

Politecnico di Torino



Corso di Laurea in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

**Gestione del patrimonio storico architettonico:
rilievo metrico 3D, modellazione BIM e analisi dei
fenomeni di degrado**

Relatore:

Prof. Marco ZERBINATTI

Correlatori:

Prof. Andrea Maria LINGUA

Prof.ssa Anna OSELLO

Candidata:

Giorgia Nobile

Indice

Introduzione	2
I. I Sacri Monti	4
1.1 Definizione di Sacro Monte	4
1.2 Il Sacro Monte di Varallo	5
1.3 Ambientazione del Sacro Monte di Varallo	12
1.4 Caso studio: il complesso di Nazareth	14
1.4.1 Inquadramento	14
1.4.2 Le cappelle	16
II. Tecniche di rilievo	23
2.1 Rilievo topografico.....	25
2.2 Rilievo fotogrammetrico	26
2.2.1 Rilievo fotogrammetrico <i>UAV</i>	28
2.3 Rilievo <i>LiDAR</i>	29
III. Acquisizione dei dati.....	33
3.1 Acquisizione mediante rilievo topografico	35
3.1.1 Rete di inquadramento e raffittimento	35
3.1.2 Rete di dettaglio	37
3.2 Acquisizioni mediante <i>Laser Scanner</i>	38
3.3 Acquisizioni mediante <i>UAV</i>	40
IV. Elaborazione dei dati acquisiti da rilievo	42
4.1 Elaborazione dei dati acquisiti mediante <i>Laser Scanner</i>	43
4.1.1 Importazione delle scansioni.....	43
4.1.2 Registrazione dei <i>marker</i>	44
4.1.3 Inserimento delle coordinate e collocazione delle scansioni	46
4.1.4 Verifica della tensione dei <i>target</i>	50

4.1.5	Colorazione delle scansioni	52
4.1.6	Esportazione della nuvola di punti.....	53
4.2	Elaborazione dei dati acquisiti mediante <i>UAV (ContextCapture)</i>	54
4.2.1	Importazione fotogrammi e inserimento delle caratteristiche della camera	54
4.2.2	Triangolazione aerea	55
4.2.3	Ricostruzione	60
4.2.4	Esportazione della nuvola di punti.....	63
4.3	Elaborazione dei dati acquisiti mediante <i>UAV (Visual SFM)</i>	64
4.3.1	Importazione dei fotogrammi.....	64
4.3.2	Inserimento delle coordinate.....	65
4.3.3	Ricostruzione nuvola sparsa.....	66
4.3.4	Ricostruzione nuvola densa	66
4.3.5	Esportazione della nuvola di punti.....	67
V.	Elaborazione delle nuvole di punti.....	69
5.1	Confronto fra <i>Context Capture</i> e <i>Visual SFM</i>	69
5.2	Pulitura	71
5.2.1	Nuvola ottenuta mediante <i>Laser Scanner</i>	71
5.2.2	Nuvola fotogrammetrica	72
5.3	Filtraggio	73
5.4	Unione	73
VI.	Il <i>BIM</i>	76
6.1	Metodologia.....	76
6.2	Il concetto di interoperabilità	77
6.3	Il <i>BIM</i> applicato al patrimonio architettonico	78
6.4	Preparazione delle nuvole di punti per <i>Revit: Recap 360</i>	79
6.5	Creazione del modello 3D: <i>Revit</i>	81

6.5.1	I <i>workset</i>	81
6.5.2	Importazione e georeferenziazione globale delle nuvole di punti	82
6.5.3	Funzionalità e <i>plugin</i>	86
6.5.4	Realizzazione del terreno	92
6.6	I <i>LOD</i>	94
VII.	Riconoscimento del degrado	99
7.1	La procedura seguita	99
7.2	Il Portale della cappella due	100
7.2.1	Classificazione dei fenomeni di degrado	103
7.2.2	Operazioni di recupero.....	111
7.3	Altri elementi architettonici.....	115
7.4	Lessico del degrado – NorMaL 1/88.....	117
VIII.	Il <i>database</i>	120
8.1	La manutenzione programmata	120
8.2	Gestione del database	121
8.2.1	Creazione dei parametri condivisi.....	121
8.2.2	Creazione dei parametri di progetto.....	123
8.2.3	Esportazione dei dati da <i>Revit</i> e creazione del <i>database</i>	125
8.2.4	Consultazione dei dati.....	132
	Conclusioni	138
	Indice delle figure	141
	Bibliografia	146
	Allegati.....	148

Introduzione

In un paese come l'Italia, caratterizzato da un patrimonio storico architettonico di importante valore, è fondamentale porre una costante attenzione alle attività di conservazione e recupero. A tal proposito, l'innovazione tecnologica assume grande rilievo circa la gestione di questa categoria di edifici.

All'interno dell'elaborato sono state trattate le nuove tecniche di rilievo e modellazione, valutandone l'applicabilità ai beni architettonici, in particolare ad alcune cappelle del Sacro Monte di Varallo, dichiarato Patrimonio Mondiale dell'Umanità nel 2003.

La presente tesi si articola in tre fasi: il rilievo, la modellazione e la creazione del *database*.

La prima fase vede come obiettivo ultimo quello di riprodurre delle nuvole di punti, aventi la precisione di un centimetro, ai fini della restituzione tridimensionale del modello in scala 1:50. Sono state utilizzate, oltre al rilievo topografico, le metodologie innovative di fotogrammetria aerea *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* e la tecnica *LiDAR (Light Detection And Ranging)*. L'elaborazione dei dati acquisiti mediante il rilievo ha permesso di creare le nuvole di punti, sulle quali sono state effettuate le comparazioni e le unioni, generando poi quella finale utile alla restituzione del modello tridimensionale.

Quest'ultimo non è stato l'unico obiettivo della metodologia *HBIM* (altrimenti si sarebbero potuti utilizzare anche approcci non interoperabili) ma si aggiunge a quello della realizzazione del *database* in futuro consultabile ai fini della conservazione e manutenzione delle tre cappelle oggetto di studio.

Infatti, in questa banca dati, creata a seguito di un sopralluogo mirato, sono state inserite le informazioni circa i fenomeni di degrado presenti sulle tre cappelle oggetto di studio, analizzando le plausibili cause e soluzioni.

I. I Sacri Monti

1.1 Definizione di Sacro Monte

Il Sacro Monte può essere definito come un “[...] percorso devozionale, tipico dell’area prealpina occidentale, che prevede, in un contesto paesisticamente significativo e caratterizzato dalla presenza di un precedente santuario una storia sacra narrata in figura, attraverso cappelle isolate disposte nell’ambiente secondo una logica predeterminata e composte dall’integrazione figurativa di sculture in legno o terracotta, e affreschi [...]”.¹

I complessi dei Sacri Monti constano di una molteplicità di edifici antichi, le cappelle, inseriti in un contesto ambientale caratterizzato da un clima normalmente piuttosto umido, spesso circondati dalla vegetazione, costruiti su una collina, a diretto contatto con il terreno, la cotica erbosa o la roccia. Al loro interno ospitano pitture e sculture realizzate per motivi di devozione. Il fatto che le cappelle dei Sacri Monti di norma non ospitassero degli altari, cioè non fossero luoghi destinati alla celebrazione della liturgia, ma alla devozione e all’insegnamento religioso, ha evitato interventi legati al rinnovamento del culto, ma nello stesso tempo ha comportato delle operazioni necessarie per mantenere le scene illustrate nelle cappelle in condizioni decorose e leggibili, con interventi che hanno visto aggiungere materiali nuovi a quelli originari, con integrazioni non sempre felici.

I Sacri Monti di Varallo, Crea, Orta e Varese possono essere etichettati come tali in quanto rispondono a delle caratteristiche comuni. Il registro dei tempi ci dice che quello di Varallo è il più antico, ma tutti e quattro sono stati fondati entro la prima metà del ‘600, si sviluppano intorno a una devozione preesistente e sono legati a un ordine regolare. L’impostazione dei Sacri Monti nati dopo quello di Varallo seguiva le specifiche regole dettate da San Carlo Borromeo e riproponevano non più solo la vita di Gesù Cristo, ma anche quella di San Francesco (Crea e Orta) e al tema del Rosario (Varese).

¹ VILLATA, Edoardo, “Cos’è un Sacro Monte? Per una casistica dei Sacri Monti Prealpini” in: CARPINTERI, Alberto, *Il patrimonio pittorico murale dei Sacri Monti: monitoraggio, valorizzazione e recupero*, Aracne Editrice, Roma, pag. 14

1.2 Il Sacro Monte di Varallo

Il Sacro monte di Varallo [Figura 1] è il più antico e il più importante tra tutti i Sacri Monti sorti nell'area piemontese lombarda. Fondato dal francescano osservante e filosforzesco Bernardo Caimi² nella seconda metà degli Anni Ottanta del Quattrocento, nacque come imitazione dei luoghi santi di Palestina e in principio era conosciuto come Santo Sepolcro di Varallo. Il Padre Bernardo Caimi, inviato come commissario a Gerusalemme, constatando la gravità della minaccia turca per i pellegrini che si recavano in Terra Santa, maturò l'idea di riprodurre con particolare fedeltà in Occidente i principali santuari della Palestina, creando quasi una "Terra Santa in miniatura" in modo tale che i pellegrini potessero ripercorrere il percorso devozionale senza che essi si allontanassero dalla propria terra.



Figura 1 - Il sacro Monte di Varallo
(Fonte: <http://www.sacromontedivarallo.org/wp/>)

² Bernardino Caimi nacque nella prima metà del XV secolo, prese i voti come francescano minore osservante e risulta documentato per alcuni anni nel convento di Sant'Angelo a Milano, in seguito in qualità di guardiano al convento di Lodi.

"[...] Nei primi mesi del 1478 è in Terrasanta come commissario dei luoghi santi incaricato di eleggere il nuovo custode dopo la morte del padre Giacomo di Alessandria, guardiano del Monte Sion. Forse negli anni subito successivi effettuò un secondo viaggio in Terrasanta. Tornato in occidente concepì l'idea di riprodurre i luoghi santi della Palestina per consentire ai fedeli di svolgere in loco il rituale pellegrinaggio considerato per la devozione francescana tappa importante di un percorso di raccoglimento, preghiera e meditazione sulle tappe della vita di Cristo [...]"

Fonte: www.sacromonte-varallo.com

Nella ricerca del luogo più adatto per realizzare il suo sogno, pare sia giunto per la prima volta a Varallo nel 1481, trovando rispondente alle sue esigenze la terrazza di roccia che domina la cittadina.

Il 21 dicembre 1486 ottenne dal Pontefice Innocenzo VIII il brevetto che lo autorizzò a accettare la donazione dei terreni, da parte dei maggiorenti varallesi, per dare inizio alla “Nuova Gerusalemme”.

Dopo la morte di Bernardo Caimi ne proseguì l’opera il vercellese Beato Candido Ranzio, che rimase al Sacro Monte fino al 1509.

Nel 1514 uscì la più antica guida dei Misteri del Monte di Varallo, che ne descrive ben ventisette tra terminati e in via di completamento.

Nel corso dei primi due decenni del Cinquecento, con l’intervento di Gaudenzio Ferrari, nacquero le cappelle teatrate, destinate a rimanere canoniche, le quali assunsero una funzione narrativa delle vicende e soprattutto della Passione di Cristo tramite la fusione di pittura e scultura. Gaudenzio Ferrari era un pittore, scultore e architetto di eccezionali doti e può essere considerato il grande regista di tutto il complesso operando fino al 1528.



*Figura 2 - Interno della cappella 5 "Arrivo dei Magi"
(Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com>)*

A lui si devono le opere più ispirate, dalle statue dell'Annunciazione, Presepe, Adorazione dei pastori, Circoncisione, al capolavoro della Crocefissione, alla cappella dei Magi.

Le statue a grandezza naturale [Figura 2] e con i volti dei personaggi della vita quotidiana restituiscono una rappresentazione realistica e coinvolgente del raccoglimento e della preghiera, permettendo ai pellegrini di immedesimarsi nelle scene della vita sacra.

I personaggi sono definiti con estrema immediatezza, non solo nei tratti fisici, ma anche negli aspetti emotivi, mostrandone anche l'umanità e i sentimenti. Per la realizzazione delle statue utilizzava per lo più la terracotta.

Dopo la morte di Gaudenzio Ferrari l'attività edificatoria rallentò, ma ormai il Sacro Monte godeva di una vasta notorietà. Per qualche tempo lavorò come pittore l'allievo di Gaudenzio, Bernardino Lanino, “[...] fedele interprete nella tradizione *gaudenziana*, pur con gli opportuni aggiornamenti [...]”³, a cui si devono gli affreschi dell'antico Palazzo di Pilato.

Al sommo del percorso del Sacro Monte dovrebbe essere presente la più grande e spettacolare delle cappelle, anche se nel Sacro Monte di Varallo non è stata rispettata questa consuetudine, infatti il percorso varallese, come si evince in *Figura 3*, si conclude con la cappella 45.

Negli Anni Sessanta del Cinquecento Galeazzo Alessi⁴ effettuò un nuovo ambizioso progetto: il “Libro dei Misteri”. L'architetto aveva ideato una risistemazione del percorso devozionale che conferiva un carattere diverso al complesso varallese, riorganizzandolo in tre aree distinte, pianificate anche in considerazione delle caratteristiche del terreno.

Una prima zona, scoscesa, al di sotto del pianoro dove oggi sorgono le piazze, partendo dalla monumentale Porta di ingresso e dalla cappella di Adamo e Eva (capp. 1), in un contesto ricco di piante e di verde, con fontane e giochi d'acqua, avrebbe ospitato le cappelle, pregevoli tempietti a pianta centrale, destinate a narrare la storia di Cristo dall'Annunciazione (capp. 2) sino all'ingresso in Gerusalemme.

³ DEFILIPPIS, Elena, *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Borgosesia 2006, pag. 25

⁴ Galeazzo ALESSI è stato un architetto italiano. Si formò inizialmente sotto la direzione dell'architetto e pittore Giovan Battista Caporali per poi studiare attentamente l'architettura antica, che segnò in modo indelebile il suo stile. A Roma incontrò Michelangelo Buonarroti e la sua influenza si sentirà nelle sue realizzazioni successive.

Al ricco giardino inferiore avrebbe fatto da contrappunto la zona pianeggiante della sommità del Monte, destinata, invece, a riprodurre un ambiente urbano, cinto da mura, la Città di Gerusalemme, con raffinati palazzi civili composti intorno a una piazza ottagonale porticata, teatro della storia della Passione di Cristo.

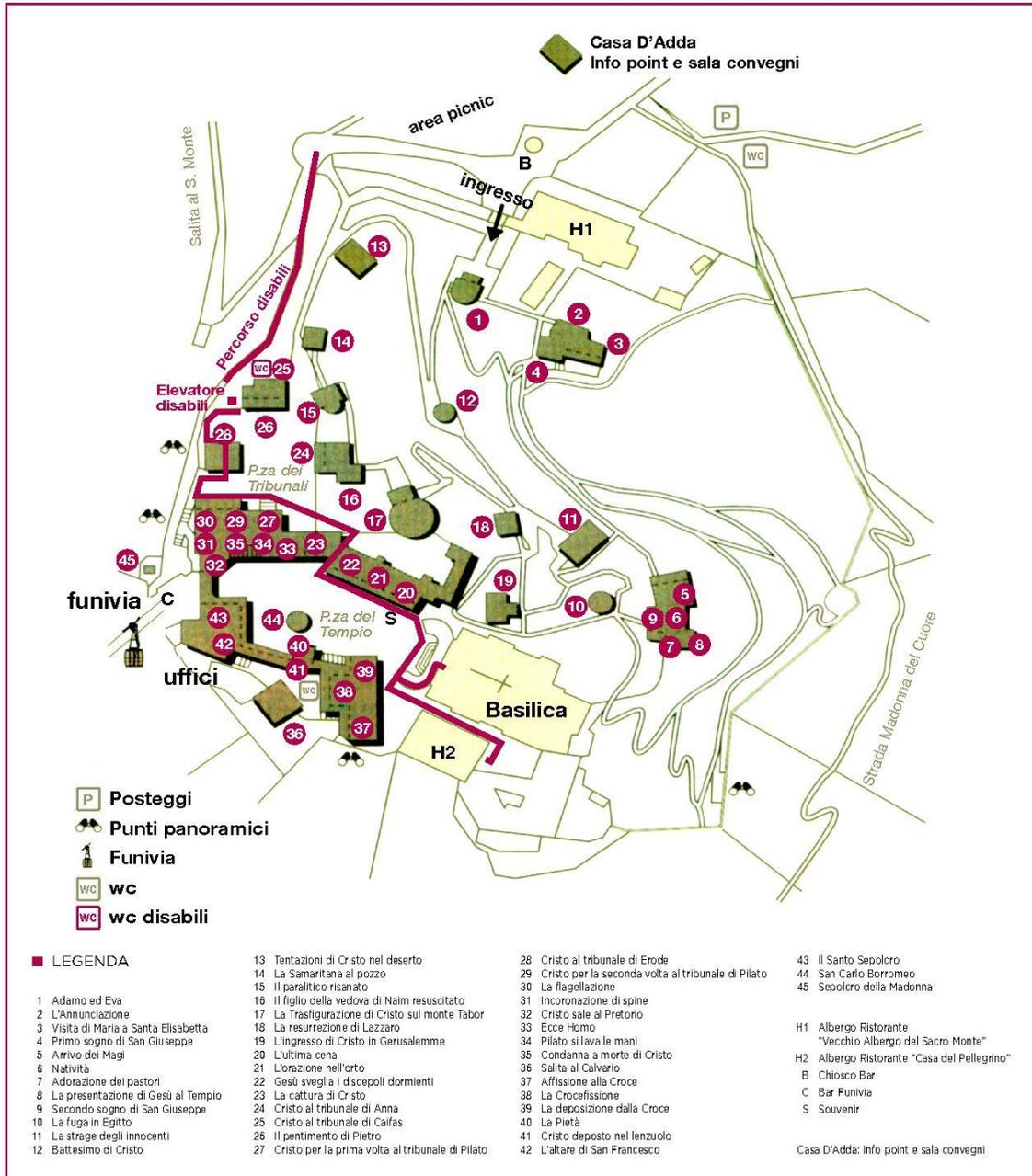


Figura 3 - Mappa del Sacro Monte di Varallo
 (Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=174)

La terza area, in un contesto selvaggio e boschivo, quasi di natura incontaminata, avrebbe ospitato le cappelle del Limbo, del Purgatorio e dell'Inferno.

