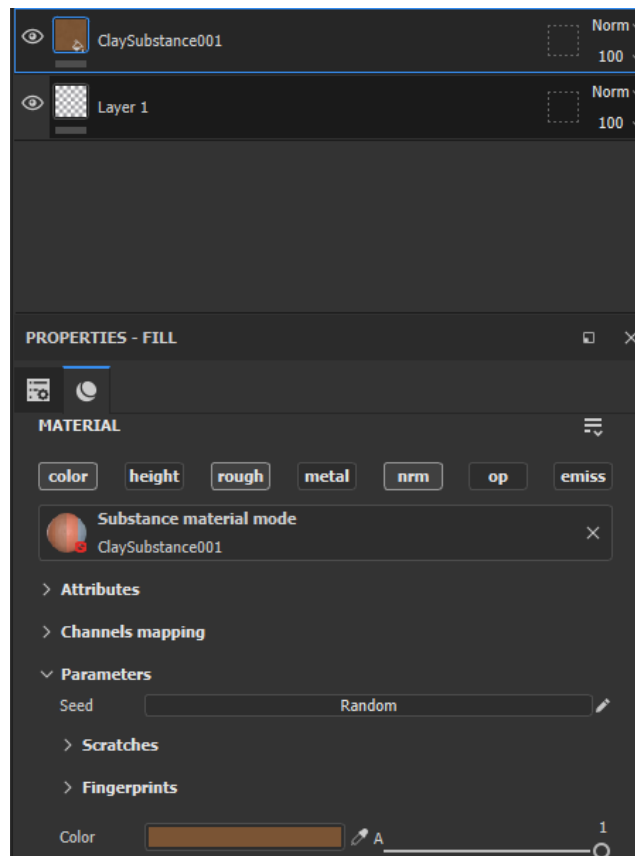


Figura 17: Setup Materiale Clay Substance

Ora il Sarcofago digitale è colorato uniformemente con il giusto materiale; tuttavia, non mostra i vari dettagli presenti invece sul reale, che sono dipinti su di esso.



Figura 18: Sarcofago con Materiale Clay Base

Una strada da percorrere per completare il lavoro sarebbe quella di avere sottomano varie foto da varie angolazioni del sarcofago e cercare di riprodurne i dettagli a mano, ma questo oltre ad essere un lavoro oneroso a livello di tempo e di precisione, è dettato dalla bravura della persona con risultati variabili. La seconda strada, quella utilizzata, prevede l'utilizzo della proiezione: Substance Painter mette a disposizione un comando di proiezione che permette di proiettare letteralmente un'immagine sopra un oggetto.

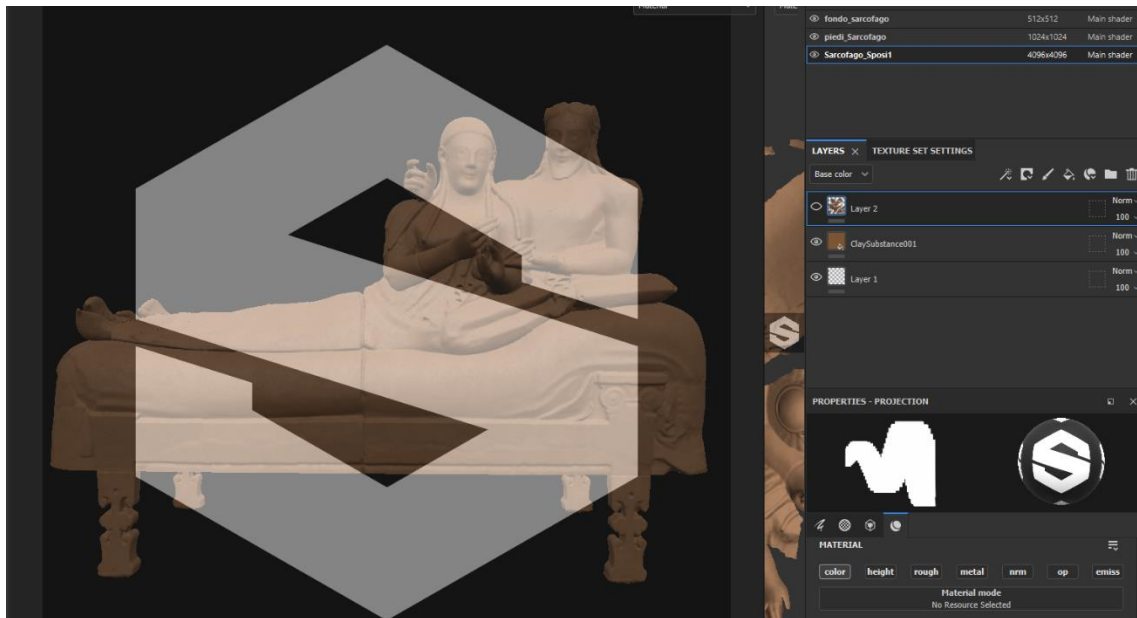


Figura 19: Strumento di proiezione attiva con immagine di sample

Vi sono tuttavia delle limitazioni e accortezze da tenere in considerazione quando si vuole eseguire una proiezione su un oggetto:

- 1: L'immagine verrà proiettata così come appare: dunque è necessario avere un'informazione di colore il più neutra possibile, non influenzata da troppe luci, ombre e riflessi.
- 2: Affinché la proiezione risulti efficace l'immagine 2D da proiettare deve essere congruente con la camera nella viewport di Substance: quindi apertura focale, inclinazione e distanza. Si evince subito che delle semplici foto scattate con una fotocamera non sono indicate per una buona resa di proiezione.



Figura 20: Foto Scattata al museo inutilizzabile per Illuminazione scorretta e riflessi

Ritornando al capitolo 2.4.1: assieme alla scansione laser del sarcofago è stata prodotta anche una sua versione utilizzando la fotogrammetria che contiene le informazioni di texture, e questo è il modello utilizzato per eseguire l'operazione di proiezione. Essendo anche esso un modello in formato .ply si può aprire e visionare utilizzando MeshLab. Le informazioni di colore attribuite al modello si attivano nell'apposita sezione color, selezionando vertex attribute.



Figura 21: Sarcofago con informazioni di Colori in Mashlab

Si può notare da subito che il colore del sarcofago è neutro e non è influenzato da luci o ombre, questo è indice di una buona operazione di fotogrammetria. Per ottenere un buon risultato di proiezione si procede orientando il sarcofago in MeshLab nelle diverse viste: frontale, 2 laterali, dietro e superiore, garantendo una copertura totale delle informazioni di colore. Le stesse viste, inoltre, si possono facilmente ricreare in Substance.



Figura 22: Viste diverse del Sarcofago

Preparate le immagini del Sarcofago nelle diverse viste, è possibile importarle in Substance e proiettarle sul modello 3D: per fare ciò è necessario creare un nuovo layer nel canale della texture del sarcofago, posizionato nella gerarchia ad un livello superiore rispetto al materiale terracotta generato precedentemente, questo per garantirne la visibilità; inoltre si lascia attivo soltanto il basecolor nel livello della proiezione affinché mantenga le stesse caratteristiche del materiale in fatto di roughness.

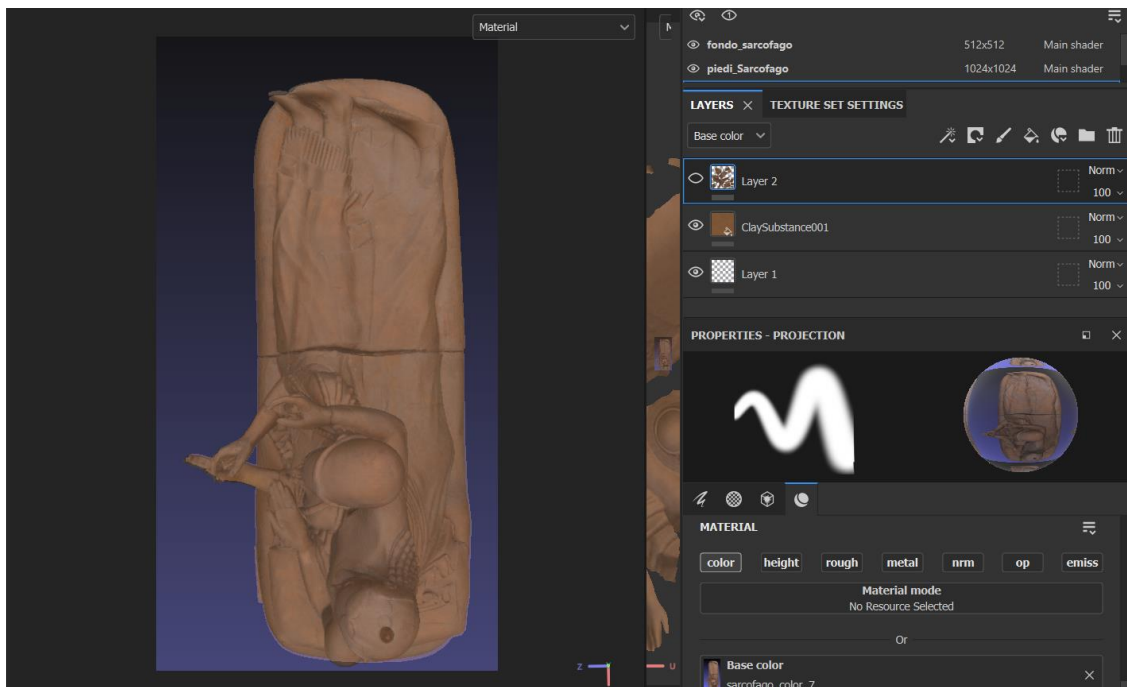


Figura 23: proiezione delle informazioni di Colore sul Sarcofago

Proiettati i 5 lati sul modello 3d possiamo vedere il risultato andando ad inserirlo in diversi scenari utilizzando gli hdri messi a disposizione da Substance.

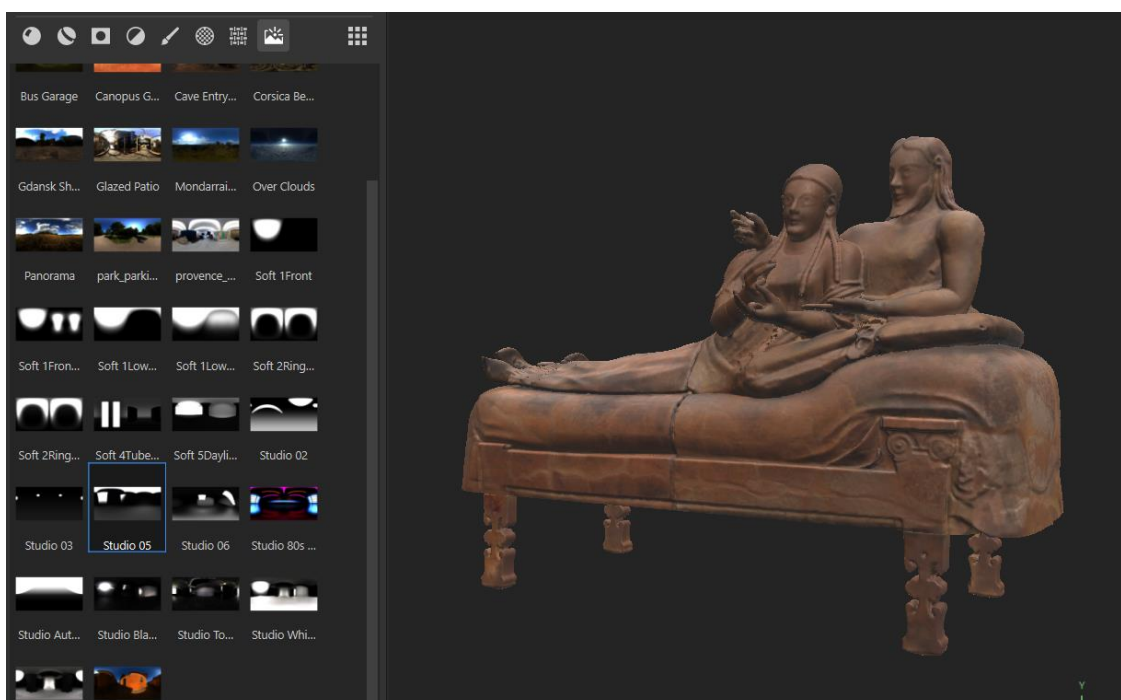


Figura 24: Sarcofago Texturizzato con hdri

Un hdri (high dynamic range image map) non è altro che un'immagine 360 che contiene informazioni luminose, utilizzato in ambito cgi per illuminare scene ed oggetti, e studiare il comportamento di materiali e texture in vari ambienti (giorno, notte, interni, esterni) per effettuare ulteriori correzioni. [15]



Figura 25: Esempi di HDRI

Ottenute un risultato soddisfacente in Substance, si procede con l'export delle texture: il software mette a disposizione una moltitudine di preset di export destinati a più svariati utilizzi, quindi conoscendo in anticipo la destinazione si posso esportare texture ottimizzate per il determinato software e pipeline di lavoro (questo perché lo stesso software può essere utilizzato con diverse rendering pipeline, nel nostro caso Unity verrà usato con la pipeline HDRP invece che la standard URP, di cui se ne parlerà in dettaglio nei capitoli successivi).

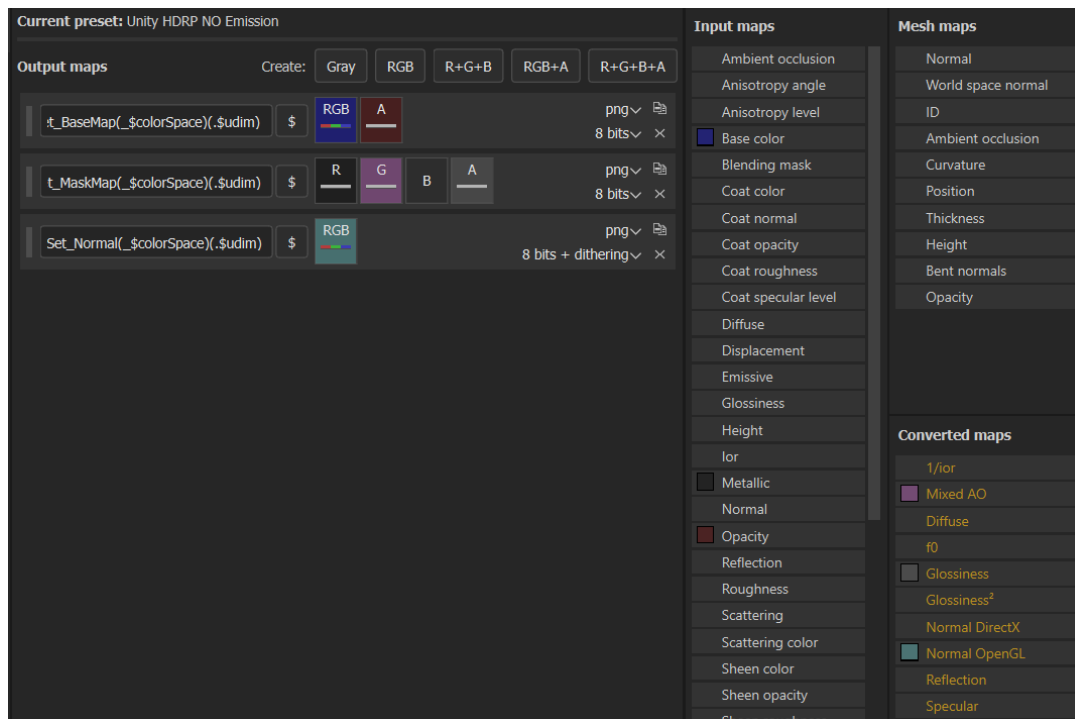


Figura 26: Preset per L'export delle Texture

Individuato il preset occorre fare uno step successivo: Substance esporta per ogni preset ciascun canale di texture, anche se esso non viene utilizzato, quindi sapendo a priori di non aver bisogno di una determinata texture si può escludere andando a creare un custom preset a partire da quello selezionato: in questo caso si vuole ignorare il canale relativo alla texture di emissione, non avendo la necessità in incorporare informazioni di luminosità in nessun asset del progetto. Si esporteranno dunque 3 texture per id material: Base color, che contiene le informazioni di colore; Metallic Map, che contiene le informazioni di roughness e metallic; Normal map, una texture che indica il corretto rimbalzo dei raggi luminosi su un poligono, dando la possibilità di creare l'illusione di dettagli anche in assenza di geometria.

L'ultimo step da eseguire è di confermare la risoluzione e di come riempire lo spazio esterno attorno alle varie UV shell dell'oggetto: è buona norma selezionare un leggero overflow della texture al di fuori delle UV shell per evitare di evidenziare i vari tagli effettuati in fase di uv mapping: per la texture del sarcofago si è impostato un dilation pari a 5 pixel oltre il contorno.

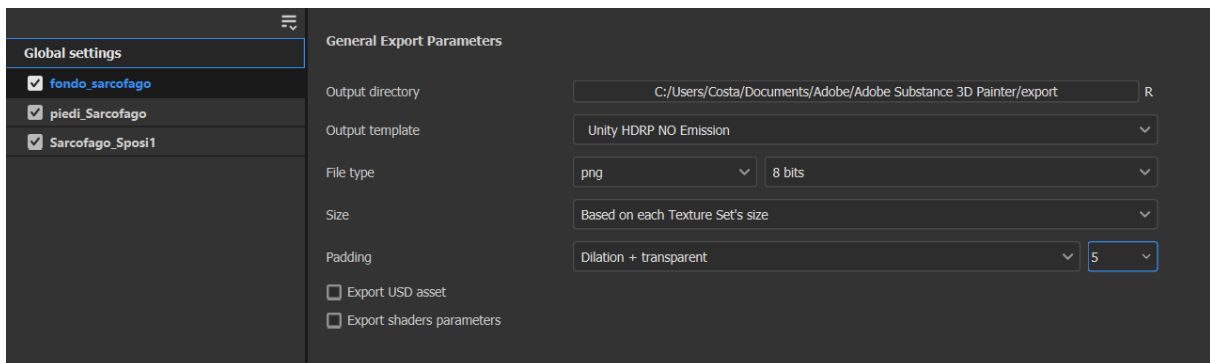


Figura 27: Export Settings Sarcofago

Il risultato finale ottenuto consiste di nove texture (base color, metallic e normal) in alta risoluzione per il Sarcofago degli sposi.

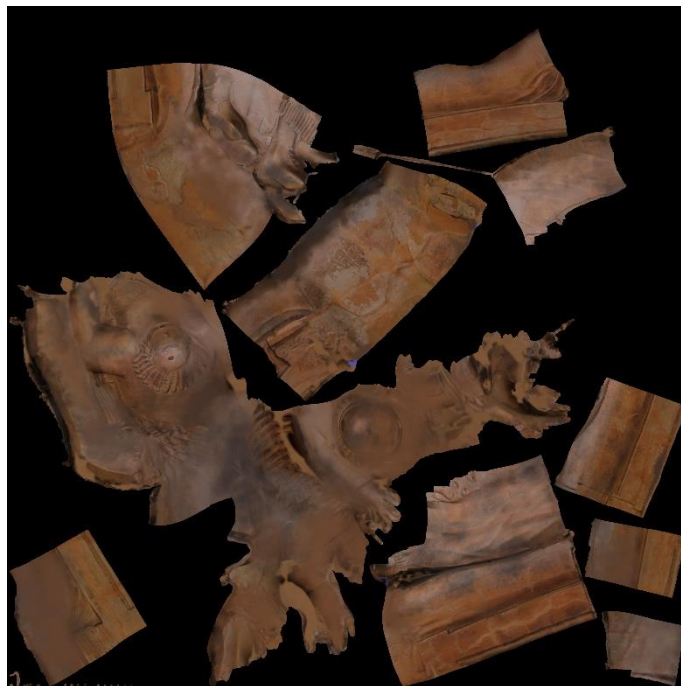


Figura 28: Texture finale Sarcofago

3.2 Realizzazione dell'Ambiente

Lo step successivo è quello di ricreare l'ambiente dentro il quale avverrà l'esperienza VR: L'utente potrà esplorare liberamente la stanza antecedente al sarcofago e la stanza del sarcofago, tuttavia non è possibile limitarsi soltanto a due stanze eliminando il resto perché si perderebbe l'illusione di immersività richiesto: oltre alle due stanze sopra citate è necessario realizzare una stanza iniziale dedicata alla familiarizzazione con il visore e per verificare il corretto rilevamento dei movimenti: questa stanza è direttamente collegata alla stanza antecedente la

Stanza del sarcofago attraverso un corridoio a 'L' in modo che l'utente non abbia visione dell'intero ambiente sin dall'inizio. Oltre la sala iniziale è necessario modellare l'ambiente che prosegue oltre la stanza del sarcofago, anche se non accessibile, così come una porzione visibile del piano superiore che si può vedere dalla stanza del sarcofago, così da essere coerenti con l'ambiente reale del Museo.

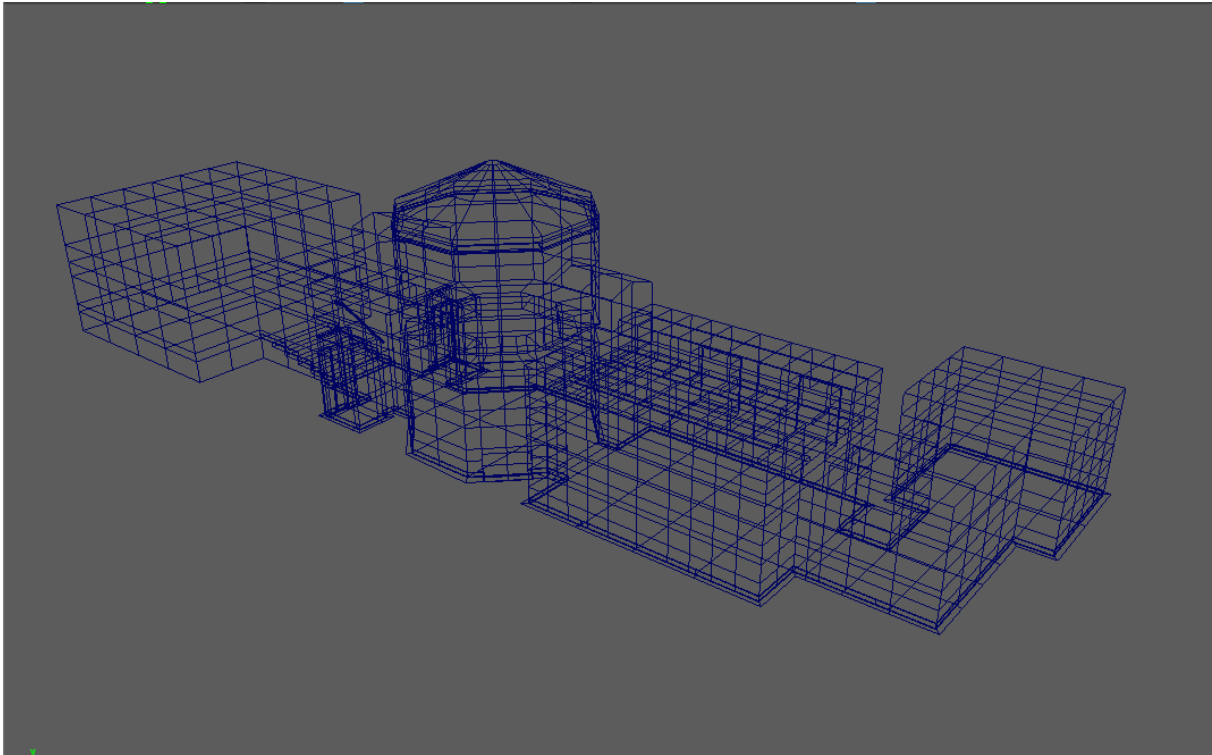


Figura 29: Wireframe Ambiente del Museo modellato

Per la realizzazione delle stanze si sono utilizzate le piantine cad fornite dal Museo: le piantine si possono visionare utilizzando il software di lettura gratuito fornito da Autodesk: DWG True View 2024, che fornisce anche utili strumenti di misura. Le piantine, oltre a contenere il layout delle mura, contengono anche la posizione delle varie teche nelle due stanze, utili per il posizionamento corretto degli oggetti.

