

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA E INFORMATICA

## IL CIELO SOPRA S. AGOSTINO PER 3D LENTICULAR

Relatore: Chiar.mo Prof. VIRGINIO CANTONI

Relazione discussa in sede di esame finale dal candidato: **DANIELE TAVAZZI** 

A.A 2018/2019

## INDICE

CAPITOLO 1	
1 Introduzione all'opera "Arca di S. Agostino"	2
1.1 L'Arca di Sant'Agostino	3
1.2 Lo Stile	4
1.3 Struttura	5
1.4 Importanza della Mandorla intorno alla figura del Cristo	9
1.5 Suddivisione in Ordini dell'Arca	10
1.6 La Volta	12
CAPITOLO 2	
2 Software e Tecniche di grafica 3D	14
2.1 Blender	15
2.2 Rigging	16
2.3 Modellazione	17
2.4 Composizione	17
2.5 Rendering	19
2.6 Equazione di Rendering	19
2.7 Analisi del comportamento della luce	20
2.7.1 Comportamenti dei fotoni	20
2.8 Modelli per lo studio del comportamento della luce per il Rendering	21
2.8.1 Modello di Phong	21
2.8.2 Modello Lambertiano	23
2.8.3 Modello Speculare	23
2.8.4 Ray Tracing	24
2.8.5 Kadiosity	25
2.8.6 muminazione globale auraverso Photon Mapping	20
CAPITOLO 3	
3 Grafica 3D su Blender	27
3.1 Rigging su Blender	28
3.1.1 Bones	28
3.2 Composing su Blender	29
3.3 Modelling su Blender	29
3.3.1 Edit Mode	29
3.3.2 Sculpt Mode	30
3.4 Rendering su Blender	30
3.4.1 Materiali su Blender	30
3.4.2 Texture su Blender	30
3.5 Illuminazione su Blender	32
3.6 Camera su Blender	33
CAPITOLO 4	
4 La Volta	34
4.1 Realizzazione della Volta	35
4.2 Rigging della Volta	35
4.3 Composing e Modelling della Volta	35
4.4 Rendering della Volta	36
4.5 Utilizzo della memoria nella realizzazione della Volta	38
4.6 Scopo del Progetto	39

CAPITOLO 1

## **INTRODUZIONE ALL'OPERA "ARCA DI S. AGOSTINO"**

## 1.1 L'ARCA DI SANT'AGOSTINO

Si tratta di una scultura sacra realizzata in marmo bianco di Carrara nella seconda metà del quattordicesimo secolo, precisamente la sua realizzazione viene datata nell'anno 1362 del calendario gregoriano per mano di autori ignoti anche se alcune teorie attribuiscono la creazione dell'Arca a Giovanni di Balduccio. Ciò che è pervenuto a noi riguardo alla commissione del lavoro è che avvenne da parte dei frati agostiniani della Basilica di San Pietro in Ciel d'Oro al fine di fare da contrapposizione ad un'altra opera di questo genere realizzata sempre in stile gotico ed in marmo di Carrara ma nella città di Milano, allora rivale politica e militare della città di Pavia: il monumento funebre di San Pietro martire nella Basilica di Sant'Eustorgio.

L'Arca è oggigiorno visibile, anche ai visitatori, nella Basilica di San Pietro in Ciel d'Oro di Pavia dove poggia al centro del presbiterio che sormonta la cripta in cui è stata collocata la reliquia del Santo nell'anno 718 dopo essere stata custodita a lungo a Cagliari.



Fotografia frontale dell'Arca di Sant'Agostino, sono visibili i quattro ordini in cui è divisa e nella parte più illuminata la cella in cui è contenuta la rappresentazione del santo defunto e la Volta.

## **1.2 LO STILE**

Proprio secondo i dettami della scultura gotica nell'Arca è possibile osservare la rappresentazione di ogni figura realizzata in modo accurato sia nell'espressione facciale e sia nella fisionomia stessa dell'individuo, basti pensare che l'opera conta alcune centinaia di elementi decorativi e ciascuno di essi è stato realizzato singolarmente: non vi è posa, dettaglio o volto che si assomigli ciò ad indicare una certosina attenzione alle differenze.



A sinistra l'Arca di Sant'Agostino a Pavia a destra l'Arca di San Pietro Martire a Milano, due esempi di monumenti funebri in marmo bianco di Carrara entrambi esempi della scultura romanica gotica del quattordicesimo secolo.

#### **1.3 STRUTTURA**

La geometria dell'opera è precisa tanto quanto l'attenzione ad ogni dettaglio. L'intero complesso marmoreo può essere suddiviso in quattro livelli o "ordini" disposti verticalmente, ciascun livello è diviso in quadranti da dodici statue, rappresentanti virtù, che soprapponendosi in modo verticale l'una all'altra vanno a distinguere otto colonne che partendo dal basamento raggiungono la sommità dell'Arca.

A loro volta ogni quadrante è adornato da altre statue finemente decorate che vanno a rappresentare virtù, figure di spicco della Religione Cattolica o scene tratte dalla vita del Santo o dalle sacre scritture.



Rappresentazione artistica della parte frontale dell'Arca.



Rappresentazione artistica della parte posteriore dell'Arca.



Rappresentazione artistica dell'Arca vista dai due lati.

Nel primo ordine, cioè il basamento dell'Arca, possiamo trovare, alternati alle virtù che formano le colonne, rappresentazioni di santi ed apostoli.

Nel secondo ordine, sostenuto sempre dalle otto colonne formate da rappresentazioni di virtù, si può vedere una cella, interna all'arca: come se fosse una stanza, la figura di Sant'Agostino ormai defunto riccamente rifinita nei dettagli, nelle mani regge un libro ed il suo corpo è coperto da un lenzuolo funebre sostenuto da sei figure di giovani e circondato dai dottori della Chiesa, figura allegorica di ciò che il santo era in vita.



Rappresentazione artistica della scena contenuta all'interno della cella del secondo ordine, la figura dalle dimensioni maggiori è il Santo, si possono vedere anche tre delle giovani che sorreggono il lenzuolo, due dei dottori della chiesa uno sulla sinistra ed uno a destra e infine le statue che vanno a formare le colonne dell'Arca.