Il Sacro Monte caro ai francescani fu così radicalmente trasformato in un luogo di meraviglie e delizie, destinato a stupire e a dilettere i sensi, consentendo al pellegrino di ammirare insieme lo spettacolo dell'arte e quello della natura. Nelle eleganti architetture ideali sarebbe stata narrata in pittura e scultura la storia universale dell'uomo dall'origine alla fine del mondo, avente come fulcro la storia della vita di Cristo.

Il progetto dell'Alessi, fortemente osteggiato dai frati, che vi leggevano un travisamento degli intenti originari, fu realizzato solo in minima parte: la Porta Maggiore (di ingresso) e la cappella di Adamo e Eva (capp. 1).

Ci fu però una forte ripresa di lavori, tant'è vero che si realizzò tutta la ghirlanda di cappelle che illustrano la vita pubblica di Gesù. Questo sviluppo si deve per lo più a S. Carlo Borromeo che prese molti provvedimenti per lo sviluppo e il buon funzionamento del Santuario. Le cappelle costruite in questi anni ripresero le tipologie architettoniche alessiane, facilmente accessibili grazie a un repertorio ricco di soluzioni generali, ma anche di particolari costruttivi e di facile uso e disponibilità, quale era il "Libro dei Misteri".

Dopo la morte di S. Carlo Borromeo, il Duca di Savoia, Carlo Emanuele I, si recò al Sacro Monte nel 1583, facendo erigere la cappella della Strage degli Innocenti.



Figura 4 - Interno della Cappella 11 "La Strage degli Innocenti"
(Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com>)

Il progetto iniziato da Carlo Borromeo fu poi portato avanti dal Vescovo di Novara Carlo Bascapè, che riorganizzò il complesso secondo le indicazioni del Concilio di Trento. Quest'ultimo, della durata di diciotto anni e concluso nel 1563, stabilì che la raffigurazione dei soggetti sacri aveva la funzione di rafforzare l'abitudine di avere sempre presenti i principi della fede alimentando il sentimento religioso dei fedeli.

Proprio in questo contesto culturale, durante il suo episcopato novarese, Carlo Bascapè diede un forte impulso soprattutto per realizzare i Misteri della Passione. Infatti nei primi anni del Seicento sorse il nuovo Palazzo di Pilato con la Scala Santa, il primo sogno di Giuseppe (capp. 4), e ebbe inizio l'attività di Giovanni d'Enrico, che nel 1614 diede un nuovo piano generale per la spianata del Monte e furono erette le cappelle della Piazza dei Tribunali [Figura 5], dove l'ultima cappella, Cristo al Tribunale di Anna (capp.24), fu eretta nel 1737.

Durante questo secolo, dopo che la Valsesia passò sotto il dominio dei Savoia, l'architetto Benedetto Alfieri progettò la tribuna dell'altar maggiore, fu iniziata il portico della Piazza Maggiore, sorsero gli altari laterali e furono ornati di pitture le cappelle della Chiesa. Durante il XVIII secolo avvennero anche molte opere di restauro, rifacimenti di affreschi e l'erezione della facciata della Chiesa.



*Figura 5 - Piazza dei Tribunali
(Foto di G. Nobile)*

A partire dalla metà del Settecento si registrarono interventi a livello urbanistico-architettonico, che resero il Monte una possibile zona residenziale stagionale.

Nel 1886 la Marchesa Severino Sanmartino Parella fece erigere in Piazza del Tempio [Figura 6] l'edificio sovrastante il porticato come sua residenza estiva. Successivamente nel 1863 fu edificato, sempre in Piazza del Tempio, l'edificio sovrastante il Sepolcro e fu completata la chiesa con una facciata eclettica.



*Figura 6 - Piazza del Tempio
(Foto di G. Nobile)*

Nel complesso sono state edificate 45 cappelle, alcune delle quali sono raccolte attorno a una piazza che, grazie anche ai percorsi immersi nella vegetazione prevalentemente boschiva, caratterizzano gli aspetti visivi e urbani.

La valle non è naturale, ma è frutto della cava da cui sono state estratte le migliaia di pietre per la costruzione del Sacro Monte.

Il Sacro Monte è una proprietà del Comune di Varallo (Amministrazione Civile del Sacro Monte) e dal luglio del 2003 è stato riconosciuto come bene d'interesse mondiale tutelato dall'UNESCO.

1.3 Ambientazione del Sacro Monte di Varallo

La perfetta ambientazione del Sacro Monte nel contesto paesaggistico è dovuta anche all'uso, nella costruzione, di soli materiali locali. Dalle *beole*, estratte dalle cave dell'Alta Valle, alla pietra di Loreto o al marmo di Parona con cui sono state realizzate colonne, gradini, rivestimenti e profili architettonici.⁵

Le cappelle del Sacro Monte di Varallo possono essere considerate degli ambienti *semiconfinati*, cioè sono soggette a un continuo interscambio climatico con l'ambiente circostante, che si presenta molto umido. Non sono mai chiuse da una facciata e, se da un lato questo evita il rischio di trasformare in opere museali, dall'altro impedisce il controllo del microclima interno. Devono quindi convivere con i mutamenti climatici e la forte umidità ambientale, la quale è spesso la causa dei degradi presenti.

Agisce per:

- infiltrazione diretta dei tetti delle cappelle: è conseguente al fenomeno delle precipitazioni atmosferiche e all'esistenza di fessurazioni nell'involucro esterno come murature e tetti, che ne permettono o ne agevolano la penetrazione all'interno;
- per risalita capillare: permette all'acqua di giungere dal basso, tramite forze di coesione, nelle porosità dei materiali, e di inzupparli, causando un degrado generale delle strutture;
- per dilavamento delle piogge che aggrediscono direttamente sulle zone non coperte.

Queste tre cause oltre a creare erosioni, generano degradi biologici come muffe e colonizzazioni biologiche.

Le muffe provocano enormi danni in contesti come quello del Sacro Monte nel quale sono presenti affreschi, pitture e statue, perché generano un decadimento che inizia con lo sfarinamento delle pitture per poi passare allo sgretolamento o scomposizione degli strati sottostanti.

Le colonizzazioni biologiche consistono in una crescita di microrganismi su un substrato, che provocano un cambiamento indesiderato delle proprietà dei materiali. La loro presenza quindi influenza anche i substrati sottostanti, ne consegue che, quando la loro crescita è evidente, si deve verificare in che misura questa danneggia il substrato per non incorrere in danni irreversibili.

⁵ MASSONE, Enrico, *Sacri Monti in Piemonte. Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos Edizione, Torino 1991, pag. 133

In buona parte del complesso del Sacro Monte si notano fenomeni di degrado relativi al dilavamento e di distacco degli intonaci. I degradi e le soluzioni relative alle parti murarie sono approfonditi nei capitoli successivi, in quanto il fine ultimo della tesi è quello di realizzare un *database* che contenga i degradi rilevati sulle facciate delle cappelle oggetto di studio.

I tetti delle cappelle sono costruiti secondo una tecnica tradizionale diffusa in loco, che prevede una struttura portante realizzata con elementi di legno di elevata resistenza, di solito larice, e una struttura secondaria costituita da correnti orizzontali posati sui puntoni parallelamente alla linea di gronda, ai quali si poggiano i listelli con lastre di pietra sovrapposte [Figura 7].



*Figura 7 - Copertura della Cappella 4
(Foto di G. Nobile)*

Per questi manti a falda inclinata sono utilizzate delle lastre di pietra, comunemente chiamate *beole*, che hanno uno spessore che può arrivare fino ai 12 cm, con forma pseudo-rettangolare.

Questa tipologia di coperture è soggetta a patologie legate all'umidità e all'infiltrazione dell'acqua piovana.

“[...] Nel dettaglio, il meccanismo degli inconvenienti è grosso modo il seguente. L’acqua penetra attraverso le perdite del manto, viene assorbita dal legno delle strutture che si imbibisce sino a superare le soglie di umidità necessarie all’insediamento dei funghi del marcimento. [...]”⁶

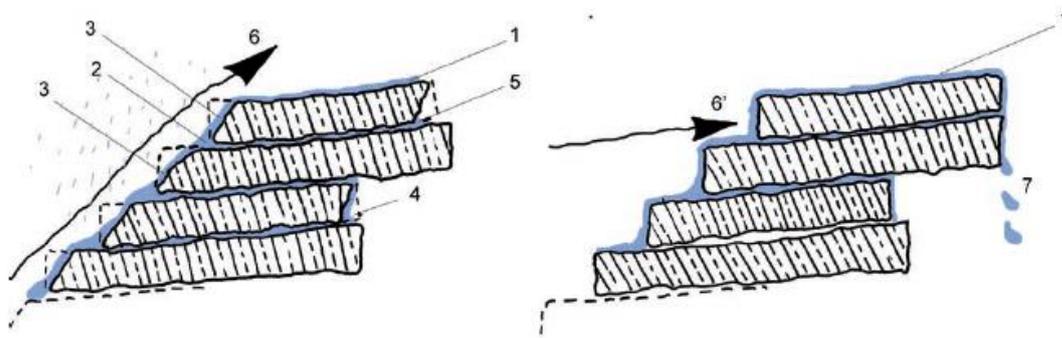


Figura 8 - Figure schematiche con e senza accorgimenti per l'infiltrazione d'acqua (Fonte: S. FASANA, P. SCARZELLA, "Il tetto con manto 'di piode'")

Per prevenire questo fenomeno si potrebbero utilizzare: lastre più grandi per il primo corso di gronda, in modo da ridurre il numero di giunti laterali; scaglie di compensazione che garantiscono la corretta inclinazione degli elementi, la planarità dei singoli corsi e limitano le infiltrazioni per capillarità; lo sfasamento dei lati superiori di piode di corsi sovrapposti così da prevenire il gocciolamento all’interno; una corretta lavorazione dei bordi delle lastre, eliminando l’angolo a 90°, per diminuire l’effetto di risalita dell’acqua causata dal vento e la relativa infiltrazione.

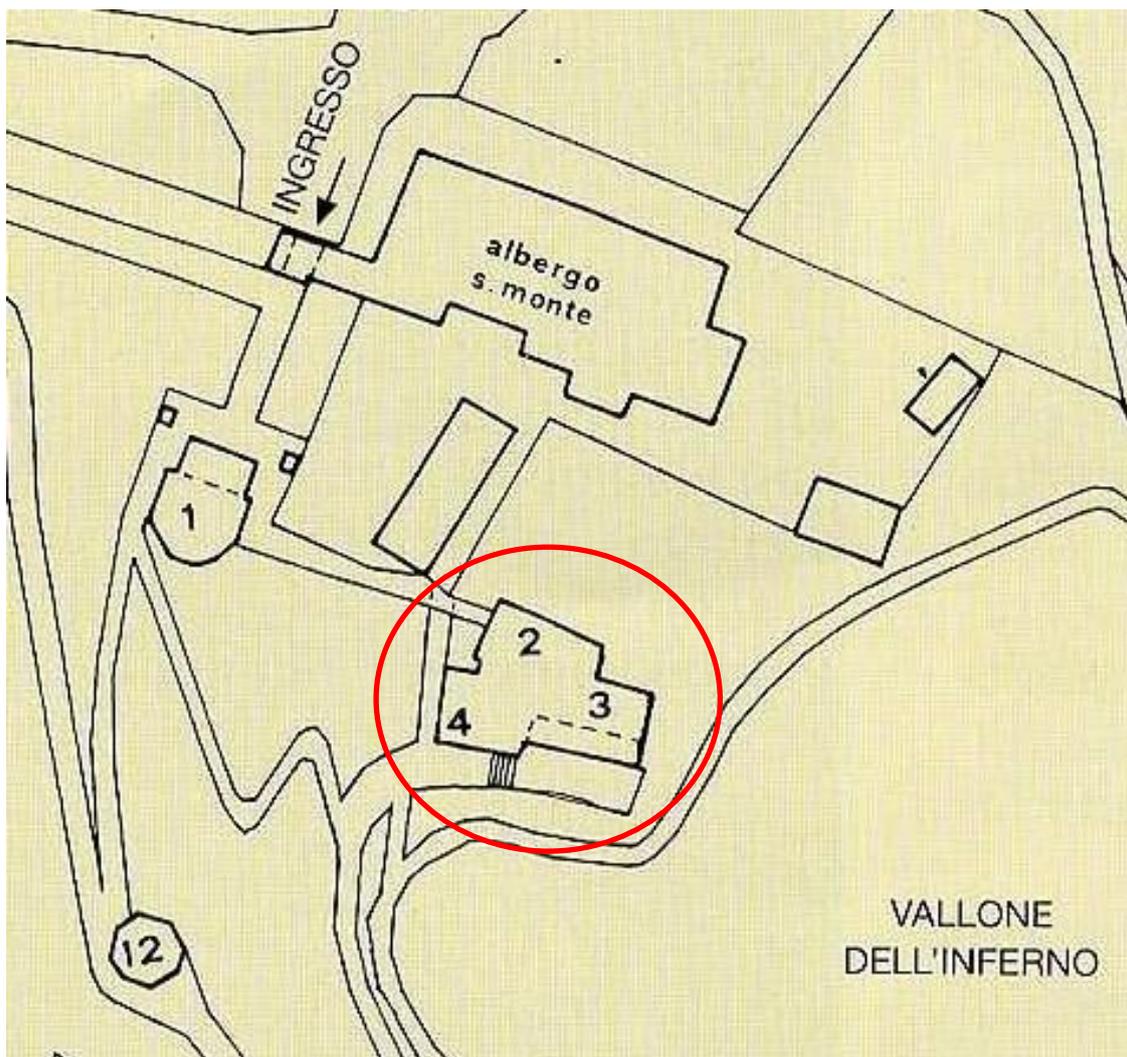
1.4 Caso studio: il complesso di Nazareth

1.4.1 Inquadramento

Quando, il 14 Aprile 1493, avvenne la donazione del “super parietem” da parte dei cittadini di Varallo a Padre Caimi, erano stati eretti soltanto la grande croce sul Calvario, il Santo Sepolcro, la Cappella dell’Ascensione e quella della Pietra dell’unzione. Ma subito dopo fu iniziata la costruzione di molte altre cappelle a perfetta somiglianza, sia per forma che per ubicazione, dei luoghi santi di Palestina, costituendo i tre grandi raggruppamenti:

⁶ SCARZELLA, Paolo, ZERBINATTI, Marco, *Recupero e conservazione dell’edilizia storica*, Alinea Editrice, Firenze, 2009, pag. 182

- Gerusalemme, attorno all'attuale Piazza Maggiore, con il Monte Sion, il Calvario, il Santo Sepolcro;
- Betlemme, dove sorsero le cappelle dei Magi, della Natività, dell'Adorazione dei pastori;
- Nazareth, nell'avvallamento a sinistra dell'attuale prima cappella, ove ora si trovano l'Annunziazione, la Visitazione e il Primo sogno di S. Giuseppe.



*Figura 9 - Mappa del complesso Nazareth
(Fonte: Riserva del Sacro Monte di Varallo)*

Quest'ultimo raggruppamento rappresenta il caso studio. Si tratta di tre cappelle unite fra loro e comunicanti.

1.4.2 Le cappelle

La cappella numero due [Figura 10] rappresenta l'annunciazione dell'angelo a Maria, il luogo in cui si evoca l'evento iniziale della vita di Gesù, quando al sì di Maria si fa uomo nel suo grembo.



*Figura 10 - Facciata della Cappella 2
(Foto di G. Nobile)*

È la prima cappella di tutto il complesso, sia come ubicazione, sia come svolgimento dei fatti evangelici.

Le statue in legno [Figura 11], di Gaudenzio Ferrari, rappresentano la Madonna e l'Angelo e risalgono al 1505-10, mentre gli affreschi sono stati realizzati intorno al 1572 da un autore ignoto.

È stata costruita nel 1514 come una cappelletta concava con le immagini della Madonna e dell'arcangelo Gabriele. Questo vano, ai cui lati era accostato un portico aperto, è stato riconosciuto nella zona inferiore del fabbricato. Ad esso fu aggiunta fra il 1514 e il 1528 la casa di Loreto, attuale cappella numero 2, in cui era in origine posta la statua della Madonna con Bambino in terracotta di Gaudenzio Ferrari, poi trasferita nella cappella del secondo sogno di San Giuseppe (capp. 9) dove è tutt'ora visibile.



Figura 11 - Statue della Cappella numero due
 (Fonte: <http://www.sacromontedivarallo.com/cappella-ii-lannunciazione/>)

Negli Anni Quaranta del Cinquecento, al mistero dell'Annunciazione fu dedicato un nuovo vano, la cappella numero 3. Circa trent'anni più tardi, ulteriori cambiamenti portarono il mistero nella sua attuale collocazione, mentre la cappella numero 3 fu dedicata alla Visitazione. Si tratta di uno degli episodi più stupefacenti del racconto evangelico: Maria, incinta del Figlio di Dio, si reca in visita all'anziana cugina Elisabetta, incinta per grazia di Dio del futuro Giovanni Battista che battezerà Gesù nel fiume Giordano. In questa occasione, Maria pronuncia le poetiche parole del *Magnificat*⁷.

Essa è stata costruita entro il 1544 e modificata verso il 1572 in esecuzione del progetto redatto da Galeazzo Alessi (il "Libro dei Misteri").

⁷ *Magnificat* è la prima parola del cantico di ringraziamento e di gioia che Maria pronuncia rispondendo al saluto della cugina Elisabetta, al momento del loro incontro.

Dopo l'Annunciazione Maria si recò da Nazaret in visita alla cugina che si trovava in una città di Giuda che la tradizione identifica nel villaggio di Ain Karem a 6 km a ovest di Gerusalemme. Il fatto è riportato dal Vangelo secondo Luca (1,39-55). Il cantico individua in tre fasi diverse la storia della salvezza interpretata alla luce dei nuovi avvenimenti che si stanno realizzando: nella prima parte viene esaltata la bontà dell'Onnipotente e la disponibilità di chi accetta di condividere il suo disegno; nella seconda parte si annuncia un capovolgimento di prospettiva: la fedeltà del Salvatore, che ha già dato storicamente prova della sua bontà, non è una fumosa speranza utopica; nella terza parte si prende coscienza che le promesse fatte a Israele stanno trovando il loro compimento: Gesù è la pienezza e il compimento della salvezza promessa.