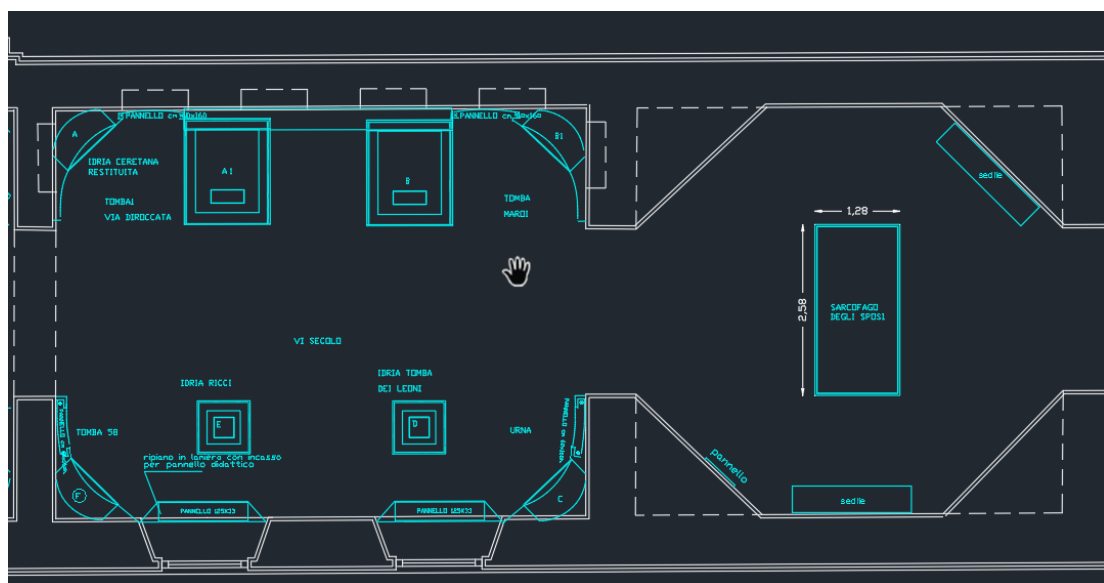


Figura 30: Piantina del museo usata come riferimento

Ottenuto lo screen dello spazio interessato, si importa l'immagine in maya per poter essere utilizzata: il riferimento si crea posizionando l'immagine all'interno di un image plane, facendolo combaciare con il piano orizzontale, dopodiché se ne aggiusta l'opacità e lo si blocca per evitare di selezionarlo durante il lavoro di modellazione. Affinché l'immagine di riferimento sia delle dimensioni corrette si è creato un cubo avente le dimensioni della teca ospitante il Sarcofago e si scala l'immagine fino a che il cubo non combaccia perfettamente con la sua controparte nella piantina; questo garantisce una corretta dimensione dell'immagine di riferimento e si può procedere con la modellazione dell'intero ambiente. (in maya l'unità di misura imposta è il metro, quindi una scala 1 equivale ad un metro)

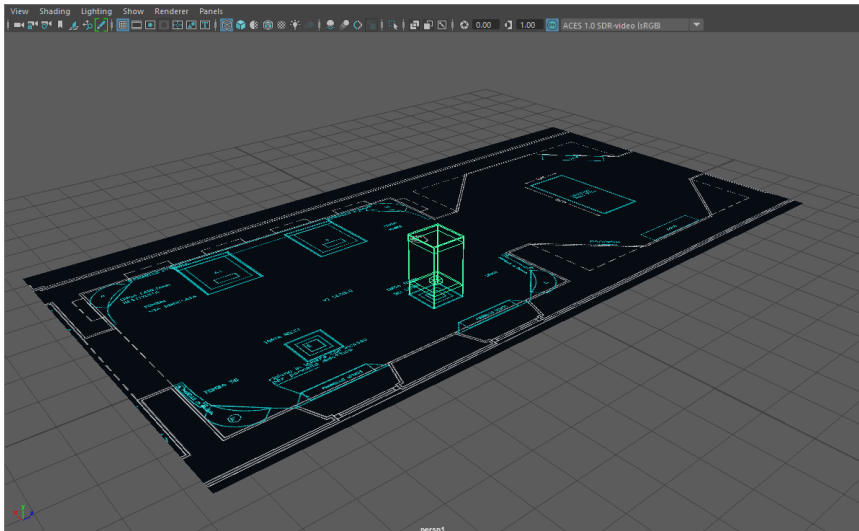


Figura 31: Operazione di scalamento della pianta del Museo

Per modellare l'ambiente si sono utilizzati dei piani 2D per ridurre il peso finale della mesh 3D e perché non è necessario visualizzare lo spessore del muro esterno. Si è notata inoltre una simmetria delle varie stanze, questo ha permesso di modellare soltanto metà ambiente ed ottenere il risultato finale tramite un'operazione di mirroring (specchiamento della mesh). Stessa operazione viene fatta la porzione di piano superiore visibile dalla sala del Sarcofago. Una volta ottenuto il layout dell'ambiente si chiudono i vari soffitti e si procede con la modellazione degli elementi fissi nell'ambiente. Questi elementi sono: il bordo inferiore, gli scalini, il corrimano e le due porte presenti ai lati del corridoio, seppur poco visibili.

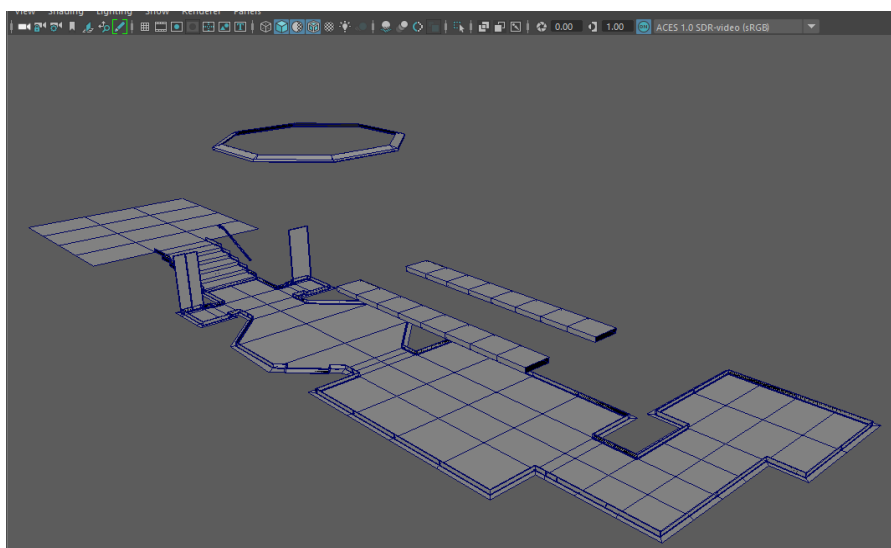


Figura 32: Elementi Fissi Ambiente

Si sono utilizzate delle immagini 360 di reference dell'ambiente per modellare gli elementi al meglio.



Figura 33: Reference 360 Museo

Una volta modellato ambiente ed oggetti, è stato necessario dividerlo in stanze per una più facile gestione dell'ambiente e delle texture: questa ha permesso di ottenere una qualità grafica maggiore per ogni singola stanza.

Si procede quindi con la generazione di mappe UV (vedi sarcofago) per permettere la creazione a assegnazione di texture.

Per la realizzazione delle texture dell'ambiente si è esportato il modello in fbx e realizzato il tutto in Substance. In questo caso si sono dovuto creare degli smart materials (materiali intelligenti) che sono in grado di coprire un'intera superficie creando dettagli proceduralmente e gestibili tramite valori numerici: questa tecnica si è rilevata particolarmente efficace nella realizzazione del pavimento in marmo del museo.

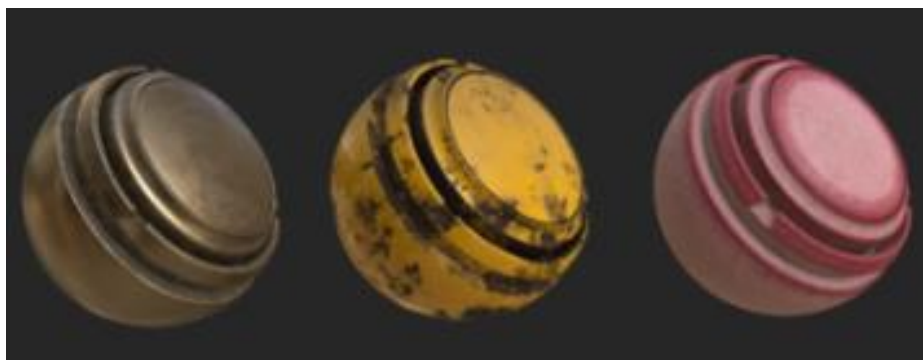


Figura 34: Esempi Smart Materials

Partendo dalla realizzazione del pavimento, stanza antecedente al Sarcofago: si è creato un materiale che andasse a imitare le varie venature e colori presenti nel museo: per ottenere questo effetto si è partito dal materiale base marmo andando ad aggiungere sopra livelli di colore utilizzando come riempimento varie immagini di rumore in scala di grigi: queste particolari immagini posso essere modificate variando parametri di densità, posizione, contrasto, grandezza ecc, fino a che non si è ottenuto il risultato desiderato.



Figura 35: Sample Pavimento Museo

Nel dettaglio il procedimento che ha portato al risultato è stato il seguente:

1. Si è generato un primo layer al quale è stato dato il colore base del pavimento, campionandolo dalle immagini di riferimento del museo, tenendo attivi soltanto i canali di colore e di roughness

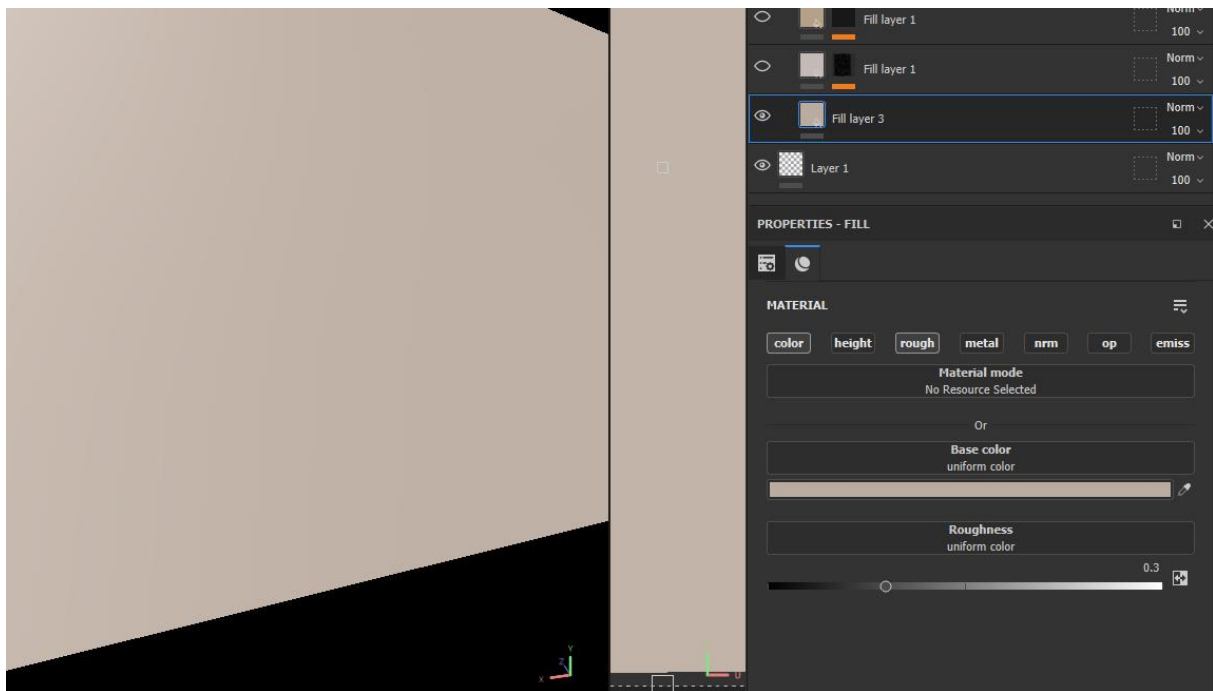


Figura 36: Layer 1 Pavimento

2. Si è generato un secondo layer che andasse ad aggiungere delle leggere variazioni più chiare al colore, imitando la struttura del marmo. Questo secondo layer è costituito da due componenti: il primo componente indica il colore; il secondo componente invece è un paint layer utilizzato come black mask per il primo layer.

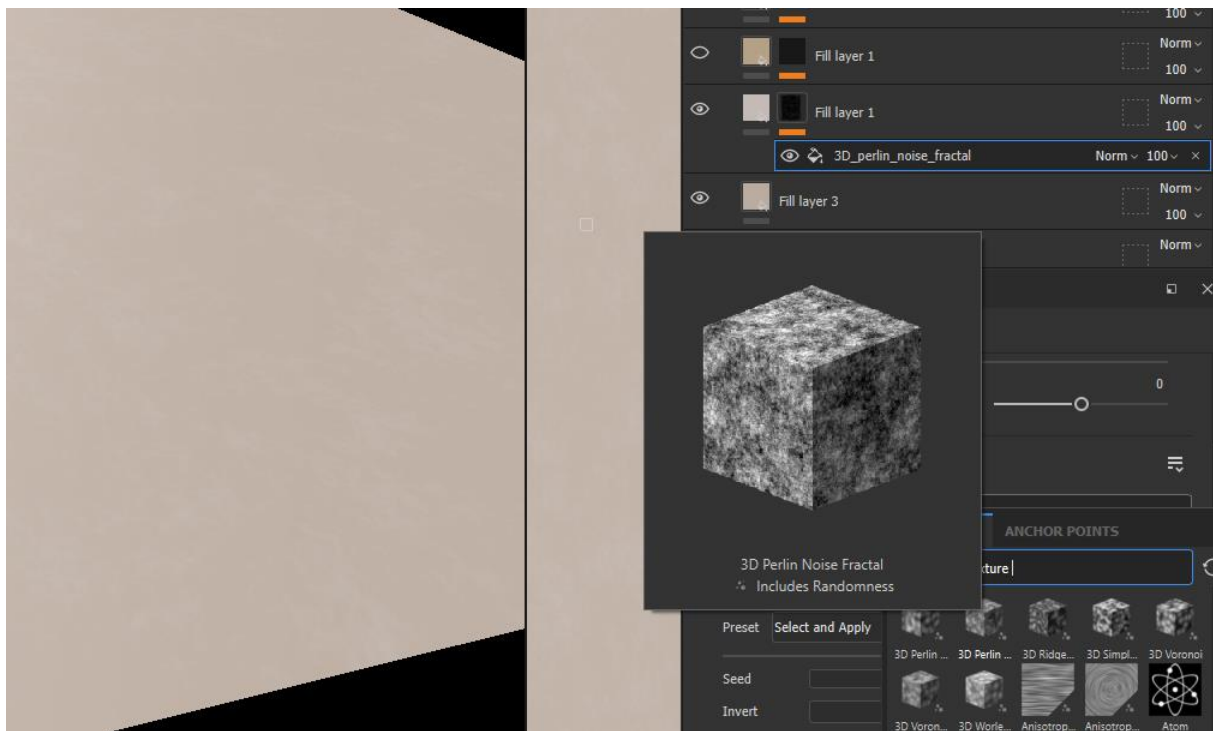


Figura 37: Layer 2 del pavimento realizzato con Marchera e Rumore Procedurale

Le maschere sono un potente strumento usati ampiamente nell'industria cgi. Il loro funzionamento di base è molto semplice: servono per nascondere o rivelare parti di immagine sottostante a livello gerarchico (nella pipeline di lavoro a layer le maschere agiscono sul livello sottostante al loro o al livello a cui sono assegnate). Funzionano con immagini a scala di grigi nascondendo le parti coperte dalle zone nere, e mostrando le parte coperte dalle zone bianche (dai cui il nome Black Mask): i restanti intervalli di grigi agiscono nella stessa maniera ma con livelli diversi di opacità.

Le maschere si possono generare in molti modi diversi: dipingendole a mano, generandole a partire da altre immagini, oppure utilizzando funzioni (procedurali) i cui parametri generano un'immagine basata su diversi tipi di rumori: queste ultime sono le più utilizzate in ambito grafico per aggiungere dettagli casuali a texture, disporre in modo randomico oggetti e anche modificare la geometria degli oggetti stessi. Un altro vantaggio delle texture procedurali è l'assenza di ripetizioni nel loro pattern.

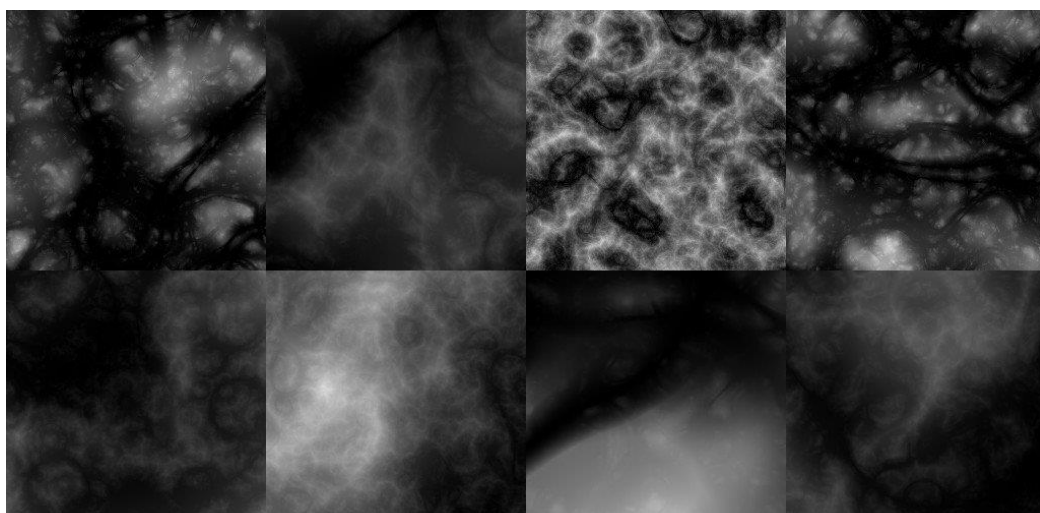


Figura 38: Esempi Noise Maps Procedurali

Le tipologie più comuni di immagini generate attraverso rumore sono: Gaussian Noise, Clouds Noise, Fractal Sum Base Noise, e Perlin Noise; ognuna di esse sfrutta operazioni di funzioni generando in output un determinato grafico di rumore.

Nel caso specifico della realizzazione dei dettagli del pavimento si è utilizzata la Perlin Noise: questo tipo di rumore implementato per la prima volta nel 2002 da Ken Perlin [16] è un ‘rumore a gradiente’ ottenuto dalla generazione di vettori di ampiezza $[-1, 1]$ facendone il gradiente dei diversi sample ottenendo una texture 2d.

Per generare un rumore a gradiente di tipo Perlin è necessario:

1. Generare un campione finito di valori casuale;
2. Generare una funzione di rumore che interpola uniformemente tali valori;
3. Sommarle insieme varie ottave di questa funzione scalandola di fattori equivalenti a $1/2$, e applicando un valore di persistenza per ogni ottava successiva, in modo che le alte frequenze vengano diminuite. [17]

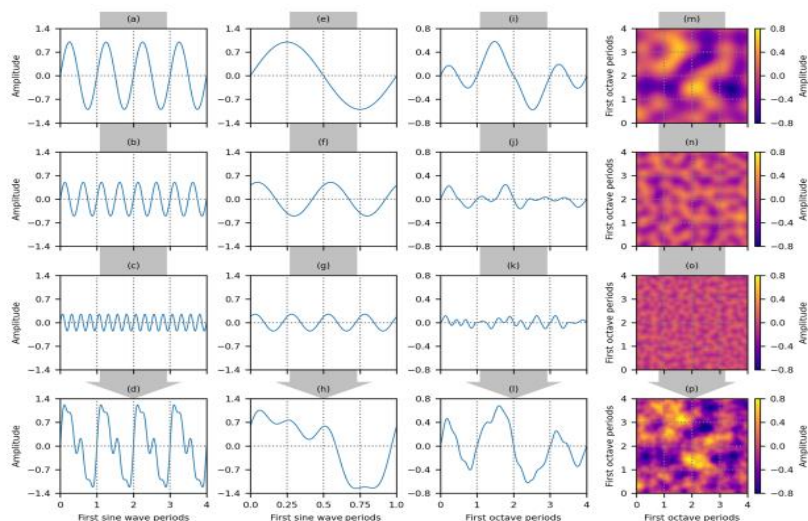


Figura 39: Costruzione della Perlin Noise Map

Per il pavimento del museo vengono aggiustati i parametri della texture di Perlin per ottenere il disegno desiderato.

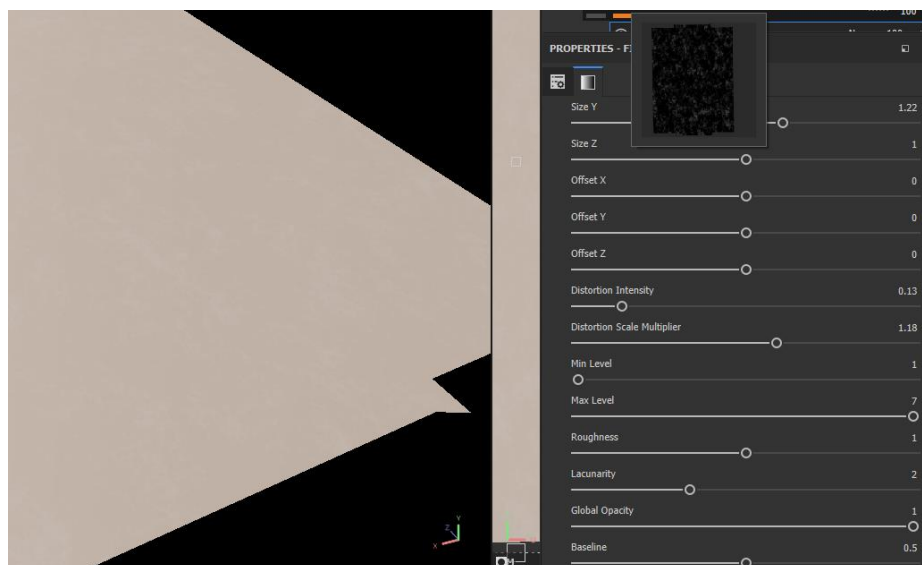


Figura 40: Gestione dei Valori della Noise Map Procedurale

3. Si crea un terzo layer per aggiungere ulteriori dettagli al pavimento: in questo caso per aggiungere le venature tipiche del marmo. Substance mette a disposizione un catalogo di texture, anch'esse procedurali, in scala di grigi che simulano diversi materiali e trame: si è scelto di usare la texture Marble Fine, la più simile al pavimento del museo. La metodologia di setup per il layer è lo stesso del precedente: un primo componente dedicato al colore, e un secondo componente avente la funzione di maschera avendo come disegno la texture del marmo selezionata.

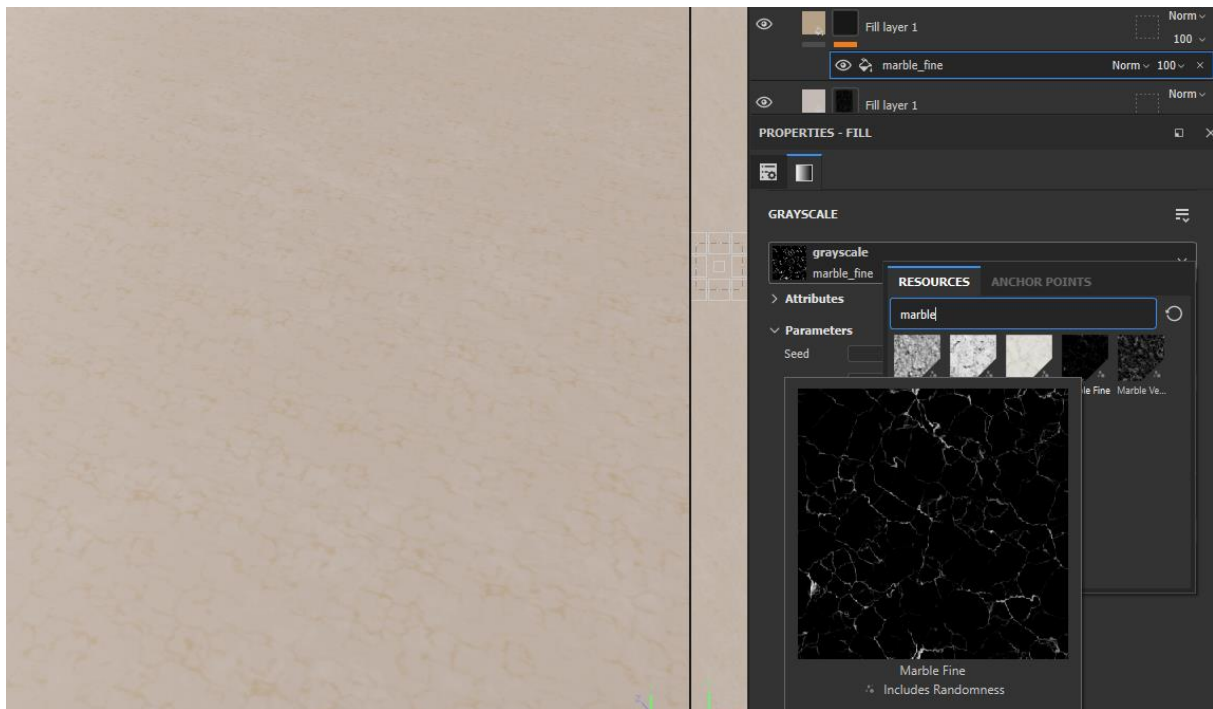


Figura 41: Layer 3 del Pavimento Generato con la Texture Marble

4. Si crea un quarto layer per aggiungere gli spot scuri presenti sul pavimento: il setup è identico ai precedenti: colore di base + black mask con una texture in scala di grigi; per questo effetto si è utilizzata la texture black and white spots, andando a configurare densità grandezza e rotazione in modo da nascondere eventuali ripetizioni.