Sopra di esso la Volta, ampiamente decorata negli elementi e nelle figure:

al centro il Cristo all'interno di una Mandorla, un riquadro di forma ogivale ottenuto intersecando due cerchi di ugual raggio l'uno con il centro appartenente alla circonferenza dell'altro, vestito in una tunica il quale si sporge dall'alto verso il basso nel gesto di accogliere lo spirito del Santo nel regno dei cieli con l'imposizione della mano destra mentre nella sinistra regge un volume. Intorno a lui otto cherubini: sette con tre ali mentre uno, quello ai piedi del Cristo, con quattro.

La Volta, oltre alla parte centrale contente questi cherubini ed il Redentore, è suddivisa in altri otto quadranti triangolari, ciascuno separato dall'altro per mezzo di un filare di cherubini incolonnati adornati con le loro quattro ali posizionate diagonalmente rispetto ai volti, due in alto e due in basso.

Nei quadranti posizionati superiormente ed inferiormente la figura del Cristo possiamo notare tre figure secondarie circondate da otto cherubini per ciascuno dei due quadranti, in cui possiamo riconoscere: l'arcangelo Michele con la spada e la bilancia, altre due figure una con in mani una pergamena ed una con nelle mani una candela ed una spada, l'arcangelo Raffaele con il cane ed il piccolo Tobia, la Maddalena ed un'altra figura maschile con nelle mani una pergamena.

Nei lati della Volta si possono vedere i restanti sei quadranti, due posizionati nel lato destro e nel lato sinistro del Redentore e gli altri quattro disposti diagonalmente rispetto a quest'ultimo.

Importante è la raffigurazione sulla destra del Redentore della Madonna.

Nel suo complesso la volta contiene settantadue cherubini, ciascuno raffigurato in maniera univoca: con quattro, tre o due ali, dodici figure secondarie e la rappresentazione del Redentore, tutti questi elementi sono a loro volta posizionati mantenendo una precisa simmetria tra i ruoli ma essendo realizzati in modo singolare e con cura ai dettagli.



Rappresentazione artistica della Volta.

## 1.4 IMPORTANZA DELLA MANDORLA INTORNO ALLA FIGURA DEL CRISTO

Il simbolo della Mandorla, utilizzato tipicamente nelle rappresentazioni in stile romanico gotico, ha un doppio significato in ambito spirituale:

Il primo allude al frutto stesso o più generalmente alla forma di un seme che va a rappresentare un'allegoria alla vita, quella ultraterrena in questo caso.

Il secondo fa riferimento alla sua forma geometrica: il simbolo infatti è formato tramite l'intersezione di due cerchi uguali, cioè il punto di giunzione di due mondi, quello materiale rappresentato dalla carnalità del Santo come essere umano e quello spirituale rappresentato dalla fede. Il Cristo, posizionato al centro di essa, ha il ruolo di mediatore tra queste due diverse realtà ed è proprio un richiamo anche al ruolo che acquisisce nella sua posizione nella Volta, quello di fare da collegamento per il Santo verso la vita eterna.



Vesica Piscis è il nome latino della Mandorla, è ovvia la relazione tra il simbolo ed il Redentore.

Nel terzo ordine invece a formare le otto colonne non troviamo più delle statue raffiguranti le virtù ma bensì vescovi e personaggi del clero agostiniani. Tra queste è possibile vedere dieci riquadri rappresentanti scene della vita di Sant'Agostino.

Il quarto ed ultimo ordine è quello visibile sulla parte più alta dell'Arca, diversamente dal primo e dal terzo in questo livello le scene sono rappresentate all'interno di timpani triangolari invece che in rettangoli, all'interno di queste scene sono ritratti i Miracoli compiuti da Sant'Agostino e a fare da divisorio tra un timpano e l'altro abbiamo otto statue a fare da prolungamento alle otto colonne che hanno percorso l'Arca dal basamento fino alla cima, in questo caso le statue vanno a rappresentare le gerarchie celesti.

Il timpano in architettura è una superficie triangolare racchiusa in una cornice o contorno, questo termine viene spesso usato come sinonimo di frontone.



## 1.5 SUDDIVISIONE IN ORDINI DELL'ARCA

Cesare e Giovanni fratelli Ferreri dis.ed inc.

Rappresentazione del primo ordine, a formare il primo livello delle colonne, da sinistra a destra, le virtù teologali Fede, Speranza, Carità e Religione.



Rappresentazione del secondo ordine, a formare il secondo livello delle colonne un insieme di vescovi e monaci.



Rappresentazione del terzo ordine, a formare il terzo livello delle colonne vi sono statue di membri dell'ordine agostiniano.



Rappresentazione del quarto ordine, a formare il quarto ed ultimo livello delle colonne vi sono otto statue di gerarchie celesti e tra di esse i timpani triangolari.

## 1.6 LA VOLTA

Con la volta andiamo ad intendere la superficie superiore della cella in cui è contenuta la statua di Sant'Agostino ormai defunto.

La volta è formata da una superficie rettangolare concava, cioè gli elementi al suo interno sono in una posizione leggermente sopraelevata rispetto a quelli che stanno sul bordo.

Al centro di questa possiamo trovare la figura del Cristo Redentore che si espone dalla volta stessa con un'angolazione di quarantacinque gradi.

Il basamento della figura del Cristo si trova nella parte inferiore di una mandorla iscritta ad altre a diverse altezze al fine di creare un effetto a gradini. A completare la decorazione di questa parte centrale dell'Arca troviamo otto cherubini, quello ai piedi del Redentore adornato con quattro ali, la quarta di queste va a coprire la parte bassa della tunica del Cristo, i restanti sette cherubini sono adornati da tre ali che con angolazione diversa vanno ad appoggiarsi sull'effetto a gradino delle mandorle senza però uscire dal contorno più esterno.

La superficie rettangolare della Volta è suddivisa da due cammini lunghi contenenti cherubini che seguono le diagonali della sua forma rettangolare sparendo nella parte centrale sotto al basamento a mandorla. All'interno di questi cammini lunghi che dividono la volta in quattro quadranti triangolari con l'angolo superiore tagliato dal basamento centrale a mandorla, rispetto al centro: due quadranti ai lati, uno in alto ed uno in basso. Questi cammini contengono al loro interno, come decorazione, un totale di ventiquattro cherubini con quattro ali ciascuno.

I due quadranti laterali, uno alla destra ed uno alla sinistra dell'Arca, disposti per lo più in altezza rispetto alle figure contenuti in esse, sono a loro volta divisi in due per mezzo di una fessura molto fine che va a fare da taglio tra le figure ivi contenute.