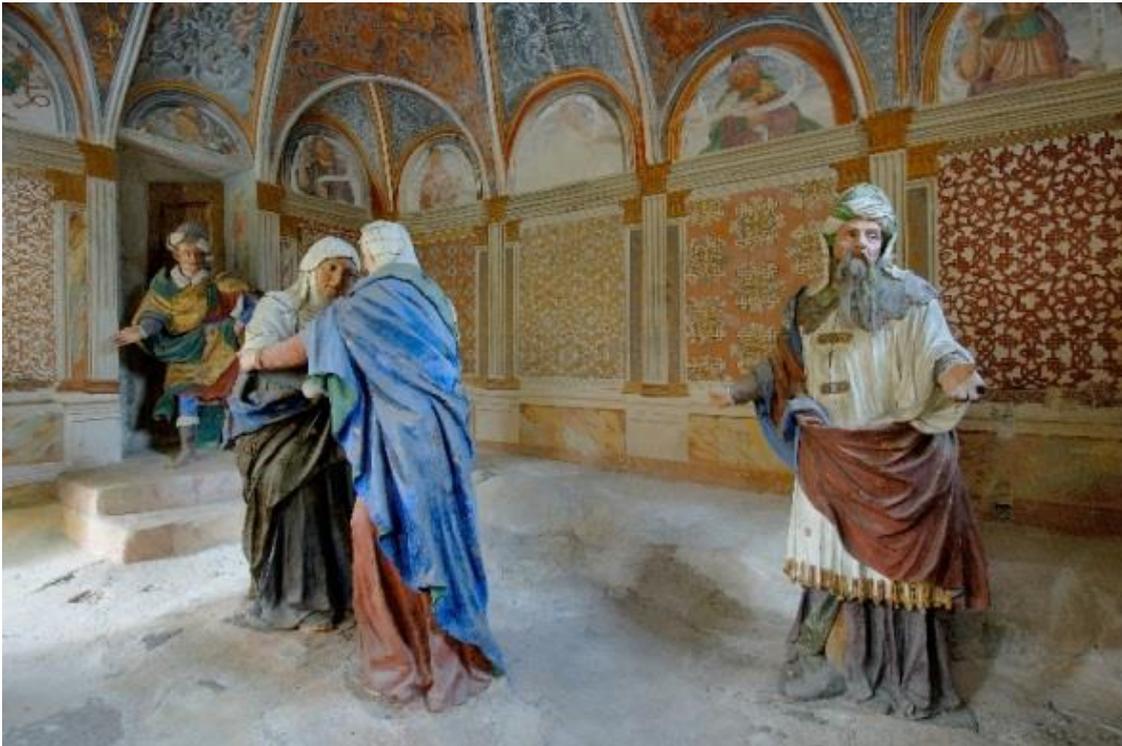
Il collegamento [Figura 12] della cappella due e la cappella tre è stato realizzato mediante un portico con volte a crociera e una scalinata.



*Figura 12 - Collegamento dalla cappella due alla cappella tre
In ordine orario: atrio presente sulla sinistra della cappella due prima di arrivare al portico
della cappella tre; portico cappella tre; vista della facciata della cappella tre dal terrazzo.
(Foto di G. Nobile)*

Le sculture [Figura 13], di ignoto autore, risalgono alla prima metà del Seicento mentre gli affreschi sono attribuiti a Giulio Cesare Luini.

La cappella è inserita in una decorazione che sulle pareti è recente, risale all'800, mentre la volta ospita una decorazione di putti e angeli che rompono lo schema architettonico e evidenzia la finezza con cui tutti i particolari del Sacro Monte sono stati curati.



*Figura 13 - Statue della Cappella numero Tre
(Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292)*

Nelle lunette dei sottarchi sono raffigurati i profeti con dei cartigli, alcuni dei quali sono ormai rovinati e illeggibili.

Nel primo decennio del XVII Secolo il Vescovo Bascapè fece chiudere il portico aperto contiguo alla vecchia Nazaret per collocarvi la cappella numero quattro [Figura 14].

Spostandosi dalla cappella tre alla quattro è possibile vedere dal terrazzino la parte più bassa del Monte, il cosiddetto “Vallone dell’Inferno” perché lì Galeazzo Alessi, progettò la realizzazione del purgatorio e dell’inferno che poi non furono mai portati a compimento.



*Figura 14 - Cappella numero quattro
(Foto di G. Nobile)*

La cappella numero quattro narra il primo sogno di San Giuseppe che ci è stato descritto dall'evangelista Matteo: Giuseppe quando scoprì che Maria, sua promessa sposa, era incinta, voleva ripudiarla secondo la legge ebraica ma l'intervento di Dio, attraverso l'angelo in sogno, spiega a Giuseppe cosa sarebbe avvenuto a lui, Maria e al bambino che lei aspettava e quindi Giuseppe accolse Maria nella sua casa.

Le tre statue del primo sogno di S. Giuseppe sono tre le prime eseguite dal d'Enrico sul Sacro Monte, dove iniziò la sua attività di statuario attorno al 1605. Si tratta delle più alte e ispirate che il maestro abbia modellato in questo periodo.

La regale figura dell'Angelo domina idealmente tutto il piccolo vano, quasi a voler far risaltare il suo divino messaggio.

La statua della madonna che cuce [Figura 15], una delle più famose di tutto il percorso, è una rara raffigurazione nella storia dell'arte di Maria ritratta nell'atto di cucire: un compito delle madri, delle mogli e delle donne di casa. Permetteva così un'identificazione da parte delle donne popolarie valesiane che spesso venivano qui a pregare e a meditare.

Giuseppe dà l'impressione di dormire un sonno sereno, mentre in realtà medita profondamente sui gravi pensieri che lo turbano.



Figura 15 - Statue cappella quattro
 (Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=19&album=2&gallery=6)

Questa cappella non rientrava nel piano iniziale di Padre Caimi, né era stata pensata nel periodo gaudenziano, di grande fervore costruttivo. Risale all'età della Controriforma, in piena fase di ristrutturazione del Sacro Monte, [...] in un momento già avanzato dell'episcopato novarese di Bascapè [...]»⁸, che durante una sua visita stabilì di far erigere questa cappella e quella dell'inchiodazione alla croce.

⁸ AMMINISTRAZIONE VESCOVILE DEL SACRO MONTE DI VARALLO, *Il Sacro Monte. Raccolta storica dei testi delle Cappelle del Sacro Monte*, Varallo Sesia, pag. 41

II. Tecniche di rilievo

In un Paese come il nostro, caratterizzato da numerose testimonianze storico-artistiche e da un patrimonio architettonico di importante valore, è indispensabile creare una documentazione utile per gli interventi di conservazione e restauro.

Negli interventi di recupero e di valorizzazione dei beni storici il primo passaggio da eseguire riguarda la comprensione dell'opera circa le sue caratteristiche, culturali, conservative, geometriche e costruttive. Si può ovviare a questa necessità solo disponendo di tecniche affidabili e compatibili con gli strumenti informatici.

A tal proposito, la disciplina del rilevamento risulta essere molto utile, specialmente perché consente di dare le informazioni necessarie alla rappresentazione architettonica. Una delle caratteristiche specifiche che contraddistingue il rilevamento dei beni culturali è la difficoltà di descrivere le diverse operazioni all'interno di schemi convenzionali e di metodologie standardizzate.

Infatti, dal momento che gli interventi di rilievo non rispondono tutti alle stesse scale e dimensioni, è necessario applicare approcci di rilievo gerarchici e multiscala, come nei casi in cui il rilievo di grande accuratezza di un oggetto è inserito in un rilievo di minore dettaglio relativo al contesto.

Utilizzando diverse strumentazioni possono insorgere problematiche relative alla precisione e all'accuratezza, che rappresenta un altro aspetto molto importante specialmente in applicazioni in cui si richiede una precisione millimetrica, come nel caso del Sacro Monte di Varallo.

L'evoluzione delle tecniche, delle strumentazioni elettroniche e dei *software*, procede in maniera costante e repentina. Infatti, grazie all'interesse mostrato dalle comunità scientifiche internazionali (*ICOMOS*, *CIPA*) è stato possibile ottenere sistemi sempre più performanti nel campo delle discipline di rilevamento, sviluppando nuovi approcci anche nell'ambito dei beni culturali.

Le operazioni di rilievo metrico sono tradizionalmente distinte in due tipologie: il *rilievo tradizionale* (o diretto) e il *rilievo innovativo* (o indiretto). Il primo segue la metodologia classica di costante validità, mentre il secondo si caratterizza per la capacità

di accogliere l'evoluzione delle tecniche di *rilevamento* e delle strumentazioni dedicate. Per ottenere risultati ottimali è necessario integrare fra loro le due metodologie.

Il rilievo diretto è più agevole da eseguire in quanto le misurazioni sono effettuate direttamente sull'oggetto; il rilievo indiretto è più articolato perché le misurazioni sono effettuate mediante le elaborazioni che permettono di misurare in automatico, con l'ausilio di strumenti ottici, muniti di cannocchiale e mirino, le dimensioni degli oggetti compresi quelli posti in lontananza o in luoghi poco accessibili. In concreto quest'ultimo consiste nel proiettare i punti di un oggetto su un piano, orizzontale o verticale, misurarne le dimensioni, rappresentarle in scala ridotta, e quindi riprodurre l'immagine in misura proporzionale all'originale in tutte le sue parti.

Un'ulteriore classificazione delle diverse tecniche di rilievo da utilizzare può essere fatta in funzione delle scale di lavoro (regionale, locale e oggetto) e della tipologia di oggetto da rilevare [Figura 16].

<i>Scala di lavoro</i>	<i>Oggetto da rilevare</i>	<i>Dati e tecniche di rilievo</i>
<i>Regionale</i>	<i>Territorio Topografia Sito</i>	<i>Immagini Satellitari Immagini aeree a piccola scala Radar Lidar GPS/GNSS</i>
<i>Locale</i>	<i>Sito Architetture Scavo Strati</i>	<i>Immagini Satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar Lidar Laser scanner TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale GPS/GNSS</i>
<i>Oggetto</i>	<i>Ritrovamenti Oggetti museali</i>	<i>Immagini terrestri Laser scanner a triangolazioni Sistemi a luce strutturata</i>

Figura 16 - Tecniche di Rilievo

Come anticipato, l'integrazione fra le tecniche e metodologie di rilevamento permette una descrizione completa della forma e delle dimensioni degli oggetti.

È molto importante, inoltre, che l'operatore che esegue il rilievo abbia piena conoscenza delle potenzialità delle tecniche di rilevamento per poter individuare la tipologia dei dati utili alla successiva rappresentazione.

Nel caso oggetto di studio, basandosi sulle caratteristiche architettoniche e urbanistiche del complesso da rilevare, sono state scelte come tecniche di rilievo:

- Rilievo topografico con stazione totale (rete di inquadramento);
- Rilievo fotogrammetrico a terra e con *UAV* (Unmanned Aerial Vehicle) (rete di dettaglio);
- Rilievo *lidar* mediante *laser scanner* (rete di dettaglio);

2.1 Rilievo topografico

Si definisce rilievo topografico l'insieme delle operazioni con il quale si determinano, partendo da misure angolari e lineari prese sul terreno, gli elementi necessari per eseguire la restituzione in scala dell'oggetto rilevato.

In principio il rilievo topografico era utilizzato per lo più nel campo della produzione cartografica. Oggi invece, l'uso del rilievo topografico classico è utilizzato prevalentemente come integrazione del rilievo fotogrammetrico e della tecnica LiDAR⁹.

Prima della nascita della tecnologia Lidar, uno dei metodi più utilizzati per il rilevamento del terreno era la tecnica della triangolazione, che consisteva nell'individuazione sul terreno di triangoli, formati da punti collegati fra loro, che avevano a due a due un lato in comune, il quale consentiva, in funzione della sua lunghezza, di classificare il rilievo in due tipi:

- Geodetico: per lunghezze superiori ai 10 km;
- Topografico: per lunghezze inferiori ai 10 km.

I passaggi da effettuare per un giusto rilievo topografico sono:

- Individuazione dei vertici trigonometrici (o geodetici);
- Costruzione della rete d'inquadramento;
- Costruzione della rete di raffittimento e poligonali;
- Esecuzione del rilievo di dettaglio.

I vertici geodetici, rappresentati dai punti di maggiore dimensione nella figura sottostante, costituiscono la rete di appoggio per i rilievi topografici.

⁹ LiDAR (*Light Detection And Ranging*)

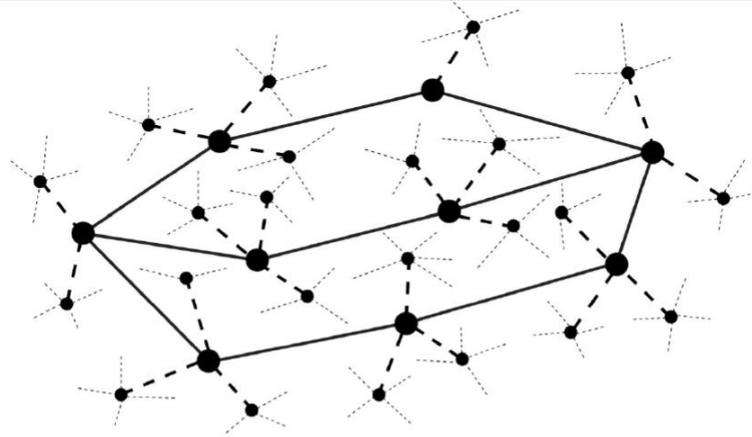


Figura 17 - Rete di inquadramento, raffittimento e dettaglio

2.2 Rilievo fotogrammetrico

Uno dei metodi innovativi di rilevamento di dettaglio più sviluppato è la **fotogrammetria**, alla quale è stata prestata maggior attenzione in questa tesi, che consente la ricostruzione tridimensionale a partire da *almeno* una coppia di fotografie di uno stesso oggetto, ripreso da posizioni diverse.

La fotogrammetria rappresenta uno dei sistemi più completi, precisi e rapidi. Infatti, consente di ottenere informazioni metriche sulla forma, dimensione e posizione di un oggetto mediante l'interpretazione di fotogrammi.

I principali vantaggi sono:

- Ottimizzazione delle condizioni operative;
- Limitazione della probabilità di commettere errori di tipo grossolano, numerico e interpretativo.

Le regole della fotogrammetria derivano dai principi dell'ottica, della fotografia e della geometria descrittiva, in particolare della *prospettiva centrale*. Un'immagine fotografica può essere associata a una **proiezione centrale**, definita come la proiezione di un oggetto mediante i raggi proiettanti, provenienti da un unico vertice, il centro di proiezione, su di un piano o quadro di proiezione, dalla quale tramite modelli analitici e costruzioni grafiche, è possibile stabilire le posizioni di punti nello spazio, riconoscibili dalle immagini stesse [Figura 18].

Secondo la geometria proiettiva, una proiezione centrale si caratterizza, dopo aver determinato il centro di proiezione, la posizione del quadro e la direzione dell'asse ottico,

da una corrispondenza biunivoca tra l'oggetto e l'osservatore che permette la rappresentazione delle figure.

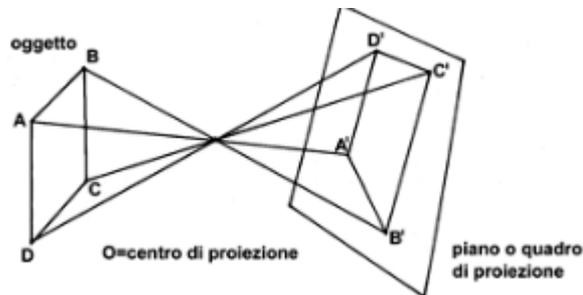


Figura 18 - Proiezione centrale
(Fonte: www.rilievo.stereofot.it)

La fotogrammetria si divide in due categorie, in funzione del tipo di rilevamento da compiere: **fotogrammetria terrestre** e **fotogrammetria aerea**.

La tecnica utilizzata per il rilievo del Sacro Monte di Varallo, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) permette, a partire da immagini terrestri e foto aeree, di ricostruire modelli digitali del terreno, ortofoto, modelli tridimensionali e nuvole di punti.

In questo modo, oltre a ricavare misurazioni affidabili e precise, è possibile effettuare una lettura del territorio.

La fotogrammetria ha dunque lo scopo di stabilire le posizioni dei punti di un oggetto nello spazio, utilizzando le corrispondenti posizioni dei punti su un'immagine fotografica, mediante equazioni di collinearità.

Le fasi del processo fotogrammetrico sono:

- Acquisizione;
- Orientamento interno;
- Orientamento esterno;
- Restituzione.

L'acquisizione (o presa fotogrammetrica) è definita come l'insieme delle operazioni di acquisizione delle immagini mediante l'uso di camere metriche digitali.

Le immagini da utilizzare devono essere idonee alla ricostruzione della proiezione centrale, motivo per cui, solitamente, l'acquisizione dei fotogrammi avviene per mezzo di camere professionali o semi professionali in grado di limitare le distorsioni radiali, cioè quelle che dipendono solo dalla distanza dalla proiezione del centro di presa.

Le camere sono classificate in tre tipologie secondo la modalità e la precisione della loro geometria interna. Di seguito sono riportate in ordine di qualità:

- camere metriche;
- camere semimetriche;
- camere amatoriali.

2.2.1 Rilievo fotogrammetrico UAV

La fotogrammetria aerea è considerata molto valida per la sua capacità di acquisire immagini dall'alto con l'impiego di sensori e fotocamere montati su velivoli o piattaforme aeree di diversa tipologia.

La fotogrammetria con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), utilizza una classe di velivoli in grado di volare senza pilota, comunemente chiamato drone o APR (*aereomobile a pilotaggio remoto*), ma capace di eseguire riprese aeree programmate a velocità elevata, con un grande dettaglio e con un minore impegno logistico di esecuzione.

Gli UAV riescono a rilevare contesti ambientali difficili e solitamente sono utilizzati in ambito civile, nei settori del monitoraggio ambientale e dei beni culturali.