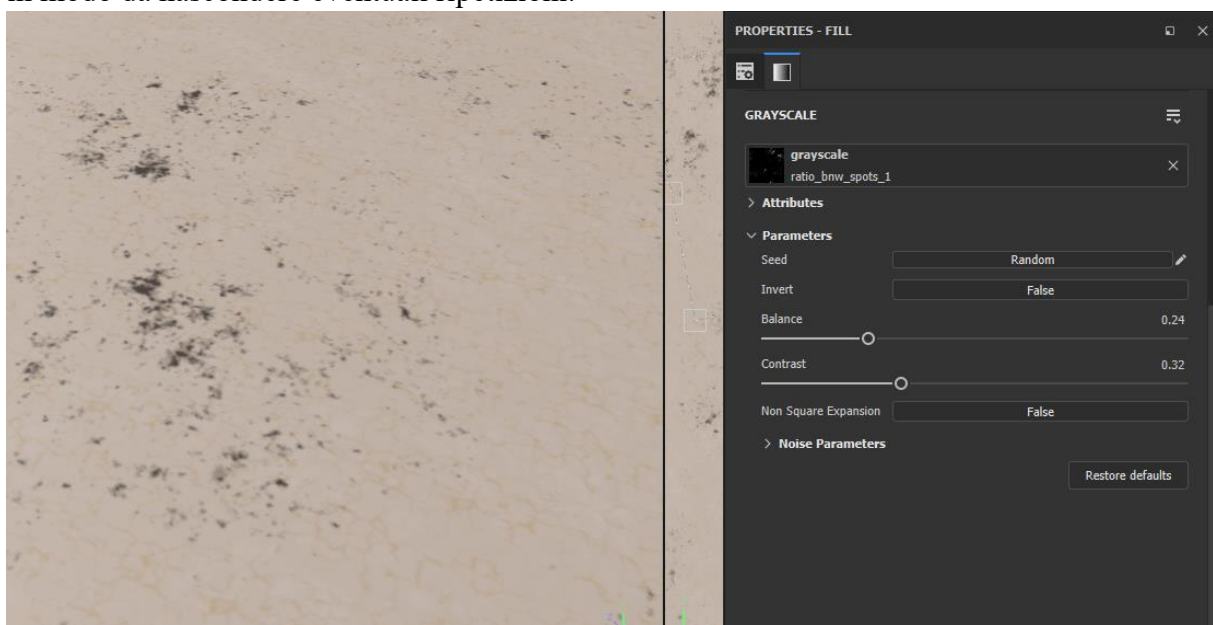


Figura 42: Layer 4 Pavimento

5. Si crea un quinto layer per aggiungere dettagli più fini: in questo caso si sono aggiunti dei piccoli spot nero che coprono l'intero pavimento. Il setup è identico al layer 4 ma con una texture procedurale diversa: ratio gaussian spot.

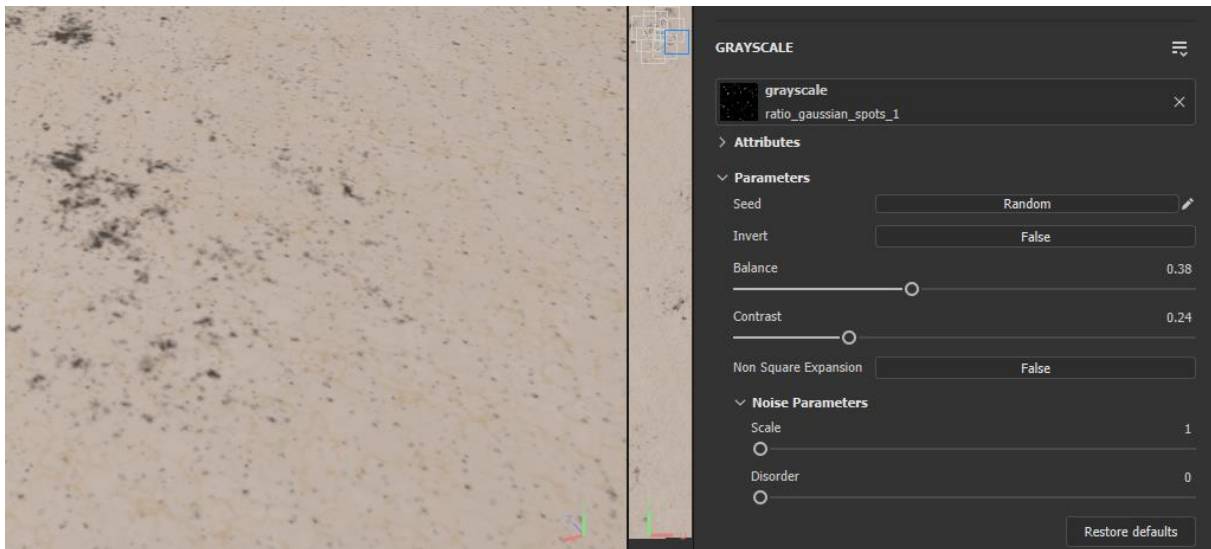


Figura 43: Layer 5 del Pavimento

6. Ora che la texture del marmo è completata bisogna generare le lastre: si crea un sesto layer composto da una componente di colore e da una black mask che prende come input un generatore di mattonelle: i generatori in substance sono delle particolari texture con un pattern determinato, che mette a disposizione vari parametri con sui poterli controllare. Il generatore è molto utile nel creare pavimenti, mura ecc, dove è necessaria una ripetizione precisa e controllabile. Il generatore non offre possibilità di creare mattonelle di una misura specifica, bensì gestisce le dimensioni in base al numero di mattonelle che si vuole avere. Per ottenere una dimensione coerente con il pavimento del museo si sono semplicemente contate il numero di lastre di marmo presenti in orizzontale e in verticale e si sono inseriti quei numeri negli appositi controller. altri parametri utili sono la definizione della dimensione delle varie linee di separazione e la disposizione generale del pattern. Questo è il risultato finale:

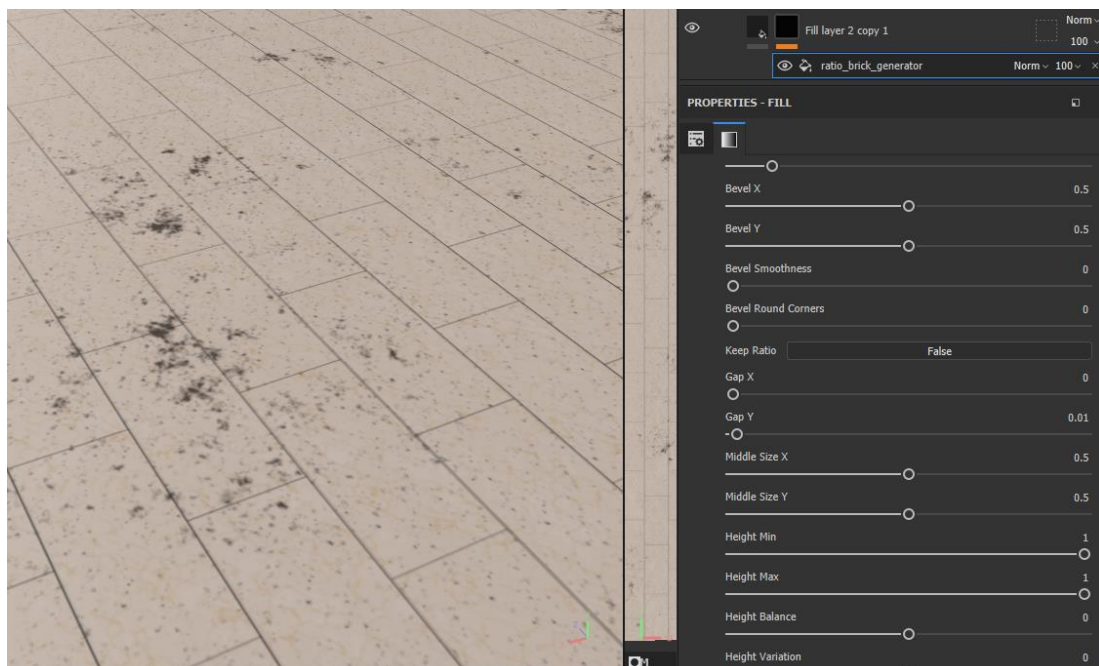


Figura 44: Layer 6 Pavimento - Risultato Finale

7. Per ottenere il bordo di marmo scuro presente attorno alla stanza si è eseguito lo stesso procedimento per la realizzazione della texture del pavimento, andando a ricreare il nuovo materiale:

7.1 Creazione del primo layer colore base, prendendo il colore dalle immagini di riferimento del museo.

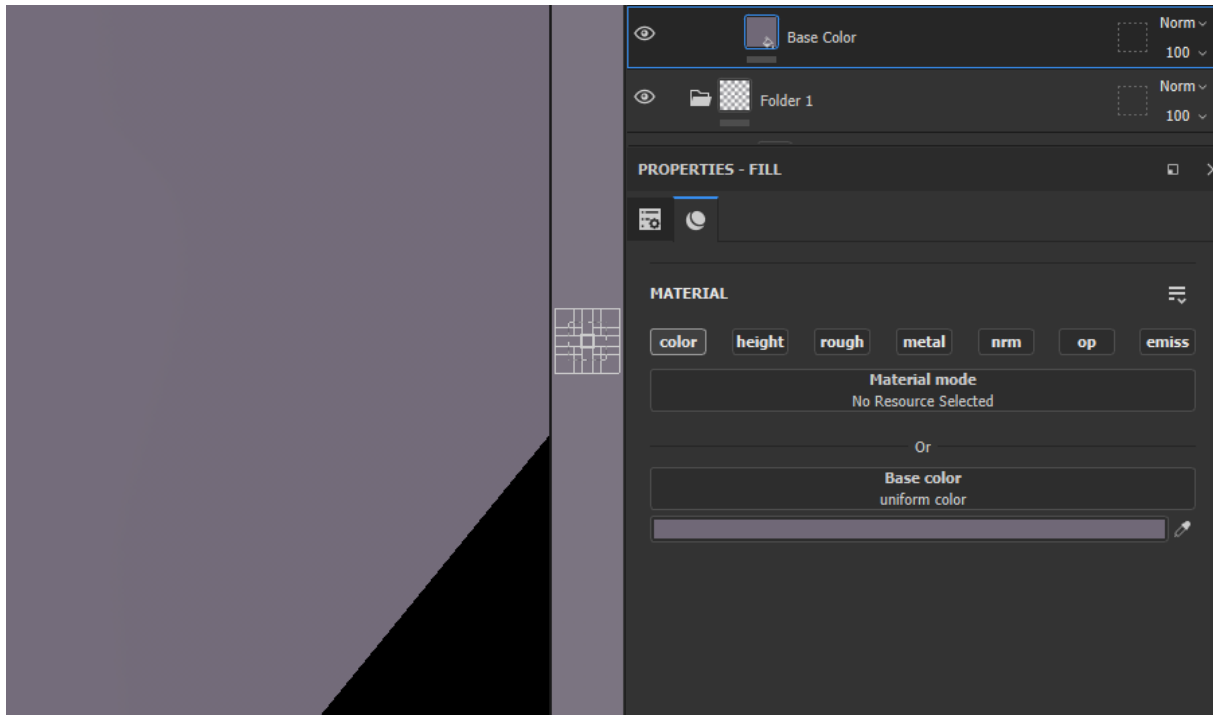


Figura 45: Layer 1 Marmo Scuro

7.2 Creazione del secondo layer composto da colore base + black mask avente come componente una noise texture in scala di grigi: fractal sum base, per aggiungere le variazioni di colore presente nel marmo.

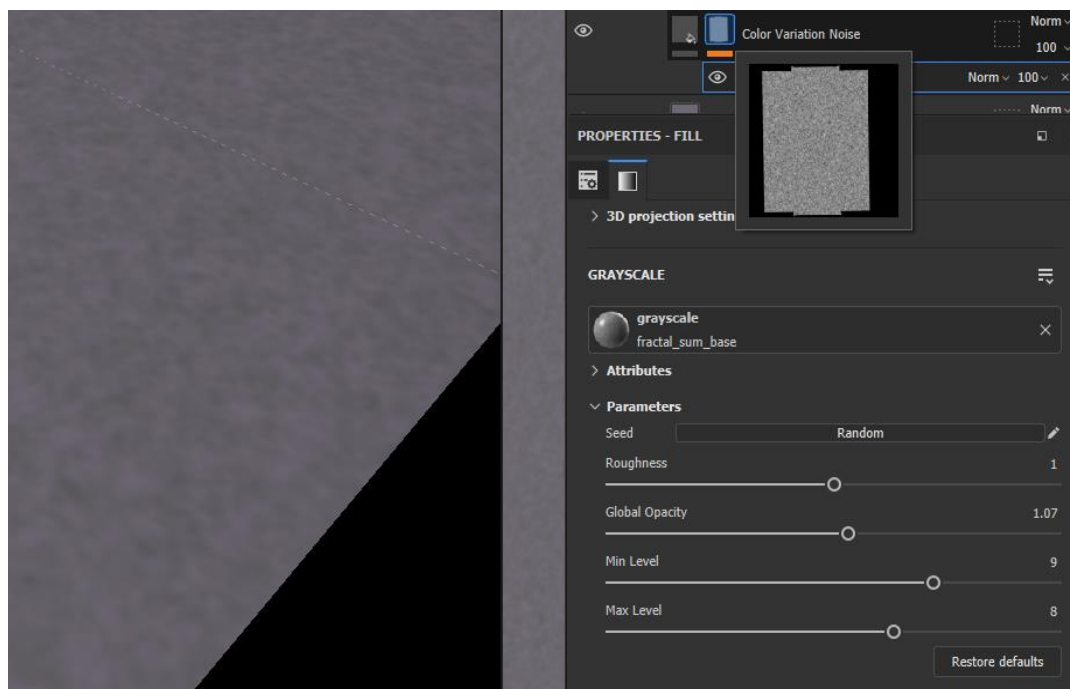


Figura 46: Layer 2 Marmo Scuro con Noise Texture

7.3 Creazione di un terzo layer filtro: questi layer permettono di controllare parametri come contrasto e luminosità dei layer sottostanti. Si è utilizzato per dare più risalto alle texture di rumore applicate in precedenza.

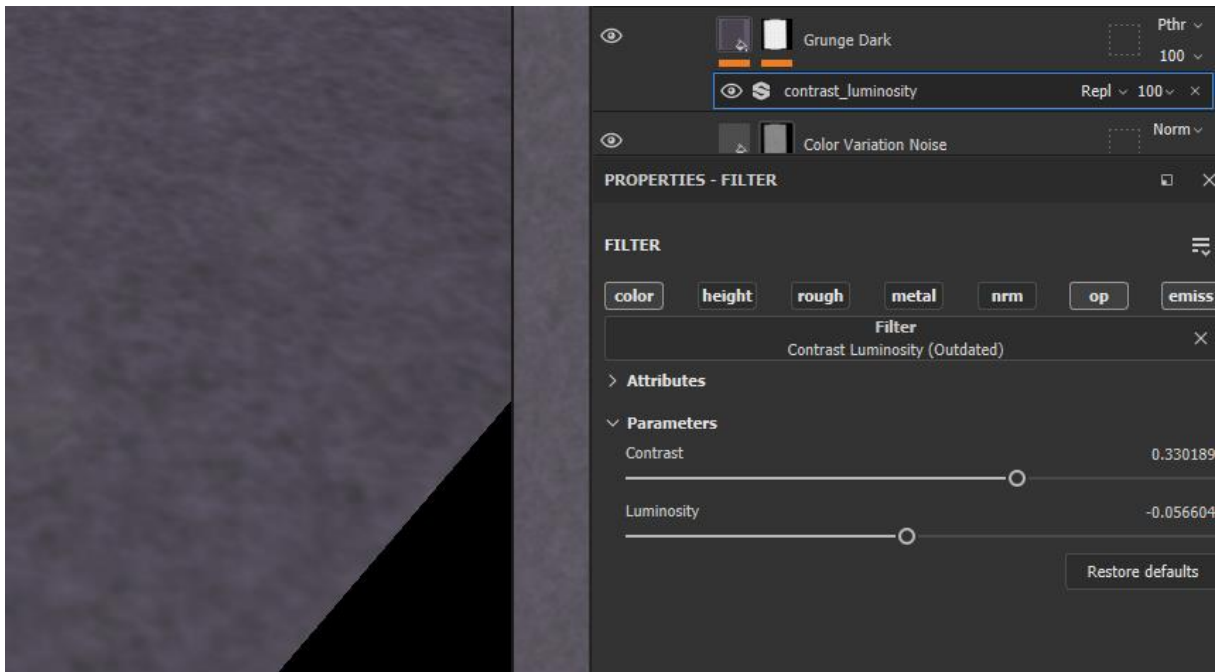


Figura 47: Layer 3 Marmo Scuro Luminosità e Contrasto

7.4 Creazione di un quarto layer per la realizzazione dei piccoli spot bianchi presenti nel materiale di riferimento: anche qui il setup è composto da un colore base e una black mask che ha componente la texture in scala di grigi: dirt_3.

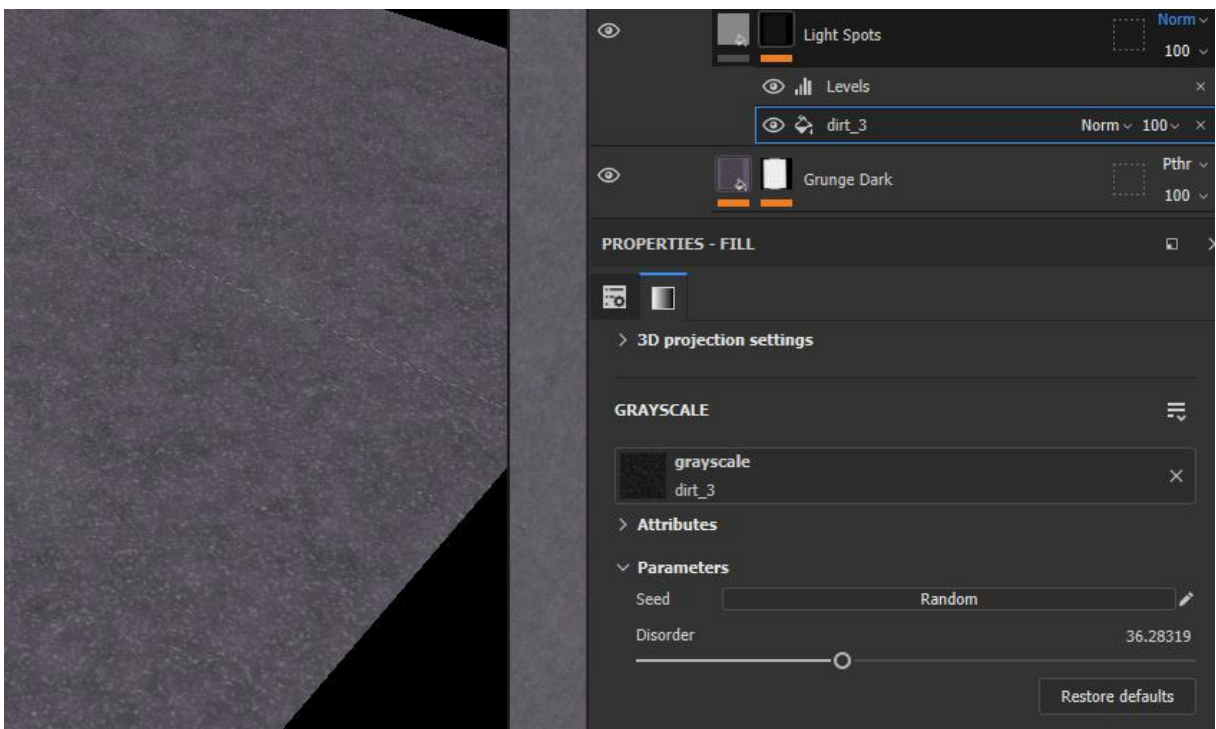


Figura 48: Layer 4 Marmo Scuro con Noise Texture per la realizzazione degli Spot Bianchi

7.5 Creazione di un quinto layer per la realizzazione degli spot neri presenti utilizzando lo stesso setup: colore base + blackmask avente componente la texture in scala di grigi: ratio_gaussian_spots_2.

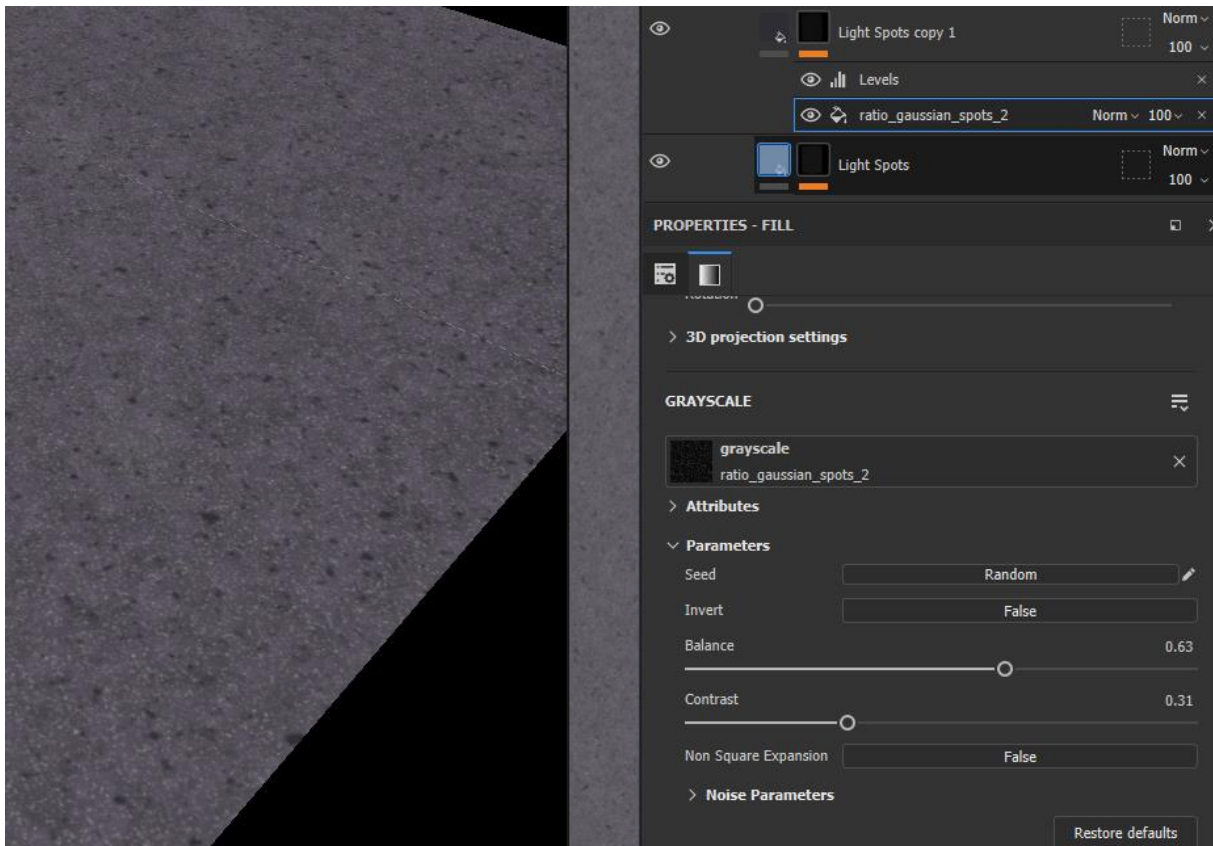


Figura 49: Layer 5 Marmo Scuro con Black Spots

Completata la creazione del materiale, si raggruppano tutti layer e si applica una black mask al nuovo materiale (senza questo passaggio il nuovo materiale coprirà tutto il pavimento). Ora che il setup è pronto possiamo dipingere manualmente sul pavimento le zone dove mostrare il marmo scuro e ricreare il motivo presente sul pavimento, utilizzando un hard brush.