Nel quadrante a sinistra possiamo vedere nella parte alta l'arcangelo Michele con la bilancia delle anime in una mano e la spada nell'altra, a sua volta è affiancato da due cherubini con tre ali. Nella parte bassa invece si possono notare due figure di Santi, una regge una candela e una spada, l'altro una pergamena, disposti ai lati esterni di queste due figure possiamo notare due cherubini da tre ali ciascuno, per un totale di quattro, a separare le due figure invece si può notare un cherubino con quattro ali posizionato in alto ed uno con due ali posizionato in basso.

Il quadrante a destra nell'Arca, dalla stessa forma geometrica del precedente invece contiene: la raffigurazione dell'arcangelo Raffaele che fa da guida al piccolo Tobia affiancato da due cherubini con tre ali ciascuno, mentre al di sotto della fessura possiamo vedere un altro santo tenente in mano una pergamena ed al suo fianco la Maddalena, sempre sui lati esterni a queste due figure possiamo vedere quattro cherubini con tre ali ciascuno, mentre in mezzo alle due figure a fare da separatori abbiamo un cherubino con quattro ali in alto ed uno con tre e non due come nell'altro quadrante, in basso.

I due frontali, sviluppati maggiormente in lunghezza invece sono a loro volta divisi ciascuno in due superfici triangolari ed una a forma di parallelogramma, a causa della giunzione del basamento centrale a mandorla, per un totale di sei superfici, quelle disposte ortogonalmente alla figura del Cristo contengono figure scolpite di dimensione ed importanza maggiore, una di queste è la Madonna, nelle superfici diagonali, di dimensione inferiore invece sono contenuti quattro figure di santi.

All'interno di queste sei superfici possiamo contare in totale sedici cherubini con tre ali, mentre nei quattro cammini corti che ne fanno da separatori possiamo contare due cherubini con quattro ali ciascuno, quindi nel complesso della Volta abbiamo: una figura centrale, il Cristo, dodici figure secondarie ad esso ma che rappresentano personaggi principali della fede ed un totale di settantadue cherubini, ciascuno con il proprio numero di ali, posizionate nelle proprio angolazioni e posizioni, ed il proprio viso scolpito nel dettaglio.



Sulla sinistra è visibile il quadrante laterale a sinistra dell'Arca posizionato in basso rispetto al Cristo, sulla destra invece il quadrante alla destra dell'Arca.



A sinistra l'immagine rappresentante il Cristo inscritto all'interno delle mandorle, intorno a lui la schiera di cherubini con tre ali.

## CAPITOLO 2

## SOFTWARE E TECNICHE DI GRAFICA 3D

#### **2.1 BLENDER**



Blender è stato il software per il design 3D utilizzato per creare un modello tridimensionale di ogni elemento dell'Arca ed in particolare per la ricostruzione della Volta in ogni suo dettaglio.

Il programma open source mette a disposizione un numero elevato di tools per quanto riguarda il rigging, la modellazione, la composizione e il rendering di elementi tridimensionali.

I vantaggi dell'utilizzo di Blender sono: la sua disponibilità essendo il suo download disponibile a tutti dato che si tratta di un software open source, la sua compatibilità considerando che è possibile utilizzarlo su molte piattaforme ed il fatto che l'interfaccia per il lavoro mantiene in ciascuna di queste lo stesso layout.



Pagina iniziale del programma Blender.

## 2.2 RIGGING

Con rigging si intende la tecnica che permette ad una scultura digitale di essere modellata nella sua posizione attraverso uno scheletro interno o rig. Tutte le ossa che formano questo scheletro sono soggette ad una gerarchia, per esempio se immaginiamo uno scheletro umano semplificato muovendo l'osso del braccio, osso genitore, avremo uno spostamento pure dell'osso dell'avambraccio, osso figlio, e di conseguenza di tutte le ossa che a questo sono collegate: quelle della mano, poi delle dita, tutte nel loro ordine gerarchico. Questa tecnica permette di muovere ciascun osso singolarmente anche se questo movimento andrà a influenzare la posizione di tutte le ossa gerarchicamente sottoposte ad esso ma è sufficiente in un secondo momento andare a ritoccare singolarmente ciascuna di queste seguendo la gerarchia. Uno dei pochi svantaggi è che questo modo di procedere non tiene conto dei movimenti effettivamente consentiti ad un osso, possiamo per esempio ruotare di trecentosessanta gradi una mano, operazione non possibile nella realtà e tanto meno tiene conto dei movimenti muscolari o della pelle successivi a determinati movimenti, per questo è bene avere una buona conoscenza della fisionomia umana.



Esempi di rigging per creare l'ossatura di diversi animali.

## 2.3 MODELLAZIONE

La modellazione 3D è un processo il cui fine è definire una forma tridimensionale partendo da oggetti primitivi, in blender questi oggetti vengono detti mesh: un oggetto vuoto, quindi privo di massa definito da vertici, contorni e facce.

Proprio partendo da queste primitive, che possono essere una sfera o un cubo per esempio, è possibile arrivare a realizzare oggetti molto più complessi e dettagliati.

Il fine proprio della modellazione è arrivare a ricreare l'oggetto richiesto nei suoi più particolari dettagli, quindi in fase di modellazione la sua posizione o la sua dimensione non sono di nostro interesse, posizionarli nel posto corretto con la giusta scala sarà compito della fase di composizione.

#### 2.4 COMPOSIZIONE

La composizione è una tecnica che permette di selezionare oggetti o immagini singole e unirle in un'unica scena creando l'illusione che si tratti di un unico oggetto.

Beldner in questo caso permette di creare un numero elevato di oggetti separatamente e di ridimensionare, posizionare e ruotare ciascuno di essi in modo totalmente indipendente. È anche possibile, per esempio, creare più oggetti complessi in più file e poi attraverso un menù file ed un comando apposito caricare oggetti da files diversi su un solo file, quello in cui stiamo lavorando e che rappresenterà il nostro operato finale.

Ad aiutarci nella fase di composizione vi è la possibilità di utilizzo di coordinate spaziali, senza di queste il posizionamento o il dimensionamento degli oggetti sarebbe un lavoro fatto "ad occhio" e quindi relativamente impreciso.

## 2.5 RENDERING

Composto il nostro modello 3D è possibile attraverso l'operazione di rendering effettuare una "resa", ovvero la generazione di un'immagine ottenuta dalla scena tridimensionale in cui ogni oggetto possiede un proprio colore ed una propria fisica riguardo a come la luce interferisce con esso.