Infatti, la possibilità di lavorare con velivoli, come i droni, dotati di ricevitori GNSS di navigazione, permette di compiere rilievi in zone a alto rischio o di difficile accesso per gli altri velivoli e con la salvaguardia della vita umana. La capacità dei droni di volare a bassa quota, per la rilevazione a distanze ravvicinate, consente di ottenere delle immagini di migliore qualità. Il maltempo può limitare il loro uso e diminuire la qualità delle immagini, ma il fatto che le traiettorie di un UAV passino al di sotto della quota limite delle nubi, ne permette comunque l'utilizzo. Durante la fase di volo è possibile inoltre ricevere i risultati, in *real time*, tramite un collegamento con una stazione a terra, che li supporta nel monitoraggio su edifici e sul territorio.

Gli UAV sono classificati in base al campo di utilizzo:

- *fotografia aerea*, per il reperimento di fotografie georeferite a alta risoluzione;
- *analisi multispettrale*, per attività in campo geologico;
- *mappatura termica*, per misurare il grado di irraggiamento di un oggetto mediante l'installazione di una camera termica;
- *modellazione tridimensionale*, mediante l'uso di tecniche stereoscopiche e correlazioni analitiche;

Vi sono poi tre tipologie di velivoli denominate *Small UAV* per le loro modeste dimensioni e potenzialità di volo:

- I *Nano UAV* hanno dimensioni minime, in campo militare sono usati come velivoli spia in campo civile, invece, sono usati per effettuare video o immagini di bassa qualità.
- I *Micro UAV*, hanno dimensioni varianti dai 30 ai 50 cm, non raggiungono elevate velocità e possono rimanere in condizioni di volo stazionario. Utilizzano un sistema propulsivo a ala battente o a ala rotante.
- I *Mini UAV* o *MUAV* sono lunghi dai 50 ai 100 cm., hanno un peso non superiore ai 20 kg e un raggio d'azione che raggiunge i 10-15 km di distanza; sono solitamente lanciati a mano e possono essere a ala fissa o rotante.

Comunque, la scelta è effettuata in funzione del rilievo da eseguire e in particolare dall'estensione dell'area di lavoro. Infatti, è scelto un *UAV multi-rotore* se l'area di lavoro è limitata e *UAV ala fissa* se l'area è più ampia, le quote più alte e il margine di precisione è maggiore.

Si riporta una tabella con diverse tipologie di *UAV* attualmente in commercio:

Nome	Peso	Velocità max	Tempo di volo	Fotocamera	Batteria
DJI Mavic Pro N1265	734 grammi	64 km/h	27 minuti	12 mpx	Durata di 27 minuti
DJI Phantom 4 Pro N1327	1388 gramm	72 km/h	30 minuti	20mpx	Durata di 30 minuti
Yuneec Typhoon-H Professional N1256	1200 grammi	-	28 minuti	20mpx	Durata di 30 minuti
Yuneec Breeze 4K N1237	1000 grammi	-	20 minuti	13mpx	Durata di 30 minuti
Cheerson CX 10C N801	15 grammi	-	2.5--4 minuti	0.3mpx	Durata di 25 minuti

2.3 Rilievo LiDAR

Tramite la tecnica LiDAR (*Light Detection And Ranging*) è possibile acquisire le coordinate spaziali di una data regione, o della superficie di un oggetto, in modo automatico, sistematico e a alta velocità.

L'acquisizione è fatta tramite i *laser scanner*: strumenti costituiti da un distanziometro e da un sensore a alta precisione capace di acquisire un numero elevato di informazioni in tempi ristretti, ossia la *Nuvola di Punti*. Si tratta di un insieme denso di punti dotati di coordinate $[x \ y \ z]$ che restituiscono la forma dell'oggetto rilevato e molto spesso (dipende dallo strumento utilizzato) anche le informazioni RGB e i dati relativi alla riflettanza.

Si distinguono due tipologie di *laser scanner*:

- A triangolazione [Figura 19],
- A misura diretta [Figura 20].

I primi si possono avvalere di un proiettore che emette un *pattern* luminoso, definito come luce strutturata, e hanno la caratteristica di avere una distanza nota tra l'emettitore e il ricevitore, denominata *baseline*.

Essi permettono di ottenere precisioni di misura fino al decimetro di millimetro, ma con la necessità di operare a distanze che inferiori ai due metri dall'oggetto.

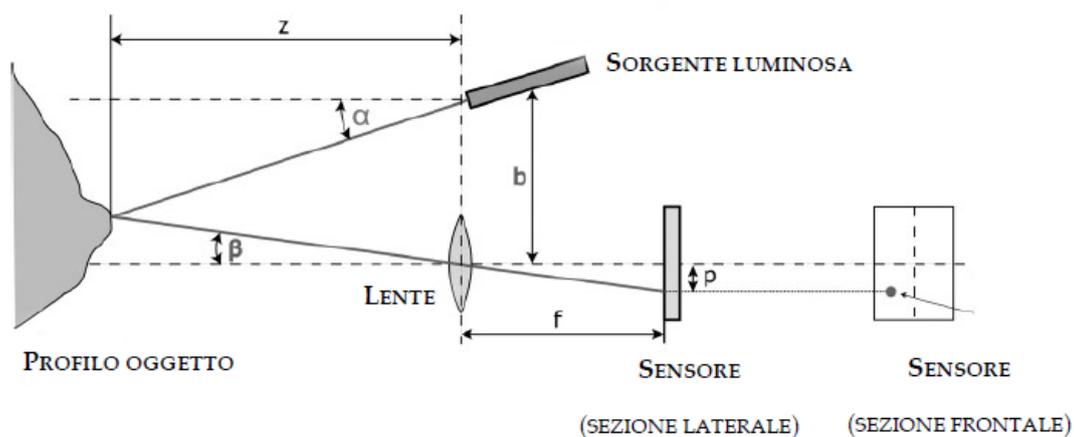


Figura 19 - Laser Scanner a Triangolazione

(Fonte: GUIDI, G.; REMONDINO, F.; RUSSO, M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*)

I secondi sono tra i sistemi maggiormente utilizzati e, a differenza di quelli a triangolazione, si basano sul principio della proiezione di un raggio o fascio di luce sull'oggetto e sul tempo che impiega il segnale stesso a ritornare allo strumento, definito come tempo di volo.

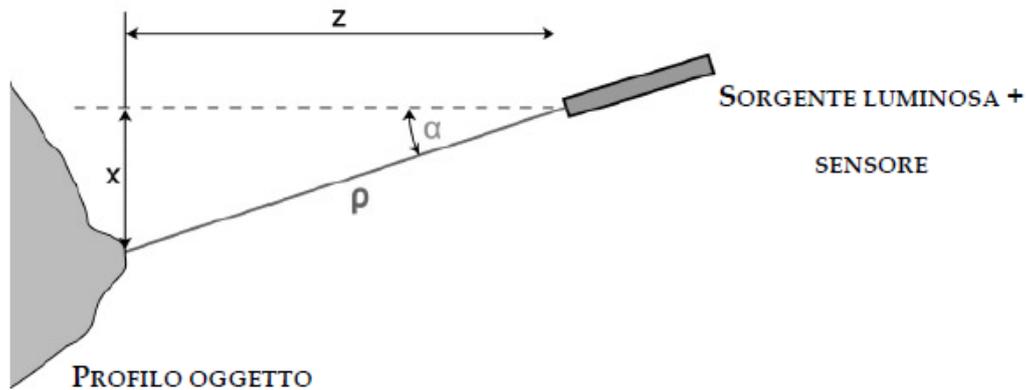


Figura 20 - Laser Scanner a misura diretta

(Fonte: GUIDI, G.; REMONDINO, F.; RUSSO, M., Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico)

Quest'ultima tipologia di *laser scanner* è stata utilizzata nel rilievo del Sacro Monte di Varallo, in quanto adatto a misure di edifici di medie-grandi dimensioni.

Attualmente in commercio ce ne sono di diverse tipologie. A titolo di esempio se ne citano due:

- *ZEB REVO*: Il sistema si basa sulla tecnologia di acquisizione *SLAM* (*Simultaneous Localisation And Mapping*), il cui algoritmo consente un'estrema adattabilità nell'impiego dello strumento in ambienti diversi. Lo strumento, a tutti gli effetti manuale e portatile da un singolo operatore, è dotato di piattaforma *IMU* e di sensore che ruota automaticamente su se stesso, seguendo i movimenti e il percorso dell'operatore e catturando 43.200 punti al secondo.
- *STONEX X300*: non è manuale come quello appena descritto ma necessita di un appoggio e permette un controllo dello scanner mediante un'interfaccia dedicata *wi-fi web* per smartphone e tablet. È in grado di catturare fino a 40.000 punti al secondo.

III. Acquisizione dei dati

Nei giorni 4 e 5 dicembre 2017 è stata svolta l'acquisizione dati al Sacro Monte di Varallo, grazie all'aiuto del prof. Andrea Maria Lingua, allo scopo di rilevare il complesso di Nazareth, costituito da tre cappelle, con la finalità di una restituzione tridimensionale e la generazione del *database*.

La prima operazione effettuata, durante la giornata del 4 Dicembre, è stata quella del posizionamento dei *target*, cioè di quegli elementi a scacchiera utili per le operazioni che sono successivamente eseguite mediante i *software*, che consentono di associare le coordinate rilevate alle scansioni in fase elaborazione.

I target posizionati sul perimetro murario degli edifici [Figura 21], codificati e etichettati, sono stati utili per il rilievo topografico e il rilievo *LiDAR*.



*Figura 21 - Marker per il rilievo topografico e per il rilievo LiDAR
(Foto di G. Nobile)*

Il rilievo topografico del Sacro Monte ha previsto in prima battuta l'individuazione dei vertici già materializzati al suolo, utilizzati nei rilievi precedenti, della rete di inquadra-

Mento, la quale ha lo scopo di fornire la struttura geometrica in cui inserire l'oggetto di studio. L'impostazione di una rete d'inquadramento per il rilievo topografico ha lo scopo di evitare che il rilievo subisca una sensibile perdita di precisione per il continuo accumularsi di piccoli errori e che la precisione non sia omogenea per tutti punti di rilievo.¹⁰

Successivamente sono stati individuati i punti che costituiscono la rete di raffittimento, integrata infine dai punti di dettaglio.

Procedendo dalla prima alla terza fase aumenta considerevolmente il numero dei punti da rilevare, mentre diminuisce la precisione richiesta nella definizione della posizione degli stessi punti. Una corretta impostazione del rilievo topografico prevede, infatti, di procedere dal generale al particolare.

Quelli posizionati a terra [Figura 22], anch'essi codificati e etichettati, sono serviti al rilievo UAV.



*Figura 22 - Marker per il rilievo UAV
(Foto di G. Nobile)*

¹⁰ GALETTO, R., SPALLA, A., *Lezioni di Topografia*, CUSL, Pavia, 1998, p. 141.

3.1 Acquisizione mediante rilievo topografico

3.1.1 Rete di inquadramento e raffittimento

La rete principale d'inquadramento piano altimetrica è in realtà la rete di raffittimento in quanto abbiamo utilizzato quella già esistente. Dal momento che dalla prima alla terza (di dettaglio) aumenta il numero di punti, ma diminuisce l'accuratezza, in questa rete essa deve essere superiore a quella compatibile con la scala finale a cui si vorranno produrre gli elaborati.

In *Figura 23* sono stati evidenziati in arancione i vertici della rete principale di inquadramento.

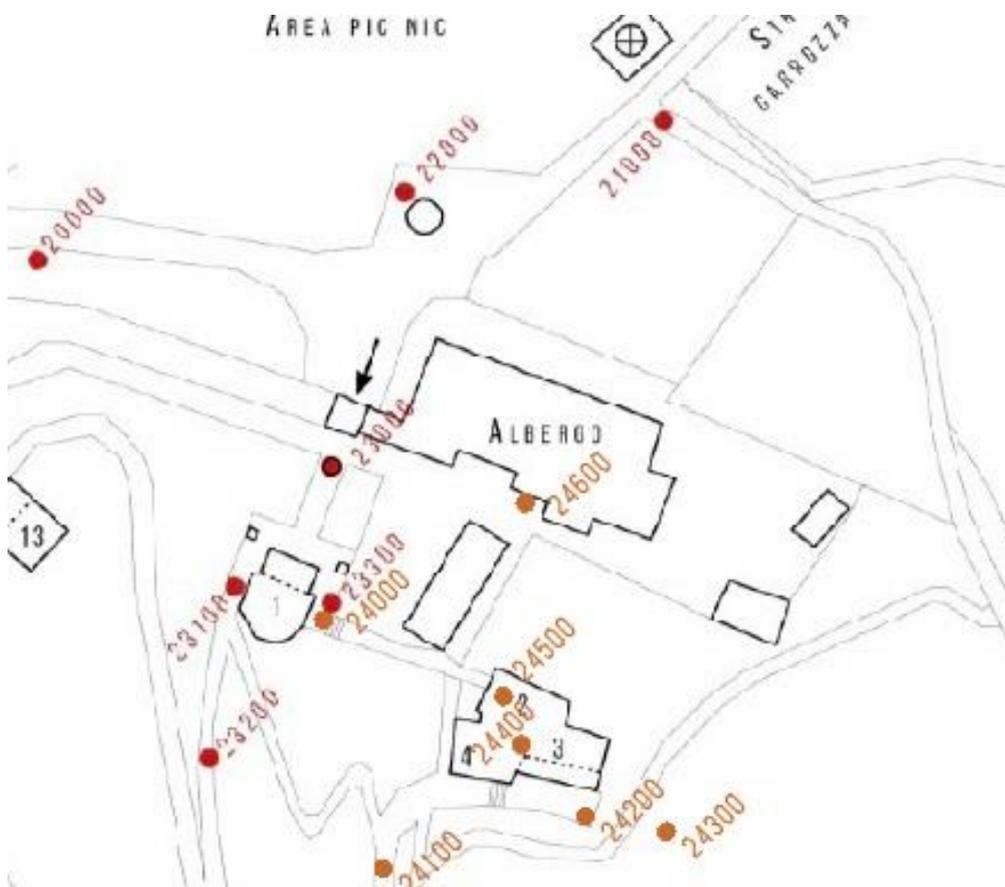


Figura 23 - Rete principale di inquadramento e raffittimento

Il rilievo topografico è stato effettuato mediante la stazione totale *Leica Nova Scan Station* [Figura 24] e la palina con prisma.



*Figura 24 - Leica Nova Scan Station
(Foto di G. Nobile)*

Al fine di documentare le fasi durante il rilievo sono state prodotte le monografie [Figura 25] per ciascun vertice di stazione che riportano le informazioni su:

- Codice;
- Operatori;
- Titolo;
- Tipo di materializzazione;
- Strumento di rilievo;
- Altezza strumentale;
- Data e ora.

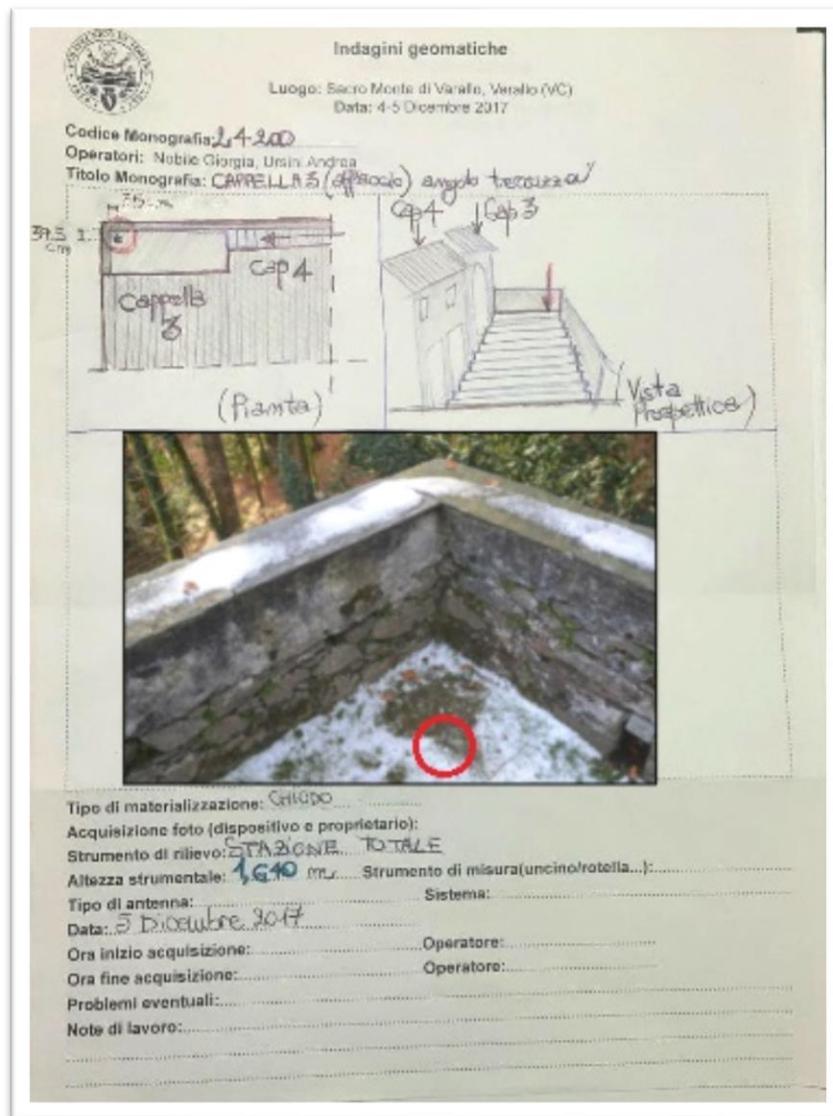


Figura 25 - Monografia vertice 24200

3.1.2 Rete di dettaglio

Il rilievo di dettaglio è l'ultima fase del procedimento di rilievo in cui si registrano i punti significativi con la stazione su un vertice noto. In questo caso sono stati registrati tutti i *marker* posizionati sulle pareti e alcuni di quelli posizionati a terra. In questa fase sono stati creati gli eidotipi, cioè dei disegni schematici in scala approssimativa di una porzione di edificio in cui sono stati collocati i *marker* e descrivere quanto volte e da quali stazioni sia stato rilevato.



Figura 26 – Eidotipo

Infatti, in *Figura 26* si evince che ogni *marker* è stato riscritto più volte nella stessa posizione con diversi colori, dove ogni colore rappresenta una stazione totale.