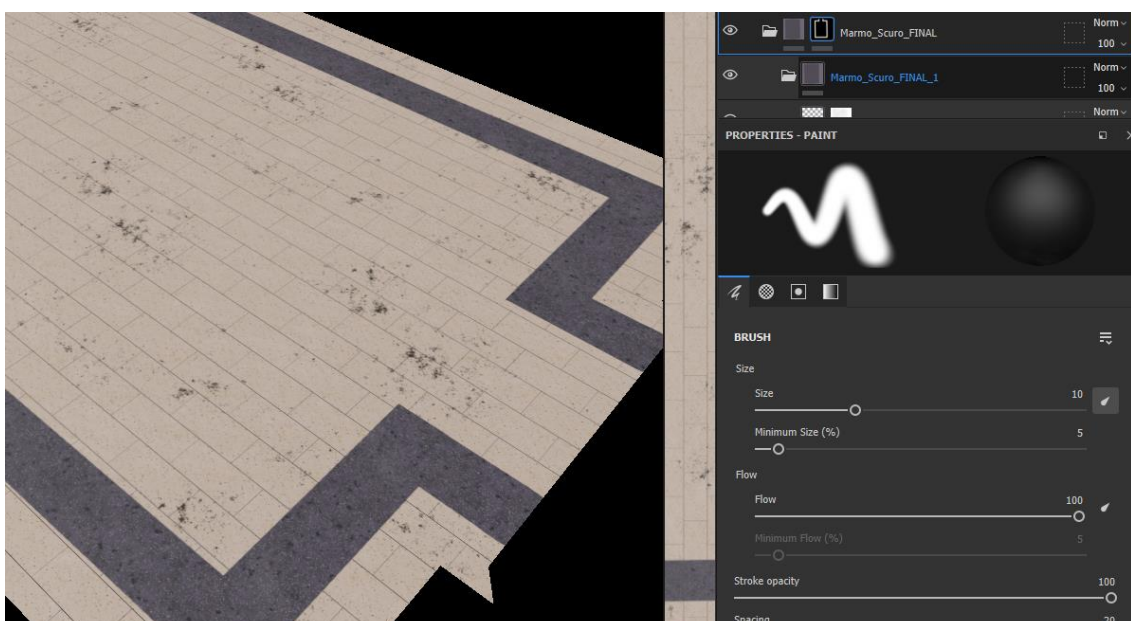


Figura 50: Texture Pavimento Finale

Un accorgimento fatto è stato quello di lasciare il canale roughness attivo soltanto sul layer che ha il colore base del pavimento (layer 1), in questo modo tutti i layer costruiti sopra ereditano tale parametro ed il pavimento avrà la stessa lucidità ovunque.

Come accennato precedentemente, Substance ha un workflow non distruttivo, questo vuol dire i parametri si possono modificare ed adattare a qualsiasi oggetto: sfruttando questa proprietà applichiamo il materiale appena creato anche alle altre porzioni di pavimento (stanza inizio, stanza del sarcofago, e stanza post sarcofago)

Per il pavimento della stanza iniziale si è ruotato il layer generatore di mattonelle di 90° ed è stata realizzata una nuova maschera che continuasse il bordo di marmo scuro, questo per creare un senso di continuità tra i due ambienti. Essendo i pavimenti divisi vi è il problema del punto di incontro delle due texture: se non gestito in maniera ottimale si possono verificare degli artifici grafici: come lastre tagliate a metà nonostante la presenza delle righe create dal generatore. Questo problema si risolve andando a trascinare le lastre affinché una linea non coincida perfettamente con il bordo della texture.

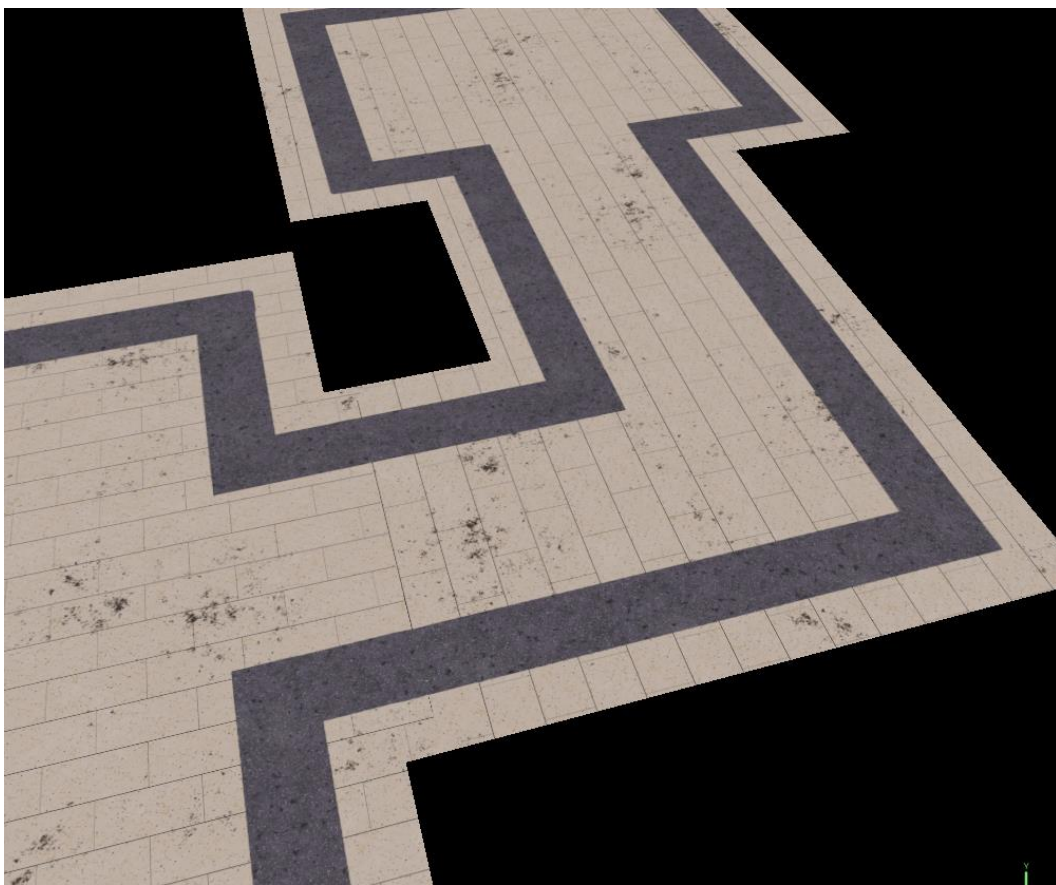


Figura 51: Continuità della texture tra i due Pavimenti

Per il punto di incontro del bordo nero non vi sono praticamente interruzioni evidenti vista la grande quantità di dettagli che si mischiano.

Per quanto riguarda il pavimento della stanza del sarcofago è stato eseguito un passo ulteriore: il pattern delle lastre di marmo presenta un motivo particolare, impossibile da ottenere con il generatore procedurale. La soluzione è stata quella di dipingere a mano le varie linee riproducendo la trama: per fare ciò si è creata in questo caso una white mask che permettesse di non mostrare le linee disegnate dal generatore, isolando così la stanza dal sarcofago; successivamente è stato creato un painting layer sul quale si sono dipinte le varie linee.

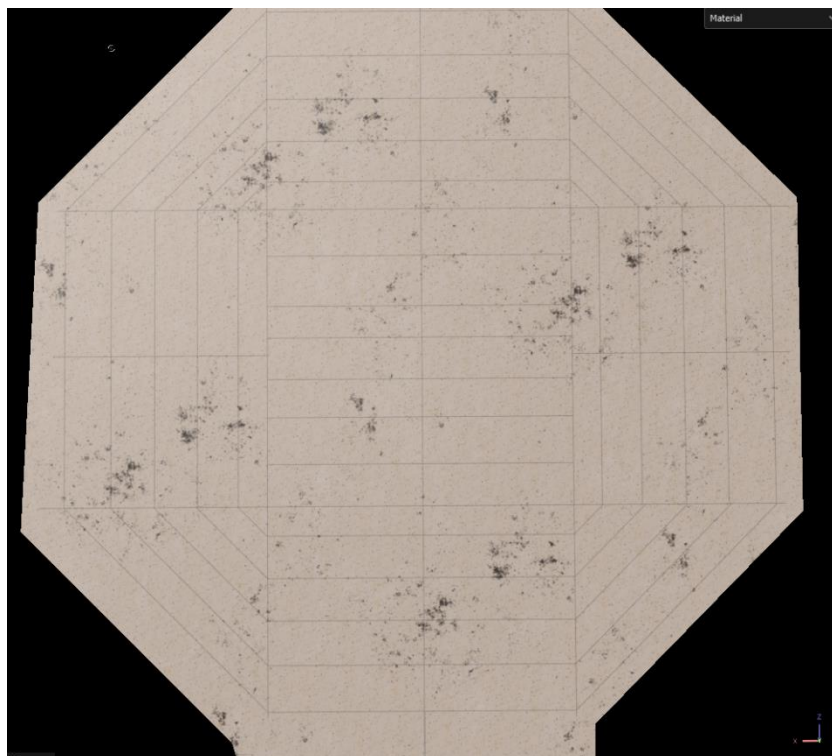


Figura 53: Dettaglio Pattern Stanza Sarcofago

Infine, per la parte di pavimento successiva il procedimento è stato analogo a quello della stanza iniziale e la stanza delle bacheche per ottenere il bordo di marmo nero.

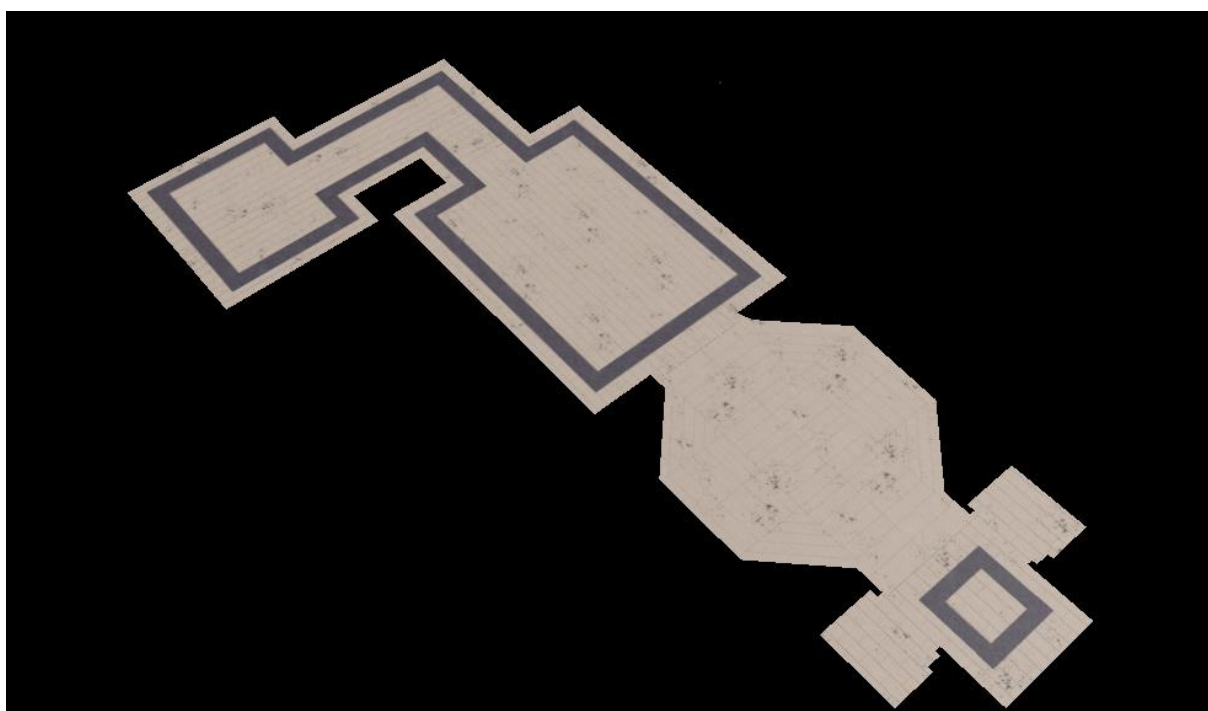


Figura 52: Risultato Finale Pavimento Museo

Tutte le tecniche viste nella realizzazione del pavimento sono state impiegate per la realizzazione di tutti gli altri materiali dell'ambiente: muri, scalini, corrimani, battiscopa, porte, ottenendo l'ambiente finale.



Figura 55: Ambiente Completo Texturizzato

Come per il Sarcofago, lo step finale è stato quello di esportazione delle texture utilizzando il preset creato per Unity: la risoluzione scelta per l'esportazione è stata di 4k per le texture dei pavimenti visto il grand numero di dettagli e sempre presente nel campo visivo dell'utente, 2k per le pareti: principalmente è un colore unico con qualche dettaglio sporadico che non necessita di grande risoluzione. 2k per i vari battiscopa, 2k per gli scalini presenti dopo la stanza del sarcofago: seppure non sia una zona accessibile è comunque ben visibile ed è abbastanza vicina, una texture a questa risoluzione garantisce una buona resa. 1k per le porte, il corrimano, pavimento e mura della stanza post sarcofago: sono zone non accessibile; dunque, è inutile generare delle texture in alta risoluzione e consumare risorse.

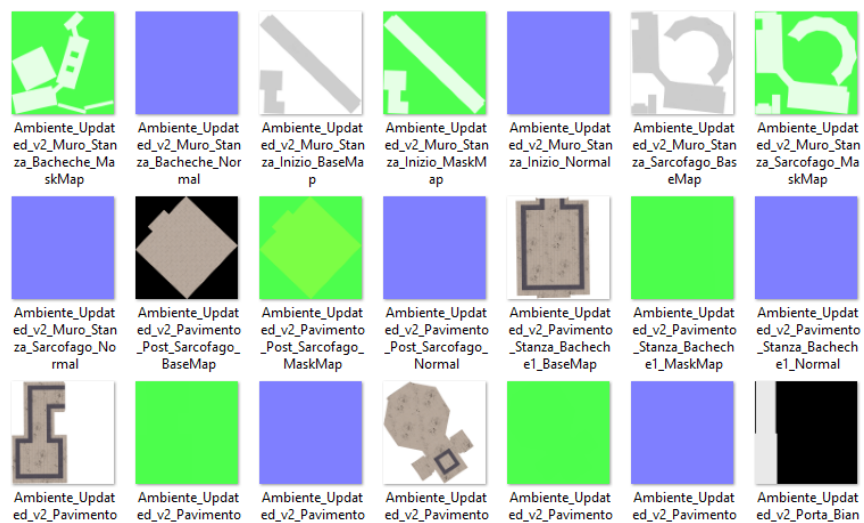


Figura 54: Esempio di Texture Exporting

3.3 Realizzazione degli oggetti presenti all'interno dell'ambiente.

Avendo pronti il sarcofago e l'ambiente, con modelli 3d e texture, si passa alla realizzazione di tutti gli oggetti che andranno inseriti al suo interno. Ogni oggetto verrà modellato e importato singolarmente nel game engine per offrire la libertà di poter essere modificati (spostati, rimossi, ecc) in futuro.

Verranno applicate tecniche di modellazione derivate dalla teoria dell'hard surface modelling, ottimizzando la topologia per l'implementazione in VR.

1. Bacheche: vi sono 5 tipologie di bacheche presenti all'interno dell'ambiente, diverse per dimensioni e forme: piccole, grandi, molto grandi, angolari ed infine la bacheca ospitante il Sarcofago. Per non essere ripetitivi se ne illustrerà il processo di modellazione di una tipologia soltanto: le bacheche piccole.



Figura 56: Riferimento Bacheche Piccole

Per modellare le bacheche si è utilizzata la piantina che conteneva dimensione delle bacheche + posizione nello spazio, assieme alle immagini di riferimento del museo per capirne l'altezza e i vari materiali.

Partendo dal software di modellazione Maya, si è creato un image plane da usare come riferimento: al suo interno è stato caricato il file della piantina opportunamente scalato per essere coerente con le misure reali. Lo step successivo è stato quello di analizzare e avere chiari gli elementi che costituiscono la bacheca.

Generalmente, quando si comincia a modellare un oggetto in 3d, la prima operazione da fare è il 'blockout' dell'oggetto: ovvero ricostruirlo utilizzando soltanto forme primitive semplici; per la bacheca si sono utilizzati dei cubi opportunamente scalati e si è ricostruita la forma. Si sono riconosciute quattro sezioni principali: la struttura in alluminio, il podio in plastica, i vetri, ed uno specchio sulla parte superiore.

Completato il blockout rispettando le dimensioni della piantina si può procedere con l'aggiunta di dettagli ai blocchi geometrici: essendo la bacheca una struttura relativamente semplice sono bastate semplici operazioni di estrusione e beveling per ottenere un buon risultato.

L'operazione di estrusione parte da un elemento 2d spostandolo avanti o indietro lungo una direzione per generare una forma in 3d.

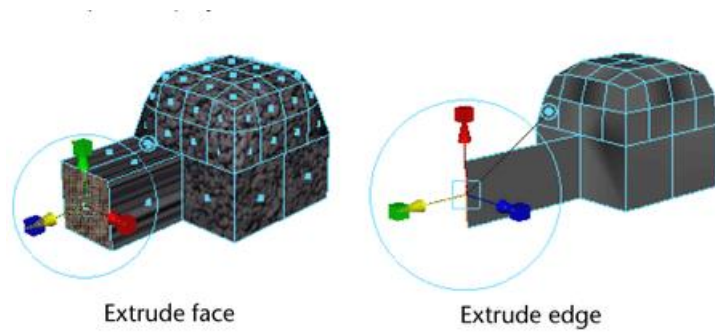


Figura 57: Esempio di Estrusione

L'operazione di beveling invece agisce sugli spigoli: selezionato uno spigolo viene espanso in una nuova faccia. Vi sono diversi parametri che controllano questa operazione come direzione del bevel, quanti segmenti deve generare e se deve essere inclinato o meno. Questa operazione si rivela fondamentale lungo i bordi degli oggetti: con un bevel si ottengono spigoli leggermente smussati permettendo il rimbalzo della luce come succede nella realtà alzando di molto la qualità finale: ogni oggetto ha un leggero bevel.

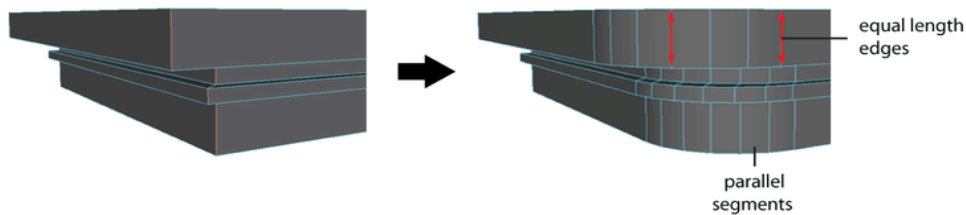


Figura 58: Esempio Bevel

Finita l'operazione di detailing si sono raggruppate le varie forme per materiale, in particolare: alluminio, plastica, vetro e specchio; i vari gruppi sono stati assegnati ad un elemento parent chiamato bacheca_piccola: questo permette di lavorare sull'intera bacheca operando sull'elemento parent e di poter modificare i singoli elementi andando a lavorare sui vari children.

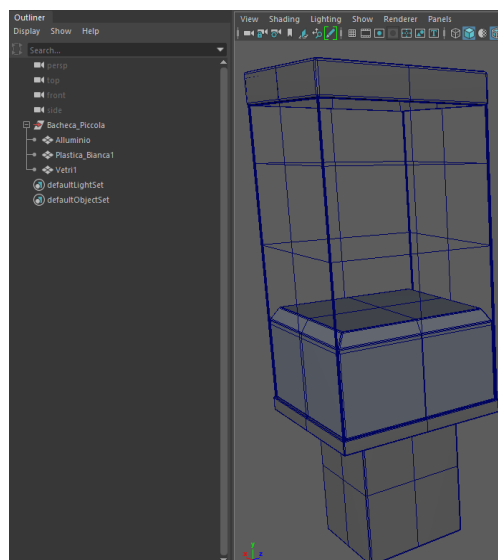


Figura 59: Modello Bacheca Piccola

In seguito, si sono assegnati i vari id_material e generate le UV set con la stessa metodologia utilizzata per il Sarcofago, ed esportato il modello in formato .fbx per essere texturizzato in substance ed in seguito importato in Unity.

Il processo di texturizzazione utilizza gli stessi principi visti precedentemente per l'ambiente, con l'aggiunta in questo caso di materiali metallici e vetrosi.

Per la realizzazione della struttura in alluminio si sono eseguiti seguenti passaggi:

1: si seleziona l'id_material relativo all'alluminio e si crea un layer a cui è stato attribuito il colore base e i canali di roughness, metallicness e normal: il primo canale indica la ruvidità del materiale, il secondo canale ne indica il comportamento metallico mentre il canale di normal gestisce il comportamento delle normali della superficie interessata, garantendo un corretto rimbalzo dei raggi luminosi. Per ottenere un buon materiale metallico bisogna giocare con i parametri del canale roughness e metallic, confrontandolo continuamente con le immagini di reference del museo.

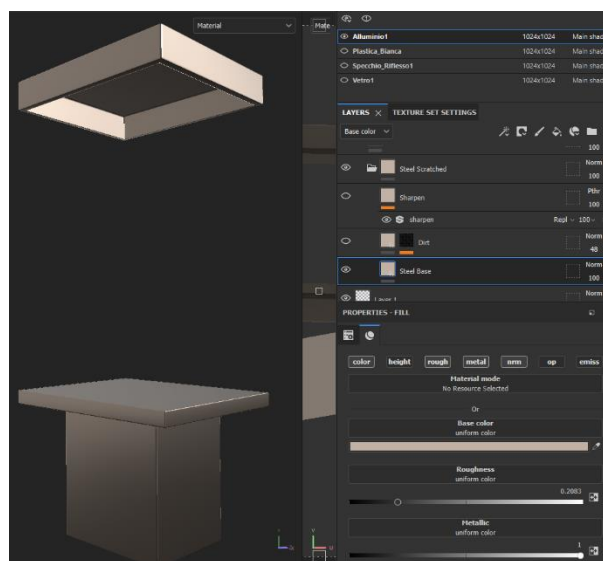


Figura 60: Materiale Metallico Base Bacheca

Successivamente si crea un nuovo layer composto dalla componente di colore e roughness e da una blackmask con una texture a scala di grigi per generare i dettagli della superficie: la texture utilizzata è la grunge_brushed_dust, che emula molto bene le imperfezioni presenti sulle varie bacheche.

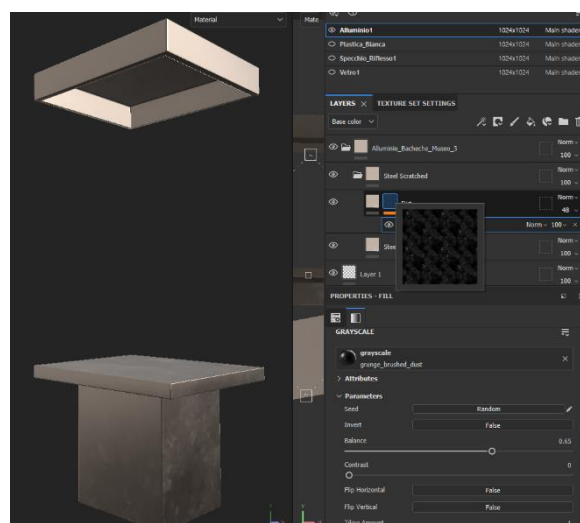


Figura 61: Materiale Metallico Finale Bacheca

Il canale di roughness è necessario perché le imperfezioni hanno un indice diverso di ruvidità rispetto al metallo base.