Considerando che in un modello 3D tutti i componenti che lo vanno a definire sono disposti in uno spazio tridimensionale ed il risultato della fase di rendering invece sarà un'immagine bidimensionale dobbiamo definire un punto di osservazione, da cui questa immagine verrà "fotografata", nel programma blender questo è possibile attraverso un oggetto telecamera, il quale definisce posizione, angolazione e dimensione del punto di osservazione che andrà a definire l'immagine finale.



Esempio di un rendering per un lavoro di design abitativo.

Tra gli effetti che andranno ad influenzare i comportamenti delle luci e delle ombre nell'immagine ottenuta attravero il rendering vi sono:

Shading: il comportamento delle ombre dovute al modo in cui la luce va a modificare il colore o la luminosità dell'oggetto su cui incide.

Texture Mapping: un metodo che permette di definire i dettagli delle superfici attraverso diverse immagini dette texture.

Le texture sono immagini che permettono di definire le ombreggiature delle superfici senza rendere quest'ultime eccessivamente omogenee: ogni volta che il livello d'ombra viene calcolato in fase di rendering, invece di usare i valori degli attributi definiti dalla geometria del rendering, i valori calcolati vengono inviati ad una texture, questa operazione si chiama texture lookup, in seguito il codice che si occupa di definire l'ombreggiatura seleziona una coordinata della texture da utilizzare e lo restituisce, in questo modo invece di creare un'ombreggiatura attraverso il rendering siamo andati ad utilizzare una parte della texture riconosciuta come ombreggiata.

Distance Fog: l'attenuazione dell'effetto luminoso attraverso oggetti o mezzi, solo il vuoto è da considerarsi perfettamente trasparente e quindi tutti gli altri materiali andranno ad opporsi al passaggio della luce. Per creare l'effetto che rende gli oggetti più lontani meno visibili a causa della diffrazione si usa questa tecnica che va a simulare un effetto nebbia, da qui il nome distance fog.

Shadows: l'effetto che si occupa di generare le ombre proiettate nelle corrette posizioni.

Reflection: di fondamentale importanza è la conoscenza dell'effetto di riflessione. La luce quando incide su un materiale in parte passa attraverso a questo materiale ma in parte viene anche riflessa "tornando indietro" con una nuova angolazione.



Legge di Fresnel utilizzata ampiamente in ogni programma che nella fase di rendering lavora sulla riflessione e rifrazione della luce.

Huygens' principle: every point on a wavefront may be regarded as a secondary source of wavelets

Fermat's principle: the path a beam of light takes between two points is the one which is traversed in the least time

Transparency: l'effetto che si occupa di generare trasparenza negli oggetti quindi permette il passaggio della luce.

Rifrazione: è importante conoscere il modo, l'angolazione e l'intensità con cui la luce passa attraverso gli oggetti.

Profondità di campo: indica quanto gli oggetti diventano più sfocati o più visibili in base alla loro posizione rispetto a dove si guarda l'immagine.

Ambient Occlusion: si occupa di simulare il comportamento della luce in presenza di oggetti che non riescono ad essere illuminati a causa della loro posizione.

Anisotropia: simula per ogni materiale il modo in cui riflette la luce per ogni direzione in cui essa arriva al punto.

## 2.6 EQUAZIONE DI RENDERING

L'equazione di rendering descrive matematicamente il flusso di energia luminosa attraverso una scena.

Attraverso un punto di interazione ed attraverso i principi di luce entrante ed uscente questa equazione va a definire l'intero trasporto di luce in tutta la scena. Tutti gli algoritmi usati dai programmi che effettuano l'operazione di rendering, blender compreso, sono stati scritti attraverso formulazioni particolari di questa equazione

$$L_o(x,ec w) = L_e(x,ec w) + \int_\Omega f_r(x,ec w',ec w) L_i(x,ec w')(ec w'\cdotec n) dec w'$$

Lo rappresenta la luce uscente in una particolare posizione x e diretta nella direzione  $\omega$ .

Li è la luce entrante da quella posizione ed in quella direzione.

Le è la luce emessa nella stessa posizione e nella stessa direzione.

L'integrale rappresenta la somma infinitesimale calcolata su un emisfero di direzioni entranti.

fr è la percentuale di luce riflessa in quella posizione della direzione entrante a quella uscente.

 $(\omega \cdot n)$  è l'attenuazione della luce dovuta all'angolo di incidenza.

Il risultato finale dell'operazione di Rendering sarà un'immagine completa quindi bidimensionale che può essere facilmente vista e stampata con le comuni stampanti.

## 2.7 ANALISI DEL COMPORTAMENTO DELLA LUCE

Un fascio di luce è un flusso di fotoni diretti nella stessa direzione, un fotone è un quanto di luce cioè la più piccola particella luminosa.

Quando il fascio luminoso incontra una superficie, di un oggetto per esempio, ciascun fotone si comporterà in un certo modo.

## 2.7.1 COMPORTAMENTI DEI FOTONI

Quando un fotone raggiunge una superficie può generare diverse interazioni:

#### ASSORBIMENTO

In questo caso l'oggetto la quale superficie è colpita dal fotone assorbe il fotone stesso. Dato che i fotoni possono essere a diverse frequenze l'oggetto ne assorbirà alcuni a determinate frequenze invece ne rifletterà altri ad altre e il risultato che se ne otterrà sarà il colore dell'oggetto, questo effetto dipende soprattutto dal materiale ovviamente.

#### DIFFUSIONE

Quando un fascio di luce colpisce un oggetto composto da un materiale non tanto riflettente parte della luce viene assorbita, un'altra parte della luce invece viene diffusa in maniera isotropica rispetto alla superficie.

#### RIFLESSIONE

Quando un fascio di luce colpisce una superficie riflettente parte di questa luce viene riflessa indietro in un'unica direzione.

#### TRASPARENZA

La trasparenza è il comportamento di un materiale che permette alla luce di passarvi attraverso in modo diffuso. Quindi se un fotone colpirà una superficie particolarmente trasparente la attraverserà in maniera rettilinea e ne uscirà con la stessa angolazione.