3.2 Acquisizione mediante *Laser Scanner*

Per un buon rilievo occorre effettuare più scansioni da punti di vista differenti, motivo per cui è stato effettuato il posizionamento dei *marker* misurabili tramite la strumentazione topografica, da utilizzare nelle fasi successive di elaborazione dati per determinare le corrispondenze tra le varie scansioni.

Lo strumento utilizzato per le acquisizioni delle scansioni è il *laser scanner FARO CAM 2* [*Figura 27*].

Le caratteristiche di quest'ultimo sono state elencate nella tabella riportata di seguito.

Tabella 1 - Caratteristiche Laser Scanner FARO CAM 2

<i>Range Focus3D X 130</i>	0,6 – 130 m
Velocità di misurazione	Fino a 976.000 punti/s
Errore di linearità	±2 mm
Macchina fotografica a colori integrata	Fino a 70 milioni di <i>pixel</i>
Classe laser	1
Peso	5,2 kg
<i>Multi-Sensor</i>	<i>GPS</i> , bussola, sensore di altezza, compensatore biassiale
Dimensioni dello <i>scanner</i>	240 x 200 x 100 mm
Controllo dello <i>scanner</i>	Tramite <i>display touchscreen</i> e <i>WLAN</i>



*Figura 27 - Faro CAM 2
(Foto di G. Nobile)*

3.3 Acquisizione mediante UAV

Il drone utilizzato al Sacro Monte di Varallo durante questo progetto di tesi è un *Phantom 4 Pro* [Figura 28].



*Figura 28 - Phantom 4 Pro
(Foto di G. Nobile)*

È equipaggiato con una telecamera stabilizzata su tre assi da 20 megapixel e un sensore da un pollice. Il telaio, costruito con parti di titanio e magnesio, ha una elevata rigidità ma il peso non è eccessivo (1388g). Può volare fino a trenta minuti per merito della batteria a 4s da 5870 Ah. Il *range* operativo del radiocomando in versione Europa è di 3,5 km.

Il volo è durato circa 20 minuti e sono stati acquisiti 137 fotogrammi in formato *.JPEG*, alcuni di essi in fase di elaborazione sono stati eliminati in quanto non erano visibili i fotografici posizionati nella fase iniziale del rilievo oppure perché era visibile solo la vegetazione e edifici diversi da quelli oggetto di studio.

IV. Elaborazione dei dati acquisiti da rilievo

Prima di descrivere la procedura effettuata con i *software*, si riporta un diagramma che spiega in modo riassuntivo i passaggi effettuati, per una più facile comprensione dei paragrafi successivi.



Il diagramma è suddiviso principalmente in due fasi: rilievo e elaborazione. La prima è stata descritta nel precedente capitolo mentre la seconda è spiegata in questo capitolo.

Dopo aver svolto l'acquisizione dei dati è stato necessario analizzarli e elaborarli. Le procedure di *data processing* svolgono e specificano le analisi sui risultati conseguiti dall'utilizzo dei *software* di studio per giungere all'obiettivo finale di creare una nuvola di punti avente la precisione di un centimetro e la tolleranza di due centimetri, in quanto bisogna riprodurre gli elaborati in scala 1:50. Per la generazione di questa nuvola di punti sono stati utilizzati tre *software*:

- *FARO SCENE* utilizza come dati di *input* le scansioni effettuate con il *laser scanner* e le coordinate ottenute mediante la stazione totale e è stato utilizzato per creare la nuvola di punti relativa agli interni delle cappelle e i confini murari;
- *CONTEXT CAPTURE* utilizza come dati di *input* le foto acquisite mediante UAV e le coordinate ottenute mediante la stazione totale e è stato utilizzato per creare la nuvola di punti che restituisce le coperture;
- *VISUAL SFM* utilizza gli stessi dati di *input* del secondo *software* elencato e è stato utilizzato per le stesse finalità.

Di seguito sono stati riportati i passaggi eseguiti per ciascun *software*.

4.1 Elaborazione dei dati acquisiti mediante *Laser Scanner*

Con il *software Scene* della Faro è stato effettuato un processo di elaborazione e georeferenziazione delle nuvole dei punti create mediante l'acquisizione delle scansioni con il *Laser Scanner*.

Infatti, permette di associare le coordinate ai marker codificati, di colorare e collocare le scansioni, in modo tale che siano riconosciuti eventuali disallineamenti o errori, e di esportare la nuvola di punti in vari formati per poterla elaborare e unire alle altre nuvole ottenute grazie agli altri *software*.

4.1.1 Importazione delle scansioni

Le scansioni possono essere importate trascinando l'intera cartella o i singoli file con estensione *.fls* nell'interfaccia di *Scene* alla sua apertura. Queste contengono varie informazioni per la memorizzazione e la visualizzazione dei punti di misurazione.

Dopo averle caricate nel *workspace*, è possibile trovarle elencate sulla sinistra contrassegnate da una nuvola e potranno essere suddivise in *cluster*, ovvero sottocartelle [Figura 29].

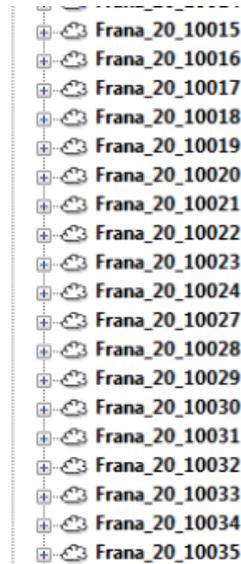


Figura 29 - Scansioni Caricate

Come si evince dalla *Figura 29*, il nome delle scansioni è relativo a un rilievo effettuato prima del nostro, non rispetta la situazione del caso studio ma semplicemente non è stato modificato prima di effettuare le scansioni al Sacro Monte di Varallo.

Cliccando con il tasto destro sulla nuvola si seleziona il comando **Visualizza-Vista Piana** è possibile alla sua visualizzazione della scansione.

Cliccando su comando **Caricato** è possibile vedere se sia stata caricata effettivamente, in questo caso appare un quadratino verde, oppure se non sia stato salvata, in questo caso compare una stellina blu.

4.1.2 Registrazione dei *marker*

La georeferenziazione è stata eseguita identificando i *marker* nelle scansioni e associando le coordinate rilevate mediante stazione totale. Per ogni scansione è necessario che ci siano almeno tre punti/*marker* da identificare e nel caso in cui nella scansione non siano presenti gli appositi quadrati a scacchiera allora si devono individuare dei punti naturali. Questi ultimi, possono essere rappresentati da spigoli, porte o altri elementi ben aventi forma ben definita, chiara visibilità e devono essere riconosciuti anche in altre scansioni in modo che ci possa essere un'associazione.

Partendo dalla vista piana, i *target* a scacchiera possono essere individuati automaticamente dal *software* e manualmente, tracciando una forma che rispetti il contorno oppure tramite un “chiodino” inserito nel baricentro.

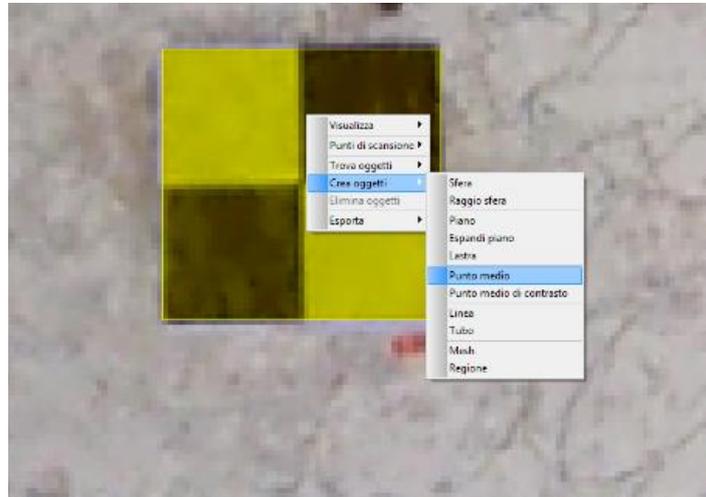


Figura 30 - Individuazione marker

Nel nostro caso sono stati individuati tutti i *marker* manualmente [Figura 30], creando la forma che rispetti il bordo e poi determinandone il punto medio tramite il comando **Crea Oggetti-Punto Medio**. Prima di effettuare questa scelta sono state provate anche le altre metodologie, ma si è notato che queste tracciavano il punto un po' lontano dal baricentro e in modo meno preciso.

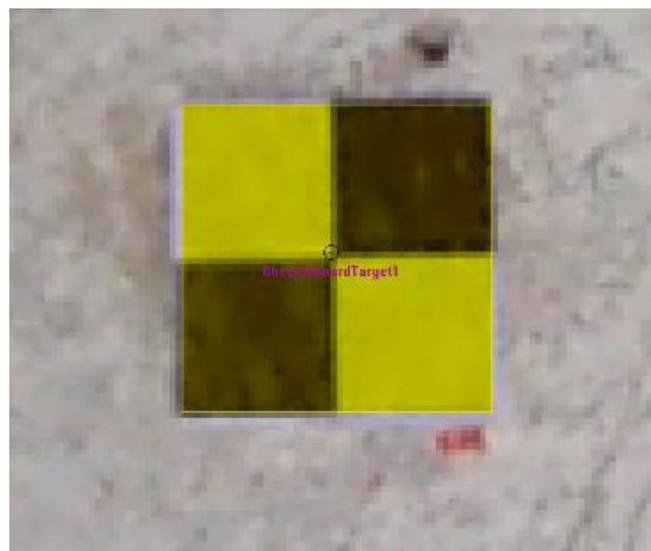


Figura 31 - Checkerboard

A questi è assegnata un'etichetta che va sotto in nome di *Checkerboard*, *Checkerboard2*, *Checkerboard3*... che successivamente è stato modificato aprendo la cartella *AutoFeatures*. Per rinominare i target è sufficiente cliccare il tasto destro del mouse sul punto e scegliendo il comando **Rinomina** dal menù a tendina.

È molto importante che a ogni punto selezionato manualmente corrisponda il simbolo di un semaforo verde, il quale indica una corretta individuazione del punto data dal fatto che il numero di punti di scansione nella selezione utilizzata per l'ottimizzazione è >80. Se il semaforo fosse giallo allora il numero di punti sarebbe compreso fra 20 e 80. Qualora fosse rosso il numero si riduce a meno di 20, indicandone una cattiva qualità.

È inoltre necessario, come già anticipato, che il numero di *marker* individuati per ciascuna scansione sia almeno pari a tre. Se così non fosse devono essere individuati dei punti naturali, presenti anche nelle altre scansioni, in modo tale che avvenga una corretta associazione.

4.1.3 Inserimento delle coordinate e collocazione delle scansioni

Prima di effettuare l'inserimento delle coordinate e la collocazione delle scansioni è stata effettuata un'operazione di compensazione della rete, durante la quale sono state corrette tutte le coordinate tenendo conto della propagazione degli errori.

```
f0006_2      ;225.68859   ;4251.25876 ;590.55320
f0001_2      ;218.49736   ;4260.15805 ;591.09355
f0002        ;237.86627   ;4266.52933 ;591.11623
f0100        ;222.17182   ;4256.53719 ;594.66641
f0101        ;228.09038   ;4252.40133 ;594.43301
f0102        ;230.50460   ;4245.88599 ;595.02818
f0103        ;231.84500   ;4248.64068 ;596.69135
f0104        ;227.22679   ;4246.08813 ;591.08252
f0012_2      ;191.83528   ;4215.06280 ;588.08929
f0104_2      ;224.67652   ;4243.00775 ;586.45070
```

Figura 32 - Estratto dal file di coordinate compensate

I target che iniziano con *m* di *marker* sono quelli che sono stati posizionati sulle murature o su altri elementi, ma comunque verticalmente, mentre quelli che sono contrassegnati con *f* di fotografici sono stati posizionati orizzontalmente, direttamente sul suolo oppure sulla pavimentazione del terrazzo.

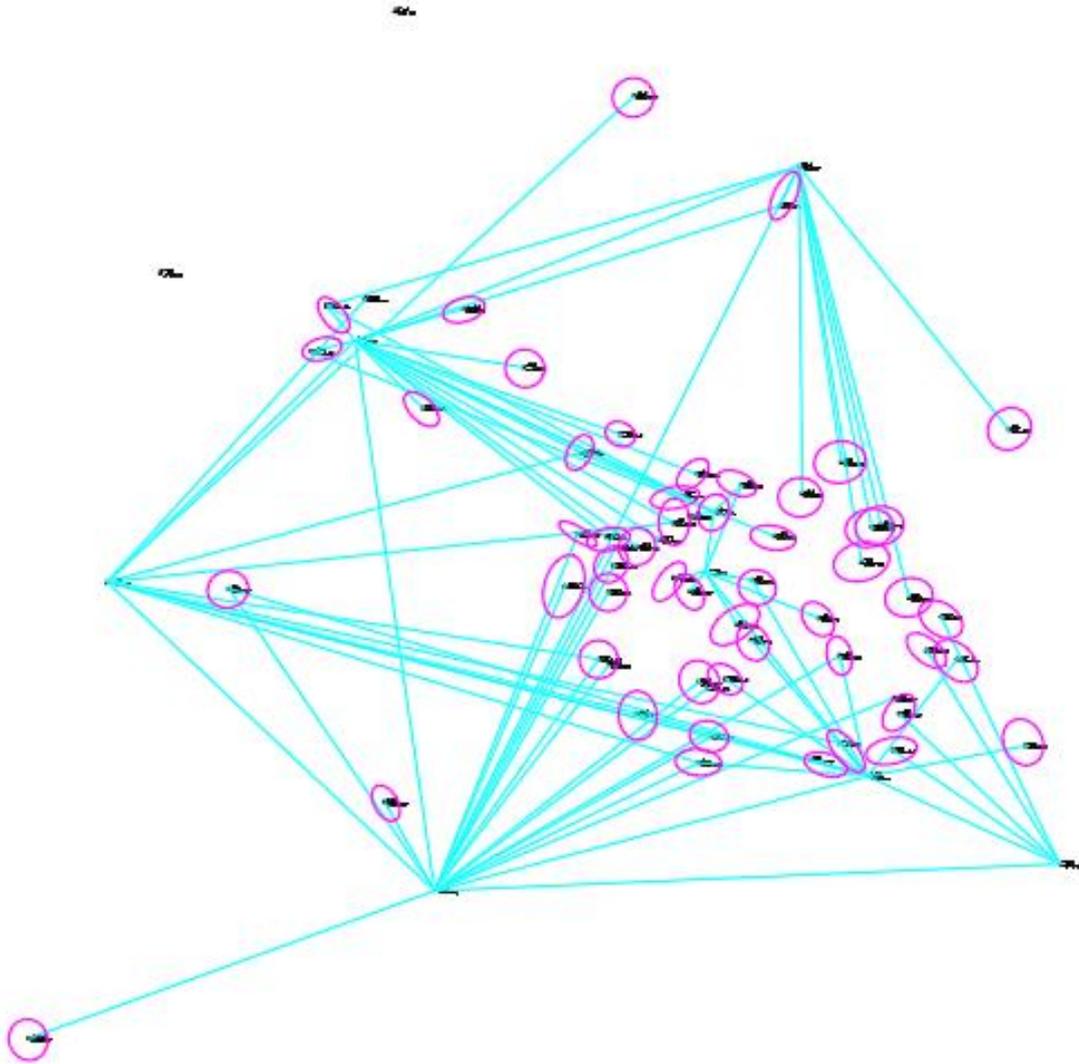


Figura 33 - Risultato della compensazione della rete

Dopo aver inserito le coordinate è stata effettuata la registrazione delle scansioni selezionando il comando **Colloca Scansioni**, presente nella sezione **Operazioni** e poi **Registrazione**, recuperabile direttamente cliccando con il tasto destro del mouse una volta sulla scansione. La modalità di collocazione scelta fra le opzioni è stata **Basata sui target**. Per verificare che, dopo aver ripetuto il processo per tutte le scansioni, siano tutte unite e georeferite, è stato necessario controllare che accanto alla cartella **ScanFit** sia presente un semaforo verde, che restituisce come informazione il corretto posizionamento.

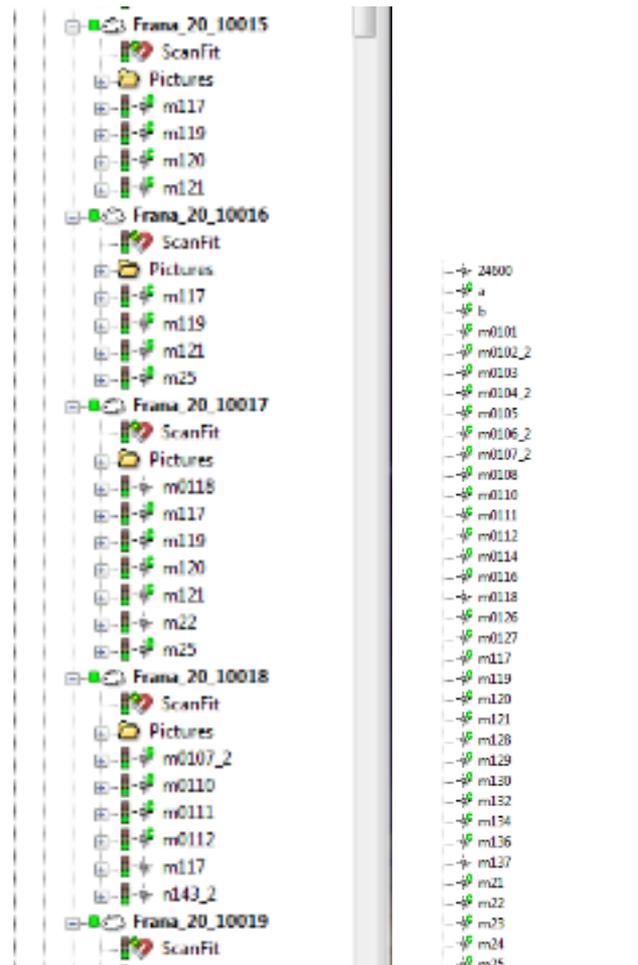


Figura 34 - ScanFit

Oltre al semaforo verde dello ScanFit, si evince che la georeferenziazione sia avvenuta in maniera corretta dalla *C* in verde presente affianco al nome dei *marker*, la quale indica che le coordinate dei *marker* inseriti e l'associazione effettuata su ogni scansione è compatibile.