2: Si seleziona l'id_material della plastica bianca e si crea un layer a cui è stato attribuito il colore base ed il canale di roughness. Il podio di plastica non presenta altri dettagli visibili, quindi, non sono state necessarie ulteriori operazioni.

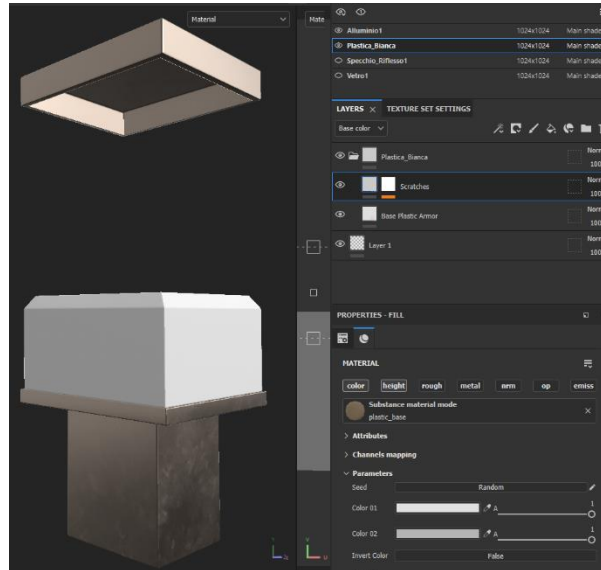


Figura 62: Materiale Plastica Bachecca Piccola

3. Si seleziona l'id_material relativo al vetro e si crea un layer base avente come canali _colore base, roughness, metallic e opacity. Per ottenere un buon materiale vetroso è necessario avere un indice di ruvidità nullo e un comportamento metallico massimo: questo crea uno specchio garantendo le corrette riflessioni; infine, con il canale di opacità si gestisce la trasparenza del vetro: per dare volume e consistenza al vetro l'indice di opacità efficace si aggira attorno ai valori dello 0.09 (su una scala da 0 a 1). Per quanto riguarda il colore, si osserva il miglior comportamento nelle riflessioni selezionando un grigio non troppo scuro. Altri colori modificano anche il colore delle riflessioni non rispettando le immagini di reference del museo. Si crea successivamente un nuovo layer al quale è stato attribuito un canale colore base e una black mask utilizzando una texture di polvere per aggiungere dettagli e imperfezioni sulla superficie di vetro.

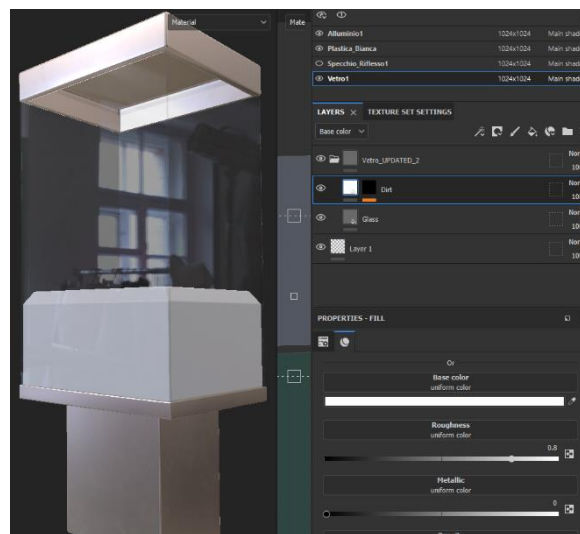


Figura 63: Materiale Vetro con dettagli Riflesso Bachecca Piccola

4. Si seleziona id_material relativo allo specchio superiore e crea un layer al quale viene assegnato lo stesso materiale del vetro creato precedentemente: per ottenere uno specchio basta assegnare il valore massimo al canale di opacità. Il colore base grigio garantisce un riflesso corretto.

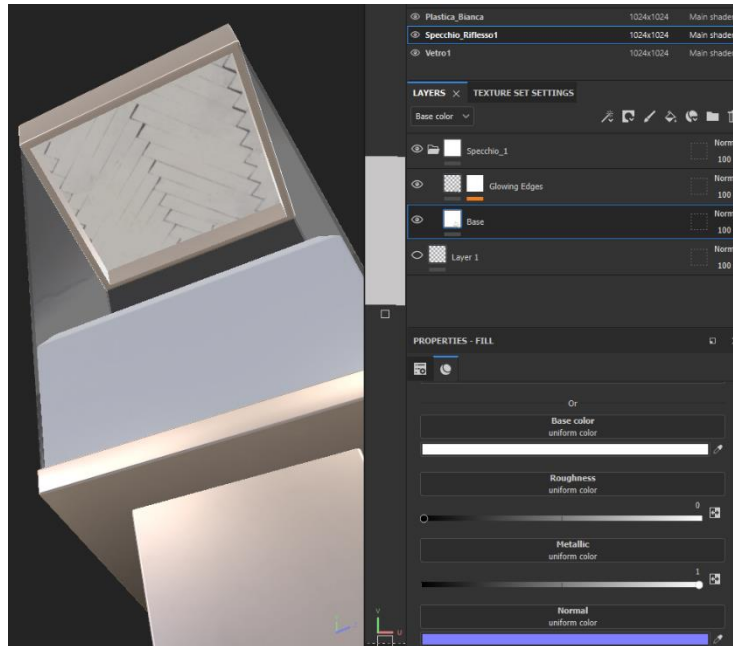


Figura 64: Specchio Superiore Bachecca Piccola

Ottenuto un risultato soddisfacente si può procedere all'esportazione delle texture come avvenuto per l'ambiente e per il sarcofago: per ogni bachecca sono state esportate delle texture in 2k per mantenere un alto livello di dettaglio.

I materiali creati sono stati salvati e assegnati a tutte le altre bacheche modellate, garantendo un risultato uniforme e coerente tra i vari elementi.

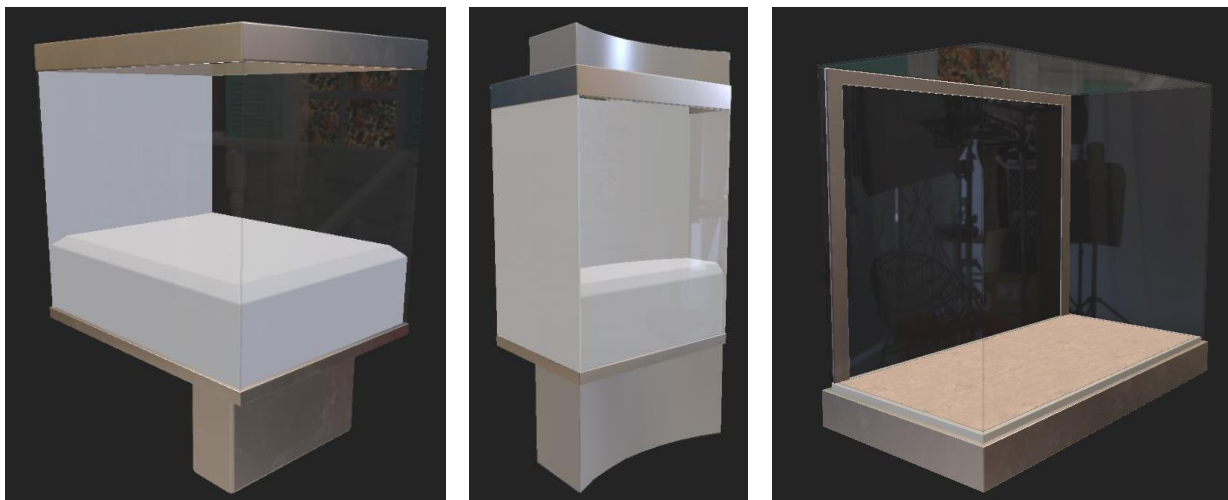


Figura 65: Risultato delle altre bacheche completate

La modellazione dei vasi è stata l'unica operazione che non disponeva di misure precise e immagini dettagliate delle varie trame, per cui si è dovuto procedere con la modellazione di ogni singolo vaso confrontandolo il più possibile con le immagini di riferimento del museo e modificando le dimensioni in modo che ricreasse il più possibile i vari rapporti di grandezza visibili nelle immagini.



Figura 66: Foto Reference dei vasi presenti al Museo

I vasi sono elementi che l'utente può vedere da vicino essendo esposti nelle bacheche; quindi, in fase di modellazione bisogna utilizzare numero minimo di poligoni affinché la superficie risulti rotonda, questo sempre per garantire buone prestazioni in fase di Runtime dell'esperienza.

Per modellare i vasi si è sempre partito dalla figura primitiva del cilindro, andando a scalare varie circonferenze per dare la forma desiderata.

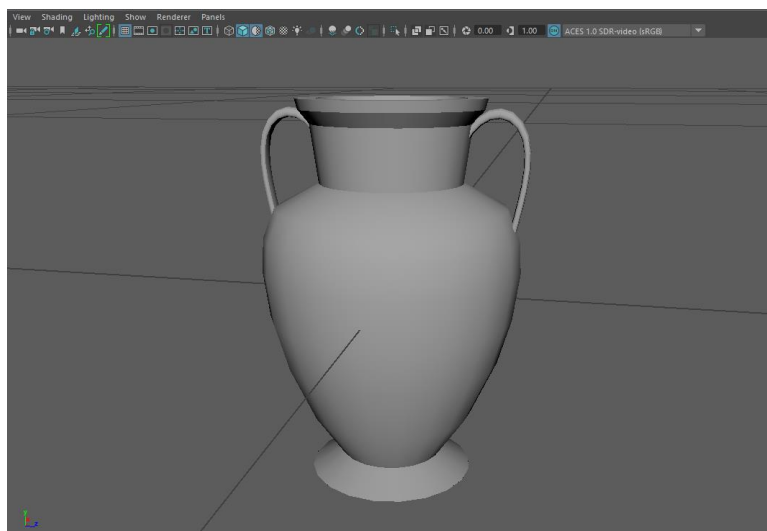


Figura 67: Esempio Modello di un Vaso

Le maniglie invece si sono modellate utilizzando curve: le curve sono un ottimo strumento per creare linee morbide potendo agire su un numero arbitrario di controlli. Una volta ottenuta la forma desiderata si utilizza la funzione swipe che crea attorno alla linea curvilinea una superficie 3d chiusa modificabile tramite vari parametri

Si assegnano successivamente gli id_material e se ne realizza le UV maps.

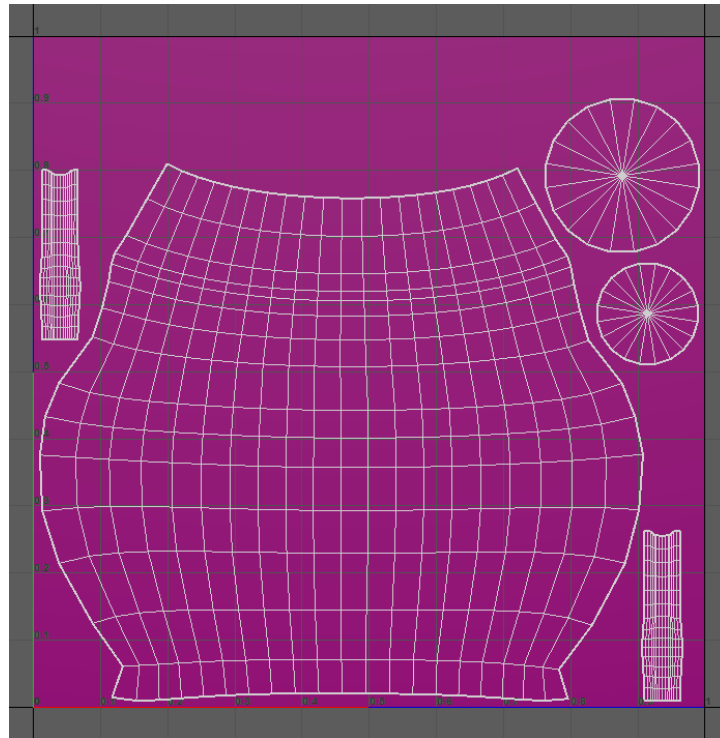


Figura 68: UV map del Vaso

Si esporta l'oggetto in formato .fbx per la texturizzazione in Substance

Si è creato un primo layer con il materiale base terracotta campionando il colore di sfondo dai vasi nelle immagini di reference; successivamente si è creato un secondo layer con colore base dei disegni presenti sui vasi a cui è stata assegnata un black mask; si è tenuto attivo soltanto il canale colore per il secondo layer per ereditare le caratteristiche di materiale dal primo layer. Questo setup è stato applicato a tutti i vasi intervenendo soltanto sui colori.



Figura 69: Vaso con Materiale Base

Substance mette a disposizione in fase di pittura un comodo strumento di simmetria radiale: questa simmetria funziona molto bene per oggetti cilindrici, in questo caso vasi, permettendo di disegnare un pattern che verrà ripetuto attorno ad esso in base a quanto necessario. Utilizzando questa funzione è stato possibile ricreare la gran parte dei dettagli semplici visibili dalle immagini di reference.

Utilizzando lo strumento di simmetria radiale si sono dipinti i vari disegni visibili.

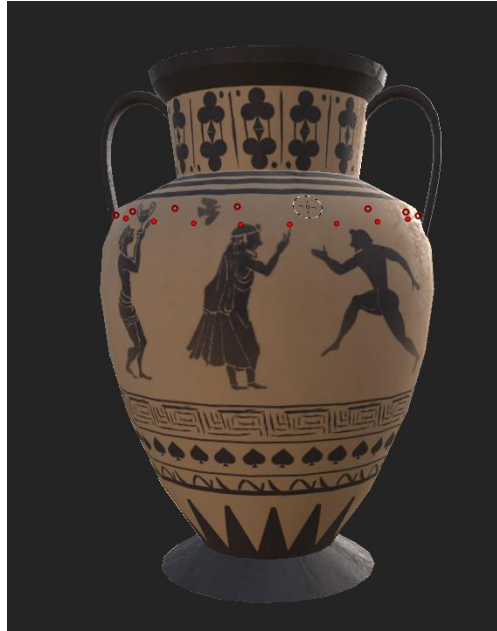


Figura 70: Strumento di Simmetria Radiale Attivato

Per quanto riguarda le parti di disegno più complicate e caratteristiche di ciascun vaso non è stato possibile ricopiare fedelmente tali soggetti: si è quindi fatta una ricerca per recuperare quanti più disegni etruschi possibili da trasformare in elementi alpha. Gli alpha sono delle immagini in bianco e nero che funzionano come maschere, mostrando o nascondendo colori e materiali. In substance le maschere alpha devono avere un rapporto di aspetto pari a 1:1 e devono essere in scala di grigi; è stato quindi necessario modificare le immagini trovate per rispettare questi parametri utilizzando photoshop.



Figura 71: Applicazioni delle figure con Alpha Mask

Importati i vari alpha in substance si sono potuti utilizzare per aggiungere figure più complesse, riempiendo le zone opportune.

Infine, si procede con l'export delle texture utilizzando il preset per Unity: la risoluzione utilizzata è stata di 2k per la maggior parte dei vasi grandi, scendendo a 1k per quelli piccoli dove i dettagli non sono visibili.

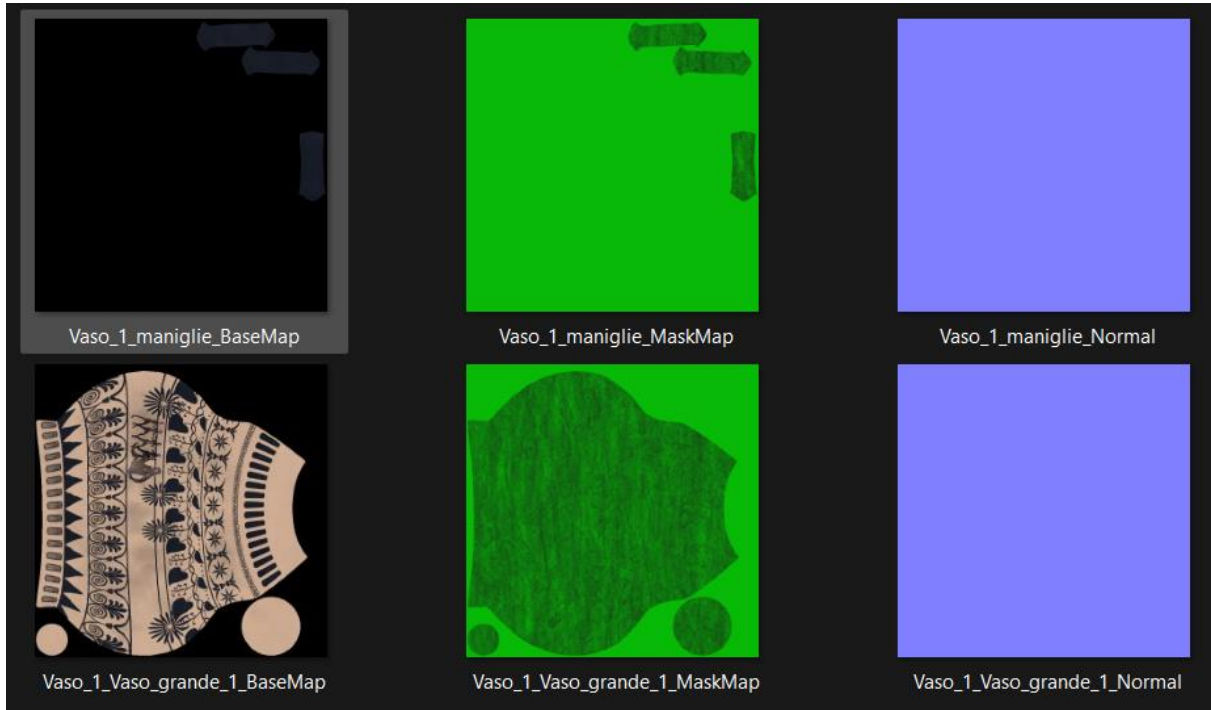


Figura 72: Texture esportate per il Vaso

Questo workflow è stato ripetuto per ogni vaso visibile dentro l'esperienza.

Gli oggetti restanti sono stati modellati e texturizzati utilizzando tutte le tecniche ed i workflow visti in precedenza, di seguito alcuni risultati.

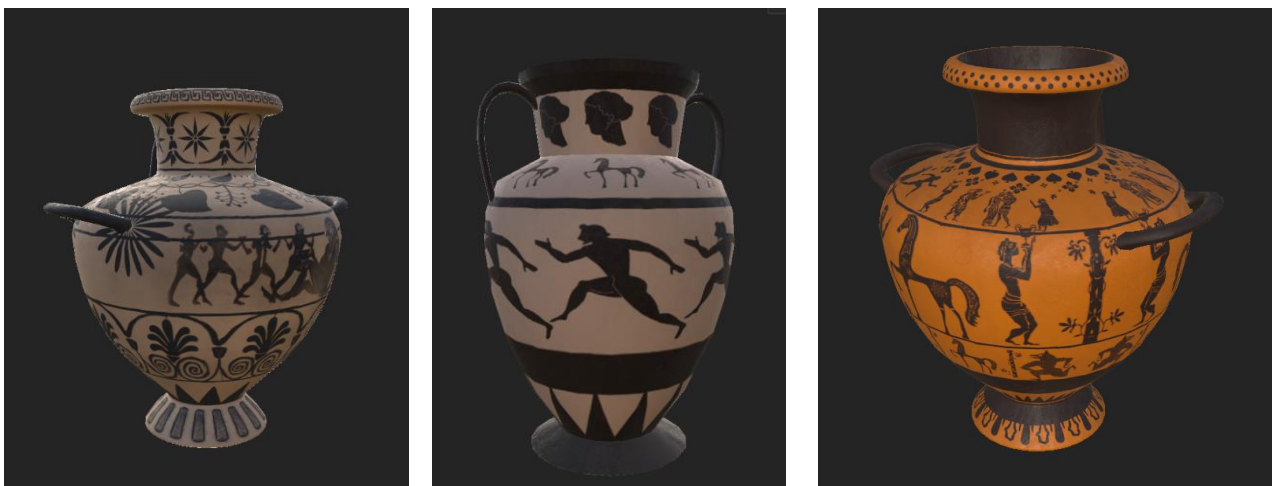


Figura 73: Esempi Vasi Texturizzati

3.4 Implementazione in Unity

Completata la modellazione e texturizzazione di ogni elemento, si può procedere alla creazione dell'ambiente nel game engine Unity.

Un Game Engine (motore grafico) è un software framework dedicato alla creazione e sviluppo di videogiochi e applicazioni. Un Game Engine mette a disposizione svariati plug-in di supporto e librerie per permettere agli sviluppatori di creare progetti. Ogni game engine inoltre ha il proprio linguaggio di programmazione con il quale è possibile eseguire le più svariati azioni tramite scripts, in Unity il linguaggio utilizzato è C#.

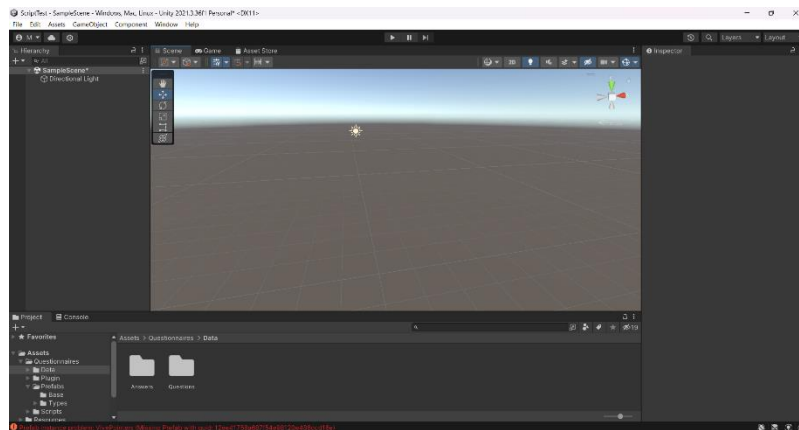


Figura 74: Viewport Base di Unity

Il primo step da fare prima di eseguire qualsiasi operazione è quello di creare il progetto e scegliere la render pipeline che si vuole utilizzare.

La render pipeline è ciò che prende gli oggetti posizionati in una determinata scena e li visualizza sullo schermo. Essa funziona in 3 fasi:

1. Culling: la pipeline decide quale oggetto della scena mostrare: rimuovendo gli oggetti non presenti nella vista della camera o coperti da altri oggetti.
2. Rendering: la pipeline disegna in un pixel buffer gli oggetti con i giusti parametri di colore e luminosità.
3. Post Processing: la pipeline modifica il contenuto dei pixel buffer per mostrare il frame finale applicando vari effetti: bloom, color grading e profondità di campo. [18]

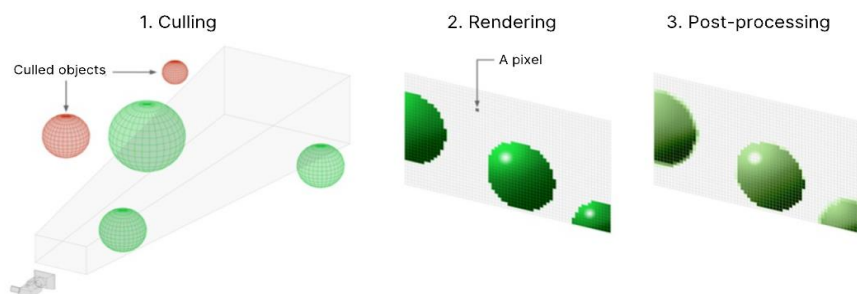


Figura 75: 3 Fasi di una Render Pipeline

Unity mette a disposizione 3 diverse pipeline di rendering:

1. Built-In Render Pipeline: è la pipeline che viene utilizzata di default con opzioni limitate di personalizzazione.



Figura 76: resa Grafica con la Built In Render Pipeline

2. Universal Render Pipeline (URP): è una pipeline scriptabile e altamente personalizzabile, che permette di generare applicazioni dalla grafica scalabile per la maggior parte dei dispositivi.



Figura 77: resa grafica con la URP

3. High Definition Render Pipeline (HDRP): anch'essa un pipeline scriptabile e personalizzabile, ma che permette di ottenere una resa grafica molto elevata destinata a dispositivi molto performanti.