#### RIFRAZIONE

La rifrazione rappresenta la deviazione che il fascio di luce subirà a causa del suo passaggio attraverso il materiale, il passaggio dei fotoni all'interno dell'oggetto non sarà più rettilineo ma dipenderà dall'indice di rifrazione del materiale mentre l'angolo di uscita del fascio di luce dalla superficie sarà lo stesso dell'ingresso.

#### FLUORESCENZA

La fluorescenza è il comportamento di determinati materiali di riemettere i fotoni del fascio di luce in diverse angolazioni e con una frequenza differente rispetto a quella originale, normalmente ad una frequenza maggiore.

#### DISPERSIONE DEL MATERIALE

La dispersione è l'effetto che si genera quando un fascio di luce che colpisce un oggetto si separa in diverse componenti ciascuna con una lunghezza d'onda differente, questo è dovuto al fatto che la risposta del materiale a delle onde luminose dipende dalla loro frequenza.

## 2.8 MODELLI PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO DELLA LUCE PER IL RENDERING

## **2.8.1 MODELLO DI PHONG**

Il modello di Phong è stato uno dei primi modelli utilizzati per descrivere il comportamento della luce quando colpisce una superficie di un determinato materiale.

Matematicamente si rappresenta tramite una combinazione lineare tra il *modello Lambertiano* e il *modello speculare*. Il modello Lambertiano si occupa di descrivere il comportamento del materiale riferito alla diffusione della luce mentre il modello speculare si occupa di descriverne la riflessione. Il modello di Phong è da utilizzarsi su oggetti singoli ed isolati, non tiene per esempio conto della luce diffusa da altri oggetti.

## $\Phi = a\cos i + b\cos^m o + c$

- *a* è la variabile che si riferisce al modello Lambertiano e quindi alla diffusione del materiale.
- *b* è la variabile che fa riferimento al modello speculare quindi alla capacità di riflettere del materiale.
- *m* è una variabile che dipende dal materiale.
- *c* è una variabile dipendente dall'illuminazione del background.



Questa immagine mostra come un oggetto risponde agli effetti di diffusione e riflessione ed infine il risultato che si avrebbe attraverso il modello di Phong.

#### 2.8.2 MODELLO LAMBERTIANO



Il modello Lambertiano rappresenta la diffusione della luce dovuta ad un materiale colpito da un fascio di luce, come si può vedere dal disegno la luce diffusa risulterà isotropica. Possiamo vedere nel caso il fascio incidente alla superficie e i fasci di luce risultanti dalla diffusione disposti tra gli angoli  $-\pi/2$  a  $+\pi/2$ .

#### 2.8.3 MODELLO SPECULARE



Il modello speculare permette di studiare matematicamente l'effetto della riflessione di un fascio luminoso incidente su una superficie, idealmente la riflessione genererebbe un nuovo fascio luminoso diretto in un'unica direzione ma nella realtà ci sono diverse componenti ad angoli leggermente differenti da quello teorico.



Questa immagine mostra il comportamento della luce incidente su una sfera usando il modello di Phong, i valori di m e c sono fissati mentre si può notare la differenza di diffusione e riflessione della luce a diversi valori di a e b.



Questa seconda immagine mostra il comportamento della riflessione secondo il Modello di Phong puramente speculare: il valore della variabile legata al Modello Lambertiano è minimo, praticamente nullo, mentre quello della variabile legata al Modello speculare è vicino ad 1.

## 2.8.4 RAY TRACING

Il ray tracing è un altro metodo per effettuare il rendering, in questo caso si tiene conto anche delle interazioni luminose tra vari oggetti posti vicini tra loro diversamente dal modello di Phong.

La tecnica del ray tracing si basa sul calcolo geometrico del percorso effettuato da tutti i fasci di luce, sia quello di partenza (illuminazione) sia i fasci luminosi generati dall'interazione del primo con le superfici degli oggetti.

Se il metodo di Phong gestisce esclusivamente gli effetti di diffusione e riflessione il ray tracing permette di considerare anche gli effetti dovuti alla rifrazione della luce, quindi al passaggio di essa attraverso la superficie e all'ombreggiatura dovuta per esempio ad oggetti che non permettono il passaggio della luce.



L'immagine mostra la tecnica di ray backward tracing che permette di semplificare enormemente la fase di computazione considerando che va a gestire esclusivamente i fasci di luce visibili dalla camera (il punto di osservazione di immagine) e man mano gestisce il comportamento della luce all'indietro fino ad arrivare a gestire solo la parte dell'illuminazione principale che effettivamente ha effetto sulla scena ripresa.

#### **2.8.5 RADIOSITY**



La radiosità è una tecnica per il rendering che permette un maggiore realismo degli effetti luminosi sulle superfici.

L'idea è quella di suddividere l'intera scena in un numero elevato di piccoli poligoni, detti patch e di calcolare l'energia luminosa emessa da ciascuno, modello Lambertiano, e gli effetti di riflessione della luce dovuta all'interazione dei vari patches.

I metodi basati sulla radiosità tuttavia non vanno a definire tutti i possibili effetti generati dall'interazione dei fotoni con le superfici.

Formula per il calcolo della radiosità di ciascun patch:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij}$$

E rappresenta l'energia emessa dal patch,  $\rho$  è il parametro di riflessione, mentre la sommatoria indica l'energia riflessa sul patch da tutti gli altri patches e questa dipende dal fattore di forma F.

Il fattore di forma rappresenta la componente di luce che raggiunge il patch i da un altro

patch j, dipende dalla posizione relativa dei vari patches, cioè dalla distanza e dall'orientazione.

## 2.8.6 ILLUMINAZIONE GLOBALE ATTRAVERSO PHOTON MAPPING

Il photon mapping è una tecnica molto complessa che permette di studiare singolarmente il comportamento di ogni fotone con ogni materiale della scena. Si tratta di un metodo sviluppato da Henrick Wann Jensen che va ad approssimare l'equazione completa di rendering quindi a considerare ogni possibile interazione tra i fotoni e l'ambiente.

Viene utilizzata per simulare porzioni di scena in modo iper realistico richiedendo quindi grandissime capacità computazionali.

La luce ed i raggi provenienti dalla sorgente luminosa dalla telecamera vengono tracciati separatamente fino a quando non viene soddisfatto un criterio di terminazione, in un secondo step sono infine collegati per produrre un valore di radianza.