Questo però non è avvenuto subito in tutte le scansioni, in quanto alcune di esse, in particolare quelle effettuate negli ambienti interni delle cappelle, restituivano un semaforo rosso, perché erano presenti pochi target all'interno dell'ambiente.

Inoltre, non in tutte le scansioni si vedevano chiaramente i *marker* posizionati che, come si evince dalla foto di seguito riportata *Figura 35*, a causa della mancanza di una sufficiente illuminazione interna.

Allora sono stati inseriti dei punti naturali, ma anche in questo caso sono stati verificati numerosi problemi relativi all'insufficiente quantità di luce, che non ha permesso di individuare chiaramente gli stessi punti in tutte le scansioni.



*Figura 35 - Foto interno della cappella quattro
(Foto di G. Nobile)*

Tramite la *Vista in Corrispondenza* è stato valutato il corretto posizionamento e che non siano presenti errate sovrapposizioni o disallineamenti.



Figura 36 - Vista in corrispondenza



Figura 37 - Scansioni dopo la registrazione

Riaprendo le scansioni dopo la registrazione, su ognuna di esse sono visibili tutti i *marker* che autonomamente sono riconosciuti anche se non sono stati associati manualmente alle coordinate.

4.1.4 Verifica della tensione dei *target*

Per effettuare la verifica della tensione dei *target* è sufficiente cliccare con il tasto destro sullo *ScanFit* di ogni scansione e scegliere le proprietà dal menu a tendina [Figura 38].

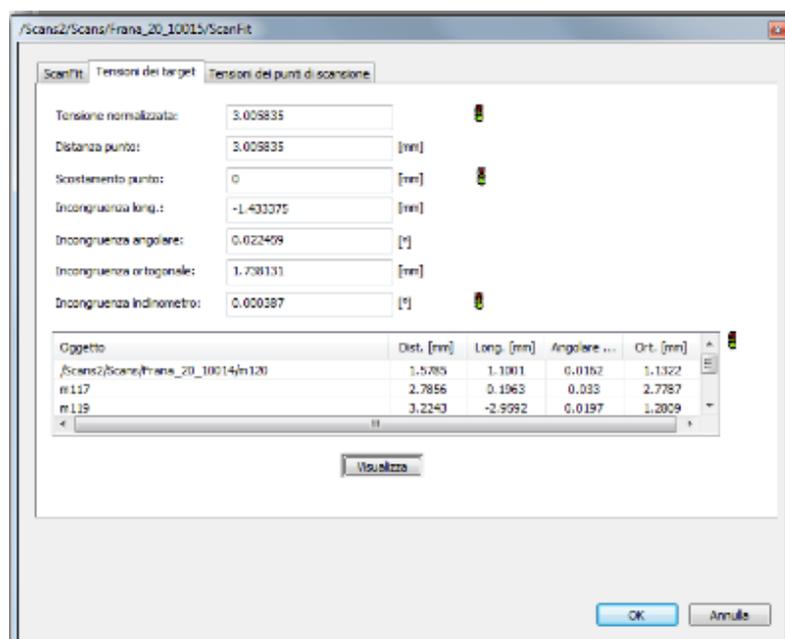


Figura 38 - Tensione dei *target*

La precisione che abbiamo prefissato è pari a 1 cm, essendo la scala di rappresentazione 1:50, e la tolleranza di 2 cm. È necessario quindi in base ai valori restituiti dalla tensione dei *target* valutare se siamo nell'intervallo prestabilito o meno.

In corrispondenza di quei *target* che hanno dato esito negativo si è provato a riposizionare il *target* in modo che la distanza fra il centro del *marker* e la coordinata fosse più ridotta. Nei casi in cui questa procedura ha dato esito positivo allora il *target* è stato lasciato, nei casi in cui ha dato esito negativo il *target* è stato rimosso. Dopo la rimozione del *target* si deve inserire un altro punto, individuabile o su un *marker* o come punto naturale, se nella scansione verificata ne restano in meno di tre. Al contrario, se ci sono già molti *target* verificati in una stessa scansione e solo uno non risulta verificato allora si procede alla rimozione senza doverne inserire un altro.

Queste operazioni sono state ripetute fino a quando non si è ottenuto un buon numero di *target* verificati [Figura 39].



Oggetto	Dist. [mm]	Long. [mm]	Angolare ...	Ort. [mm]
/Scans/CAPPELLA2ESTERNO/Frana_20_10032/m101	3.4023	-3.3793	0.0112	0.3948
/Scans/CAPPELLA2ESTERNO/Frana_20_10032/m102	5.9147	-4.289	0.1051	4.0768
/Scans/CAPPELLA2ESTERNO/Frana_20_10032/m103	3.36	0.4104	0.0463	3.335
/Scans/CAPPELLA2ESTERNO/Frana_20_10031/m108	6.1491	1.1545	0.0204	6.04
/Scans/CAPPELLA2ESTERNO/Frana_20_10031/m109	4.0282	3.5967	0.006	1.8141

Figura 39 - Verifica target su scansione

Negli allegati è possibile trovare la tabella della verifica della tensione *target*, in cui sono stati riportati tutti i valori per ogni scansione.

4.1.5 Colorazione delle scansioni

La colorazione delle scansioni è stata effettuata perché oltre alle informazioni sulla distanza, queste forniscono anche informazioni sui valori nel sistema RGB dei singoli punti, quindi dopo la registrazione e collocazione è stata eseguita questa operazione. Questo è stato possibile perché le operazioni in fase di acquisizione dei dati, sono state svolte con l'opzione *Colore*, cioè sono state acquisite anche le immagini digitali degli ambienti rilevati, memorizzate all'interno della scansione e visibili nella struttura a sinistra del *workspace*. Tramite il comando *Applica immagini* presente nella sezione *Operazioni* e poi *Colora immagini* è stata effettuata l'associazione fra le immagini digitali e le scansioni.



Figura 40 - Scansione Colorata

Dopo aver effettuato il procedimento, dalle scansioni colorate si evince che la rappresentazione ottenuta e quindi anche i colori restituiti, sono abbastanza fedeli alla realtà.

Le operazioni eseguite mediante il *laser scanner* infatti, sono state eseguite in giorno 5 dicembre nel corso della mattinata e le condizioni meteorologiche, dal punto di vista dell'illuminazione, erano favorevoli in quanto fosse soleggiato ma non a tal punto da ottenere un abbagliamento che “bruciasse” le scansioni.

Per questi motivi le foto non sono state corrette mediante Photoshop o altri *software* che consentissero il miglioramento.

Oltre alle scansioni, è possibile ottenere anche una visualizzazione tridimensionale colorata dalla quale, mediante l'aggiunta dei colori, è possibile valutarne meglio la qualità.



Figura 41 - Nuvole Colorate

4.1.6 Esportazione della nuvola di punti

L'esportazione [Figura 42] è avvenuta con il comando *Esporta*, presente nella sezione *Esporta Nuvola di Punti* che compare cliccando con il tasto destro sulla singola scansione, in formato *.E57*, il quale risulta essere meno pesante rispetto a altri e compatibile con i *software* utilizzati successivamente.

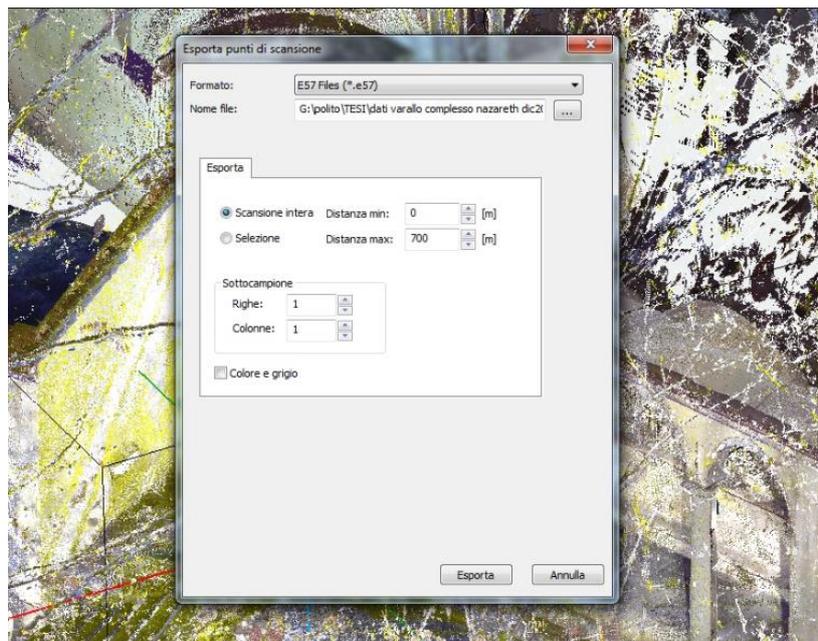


Figura 42 - Esportazione nuvole in .E57

4.2 Elaborazione dei dati acquisiti mediante UAV (*ContextCapture*)

Il *software ContextCapture* è servito per l'elaborazione delle immagini nadirali e oblique acquisite dal drone. Si tratta di un programma sviluppato da *Bentley System* e consente la creazione di modelli tridimensionali, sia nuvole di punti sia mesh, a partire da fotogrammi scattati tramite UAV da differenti punti di vista, a cui possono essere aggiunte le caratteristiche della camera di ripresa, le posizioni e la rotazione delle foto e i punti di controllo a terra.

4.2.1 Importazione fotogrammi e inserimento delle caratteristiche della camera

Per l'elaborazione della nuvola di punti sono stati utilizzati sia i fotogrammi nadirali, utili per la definizione delle coperture, sia i fotogrammi obliqui, utili per la integrazione delle nuvole generate con *Scene*.

I fotogrammi scattati in totale sono 138 ma ne sono stati utilizzati 92, in quanto in molti di loro era presente solo la vegetazione o altre cappelle diverse da quelle oggetto di studio. L'importazione è avvenuta mediante il comando **Photos** [Figura 43] dal menù generale e selezionando le immagini direttamente.

Inoltre, sono state inserite anche le caratteristiche della fotocamera installata sul drone, semplicemente selezionando nella casella **Sensor Size** e digitando la misura in millimetri della diagonale. Invece **Focal length** è un dato che il *software* ha riconosciuto dopo l'inserimento dei fotogrammi.

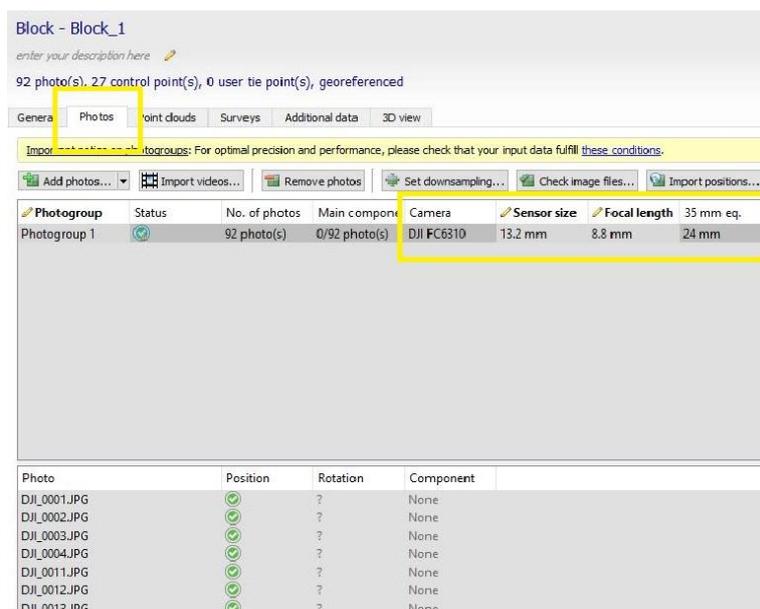


Figura 43 - Importazione Fotogrammi in ContextCapture

4.2.2 Triangolazione aerea

Questo processo nel *software* è indicato con la sigla **AT** e permette di stimare un posizionamento iniziale dei fotogrammi senza l'ausilio dei punti di controllo, migliorandone il risultato finale.

Per avviare il processo è stato selezionato il comando **Submit aereotriangulation** presente nella cartella **Block**, ma prima di avviare il processo è stato necessario inserire alcune caratteristiche:

- *Output block name* [Figura 44]: il nome di salvataggio del blocco;

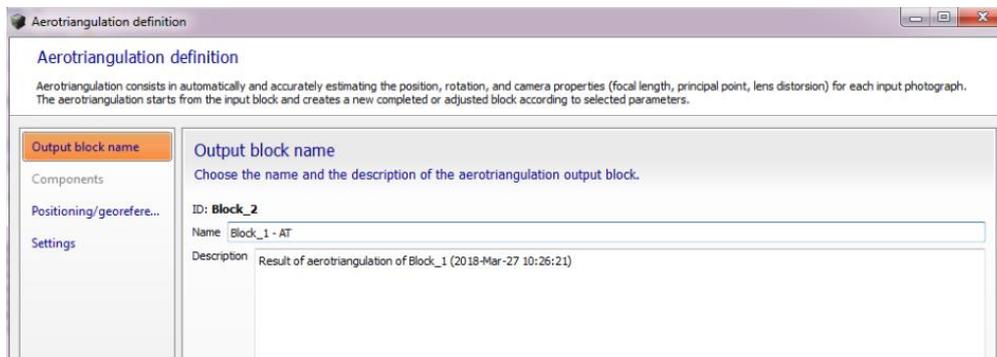


Figura 44 - Output Block Name

- *Settings*: consente di inserire varie impostazioni fra cui la densità dei *key points* e gli algoritmi per la costruzione del modello, ma sono state mantenute tutte le impostazioni di default;

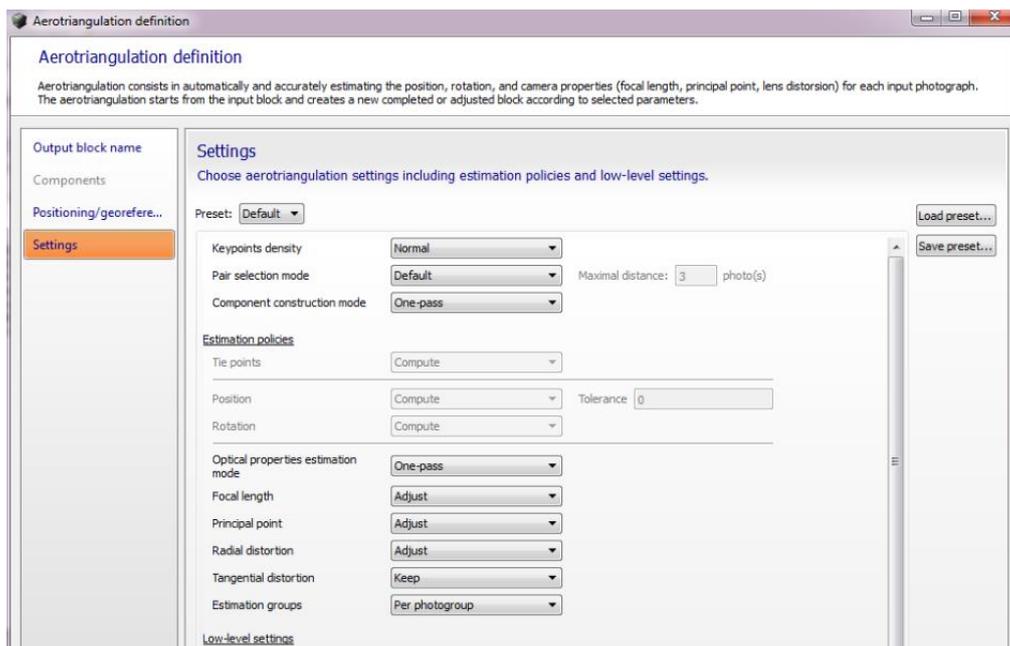


Figura 45 - Settings

- *Positioning/Georeferencing*: fra le varie opzioni è stata scelta *Use control point for adjustment* che consente di fare appunto un'orientazione delle foto in base alle informazioni che esse stesse forniscono integrandole con le coordinate ottenute mediante stazione totale, per una ulteriore verifica di compatibilità.

Dopo aver impostato le caratteristiche sopra riportate e aver effettuato l'assegnazione dei *ControlPoints* è stato avviato il processo [Figura 46] mediante il comando **Submit Aereotriangulation** presente nella sezione **General** del blocco.

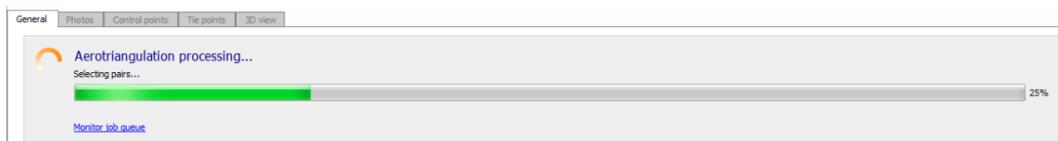


Figura 46 - Aereotriangulation processing

Affinché il processo avvenisse però, è stato necessario selezionare il modulo di lavoro *ContextCaptureEngine* [Figura 47] altrimenti le operazioni di triangolazione o ricostruzioni 3D non avrebbero avuto inizio. Esso utilizza vari algoritmi che permettono l'estrazione dei *keypoint*, il combaciare dei punti di legame, l'integrazione delle *texture*, la creazione di un *database* per le *texture*, etc;

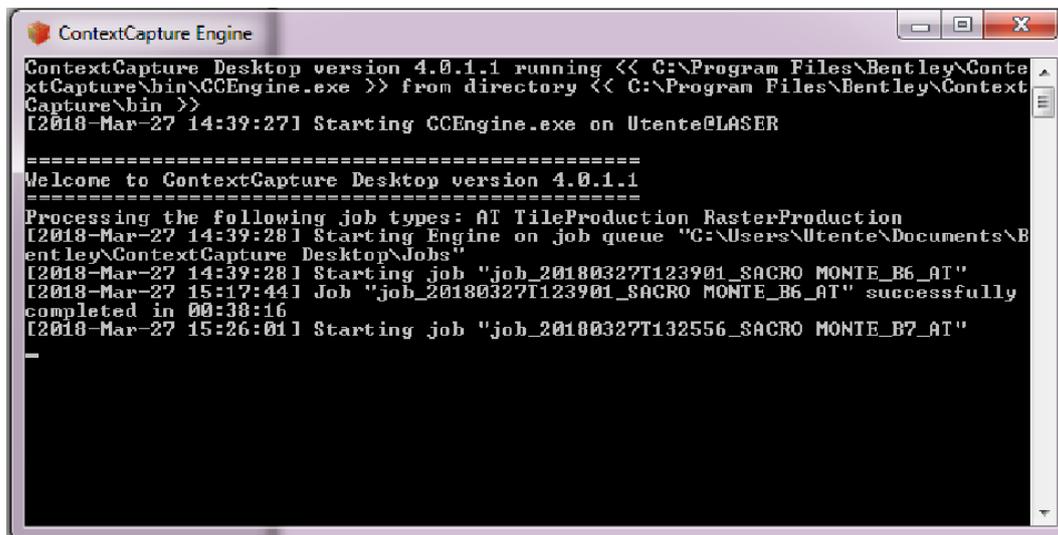


Figura 47 - ContextCaptureEngine

Questo processo ha richiesto varie ore di elaborazione.