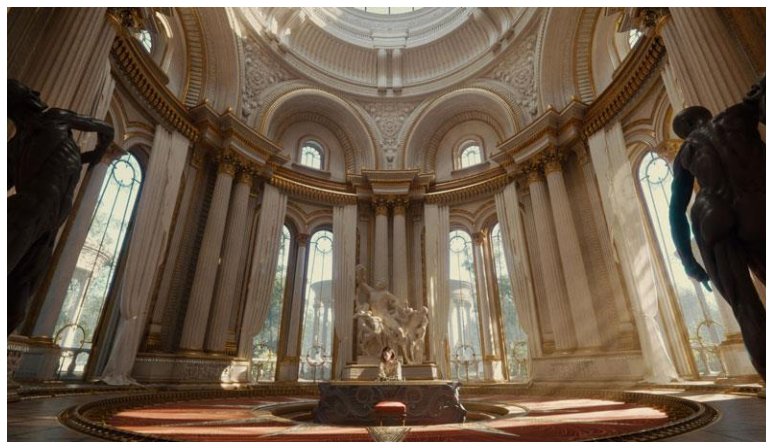


Figura 78: Resa grafica con la HDRP

Per il progetto EtruVR si è scelto di utilizzare la HDRP per ottenere il massimo dalla resa grafica: infatti questa pipeline usa un approccio all'illuminazione e ai materiali basato su modelli fisici, simulando efficacemente il comportamento reale. Per utilizzare questa pipeline è necessario installarla dall'apposta sezione dei plug-in

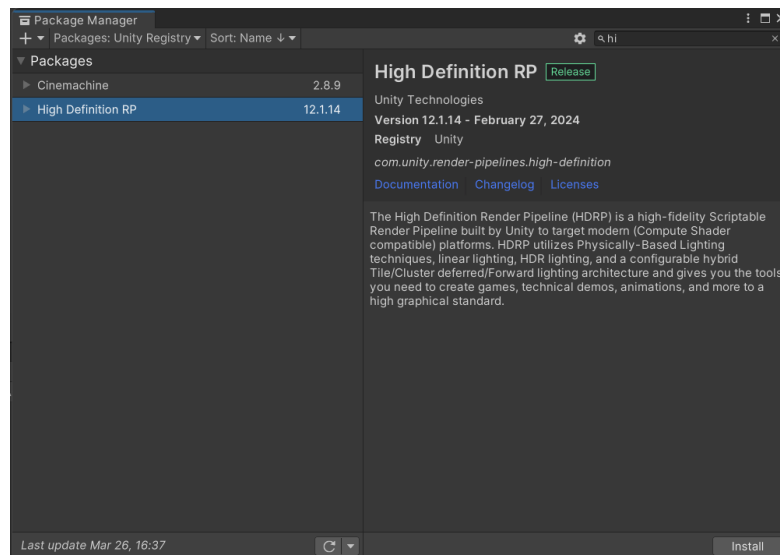


Figura 79: Installazione del Pacchetto relativo alla HDRP

Una volta installata la pipeline apparirà un wizard che installerà e creerà automaticamente tutti i profili necessari affinché la pipeline funzioni. I profili sono file di impostazioni che dettano le regole di visualizzazione; se ne possono creare diversi con diversi settaggi per ottenere rese grafiche differenti.

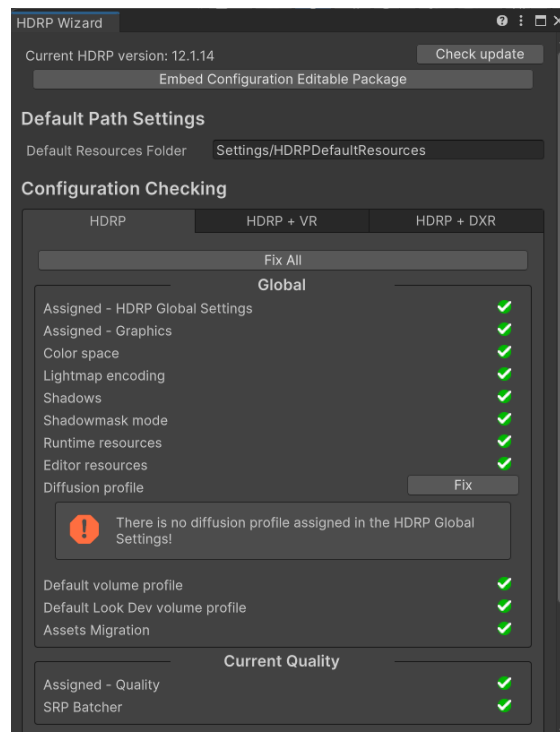


Figura 80: Wizard HDRP che crea in automatico i file mancanti

Terminate le operazioni del wizard si potrà cominciare a lavorare sulla scena: una scena non è altro che un 'livello': si possono creare diverse scene nello stesso progetto ognuna con i propri oggetti e impostazioni. (un videogioco avrà per esempio una scena per ogni singolo livello o zona)

Per cominciare a popolare la scena bisogna importare i modelli e le texture realizzate precedentemente: in questa fase è consigliato caricare i vari oggetti in cartelle dedicate per mantenere ordinato il tutto. L'importazione può essere svolta con un semplice drag and drop del file .fbx del modello nella directory dedicata. Quando si importa un oggetto non si crea un collegamento al file esistente nella cartella di origine, bensì Unity ne crea una copia posizionata nella cartella master del progetto.

Importato l'oggetto lo si può posizionare nella scena: una volta posizionato l'oggetto sarà visibile nella viewport e nella hierarchy a sinistra, che mostra l'elenco degli oggetti presenti nella scena.



Figura 81: Oggetto importato in Unity

Bisogna in questa fase stare attenti alla scala dell'oggetto importato: quando si esporta il modello dal software di modellazione è possibile scegliere le unità di misura con il quale esso viene esportato (ad esempio m o cm). L'unità di misura di default in Unity è il metro, e avere un .fbx importato con un le unità sbagliate può creare problemi di scala causando artifici durante la fase di rendering.

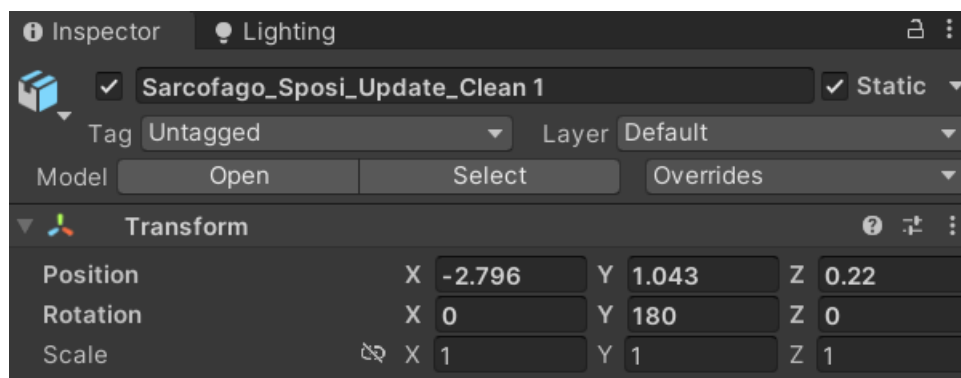


Figura 82: Scale Corrette di importazione

Confermato il corretto rapporto di scala bisogna assegnare le texture precedentemente create al modello: per fare ciò bisogna creare dei materiali in Unity da assegnare ai vari oggetti: per vedere quanti materiali sono necessari si può selezionare il modello 3d e aprire la tab Materials. Si nota che sono gli stessi id_materials creati per la texturizzazione in Substance. Si creano quindi i vari materiali da assegnare agli id_materials.

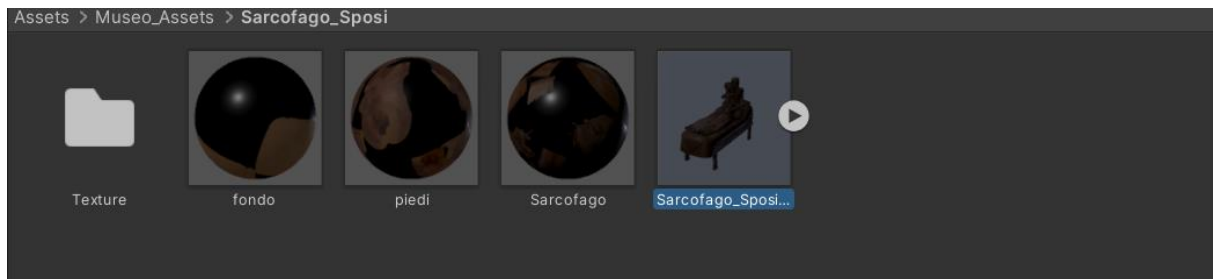


Figura 83: Materiali creati in Unity

Una volta creato il materiale è possibile assegnargli le varie texture create: per fare ciò è necessario importare le texture nel progetto di unity come si è fatto per il file .fbx. Anche in questo caso è consigliato mettere le texture in apposite cartelle nella stessa directory del file dell'oggetto per mantenere il tutto ordinato.

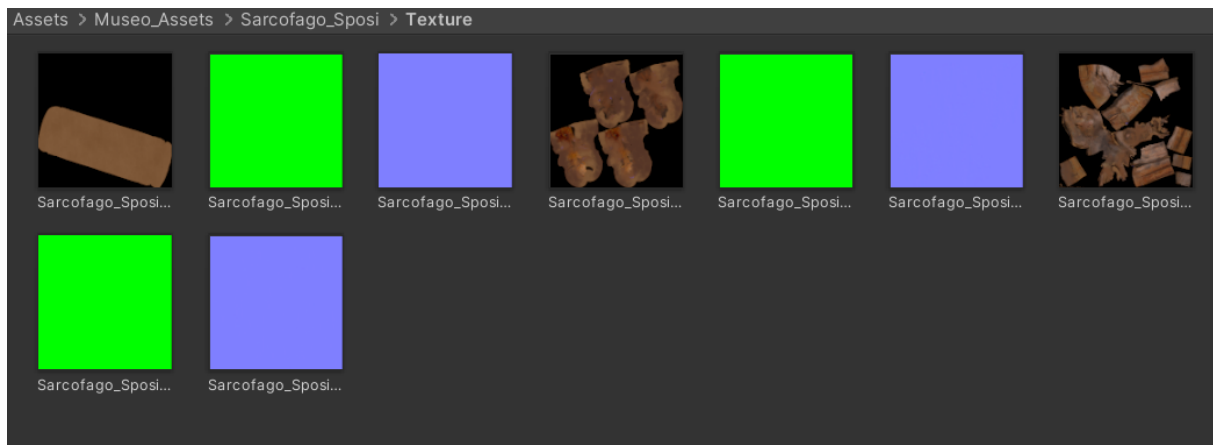


Figura 84: Textures:importate in Unity

Durante l'importazione delle texture bisogna fare attenzione alle seguenti cose: tutte le texture vengono importate e compresse di default a 1k se non precedentemente specificato nelle preferenze del progetto. Se le texture importate vengono compresse bisogna selezionarle e cambiare risoluzione e modalità di compressione nell'apposita sezione.

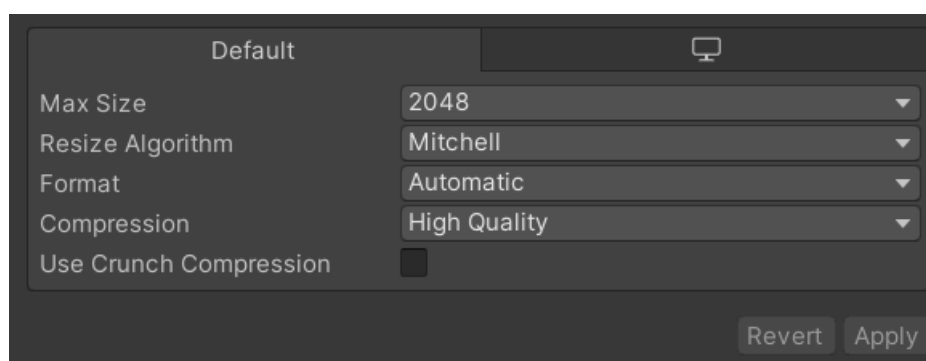


Figura 85: Settings per la corretta risoluzione delle textures

L'ultimo accorgimento da fare durante l'operazione di importazione delle texture è la definizione delle normal maps: unity tratta immagini importate allo stesso modo (immagini 2D) e se non diversamente specificato assegnando una normal map nel formato immagine 2D causa errori nella render pipeline (trasparenze e riflessioni non corrette, parti non illuminate ecc). Per risolvere il problema bisogna selezionare la normal map e dal menu a tendina in alto definire il file come normal map.

Importate le varie texture è possibile assegnarle ai vari materiali: Substance ha esportato 3 texture per ogni materiale: base color, metallic map e normali, per assegnarle basta trascinarle sull'apposita sezione nel materiale. Durante questa fase è consigliato avere il materiale e texture nella stessa directory del progetto per velocizzare il processo di assegnazione.

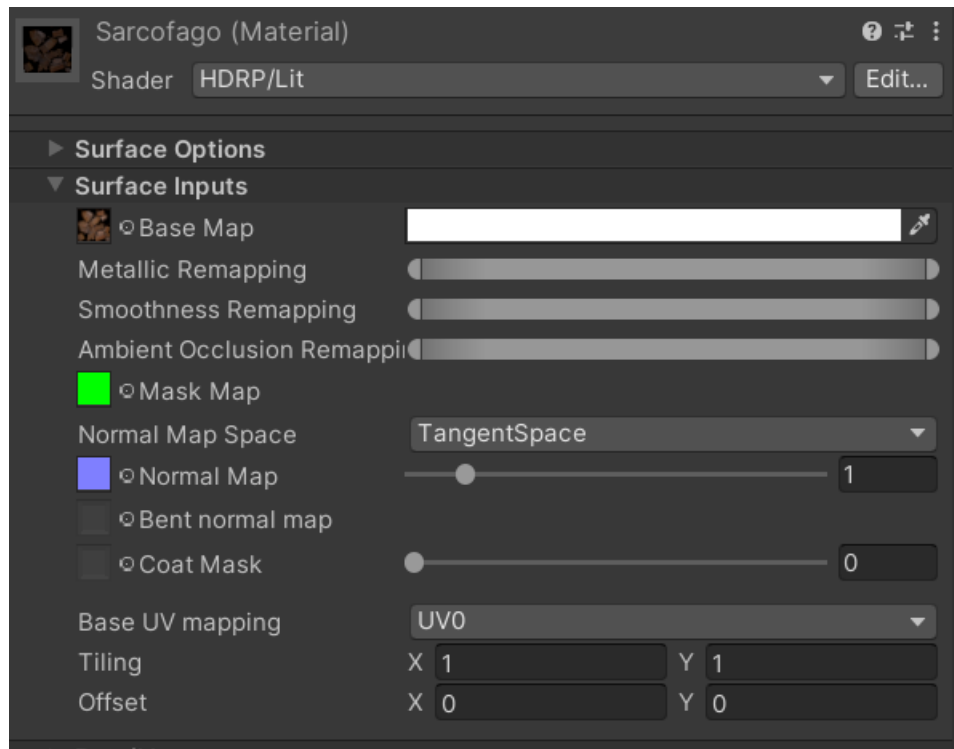


Figura 86: Assegnazione delle texture ai vari materiali

Ora gli oggetti hanno le stesse proprietà che si potevano osservare i Substance.



Figura 87: sarcofago con materiali e texture in Unity

Importati tutti gli oggetti e assegnate le texture si può ricreare l'ambiente del museo: viene innanzitutto caricato nella scena l'ambiente stesso: mura, pavimenti ecc. per poi continuare con le bacheche, il sarcofago, i vari vasi e tutti gli oggetti presenti. Si lavora sempre controllando le immagini di riferimento del museo.

Per facilitare il posizionamento degli oggetti si lavora in modalità wireframe: una modalità di rendering dei vari oggetti che ne mostra soltanto la geometria, questo per rendere meno pesate le operazioni sul motore grafico ed essere più precisi. Si utilizza anche la vista ortografica per posizionare con precisione i vari elementi.

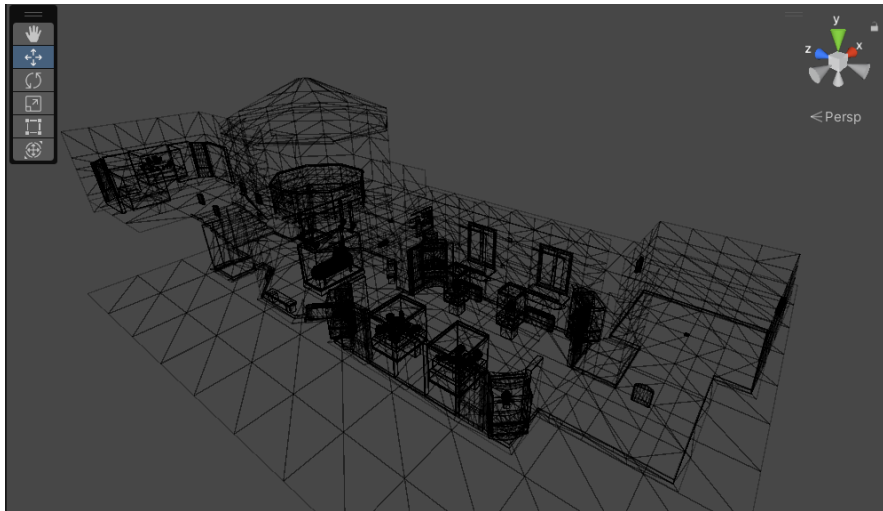


Figura 88: Ambiente ricreato in Unity utilizzando la Wireframe Mode

Posizionati i vari elementi è possibile procedere con la realizzazione dell'illuminazione: Come accennato precedentemente la pipeline di rendering HDRP utilizza un approccio fisico per quanto riguarda la gestione delle luci.

Unity mette a disposizione 4 tipologie di luci:

1. Spot Light: è una luce che simula i riflettori emettendo raggi luminosi che partono da un punto e si espandono lungo una direzione, diminuendo di intensità maggiore è la distanza rispetto al punto di origine e minore la distanza rispetto al bordo di influenza della forma. Questa tipologia di luce può assumere tre forme diverse: Cone, Pyramid e Box, e mette a disposizione vari parametri regolabili per ottenere la luce desiderata.
2. Directional Light: è una luce che simula il comportamento del sole: i raggi luminosi non diminuiscono con la distanza e colpiscono gli oggetti nella stessa direzione. Anch'essa ha dei parametri regolabili che ne influenzano il comportamento.
3. Point Light: è una sorgente luminosa puntiforme che emette raggi in tutte le direzioni a partire dal centro di origine; questi raggi diminuiscono man mano che ci si avvicina al limite indicato.
4. Area Light: è una sorgente luminosa che emette raggi luminosi uniformi da un'intera superficie planare.

Ciascuna luce inoltre ha diverse modalità di utilizzo:

1. Realtime: La luce viene aggiornata in tempo reale ogni singolo frame: è la più onerosa a livello computazionale e si utilizza quando nella scena si vuole realizzare un'illuminazione coerente con oggetti in movimento.

2. On-Demand: La luce viene aggiornata soltanto quando richiesto dall'applicazione: può essere programmata ogni n-frame o soltanto al verificarsi di certi eventi: tanto più sono gli aggiornamenti richiesti tanto più è oneroso dal punto di vista dei calcoli.

3. Baked: La luce viene calcolata soltanto una volta in fase di sviluppo dell'applicazione, creando una lightmap da applicare all'ambiente: rispetto alle luci in real-time e on demand, la fase di baking permette una personalizzazione più accurata del comportamento e risoluzione dei raggi luminosi. I vantaggi sono enormi dal punto di vista computazionale durante il runtime in quanto la lightmap risultante è una texture luminosa che viene applicata all'ambiente e non ha bisogno di essere aggiornata in tempo reale, a discapito di un tempo di calcolo più o meno lungo in fase di creazione della lightmap (si possono tranquillamente superare le 5 ore di calcolo in base alle impostazioni e prestazioni della macchina): questa tecnica è ampiamente utilizzata nell'illuminazione di ambienti statici all'interno dei quali non sono presenti oggetti che si muovono. Per generare una lightmap, oltre alla presenza di luci in modalità baked serve impostare un profilo luminoso che contiene tutte le impostazioni per il baking da effettuare: in Unity tale profilo si chiama Lighting Setting Asset e si può creare dalla relativa sezione Lighting accessibile dal menu Rendering. In questa sezione vi sono numerose impostazioni e parametri da modificare: tutti impattano in maniera più o meno marcata la lightmap risultante, ma i più importanti sono:

- direct samples: gestisce il numero di campioni diretti da calcolare per ogni sorgente luminosa

- indirect samples: gestisce il numero di campioni indiretti da calcolare per ogni oggetto colpito dai raggi diretti

- lightmap resolution: indica la risoluzione in fattore di texel per lightmap: maggiore è il numero e minore saranno gli artefatti generati (come ad esempio il light bleeding, ovvero informazioni luminose influenzano oggetti sbagliati)

-lightmap padding: indica la distanza in texel da lasciare tra i vari oggetti (maggiore la distanza e minore sarà il rischio per il light bleeding ma più grande deve essere la dimensione della lightmap)

-max lightmap size: indica la dimensione finale della lightmap risultante: maggiore sarà la dimensione e maggiore sarà la qualità finale.

-ambient occlusion: se selezionata calcolerà l'occlusione ambientale generata dagli oggetti nella scena

-lightmap compression: indica quale tipo di compressione applicare alla lightmap finale.

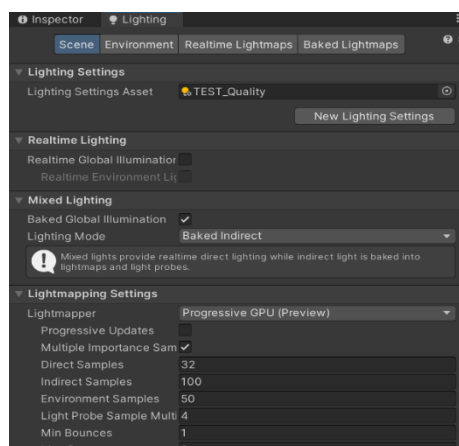


Figura 89: Sezione delle lighting Settings in Unity

Per ricreare l'illuminazione del Museo ci si è basati sull'illuminazione presente nelle immagini di reference: si sono individuate le diverse fonti luminose e si sono ricreate in Unity utilizzando le diverse tipologie di luci.

Ogni bacheca presente delle sorgenti luminose nella parte superiore in terna, che illuminano i vari vasi al loro interno; per realizzarla si è utilizzata un'area light rettangolare opportunamente scalata e posizionata. Come combinazione di colore si è impostata una temperatura di 12439 Kelvin (tendente al freddo) con un'intensità di 110 lumen (simile ad una lampada da scrivania) ottenendo un risultato simile alle reference. Questa area light è stata utilizzata per tutte le bacheche presenti.

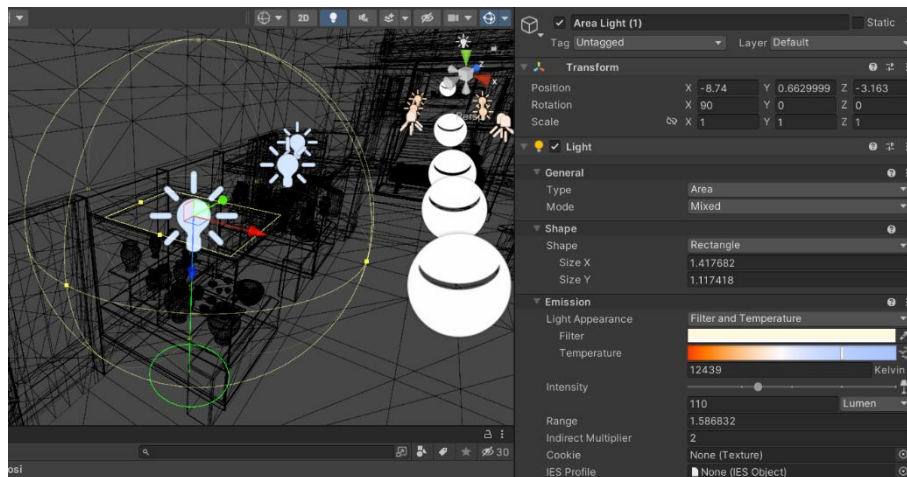


Figura 90: Impostazione luci Bacheche

Nella stanza delle bacheche inoltre sono presenti due finestre da cui entra la luce esterna: anche qui si sono utilizzate due area light che andassero a simulare il fenomeno: per ottenere un effetto azzurrino nei vari riflessi si è tenuta una temperatura di 13000 kelvin applicando un filtro di colore tendente all'azzurro chiaro CBDEE7. L'intensità impostata è di 200 lumen.