Nell'immagine una scena realizzata usando la tecnica del photon mapping per la gestione dell'illuminazione

## CAPITOLO 3

GRAFICA 3D SU BLENDER

## **3.1 RIGGING SU BLENDER**

In blender è possibile creare un oggetto Armature, il quale a sua volta includerà altri elementi detti Bones, elementi rigidi che andranno a rappresentare ciascuno un differente osso.

#### Armature Object

Gli oggetti Armature, proprio come ogni altro oggettto, avranno una propria origine, posizione quindi sono soggetti alle operazioni di spostamento, rotazione e ridimensionamento. Ognuna di queste modifiche appostate in Object Mode o in Edit Mode, in cui per esempio è possibile modificare singolarmente le ossa o separatamente da esso i punti di giuntura, avranno effetto solo sull'oggetto Armature, per apportare delle modifiche effettive alle ossa, come può essere il variare la loro posizione bisogna operarsi all'interno della Pose Mode.

In questa Modalità infatti è possibile ruotare ogni singolo osso, rotazione che andrà ad influire anche sulle ossa ad esso collegato, è anche possibile spostare le ossa ma questa operazione è rischiosa perché potrebbe creare problemi avere un osso spostato e staccato dal resto dello scheletro.

Un'armatura è pensata per rimanere nella posa che noi abbiamo deciso per questo è stato definito lo stato "Rest Position", nel menù Proprietà e nell'attributo Data è possibile visualizzare i diversi Layer per la nostra armatura e la Rest Position attualmente definita, nel caso noi volessimo definirne una nuova il comando da utilizzarsi, all'interno della Pose Mode, è: CTRL+A, Apply Pose as Rest Pose.

## 3.1.1 BONES

È possibile creare un osso attraverso un altro in Edit Mode, è sufficiente selezionare un punto di giunzione e poi utilizzare il comando Extrude, il nuovo osso si aggiungerà automaticamente al di sotto dell'oggetto Armature all'interno del menù di visualizzazione degli oggetti. Ogni nuovo osso creato sarà gerarchicamente sottoposto a quello da cui è stato creato.



Esempio di un'armatura di ossa creata in blender.

#### **3.2 COMPOSING SU BLENDER**

In blender è possibile inserire nuovi oggetti al nostro lavoro attraverso il comando Add, che ci permette di inserire nuovi oggetti primitivi, oppure attraverso il comando Append nel menù File che ci permette di caricare oggetti più complessi da altri file blend, caricati i nostri oggetti possiamo decidere di spostarli, ruotarli o ridimensionarli in Object Mode utilizzando i comandi appositi.

È anche possibile decidere di suddividere in diversi Layers i nostri oggetti, quest'ultimi saranno visualizzati separatamente in base ai layer che decidiamo di vedere al momento, questa operazione è molto utile nel caso noi volessimo lavorare solo su determinati oggetti nascondendo quelli che al momento non ci interessano ed anche il carico computazione sul dispositivo su cui stiamo lavorando decresce sensibilmente.

È anche possibile decidere di raggruppare determinati oggetti all'interno di un gruppo, questa operazione concede di poterli gestire più facilmente senza dover per esempio selezionare uno ad uno ogni volta, gli oggetti raggruppati su blender saranno facilmente riconoscibili perché i loro contorni si illuminano di verde e non di arancio come gli oggetti singoli. Il raggruppamento è solo un'operazione che va ad aiutare nel lavoro, effettivamente non crea nessuna relazione tra gli oggetti che ne fanno parte.

#### **3.3 MODELLING SU BLENDER**

#### 3.3.1 EDIT MODE

Questa modalità permette di suddividere l'oggetto di partenza in un numero maggiore di vertici usando il comando subdivide, aumentandone il livello di dettaglio anche se questo rischia di appesantire eccessivamente la memoria. Poi selezionando singolarmente un vertice, un bordo o edge o una faccia è possibile adattare la posizione o la forma di questi a proprio piacimento andando a modellare la forma originale dell'oggetto fino ad ottenere ciò desiderato. La diversa selezione di vertici, bordi o facce è possibile attraverso tre tipi diversi di selezione. Oltre alla loro creazione e alla loro modifica è anche possibile la loro cancellazione, questa tecnica può tornare utile per eliminare dal modello parti di oggetti che comunque andrebbero nascoste dietro o dentro ad altre.



Esempio di modelling e composing in blender.

#### 3.3.2 SCULPT MODE

Questa modalità che predilige modelli organici, quindi umani perché va ad introdurre livelli di dettagli più "imprecisi", è difficile immaginare per esempio un volto modellato come una sfera perfetta in ogni suo dettaglio.

Il primo passo è selezionare un brush, cioè un tipo di scultura, e attraverso un cursore a forma di cerchio, che per noi rappresenterà il nostro "scalpello", possiamo andare a modellare ciascuna parte dell'oggetto selezionato.

La Sculpt Mode renderà tanto più quanto sarà il livello di risoluzione dato dal numero di vertici che siamo andati a creare ma è importante partire da forme generali, come una sfera o un cubo e man mano modellarli attraverso diversi steps, perché decidere di spostare o modificare in seguito oggetti già scolpiti finirebbe a caricare in modo gravoso la memoria.

## **3.4 RENDERING SU BLENDER**

## 3.4.1 MATERIALI SU BLENDER

In blender è possibile definire il materiale di cui un oggetto è composto, questo materiale andrà a definire le caratteristiche artistiche o visive dell'oggetto come per esempio il colore o la sostanza.

Nel menù Materiale prima di tutto possiamo avere una preview, cioè un'anticipazione di come il nostro materiale si comporterà su oggetti primitivi, come può essere un cubo o una sfera per esempio, poi nel pannello Diffuse è possibile selezionare il colore di base dell'oggetto e determinate caratteristiche dipendenti dal tipo di shader che andiamo a scegliere, lo shader è una caratteristica che ci permette di variare l'effetto dell'ombreggiatura sull'oggetto, noi possiamo decidere il valore dell'intensità ed il modo in cui questa si distribuisce.

Il pannello successivo è Specular che ci permette di scegliere il colore e le caratteristiche delle luci chiare che vedremo sulla superficie dell'oggetto.

In seguito vi sono il pannello Shading, che mette a disposizione sei tools per quanto riguarda i comportament delle ombre con l'oggetto, il pannello Transparency, che permette di far variare la trasparenza dell'oggetto ed il pannello Mirror che ci consente di impostare i valori della riflessione della luce sull'oggetto.