Tramite il comando **3D view** [Figura 48] è possibile monitorare il risultato di ogni ciclo di aereotriangolazione attraverso una visualizzazione tridimensionale dei punti di presa ottimizzati e dei relativi *tiepoints* estratti.

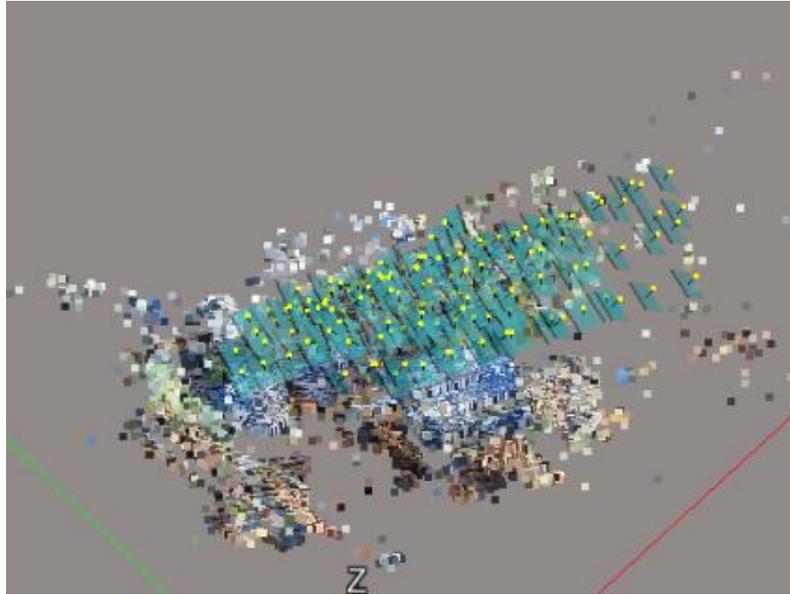


Figura 48 - 3D view

Alla fine del processo di triangolazione aerea è stato valutato il **report** [Figura 50] dal quale è possibile controllare la georeferenziazione, i parametri impostati e i principali risultati della triangolazione aerea, confrontabili anche con i precedenti e valutando se sono accettabili o meno.

Nel caso studio il processo di triangolazione aerea è stato ripetuto varie volte [Figura 49] poiché non soddisfaceva i requisiti richiesti.

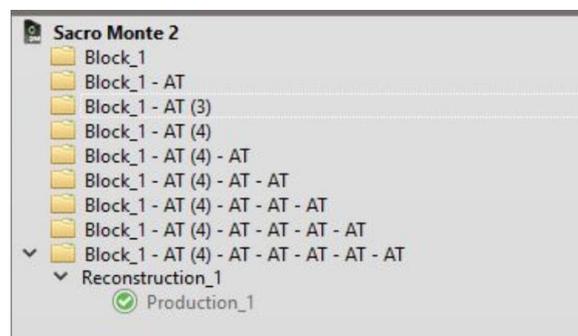


Figura 49 - Aereotriangolazione ripetuta diverse volte

ContextCapture Master

Aerotriangulation report

I. Settings

A. Positioning/georeferencing:
- Positioning mode: Use control points for adjustment

B. Main settings:
- Key point density: Normal
- Pair selection mode: Default
- Component construction mode: OnePass

C. Estimation policies:
- Tie points: Compute
- Position: Adjust
- Rotation: Adjust
- Photogroup estimation mode: OnePass
- Focal length: Adjust
- Fisheye focal: Keep
- Principal point: Adjust
- Radial distortion: Adjust
- Tangential distortion: Keep
- Aspect ratio: Keep
- Skew: Keep
- Fisheye distortion: Keep
- Estimation groups: PerPhotogroup

II. Results

A. Global:

- Errors

Before aerotriangulation							
Type	Number of points	Median reprojection error [px]	RMS of reprojection errors [px]	RMS of distances to rays [u]	RMS of 3D errors [u]	RMS of horizontal errors [u]	RMS of vertical errors [u]
Control_points	24	1.78	1.66	0.018	0.024	0.015	0.019
Automatic_tie_points	15487	0.44	0.61	0.005			

After aerotriangulation							
RMS of vertical errors [u]	Number of points	Median reprojection error [px]	RMS of reprojection errors [px]	RMS of distances to rays [u]	RMS of 3D errors [u]	RMS of horizontal errors [u]	RMS of vertical errors [u]
0.019	24	0.88	1.07	0.012	0.015	0.010	0.010
	16348	0.43	0.60	0.005			

Figura 50 - Estratto report positivo

La registrazione dei punti di controllo a terra, le cui coordinate sono state rilevate con la stazione totale, è avvenuta mediante il comando **Edit Control Point** [Figura 51] presente nella sezione **Control Point**. È stato infatti inserito il file delle coordinate, lo stesso utilizzato per l'elaborazione delle nuvole con **Scene** e a ogni fotogramma è stata effettuata l'assegnazione. Il programma, una volta selezionata la coordinata, riconosce automaticamente la sua posizione nel fotogramma mediante un cerchio verde.

Control points editor

File Actions

Control points

Spatial Reference System (SRS): Cartesian

Name	Category	Check point	Given X	Given Y	Given Z	Horizontal accuracy [m]	Vertical accuracy [m]	Estimated X	Estimated Y	Estimated Z	RMS of reproj. error [px]	RMS of det. to rays [u]	3D error [u]	3D horizontal error [u]	3D vertical error [u]
P0001	Full	<input type="checkbox"/>	238.953	4273.328	596.439	0.010	0.010								
P0001_2	Full	<input type="checkbox"/>	218.487	4260.158	591.084	0.010	0.010								
P0002	Full	<input type="checkbox"/>	237.866	4266.529	591.116	0.010	0.010								
P0006	Full	<input type="checkbox"/>	225.686	4251.264	584.639	0.010	0.010								
P0006_2	Full	<input type="checkbox"/>	225.689	4251.259	586.553	0.010	0.010	225.692	4251.258	590.556	0.25	0.003	0.005	0.004	0.003
P0008	Full	<input type="checkbox"/>	228.182	4235.172	584.639	0.010	0.010								
P0009	Full	<input type="checkbox"/>	232.903	4232.091	584.639	0.010	0.010								
P0009_2	Full	<input type="checkbox"/>	232.900	4232.093	584.766	0.010	0.010								
P0012	Full	<input type="checkbox"/>	241.573	4233.297	584.639	0.010	0.010								
P0012_2	Full	<input type="checkbox"/>	191.835	4215.063	588.386	0.010	0.010								
P002	Full	<input type="checkbox"/>	237.991	4266.525	591.149	0.010	0.010								
P003	Full	<input type="checkbox"/>	241.642	4250.671	589.683	0.010	0.010								
P004	Full	<input type="checkbox"/>	251.919	4252.887	588.051	0.010	0.010	251.912	4252.692	588.052	0.88	0.009	0.009	0.009	0.001

Photo

Display photos: All

Display points: All

Display links: Yes

Measurements:

Image	X	Y	(Reproj. error [px])
...rabbicomplexo	2382.81	991.76	0.29
...rabbicomplexo	2338.57	1458.73	0.37
...rabbicomplexo	2097.29	1089.07	0.37

Statistics

All control points:
- number of points: 27
- RMS of reproj. error: 0.93 px

Figura 51 - GroundControlPoint

Se questo non avviene vuol dire che la coordinata associata al punto è errata, i fotogrammi sono evidenziati in rosso e il cerchio verde non compare. Infatti, prima di ottenere un risultato positivo, è stato commesso questo errore [Figura 52] assegnando a un target a terra presente in foto le coordinate di un differente target rilevato con la stazione totale.

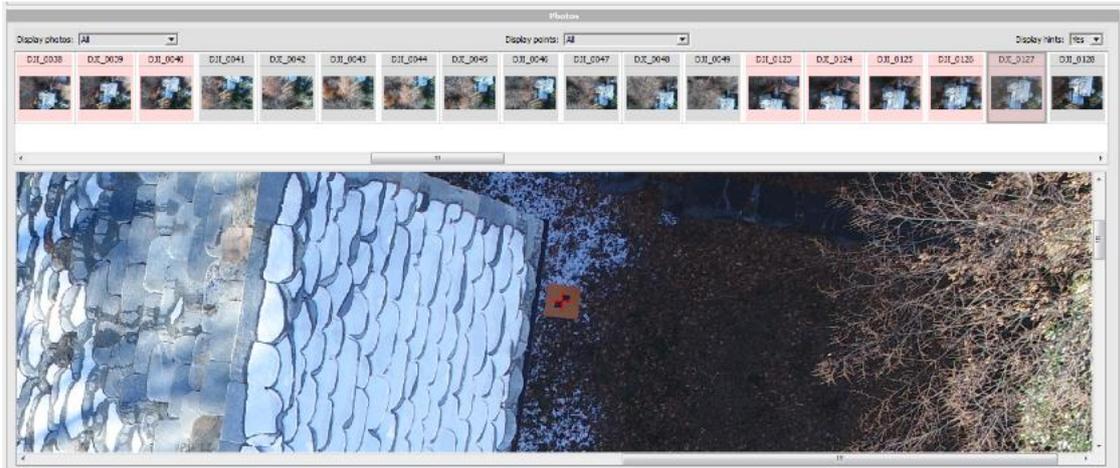


Figura 52 - Errore nell'assegnazione delle coordinate

Dal report (negli allegati si riporta per intero) si evince se le coordinate inserite rispettano i requisiti richiesti o meno e nel caso in cui le distanze fra il baricentro del target e la coordinata superino il valore della tolleranza, deve essere rifatta l'assegnazione. Se dopo aver riposizionato il target, dal report si evince che i valori superano quelli della tolleranza e nel fotogramma sono presenti almeno tre target in comune con gli altri, si può decidere di rimuoverlo. Un procedimento molto simile a quello ripetuta con *Scene*.

C. For points:
Control points:

Name	Category	Check point	Horizontal accuracy [m]	Vertical accuracy [m]	Number of photos	Before aerotriangulation					After aerotriangulation						
						RMS of reprojection errors [pix]	RMS of distances to rays [m]	RMS of 3D errors [m]	RMS of horizontal errors [m]	RMS of vertical errors [m]	Number of photos	RMS of reprojection errors [pix]	RMS of distances to rays [m]	RMS of 3D errors [m]	RMS of horizontal errors [m]	RMS of vertical errors [m]	
F008	FuI		0.020	0.020	0						0						
F012	FuI		0.020	0.020	0						0						
F009	FuI		0.020	0.020	0						0						
F006	FuI		0.020	0.020	0						0						
F001	FuI		0.020	0.020	0						0						
F006_2	FuI		0.020	0.020	3	1.17	0.011	0.020	0.008	0.028	3	1.03	0.010	0.014	0.008	0.011	
F001_2	FuI		0.020	0.020	14	1.87	0.019	0.020	0.010	-0.004	14	1.68	0.017	0.015	0.016	-0.010	
F000	FuI		0.020	0.020	4	1.16	0.016	0.017	0.014	-0.002	4	1.08	0.016	0.016	0.015	0.007	
F020	FuI		0.020	0.020	0						0						
F010	FuI		0.020	0.020	0						0						
F012_2	FuI		0.020	0.020	0						0						
F014_2	FuI		0.020	0.020	0						0						
F011	FuI		0.020	0.020	0						0						
F009_2	FuI		0.020	0.020	0						0						
F014	FuI		0.020	0.020	48		1.60	0.015	0.017	0.016	0.003	48	0.72	0.007	0.010	0.008	0.007
F009	FuI		0.020	0.020	0						0						
F008	FuI		0.020	0.020	0						0						
F020	FuI		0.020	0.020	21	2.69	0.029	0.042	0.029	-0.028	21	0.94	0.020	0.028	0.005	-0.028	
F011	FuI		0.020	0.020	3	0.78	0.008	0.017	0.008	0.018	3	0.64	0.007	0.008	0.008	0.006	
F002	FuI		0.020	0.020	0						0						
F011	FuI		0.020	0.020	0						0						

Figura 53 - Estratto report positivo parte 2

Infatti, dal report si può vedere come non tutti i punti siano stati inseriti, ma solo quelli che hanno dato valori compresi nell'intervallo della tolleranza prefissata.

4.2.3 Ricostruzione

Una volta aver ottenuto un report “positivo” è stato possibile avviare il processo di ricostruzione, mediante il comando *New Reconstruction* presente nella sezione *General* del blocco. In questo modo è stata creata un'ulteriore cartella avente il nome della ricostruzione [Figura 54].

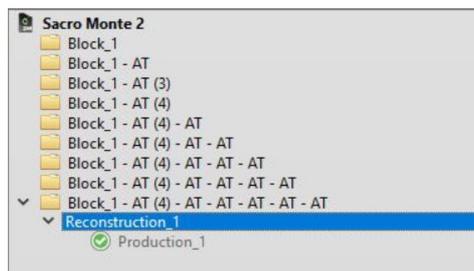


Figura 54 - Reconstruction

Successivamente sono stati impostati i parametri richiesti nella sezione [Figura 55]



Figura 55 - Parametri Reconstruction

- *Spatial framework* [Figura 56]: serve per la definizione del workspace per la ricostruzione, inclusi i dati sul sistema di riferimento, la regione di interesse e il *tiling*.

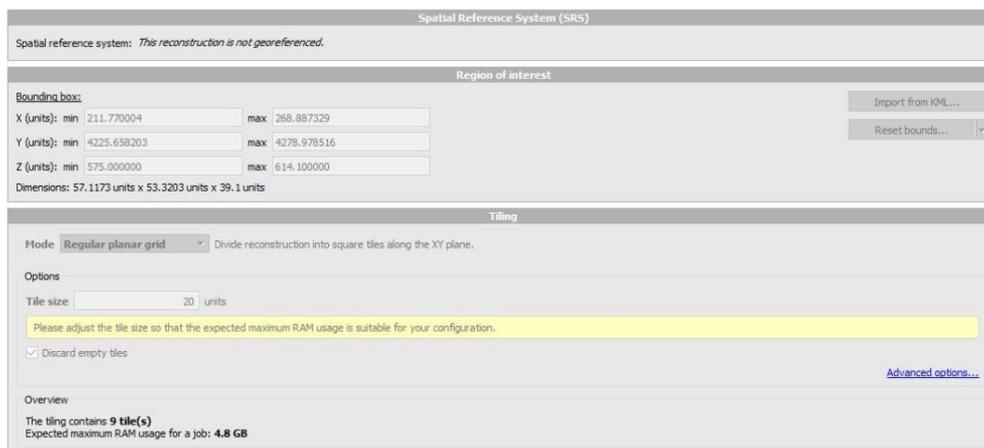


Figura 56 - Spatial framework

Il sistema di riferimento è stato precedentemente impostato, nell'importazione delle foto, e è quello cartesiano, per questo esce scritto *This reconstruction is not georeferenced*, in quanto *ContextCapture* riconosce come sistema di riferimento UTM WGS84.

Il *tiling* è la suddivisione in aree di interesse da far elaborare al programma. È pertanto stato scelto di suddividere l'area mediante una griglia di 9 *tile*, diminuendo anche l'area di interesse considerando che le tre cappelle sono posizionate al centro della nuvola.

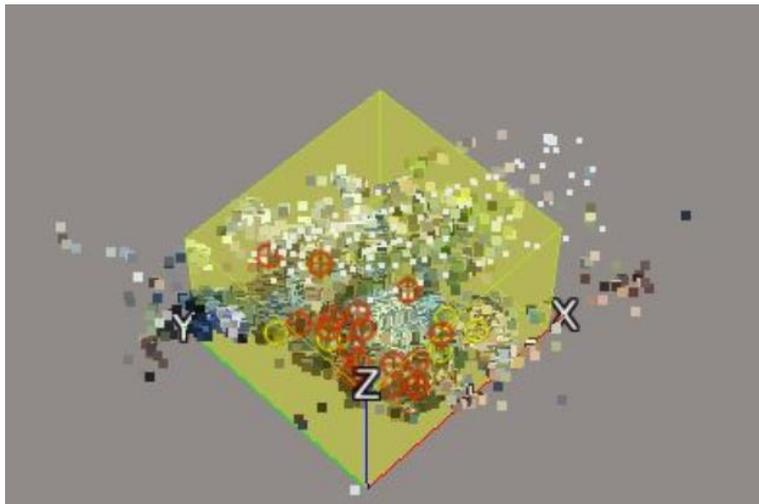


Figura 57 - Tile

- *Reference 3D model* [Figura 58]: gestisce le *tile* mostrando lo stato di avanzamento del processo.

Reconstruction - Reconstruction_1
 enter your description here

Regular planar grid (grid size 20 units), 9 tile(s), highest precision

General Spatial framework Reconstruction constraints Reference 3D model Processing settings

Tile	Status	Retouching	Tag	Description	Last modified
Tile_+000_+000	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+001_+000	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+002_+000	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+000_+001	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+001_+001	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+002_+001	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+000_+002	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+001_+002	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52
Tile_+002_+002	✔ Completed	None			13/04/2018 14:52

Figura 58 - Reference 3D model

- *Processing setting*: si impostano le caratteristiche per la ricostruzione e la precisione geometriche, ma in questo caso sono stati lasciati i valori di default.