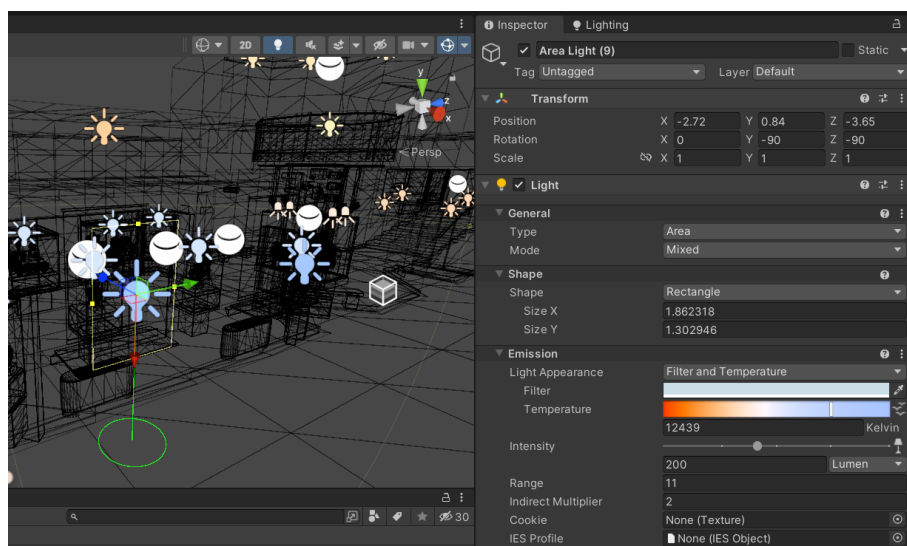


Figura 91: Impostazione luci Finestre

Per ottenere la leggera sfumatura arancione proveniente dal soffitto, si è utilizzata un'area light che andasse a ricoprire tutto il soffitto della stanza: la temperatura impostata è di 5142 Kelvin con un filtro colore tendente all'arancione chiaro FFE8BF ed un'intensità di 240 lumen.

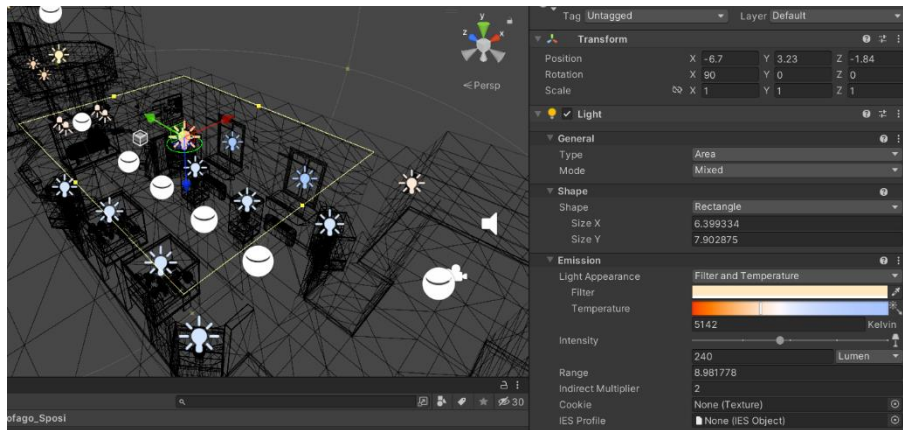


Figura 92: Impostazioni Luce Soffitto

La sala del sarcofago è illuminata grazie al contributo delle lampade poste sopra di esso e dall'illuminazione proveniente dal piano superiore.

Per le lampade si sono utilizzate delle spot light coerentemente inclinate per ottenere la giusta illuminazione del sarcofago: la temperatura impostata è di 5376 Kelvin con un'intensità di 250 Lumen.

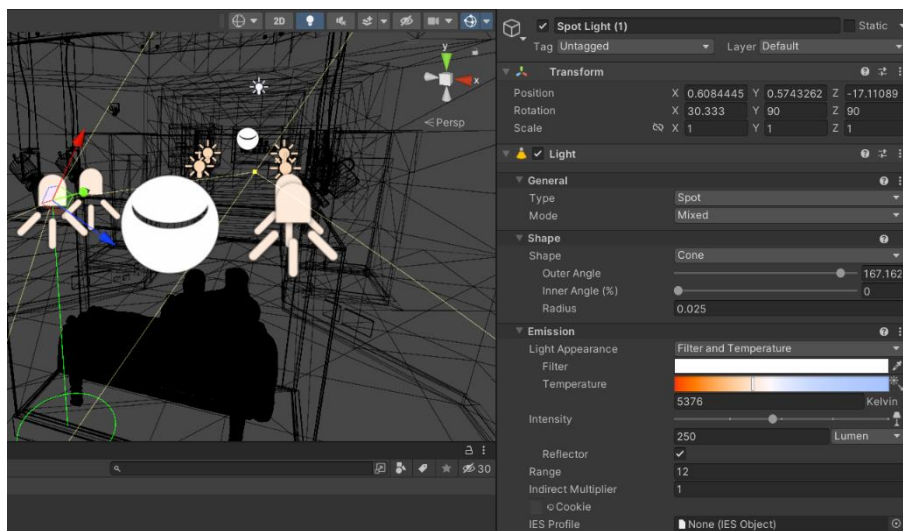


Figura 93: impostazione luci Sarcofago

Il piano superiore presenta delle luci poste in alto vicino al soffitto che puntano verso quest'ultimo: si sono utilizzate dell'area light rettangolari opportunamente scalate con una temperatura di 5258 Kelvin ed un'intensità di 20. L'intensità è stata necessaria metterla così bassa per la loro vicinanza al muro, un valore superiore causa una saturazione rendendo il soffitto troppo illuminato.

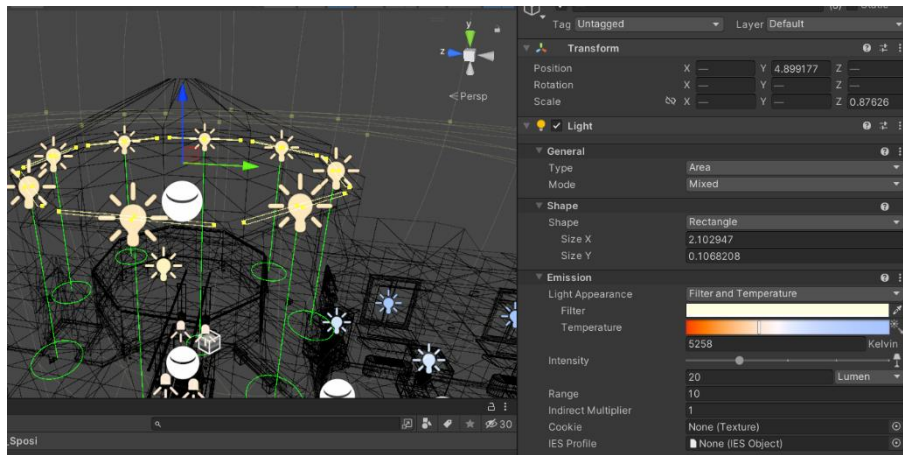


Figura 95: Impostazioni luci Piano 1

Per ottenere un'illuminazione più omogenea si è utilizzata una point area posta tra la stanza del sarcofago ed il primo piano con una temperatura d 5540 Kelvin ed un'intensità di 497 Lumen.

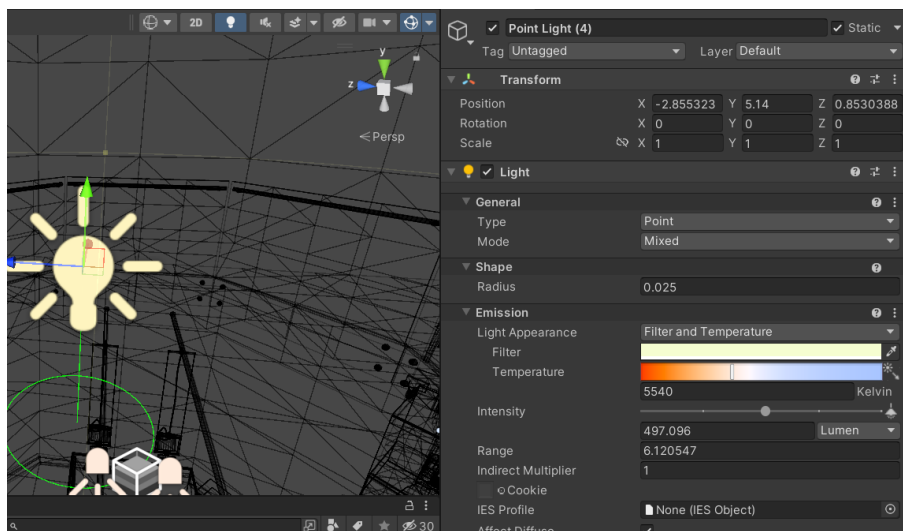


Figura 94: Impostazioni Luce Fill area Sarcofago

Per l'illuminazione delle zone successive si sono utilizzate delle point lights per le luci nella zona delle scale con una temperatura di 4422 kelvin ed un'intensità di 214 lumen; ed un'area light per illuminare la stanza seguente con una temperatura di 6814 Kelvin e 250 Lumen.

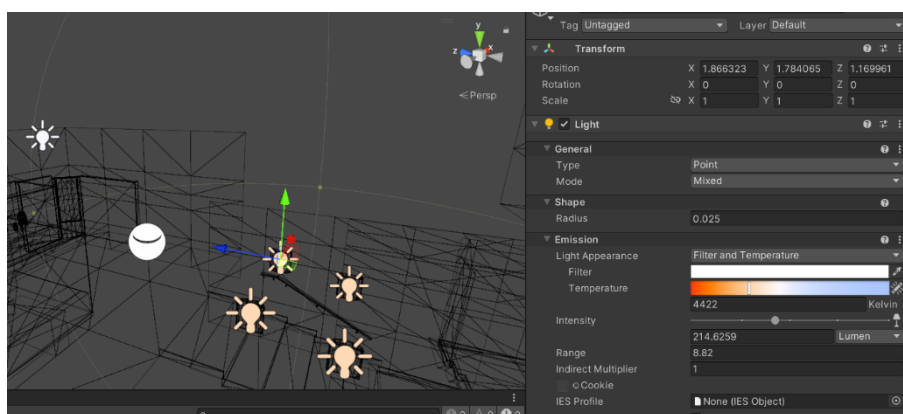


Figura 96: Impostazioni luci Post Sarcofago

Infine, per la stanza iniziale si sono utilizzate delle point light con una temperatura di 5373 kelvin ed un'intensità di 120 lumen.

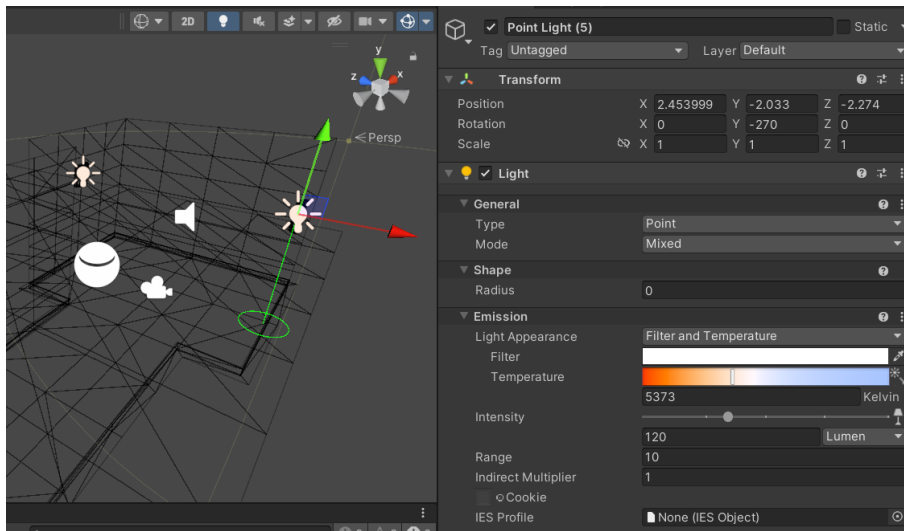


Figura 97: Impostazioni Luce Sala Inizio

Tuttavia, posizionare soltanto le luce non garantisce una corretta illuminazione dell'ambiente: nonostante ci siano materiali riflettivi come il metallo ed i vari vetri si perde il loro contributo all'illuminazione globale. Per risolvere questo problema bisogna utilizzare degli elementi che simulano queste riflessioni e contributi: Unity mette a disposizione i Reflection Probes.

I riflessi sono un elemento importantissimo nella resa di un ambiente, ed i film e corti animati riescono a sfruttare bene questo elemento, creando una sorta di omogeneità e appartenenza degli oggetti dentro l'ambiente. Per generare questi riflessi, tuttavia, è richiesto un ingente costo di tempo e prestazioni computazionali, che per i film non rappresentano un problema, ma per le applicazioni e giochi che devono lavorare in tempo reale, generando 60 o più frame al secondo diventa proibitivo.

I videogiochi, per ovviare a questo problema, hanno utilizzato una tecnica chiamata reflection mapping: essa consiste nell'assumere che tutti gli oggetti riflettivi nella scena vedono e riflettono lo stesso ambiente, che funziona molto bene in ambienti aperti e grandi, ma meno in ambiente chiusi dove sono presenti cambi di stanze (come nel caso del museo).

Con i reflection probes Unity migliora la reflection mapping di base permettendo la creazione di diverse reflection maps in punti strategici della scena. I reflection probes catturano una cube map (letteralmente un'immagine a 360° dell'ambiente) che verrà utilizzata per mostrare le riflessioni sui vari oggetti.

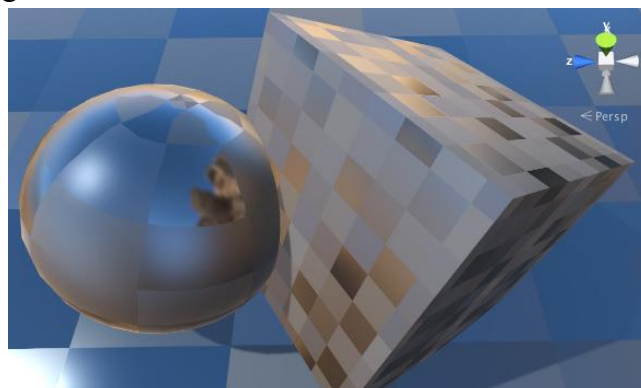


Figura 98: Comportamento di un Reflection Probe vicino ad un cubo riflettente

Le cube map calcolate dai vari reflection probes inoltre hanno una loro risoluzione modificabile dalle impostazioni generali della pipeline di rendering: è necessario trovare il giusto compromesso tra qualità e prestazione per ottenere un buon risultato. Per il progetto si sono utilizzate delle cube map a risoluzione 1k.

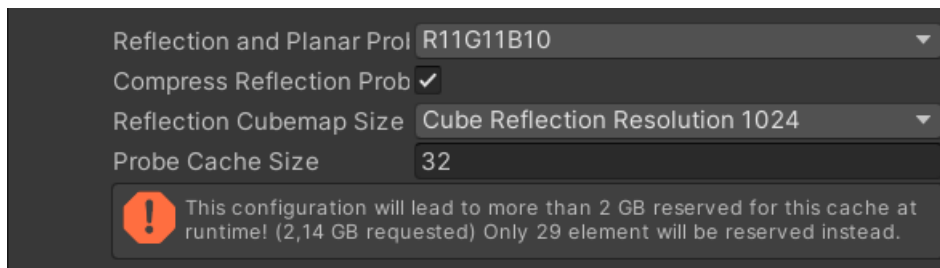


Figura 99: Impostazione di Risoluzioni per i Reflection Probes

Anche i reflection probes, come le luce, possono essere calcolati un real time, on demand oppure baked. La scelta più vantaggiosa, ed eseguita, è quella della modalità baked: viene calcolata la cube map una sola volta dopo aver completato la fase di illuminazione.

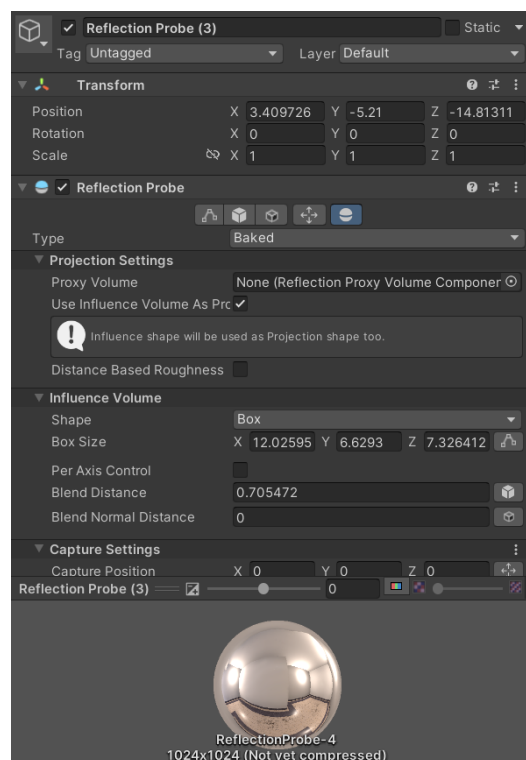


Figura 100: Impostazioni Reflection Probes

I reflection probes hanno due parametri importanti da gestire:

1. Influence volume: è il volume di influenza dentro il quale la cube map viene riflessa sui vari oggetti
 2. Blending volume: è la parte di volume dove è vengono uniti i confini di diversi probes vicini.
- È buona pratica avere un influence volume minore rispetto al blending volume per consentire una transizione graduale da un reflection probe all'altro.

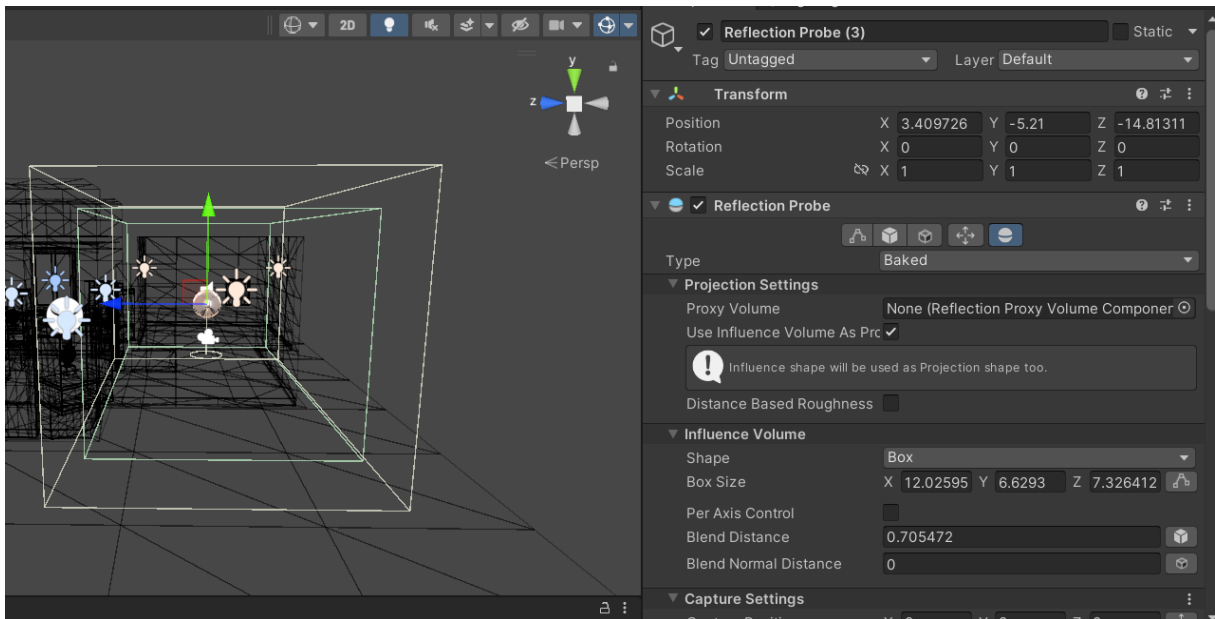


Figura 102: Volumi di influenza e blending dei Reflection Probes

Per l'ambiente del museo si sono posizionati vari reflection probes in posizioni strategiche e modificando i relativi volumi di influenza e blending affinché i riflessi fossero coerenti con la posizione dell'utente nell'ambiente.

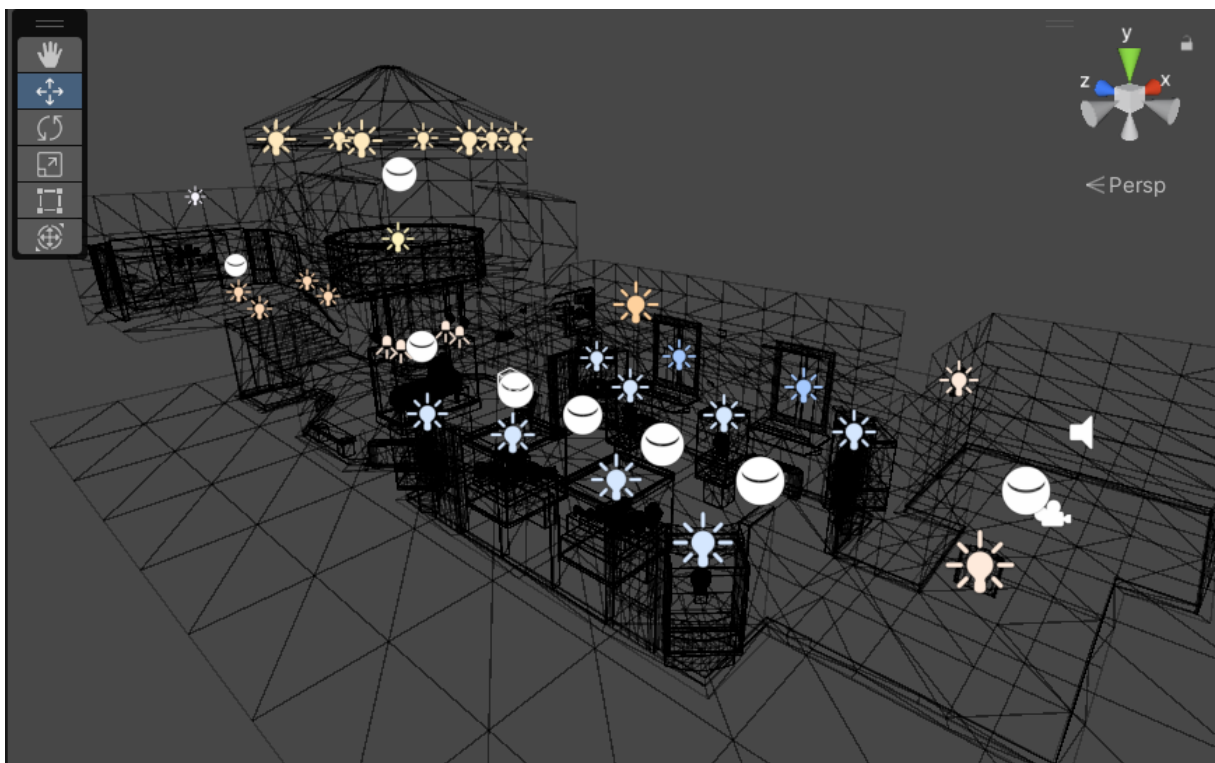


Figura 101: Posizionamento dei vari Reflection Probes nell'ambiente

Con i probes settati e le varie luci in posizione è possibile fare il baking generale delle luci.

Tornando alla relativa sezione di lighting è necessario aggiungere che è possibile scegliere la risorsa da utilizzare per effettuare il baking: CPU o GPU. Nella maggior parte dei casi è consigliato selezionare sempre la GPU perché offre prestazioni migliori, in caso di memoria insufficiente Unity ripiegherà automaticamente sull'utilizzo della CPU.

È possibile inoltre creare vari profili di lighting con impostazioni diverse: si possono creare profili specifici per ottenere una prestazione migliore, utilizzando quindi delle lightmap a risoluzione minore, oppure creare profili ad alta risoluzione che richiedono più risorse.

Per il progetto si sono creati vari profili di qualità da utilizzare dove necessario.