Quindi il menù materiale non va solo a definire differenti colori tra gli oggetti ma bensì permette effettivamente di definire il lacaratteristiche fisiche ed i comportamenti legati alla luce della "sostanza" di cui l'oggetto è composto.

#### **3.4.2 TEXTURE SU BLENDER**

In blender è possibile inserire le texture tramite il menù proprietà, posizionato sulla destra, innanzitutto va selezionato l'oggetto che si vuole andare a modificare in object mode, poi si deve creare proprio nel precedente menù un materiale: non è possibile inserire una texture senza definire prima un materiale, in seguito dobbiamo inserire una texture, possiamo farlo semplicemente caricando un'immagine. Ora il nostro oggetto sarà "fatto" di questo materiale e ricoperto dalla texture appena inserita, però dobbiamo controllare che la texture copra completamente l'oggetto e di n maniera corretta: dobbiamo quindi andare in Edit Mode, selezionare tutte le facce dell'oggetto e utilizzare il comando Unwrap che ci permette di visualizzare tutte le facce selezionate nella modalità UV Editing, in cui è possibile vedere come risulterà la distribuzione della texture su ciascuna faccia, le facce possono essere visualizzate in maniera differente, questa dipende dal modo in cui abbiamo deciso di fare l'unwrap: possiamo decidere di vedere i vertici UV disposti sulle

superfici di un cubo, un cilindro o una sfera, in base alla visualizzazione scelta il lavoro può risultare più preciso o più comodo. All'interno dell'UV Editing possiamo decidere di muovere i vertici o più facce, oppure ruotarli o ridimensionarli con gli stessi comandi di Object Mode andando così a correggere così i problemi, e le imperfezioni nella distribuzione della texture sull'oggetto. L'operazione appena definita non è altro che il texture mapping.



Esempio dell'utilizzo di materiali e texture in blender.

#### **3.5 ILLUMINAZIONE SU BLENDER**

In blender per generare luci e quindi illuminare il proprio lavoro viene messa a disposizione una particolare classe di oggetti: Lamp.

È possibile inserire più di uno di questi oggetti al fine di creare più punti di origine della luce e quindi cambiare il modo in cui essa si propaga all'interno della scena, è anche possibile decidere il tipo ed il colore della lampada, si può scegliere tra:

Point, che emette la stessa quantità di luce in ogni direzione.

Sun, che emette una quantità costante di luce da un punto molto distante e in un'unica direzione, corrisponde ad un oggetto di tipo Point in cui l'intensità luminosa è impostata al valore massimo, viene utilizzaro per simulare una fonte di luce molto forte come potrebbe essere il sole.

Spot, una fonte di luce che emette un fascio di luce cuneiforme in un'unica direzione, può essere utilizzato per mettere in risalto determinare porzioni di scena.

Hemi Lamp, un oggetto a forma di cupola che fornisce luce la cui direzione si distribuisce in un emisfero di 180 gradi.



Insieme degli oggetti per creare fonti di luce in blender.

## **3.6 CAMERA SU BLENDER**

La camera è un oggetto molto particolare, non è visibile nell'immagine ottenuta dopo aver effettuato l'operazione di rendering ma bensì è proprio lei che decide quale porzione di scena verrà ottenuta.

Di default una scena contiene solo una camera ma è possibile inserirne diverse, tuttavia è consentito l'utilizzo di una di esse per volta.



Esempio dell'utilizzo della camera in blender per l'acquisizione di scene (immagini 2D).

## CAPITOLO 4

LA VOLTA

#### 4.1 REALIZZAZIONE DELLA VOLTA

La Volta rappresentante il cielo al di sopra della rappresentazione di Sant'Agostino defunto è stata realizzata nei suoi elementi in maniera separata. La struttura della Volta e ogni singola figura che ne fa parte sono state realizzate da più persone all'interno del progetto del corso di Computer Vision del professore Cantoni Virginio dell'Università degli studi di Pavia. L'opera di fusione di ogni sua parte, il "merge", è oggetto di questa Tesi triennale.

#### 4.2 RIGGING DELLA VOLTA

La quasi totalità delle figure facenti parte della Volta possiedono uno scheletro o armatura realizzata tramite il programma Adobe Fuse, un programma per la realizzazione della grafica tridimensionale incentrato sul design di personaggi sia umani sia animali.

Alcune statue sono state realizzate senza uno scheletro che modellasse la loro posizione ma bensì partendo da oggetti base e modellandoli fino ad ottenere perfette rappresentazioni dell'oggetto reale, questa scelta di realizzazione è dovuta al fatto che diverse statue hanno diversi realizzatori e quindi sono state scelte diverse strade, il fatto che la posa della statua così realizzata non sarebbe in seguito modificabile non rappresenta un punto critico nel lavoro poiché il fine del progetto è realizzare una perfetta coppia dell'Arca di Sant'Agostino e in questo caso particolare la Volta, l'utilità maggiore di uno scheletro si ha nel caso si voglia in futuro modificare la posa degli elementi andando a modificare in modo drastico la scena oppure per creare delle animazioni video, non è questo il caso.

#### **4.3 COMPOSING E MODELLING DELLA VOLTA**

Dopo aver caricato uno per uno gli elementi della Volta da singolo file in un unico che precedentemente conteneva solo il basamento, il "guscio", su cui appoggiare ogni figura ci si è posto il problema di posizionare ogni elemento al proprio posto, nella giusta posizione e con la corretta dimensione. Per far ciò si è cercato di utilizzare al meglio le proporzioni ottenute da fotografie o da rappresentazioni artistiche e quando non possibile si è utilizzata la simmetria della scena contenuta nella volta per cercare punti di riferimento utili al fine. Il risultato ottenuto risulta essere una rappresentazione tridimensionale particolarmente fedele all'originale.

Va tenuto presente che essendo state realizzate a parte le statue, i realizzatori hanno giustamente deciso di creare, seguendo ovviamente una logica, parti realmente non presenti, come per esempio le parti posteriori alle rappresentazioni per esempio gli arti inferiori, questa scelta si è dimostrata necessaria considerando l'importanza di avere una visuale completa della figura e non solo una sezione di essa, tuttavia nel posizionamento all'interno della Volta questa scelta ha richiesto che queste parti in eccesso venissero eliminate o tagliate, operazione che è stata possibile attraverso un lungo e accurato lavoro all'interno della modalità Edit di Blender, l'eliminazione di porzioni, a volte anche abbastanza ampie, dei singoli modelli tridimensionali di ogni figura ha permesso un alleggerimento notevole dello spazio totale occupato in memoria dal progetto finale.