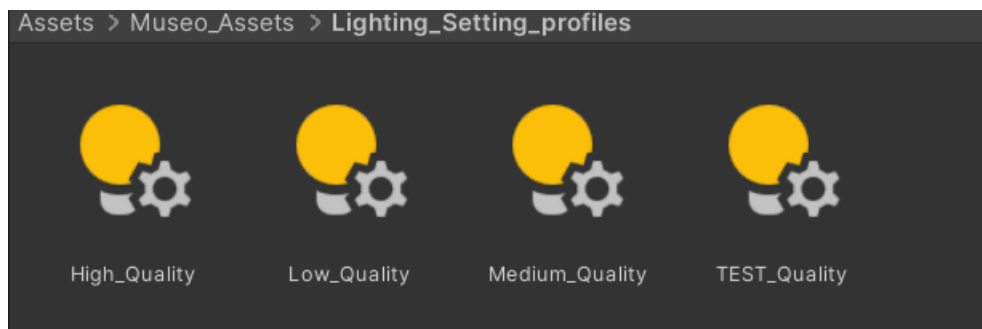


Figura 103: Profili di illuminazione diversi

Finita la fase di illuminazione e baking si sono implementati le logiche di funzionamento per il VR, utilizzando il pacchetto XR interaction Toolkit.

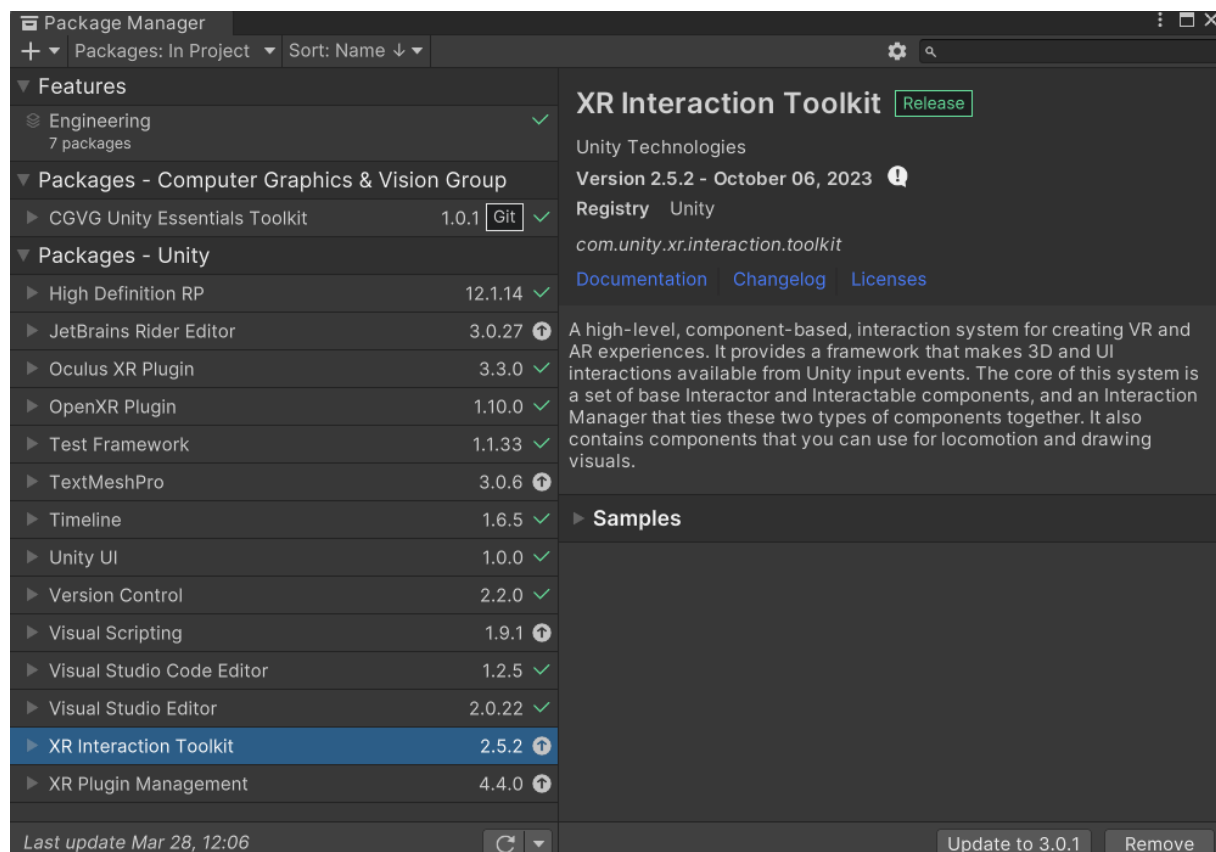


Figura 104: installazione del Pacchetto dedicato all'interazione VR

Questo Pacchetto mette a disposizione script precompilati che gestiscono la comunicazione con il Visore HMD. Per far funzionare il tutto bisogna creare un XR origin che delimita lo spazio di attività dell'utente a cui andrà assegnata una camera.

Sempre ad XR Origin bisogna assegnare un sistema di Locomozione per gestire lo spostamento all'interno dello spazio: sarà possibile esplorare il museo sia camminando fisicamente, sia utilizzando i due controller.

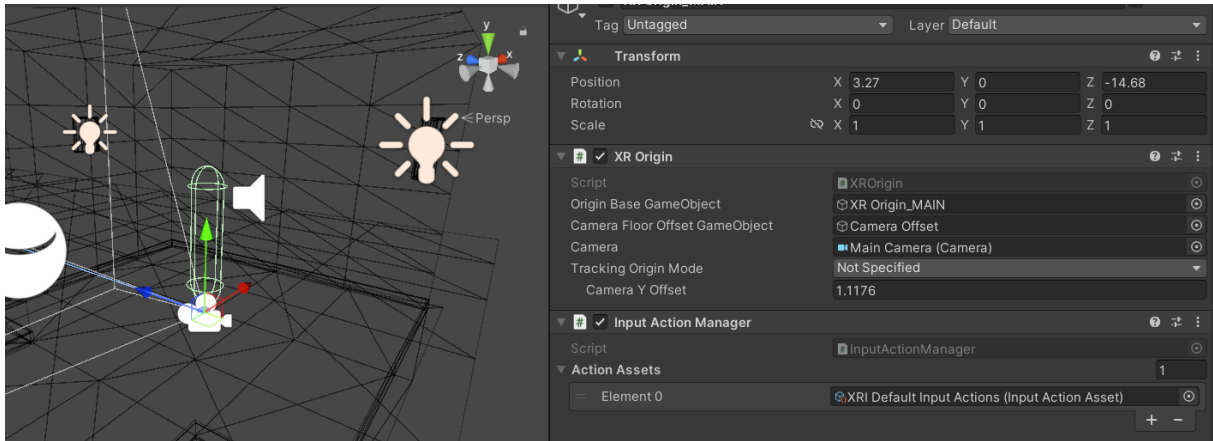


Figura 105: implementazione del sistema di esplorazione nell'ambiente Virtuale.

Implementato e testato il sistema di spostamento dell'ambiente, si sono implementati ulteriori funzionalità:

-un sistema di logging che raccoglie dati durante l'esperienza: fps, cpu, ram, posizioni e rotazioni dell'utente. Questi dati verranno in seguito esportati automaticamente in un file csv per poter essere elaborati e visualizzati in software specifici come ad esempio excel.

-un sistema di teleport a specifici hub posizionati all'interno dell'ambiente: questo per poter effettuare vari test in posizioni specifiche senza la necessita di spostarsi fisicamente al punto interessato.

I vari script sono stati scritti utilizzando il linguaggio di programmazione C# nativo di Unity.

4. Risultati e Discussione

Terminate le operazioni di modeling, texturing, importazione, illuminazione, baking ed implementato le varie funioni, si può esplorare l'ambiente del museo utilizzando sia il Visore HMD sia un emulatore utilizzando mouse e tastiera.

Per poter svolgere i test utilizzando il Visore HMD è stato necessario trovare un luogo ampio quanto lo spazio del Museo: circa 20 metri di lunghezza e 10 in larghezza. Il luogo utilizzato è stato l'aula Luigi Ciminiera del Politecnico di Torino, situata al quinto piano del dipartimento DAUIN.



Figura 106: Aula utilizzata per il testing del prototipo EtruVR

Per il test si è utilizzato un numero di persone pari a 15, proponendo alternativamente l'esperienza in 2 qualità diverse: Bassa e Alta Risoluzione.



Figura 107: un utente durante il testing

In seguito, ogni utente ha compilato un questionario volto a raccogliere pareri su: immersione VR e resa Grafica.

Il test è stato utile non solo per verificare l'efficacia dell'esperienza nel suo stato prototipale ma anche per vedere se la risoluzione dell'ambiente influisce effettivamente sull'esperienza.

Il questionario è diviso in 3 sezioni: la prima sezione contiene domande volte a valutare il senso di presenza del soggetto dell'ambiente virtuale: Ingroup Presence Questionnaire, che raccoglie pareri sulla presenza spaziale, coinvolgimento e realismo percepito. La seconda sezione invece contiene domande inerenti le VRUs, ovvero domande specifiche sull'utilizzo dello strumento per la realtà virtuale e l'efficacia della simulazione. La terza ed ultima sezione invece si è concentrata su aspetti particolare del progetto EtruVR andando a verificare la qualità degli elementi presenti all'interno: Sarcofago, Vasi, Riflessioni ecc.

Il Questionario, somministrato tramite Google Forms, è stato in seguito esportato e rielaborato in Excel: in particolare si sono eseguite le varie medie dei punteggi per le sezioni e per gli utenti singoli.

Il tutto per poter eseguire il TTest: il ttest è un test statistico che viene utilizzato per confrontare le medie di due gruppi e determinare l'esistenza di una differenza significativa tra di essi. Esso si basa su due valori:

- Il t-value: è la differenza tra le medie dei due gruppi, rapportata alla variazione all'interno di ciascun gruppo. Più esso è grande e maggiore sarà la differenza tra le medie dei due gruppi.
- Il p-value: è la probabilità di osservare un t-value più estremo, supponendo che non ci sia una vera differenza tra i gruppi.

Per interpretare i risultati del Ttest si osserva il p-value: confrontando il risultato ottenuto con una soglia di significatività: questa soglia è posta al valore di 0.05.

- Se il valore è inferiore alla soglia di significatività si può affermare che tra i due gruppi ci sia una differenza significativa.
- Se il Valore supera la soglia di significatività si può concludere che non ci sono prove sufficienti per confermare un'effettiva differenza tra i gruppi. [19]

Per eseguire il TTest utilizzando Excel è necessario suddividere i risultati nei due gruppi da confrontare (in questo caso High e Low Quality) ed in seguito utilizzare la formula TESTT, a cui passare come parametri i due gruppi.

Si sono fatti 3 TTest per vedere la differenza dei 2 due gruppi rispetto alle domande fatte: Presenza IPQ, Fedeltà VRUse 1 e immersione VRUse 2. Di seguito i risultati:

TTEST IPQ QUESTIONS						
RISULTATI HIGH QUALITY			RISULTATI LOW QUALITY			TTEST
Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	
High	2	5,9	Low	1	4,1	0,455289
High	4	4,6	Low	3	4,3	
High	6	3,6	Low	5	4,6	
High	8	5,3	Low	7	3,8	
High	10	4,4	Low	9	5,1	
High	11	4,9	Low	12	5,0	
High	14	5,1	Low	13	4,8	
			Low	15	4,5	

Figura 108: TTest per le domande IPQ

TTEST VRUSE 1 FEDELTA' QUESTIONS						
RISULTATI HIGH QUALITY			RISULTATI LOW QUALITY			TTEST
Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	
High	2	4,4	Low	1	4,1	0,536268
High	4	4,1	Low	3	4,6	
High	6	4,1	Low	5	4,3	
High	8	4,6	Low	7	3,6	
High	10	4,3	Low	9	4,6	
High	11	4,6	Low	12	4,1	
High	14	4,5	Low	13	4,4	
			Low	15	4,5	

Figura 109: TTest per le domande VRUse 1 Fedeltà

TTEST VRUSE 2 IMMERSIONE E PRESENZA QUESTIONS						
RISULTATI HIGH QUALITY			RISULTATI LOW QUALITY			TTEST
Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	Qualità Esperienza	ID soggetto.	Media questionario	
High	2	4,3	Low	1	4,1	0,735765
High	4	4,0	Low	3	4,2	
High	6	3,7	Low	5	4,4	
High	8	4,9	Low	7	4,4	
High	10	4,2	Low	9	5,0	
High	11	5,0	Low	12	4,2	
High	14	4,2	Low	13	4,4	
			Low	15	4,0	

Figura 110: TTest per le domande VRUse 2 Immersione e Presenza

I valori ottenuti nei TTest sono molto maggiori rispetto alla soglia di significatività di 0,05: dunque si può affermare che non ci sono prove sufficienti per confermare un'effettiva differenza tra le due esperienze in alta e bassa qualità. Dunque, la qualità delle texture per come è stato impostato il test non ha influito sull'esperienza.

Questo risultato può essere associato alla familiarità che gli utenti hanno con un Visore HMD: all'approccio a questa nuova tecnologia gli utenti si concentrano di più sul fatto di essere trasportati in un luogo completamente nuovo (digitale) chiudendo i contatti visivi con il reale; quindi, in base alle diverse reazioni di stupore e novità gli utenti sorvolano aspetti più sottili come le imprecisioni grafiche.

Di contro utenti più esperti e abituati all'utilizzo della tecnologia, osservano con più attenzione l'ambiente, valutandone la qualità estetica e confrontandolo con le esperienze passate

Di seguito alcune immagini dell'ambiente finale con il quale sono stati eseguiti i test.



Figura 111: Inizio Stanza bacheche



Figura 113: Inizio Stanza Sarcofago Degli Sposi



Figura 112: Close-up Sarcofago Degli Sposi

5. Conclusioni

Il progetto realizzato: EtruVR, si pone come un punto di partenza per ulteriori sviluppi ed esperimenti. Il lavoro svolto illustra l'intero processo di produzione di un prodotto destinato all'utilizzo in Realtà Virtuale, illustrando tutti gli accorgimenti da attuare per ottenere un risultato di qualità.

In un mondo in cui la tecnologia VR sta diventando sempre più performante ed accessibile, è necessario che anche le istituzioni promotrici della cultura comincino ad adoperare le tecnologie per poter proporre esperienze sempre più variegata e coinvolgenti.

Inoltre, il fatto di avere a disposizione un ambiente reale completamente digitalizzato apre la strada a nuove applicazioni che facilitano varie operazioni: ad esempio la possibilità di riarrangiare l'ambiente virtuale e verificare la fattibilità e l'efficacia senza dover toccare quello reale; proporre punti di vista completamente nuovi che nella vita reale sono impossibili da ottenere (una fly cam ad esempio), ed anche la possibilità di aggiungere elementi interattivi che coinvolgono di più l'utente, portando all'interno della storia stessa.

Bibliografia

- [1] Treccani, [Online]. Available: <https://www.treccani.it/enciclopedia/realta-virtuale/>.
- [2] R. Burton, «amturing.com,» [Online]. Available: https://amturing.acm.org/award_winners/sutherland_3467412.cfm.
- [3] D. Barnard, «virtualspeech.com,» 20 02 2023. [Online]. Available: <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr>.
- [4] T. Alsop, «statista.com,» 13 02 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1337114/vr-headset-comparison-by-weight/>.
- [5] Stanford, «stanford.edu,» [Online]. Available: <https://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture7.pdf>.
- [6] S. Soletta, «ing.com,» 11 04 2017. [Online]. Available: <https://it.ign.com/oculus-rift/117274/feature/visori-vr-come-funzionano>.
- [7] Università degli studi di Foggia, Marzo 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Valentina-Berardinetti/publication/378697237_Didattica_Museale_e_Realta_Virtuale/links/65e58c56e7670d36abf0b4de/Didattica-Museale-e-Realta-Virtuale.pdf.
- [8] Inaf, «garr.it,» 2022. [Online]. Available: <https://www.garr.it/it/chiamo/documenti/selected-papers/selected-papers-conferenza-2022/6103-selected-papers-conferenza-2022-volume/file>.
- [9] ibm, «ibm.com,» [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>.
- [10] R. Cosentino, «Il Sarcofago degli Sposi : dalla scoperta alla realtà virtuale,» *Anabases*, pp. 27-41, 2016.
- [11] P. Bourke, «paulbourke.net,» [Online]. Available: <https://paulbourke.net/dataformats/ply/>.
- [12] M. C. M. C. M. D. F. G. G. R. P. Cignoni, «vcg.isti.cnr.it,» 2008. [Online]. Available: <https://vcg.isti.cnr.it/Publications/2008/CCCDGR08/MeshLabEGIT.final.pdf>.
- [13] H. H. M. Kazhdan, «Screened poisson surface reconstruction,» *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, pp. 29-32, 2013.
- [14] V. M, «<https://vection-technologies.com/>,» 29 11 2022. [Online]. Available: <https://vection-technologies.com/blog/Everything-You-Need-to-Know-About-FBX-Files-A-Comprehensive-Guide>.
- [15] m. Segasby, «www.lightmap.co.uk,» 31 01 2022. [Online]. Available: <https://www.lightmap.co.uk/blog/whatisanhdriomap/>.
- [16] K. Pelin, «Improving Noise,» Media Research Laboratory, Dept. of Computer Science, New York University.
- [17] T. R. Etherington, «Perlin noise as a hierarchical neutral landscape model,» *Web Ecol*, 22.
- [18] Unity, «unity3d.com,» [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/Manual/render-pipelines-overview.html>.

[19] JMP , «jmp.com,» [Online]. Available: https://www.jmp.com/it_it/statistics-knowledge-portal/t-test.html.

Elenco Figure

Figura 1: Primo prototipo di HMD "Spada di Damocle"	3
Figura 2: Distorsione e Correzione Lenti in VR [5].....	4
Figura 3: Esperienza Interattiva Museo della Specola	5
Figura 4: Rilevazione Fotogrammetria Sarcofago Degli Sposi	7
Figura 5 Nuvola Punti Sarcofago degli Sposi con errori (sx)	8
Figura 6: Le Tre operazioni eseguite in MeshLab.....	9
Figura 7: Sarcofago degli sposi importato in Maya con errori	9
Figura 8: Sarcofago corretto.....	10
Figura 9: Topologia Sarcofago Disordinata e Non Uniforme	10
Figura 10: Topologia Sarcofago Ordinata e Uniforme.....	11
Figura 11: Mesh Finale Sarcofago	11
Figura 12: UV Editor in Maya	12
Figura 13: UV Shell del Sarcofago	13
Figura 14: Sarcofago con Materiali Assegnati	14
Figura 15: Sarcofago Esportato in FBX.....	14
Figura 16: Creazione setup Sarcofago in Substance Painter.....	15
Figura 17: Setup Materiale Clay Substance	16
Figura 18: Sarcofago con Materiale Clay Base.....	16
Figura 19: Strumento di proiezione attiva con immagine di sample.....	17
Figura 20: Foto Scattata al museo inutilizzabile per Illuminazione scorretta e riflessi	17
Figura 21: Sarcofago con informazioni di Colori in Mashlab	18
Figura 22: Viste diverse del Sarcofago.....	18
Figura 23: proiezione delle informazioni di Colore sul Sarcofago	19
Figura 24: Sarcofago Texturizzato con hdri	19
Figura 25: Esempi di HDRI	20
Figura 26: Preset per L'export delle Texture	20
Figura 27: Export Settings Sarcofago	21
Figura 28: Texture finale Sarcofago	21
Figura 29: Wireframe Ambiente del Museo modellato.....	22
Figura 30: Piantina del museo usata come riferimento	22
Figura 31: Operazione di scalamento della pianta del Museo	23
Figura 32: Elementi Fissi Ambiente.....	23
Figura 33: Reference 360 Museo	24
Figura 34: Esempi Smart Materials.....	24
Figura 35: Sample Pavimento Museo	25
Figura 36: Layer 1 Pavimento.....	25
Figura 37: Layer 2 del pavimento realizzato con Marchera e Rumore Procedurale.....	26
Figura 38: Esempi Noise Maps Procedurali.....	26
Figura 39: Costruzione della Perlin Noise Map.....	27
Figura 40: Gestione dei Valori della Noise Map Procedurale	27
Figura 41: Layer 3 del Pavimento Generato con la Texture Marble	28
Figura 42: Layer 4 Pavimento.....	28
Figura 43: Layer 5 del Pavimento	29
Figura 44: Layer 6 Pavimento - Risultato Finale	29
Figura 45: Layer 1 Marmo Scuro	30
Figura 46: Layer 2 Marmo Scuro con Noise Texture.....	30
Figura 47: Layer 3 Marmo Scuro Luminosità e Contrasto	31
Figura 48: Layer 4 Marmo Scuro con Noise Texture per la realizzazione degli Spot Bianchi	31

Figura 49: Layer 5 Marmo Scuro con Black Spots	32
Figura 50: Texture Pavimento Finale	32
Figura 51: Continuità della texture tra i due Pavimenti	33
Figura 52: Risultato Finale Pavimento Museo	34
Figura 53: Dettaglio Pattern Stanza Sarcofago	34
Figura 54: Esempio di Texture Exporting	35
Figura 55: Ambiente Completo Texturizzato	35
Figura 56: Riferimento Bacheche Piccole.....	36
Figura 57: Esempio di Estrusione	37
Figura 58: Esempio Bevel	37
Figura 59: Modello Bacheca Piccola	37
Figura 60: Materiale Metallico Base Bacheca Piccola.....	38
Figura 61: Materiale Metallico Finale Bacheca	38
Figura 62: Materiale Plastica Bacheca Piccola	39
Figura 63: Materiale Vetro con dettagli Riflesso Bacheca Piccola	39
Figura 64: Specchio Superiore Bacheca Piccola.....	40
Figura 65: Risultato delle altre bacheche completate.....	40
Figura 66: Foto Reference dei vasi presenti al Museo	41
Figura 67: Esempio Modello di un Vaso	41
Figura 68: UV map del Vaso	42
Figura 69: Vaso con Materiale Base.....	42
Figura 70: Strumento di Simmetria Radiale Attivato.....	43
Figura 71: Applicazioni delle figure con Alpha Mask	43
Figura 72: Texture esportate per il Vaso	44
Figura 73: Esempi Vasi Texturizzati.....	44
Figura 74: Viewport Base di Unity.....	45
Figura 75: 3 Fasi di una Render Pipeline	45
Figura 76: resa Grafica con la Built In Render Pipeline	46
Figura 77: resa grafica con la URP	46
Figura 78: Resa grafica con la HDRP	46
Figura 79: Installazione del Pacchetto relativo alla HDRP	47
Figura 80: Wizard HDRP che crea in automatico i file mancanti	47
Figura 81: Oggetto importato in Unity.....	48
Figura 82: Scale Corrette di importazione	48
Figura 83: Materiali creati in Unity.....	49
Figura 84: Textures:importate in Unity	49
Figura 85: Settings per la corretta risoluzione delle textures	49
Figura 86: Assegnazione delle texture ai vari materiali	50
Figura 87: sarcofago con materiali e texture in Unity.....	50
Figura 88: Ambiente ricreato in Unity utilizzando la Wireframe Mode	51
Figura 89: Sezione delle lighting Settings in Unity	52
Figura 90: Impostazione luci Bacheche	53
Figura 91: Impostazione luci Finestre	53
Figura 92: Impostazioni Luce Soffitto	54
Figura 93: impostazione luci Sarcofago.....	54
Figura 94: Impostazioni Luce Fill area Sarcofago	55
Figura 95: Impostazioni luci Piano 1	55
Figura 96: Impostazioni luci Post Sarcofago	55
Figura 97: Impostazioni Luce Sala Inizio	56
Figura 98: Comportamento di un Reflection Probe vicino ad un cubo riflettente	56

Figura 99: Impostazione di Risoluzioni per i Reflection Probes	57
Figura 100: Impostazioni Reflection Probes	57
Figura 101: Posizionamento dei vari Reflection Probes nell'ambiente.....	58
Figura 102: Volumi di influenza e blending dei Reflection Probes	58
Figura 103: Profili di illuminazione diversi	59
Figura 104: installazione del Pacchetto dedicato all'interazione VR	59
Figura 105: implementazione del sistema di esplorazione nell'ambiente Virtuale.	60
Figura 106: Aula utilizzata per il testing del prototipo EtruVR	61
Figura 107: un utente durante il testing.....	61
Figura 108: TTest per le domande IPQ	62
Figura 109: TTest per le domande VRUse 1 Fedeltà	63
Figura 110: TTest per le domande VRUse 2 Immersione e Presenza	63
Figura 111: Inizio Stanza bacheche.....	63
Figura 113: Close-up Sarcofago Degli Sposi	64
Figura 112: Inizio Stanza Sarcofago Degli Sposi	64