#### **4.4 RENDERING DELLA VOLTA**

La fase di Rendering ha richiesto innanzitutto una corretta posizione delle fonti di luce all'interno del progetto, va considerato per esempio il fatto che la parte posteriore del basamento in cui sono posizionate tutte le figure non era di alcun interesse quindi la sua illuminazione sarebbe risultata vana e sarebbe andata esclusivamente a caricare il già notevole peso computazionale. Quindi le fonti di luce sono state posizionate in modo tale da illuminare la parte frontale della Volta con particolare attenzione alle grandi figure centrali, in particolare il Cristo, vero protagonista della scena.



Nell'immagine sono mostrate le posizioni delle fonti di luce all'interno del progetto.



Nell'immagine sono mostrate tutte le camere per l'acquisizione di immagini di rendering dal progetto, in arancione è visibile quella selezionata al momento.

Sono stati posizionati un totale di sette fonti di luce di tipo Point, un oggetto di tipo Sun avrebbe illuminato in maniera eccessiva la Volta, il primo oggetto è stato posizionato al centro del basamento rispetto gli asse x, y e rialzato rispetto all'azze z, quattro altre fonti di luce sono state posizionate negli angoli del basamento per illuminare le parti dove l'effetto della luce centrale risultava più scarso, al centro dei lati lunghi del basamento sono state posizionate le ultime due fonti di luce.

Per quanto riguarda il materiale che compone la Volta bisogna ricordare che l'opera originale è stata realizzata in marmo bianco di Carrara quindi si è andata ad utilizzare un MatCap: si tratta di un materiale già realizzato che Blender permette di assocciare tramite un'unica selezione ad ogni oggetto che compone il progetto, altrimenti sarebbe stato necessario ricreare lo stesso materiale con la stessa texture per ogni singolo elemento.

Infine l'acquisizione delle immagini di rendering sono avvenute tramite nove telecamere posizionate in modo tale da avere diverse viste della Volta in posizioni differenti e che ne facessero risaltare il livello di dettaglio, la tridimensionalità e il comportamento in funzione della luce.



Immagine di rendering della volta attraverso una camera posizionata lateralmente e diagonalmente.

## 4.5 UTILIZZO DELLA MEMORIA NELLA REALIZZAZIONE DELLA VOLTA

Considerando la grandissima quantità di dati e di dettagli che vanno a completare il progetto sono stati necessari numerosi accorgimenti durante la sua realizzazione.

Il primo modo per cercare di utilizzare meno memoria è stato realizzare i modelli tridimensionali in maniera "professionale": utilizzare il numero minore possibile di vertici o facce, cioè andare a suddividere in un numero maggiore di vertici le parti dei modelli che effettivamente lo richiedevano, per esempio è inutile suddividere in più facce una superficie piana, la suddivisione in più vertici va fatta esclusivamente nelle parti curve e che richiedono maggiore attenzione ai dettagli, anche in questi casi tuttavia Blender mette a disposizione i modificatori, strumenti che permettono di ottenere particolari effetti utilizzando un numero limitato di facce.

La memoria grafica ha visto i suoi picchi di utilizzo durante le modifiche in Edit Mode dei singoli elementi, da questo punto di vista Blender ci viene in aiuto permettendoci di caricare in questa modalità solo un oggetto alla volta, tuttavia va considerato in alcuni casi l'elevatissimo livello di dettagli di ogni singolo oggetto, è stato necessario trovare il miglior compromesso tra il numero di vertici e facce.

La CPU non è stata utilizzata in maniera realmente eccessiva durante le fasi di modellazione o composizione, invece ha dovuto sopportare un lavoro veramente gravoso durante la fase di Rendering, l'acquisizione di ogni immagine di rendering è stata un'operazione che ha richiesto anche decine di minuti in base soprattutto al livello di risoluzione delle immagini.

La memoria principale è stata utilizzata ampiamente in tutta la fase di realizzazione del progetto, è stato necessario ad un certo punto non solo smettere di utilizzare un semplice computer casalingo per optare per qualcosa di maggior potenza ma lavorare in maniera più saggia, come ad esempio adottando la suddivisione in layer, speciali "oggetti" non direttamente gestibili come tutti gli altri oggetti all'interno di Blender, grazie ai quali è possibile decidere di visualizzare solo determinati oggetti al di fuori di quel determinato layer, questo modo di lavorare oltre a rendere meno confuso il lavoro ha permesso di continuare la realizzazione del progetto sui calcolatori messi a disposizione. Un'altra tecnica per cercare di non appesantire ulteriormente la memoria principale è stata semplificare il più possibile le forme più nascoste, limitandone il numero di facce quindi in parte il livello di dettaglio, oppure cancellare le porzioni degli oggetti nascoste dietro ad altri elementi, come per esempio le parti delle statue che sono nella parte posteriore del basamento.

#### 4.6 SCOPO DEL PROGETTO

Lo scopo di realizzare un modello tridimensionale della Volta è quello di essere stampabile in differenti modi, sia su oggetti bidimensionali che diano l'illusione della tridimensionalità sia attraverso stampanti 3D realizzando proprio una perfetta copia dell'opera originale.

Il fine è quello di rendere visibile a chiunque ed in qualsiasi luogo un'opera artistica che essendo unica è osservabile solamente di persona a Pavia, senza tuttavia avere una completa visuale considerando che vedere frontalmente la Volta per esempio è fisicamente impossibile a causa della sua posizione all'interno dell'Arca, grazie a questo progetto chiunque, sia per via digitale attraverso il modello realizzato e salvato, sia fisicamente attraverso la riproduzione di quest'ultimo ha la possibilità di osservare chiaramente e in modo diretto e da vicino qualcosa mai visto prima.

Una seconda utilità, non in fatto di importanza, magari meno ovvia è la salvaguardia delle opere d'arte, l'Arca di Sant'Agostino è un'opera marmorea realizzata durante il quattordicesimo secolo e come ogni cosa soggetta all'usura del tempo ed a possibili rischi alla sua integrità, quindi è uno dei compiti della tecnologia e di chi con essa lavora mettere a disposizione mezzi e capacità al fine di proteggere l'arte realizzando così qualcosa che può durare in eterno ed in eterno essere vista.



Visione completa frontale del modello tridimensionale della Volta.