La ricostruzione è stata avviata mediante *ContextCaptureEngine* e l'elaborazione ha avuto una durata di circa 18 ore.

The screenshot shows a software interface for a production job. At the top, it says 'Production - Production_1' and 'LAS production, 9 job(s)'. Below this, there are tabs for 'General', 'Properties', and '3D view'. A large green checkmark and the word 'Completed' are prominently displayed, indicating the job is finished. Below this, it states 'The production is completed. 9/9 job(s) completed.' and provides a link to 'Open output directory'. At the bottom, there is a 'Fever details' section with a table listing individual jobs.

Job	Type	Status	Retouching	Last submitted
Tile_001_001	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_001_002	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_001_000	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_002_001	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_000_001	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_002_002	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_002_000	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_000_002	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52
Tile_000_000	TileProduction	Completed	None	13/04/2018 14:52

Figura 59 - Production

Il risultato finale ottenuto risulta essere abbastanza fedele alla realtà [Figura 60], a eccezione della facciata principale della cappella quattro, dove la geometri e il colore sono stati falsati dalla vegetazione presente nelle vicinanze.



Figura 60 - Estratto della mesh ottenuta da ContextCapture

Al contrario, i muri del retro del complesso [Figura 61] sono serviti a un'integrazione delle nuvole elaborate con *Scene*. Infatti, sul retro non è stato possibile rilevare perfettamente tutte le parti murarie con il *laser scanner* in quanto la zona non era accessibile.



Figura 61 - Estratto Nuvola di Punti ContextCapture 2

A ogni modo, anche se in alcune porzioni delle superfici murarie il risultato non è coerente con la realtà, l'elaborazione effettuata mediante *ContextCapture* è servita per la realizzazione delle coperture e per tale scopo i risultati ottenuti possono essere considerati soddisfacenti.

4.2.4 Esportazione della nuvola di punti

A differenza del *software Scene* in questo caso l'esportazione è avvenuta automaticamente alla fine del processo di ricostruzione. Infatti è stata creata una cartella *Production* in cui sono riportate in delle sottocartelle denominate *Tile* all'interno delle quali sono contenute appunto le *tile* create in fase di ricostruzione aventi estensione *.las*

4.3 Elaborazione dei dati acquisiti mediante UAV (*Visual SFM*)

VisualSFM è stato utilizzato con la stessa finalità di *ContextCapture*, con il quale è stato effettuato un confronto, cioè quella di ottenere una restituzione di nuvole di punti che consentirà di modellare le coperture delle cappelle. Si tratta di un *software* che utilizza la tecnica della *structure from motion* (SFM) per la ricostruzione 3D degli oggetti.

Questo *software* è integrato da:

- l'algoritmo *SiftGPU* e la tecnica *multicore bundle adjustment* per il rilevamento e la corrispondenza tra le caratteristiche delle immagini;
- il *plugin PMVS/CMVS* per l'elaborazione dei dati, la ricostruzione di una nuvola densa e la georeferenziazione attraverso i punti di controllo;

I passaggi che sono stati compiuti da questo *software* sono: l'importazione delle immagini, la ricostruzione di una nuvola *sparsa*, la ricostruzione di una nuvola *densa* e la georeferenziazione delle immagini.

Si premette che, anche se dall'apparenza può sembrare un *software* dal banale utilizzo, prima di ottenere il risultato atteso, ovvero la nuvola di punti, sono stati effettuati numerosi tentativi, specialmente per quanto riguarda la fase di georeferenziazione.

4.3.1 Importazione dei fotogrammi

Le immagini utilizzate in *Visual SFM* sono le stesse utilizzate in *ContextCapture*, ossia ne sono state selezionate 92 sulla totalità di fotogrammi recuperati mediante rilievo UAV.

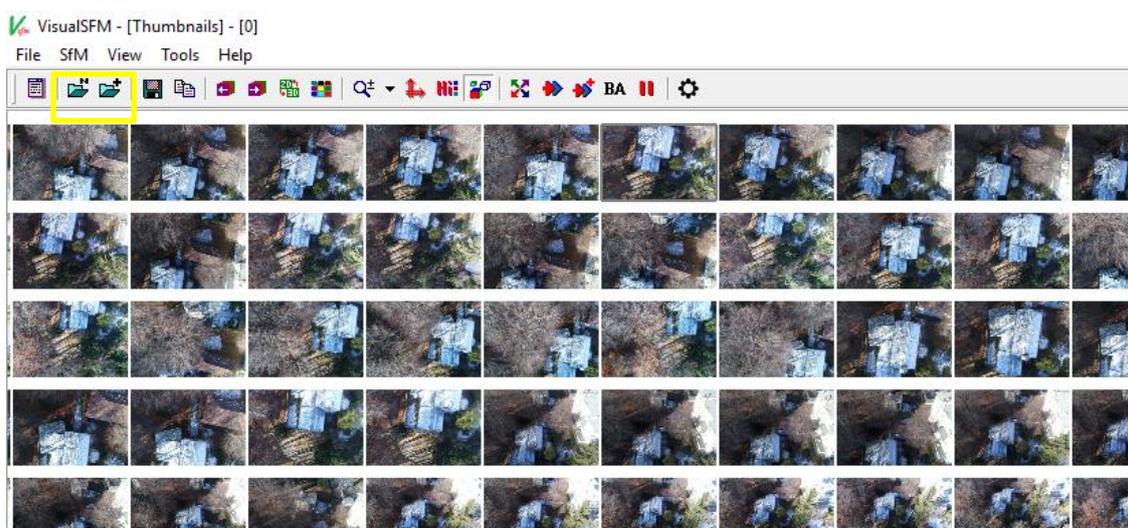


Figura 62 - Importazione immagini Visual SFM

L'importazione è avvenuta mediante il comando *Add some images* [Figura 62]. Di primo acchito si è notato che questa fase, confrontandola dal punto di vista temporale, è stata molto più lunga rispetto agli altri *software*, ma questo può essere riconducibile al fatto che la creazione della nuvola di punti è stata effettuata tramite un processore diverso da quello utilizzato per *Scene* e *ContextCapture*, ossia quello presente nel laboratorio di Geomatica all'interno del quale è stata svolta buona parte della tesi.

4.3.2 Inserimento delle coordinate

L'inserimento delle coordinate è stato eseguito mediante il comando *Ground Control Points-based Transform* [Figura 63] presente nella sezione *More Function*. I punti inseriti sono stati gli stessi utilizzati per l'elaborazione effettuata mediante *ContextCapture*.

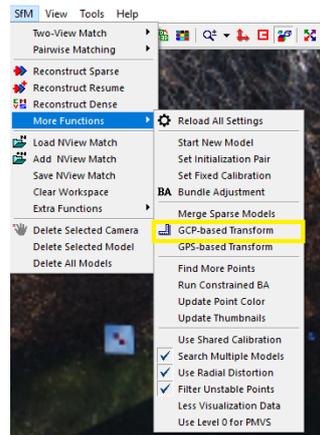


Figura 63 - GCP-based transform

A questo punto sono state aperte le stesse immagini selezionate con il precedente *software* di elaborazione e sono state associate manualmente le coordinate ai target [Figura 64].

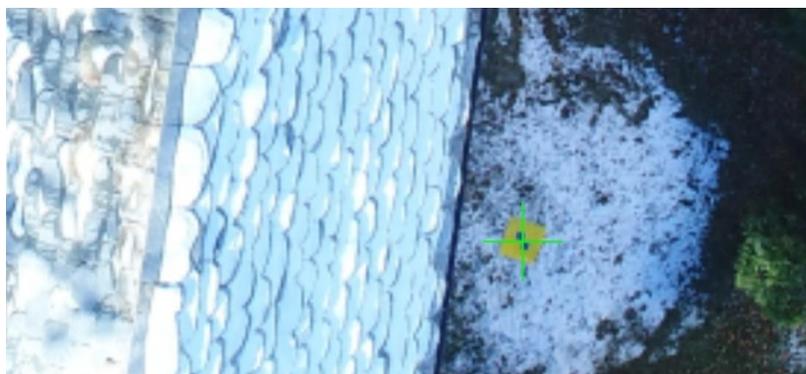


Figura 64 - Coordinate target

4.3.3 Ricostruzione nuvola sparsa

Dopo aver importato le immagini è stato necessario selezionare il comando **Match the images** [Figura 65] che individua le corrispondenze tra le immagini e ne consente un primo posizionamento di massima.



Figura 65 - Match the images

Dopo aver finito questo processo, dalla durata non breve che si aggira attorno alle cinque ore, è possibile tramite il comando **N View 3S points** visualizzare una prima restituzione della nuvola sparsa [Figura 66].

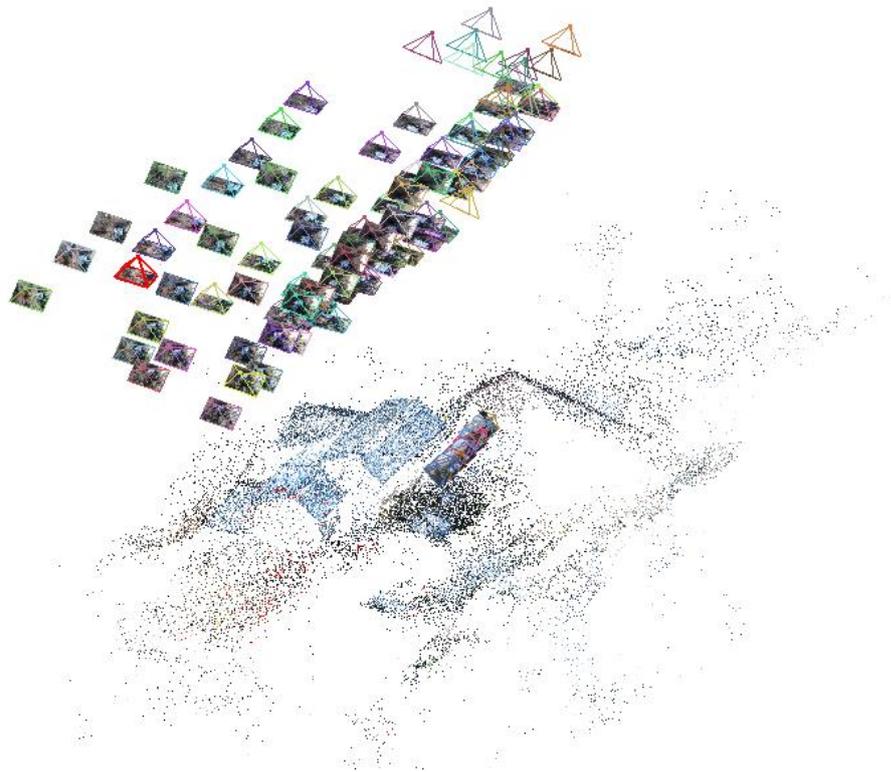


Figura 66 - NView

4.3.4 Ricostruzione nuvola densa

Ottenuta la nuvola sparsa è stato possibile avviare il processo di ricostruzione della nuvola densa tramite il comando **Run Dense Reconstruction** [Figura 67] individuabile sull'interfaccia sotto il nome di **CMVS** solo dopo aver installato l'apposito *plugin*.



Figura 67 - Run Dense Reconstruction

Al termine di questo processo, durato circa sette ore, è stata visualizzata la nuvola di punti [Figura 68].



Figura 68 - Nuvola di punti Visual SFM

4.3.5 Esportazione della nuvola di punti

L'esportazione avviene automaticamente, più o meno in modo simile a come è avvenuto per *ContextCapture*. Infatti è stata creata una ulteriore cartella in quella di installazione, in cui sono stati salvati due file: uno in formato *.nvm* e uno in formato *.ply*. Quest'ultimo è importabile in *CloudCompare*, software utilizzato per l'elaborazione delle nuvole.

V. Elaborazione delle nuvole di punti

Prima di introdurre il *software* CloudCompare con il quale sono stati eseguiti l'unione, la pulizia e il filtraggio delle nuvole, si fa una breve riepilogo di quanto effettuato nella fase precedente, ovvero la creazione delle nuvole di punti.

Il primo *software* utilizzato è stato *Scene* il quale ha permesso di realizzare la nuvola che servirà alla modellazione delle superfici murarie o comunque quelle presenti sulle facciate degli edifici.

Successivamente sono stati utilizzati due *software* per la realizzazione delle nuvole di punti che serviranno alla modellazione delle coperture: *ContextCapture* e *VisualSFM*. Questi sono stati confrontati con la finalità di decidere quale dei due unire con la nuvola realizzata con *Scene*.

Le nuvole di punti elaborate con i tre *software* appena citati presentano delle zone comuni. A titolo di esempio negli allegati è stato riportato un confronto, basato sulla densità, sulla facciata della cappella due estratta dalle tre nuvole.

5.1 Confronto fra nuvole fotogrammetriche

In entrambi i *software* sono state inserite lo stesso numero di immagini e le stesse coordinate ai target presenti nei fotogrammi, in modo tale che la comparazione fosse equa e basata sullo stesso livello di dati.

Dal primo è emerso che, le difficoltà riscontrate sono state relative a errori commessi durante la fase di associazione delle coordinate ai target, avendo sbagliato a selezionare una coordinata al posto di un'altra implicandone l'errato posizionamento iniziale. Quindi l'ulteriore dispendio di tempo impiegato per la generazione della nuvola non è imputabile a un mal funzionamento del *software* ma a un errore di esecuzione, che successivamente è stato trovato e corretto ottenendo un buon risultato.

Al contrario, in *Visual SFM*, nel quale sono stati utilizzati gli stessi dati di *ContextCapture*, non sono stati commessi errori nell'associazione delle coordinate. Inoltre esso dispone di una interfaccia molto più intuitiva.

ContextCapture è un *software* completo che permette la scelta della risoluzione dell'elaborato e restituisce maggiori dati rispetto a *VisualSFM* che, invece, consente delle lavorazioni più rapide a svantaggio delle precisioni e della completezza.

La nuvola restituita da CC risulta più particolareggiata a differenza di quella estratta da VSFM che risulta imperfetta e con la presenza di lacune anche nei punti in cui sono stati inseriti un buon numero di fotogrammi. Anche dal punto di vista della densità è possibile notare un risultato nettamente migliore in quella prodotta da *ContextCapture* [Figura 69].



Figura 69 - Nuvola VSFM e Nuvola CC

Questo risultato è stato possibile riscontrarlo anche facendo un'analisi mediante *CloudCompare*. Con il comando *density* presente nella sezione *tools* è stato possibile effettuare un'analisi automatica sulla densità della nuvola, che restituisce dei colori i quali indicano il grado di densità.

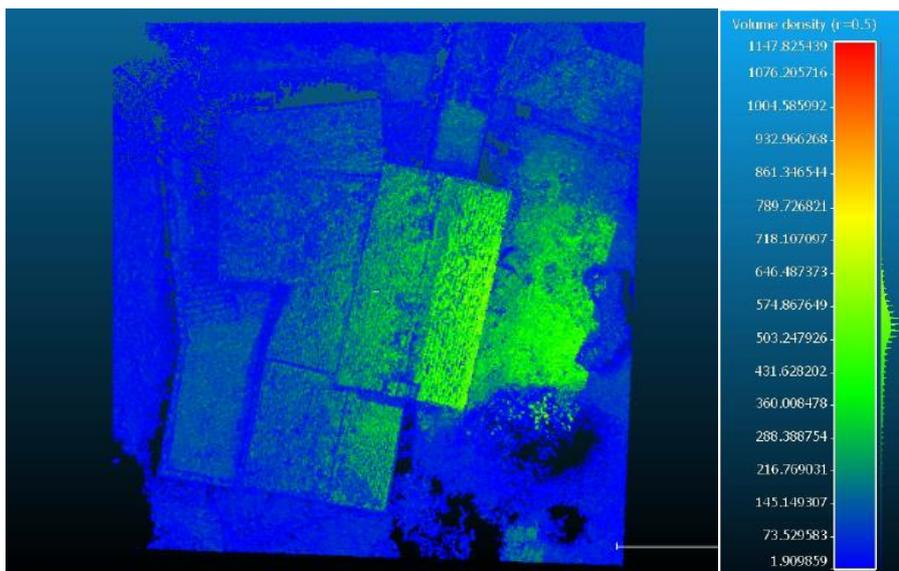


Figura 70 - Densità Nuvola di Punti Visual SFM

Si può notare come la nuvola di *VisualSFM* appare molto densa unicamente nelle aree di copertura degli edifici, mentre aree in blu mostrano la scarsa densità di punti, a dimostrazione di quanto si evince basandosi dalla restituzione delle nuvole.

Inoltre, dopo aver inserito la nuvola di punti creata e georeferenziata con *VisualSFM* su *Cloud Compare* è risultato che quest'ultima non fosse collocata nella posizione giusta, nonostante si fossero utilizzate le stesse coordinate.

Per i motivi elencati è stato scelto di utilizzare la nuvola di punti estratta da *ContextCapture* per unirla con quella elaborata su *Scene* e ottenere la nuvola unita.

Prima di questo passaggio è stato necessario la pulizia e il filtraggio delle nuvole.

5.2 Pulitura delle nuvole di punti

Il complesso rilevato risulta essere confinato da vegetazione che si è manifestato come zona di disturbo sia nel rilievo eseguito mediante *laser scanner* sia in quello eseguito con UAV.

5.2.1 Pulitura della nuvola *Laser Scanner*

La pulitura di queste nuvole ha comportato un notevole dispendio di tempo in quanto, su *CloudCompare* sono state caricate le singole esportazioni in *.E57* ottenute da *Scene* perché, provandole a caricare tutte insieme oppure più di una per volta si andava incontro a un rallentamento eccessivo del programma.

Dalle singole esportazioni si può notare come buona parte fosse relativa al disturbo [Figura 71].



Figura 71 - Zona di interesse della nuvola esportata *Scene*

La pulitura è stata effettuata mediante il comando *Segment* con il quale sono stati selezionati i punti e infine cancellati.

Dopo aver effettuato una pulitura grossolana è stata eseguita una pulitura volta a eliminare i disturbi prossimi al complesso, come a esempio la presenza di oggetti che non fossero necessari alla modellazione.

Quello che è stato mantenuto dell'insieme delle esportazioni è costituito dai soli elementi che fanno parte della struttura del complesso di Nazareth e da una parte di vegetazione presente nelle immediate vicinanze del complesso.

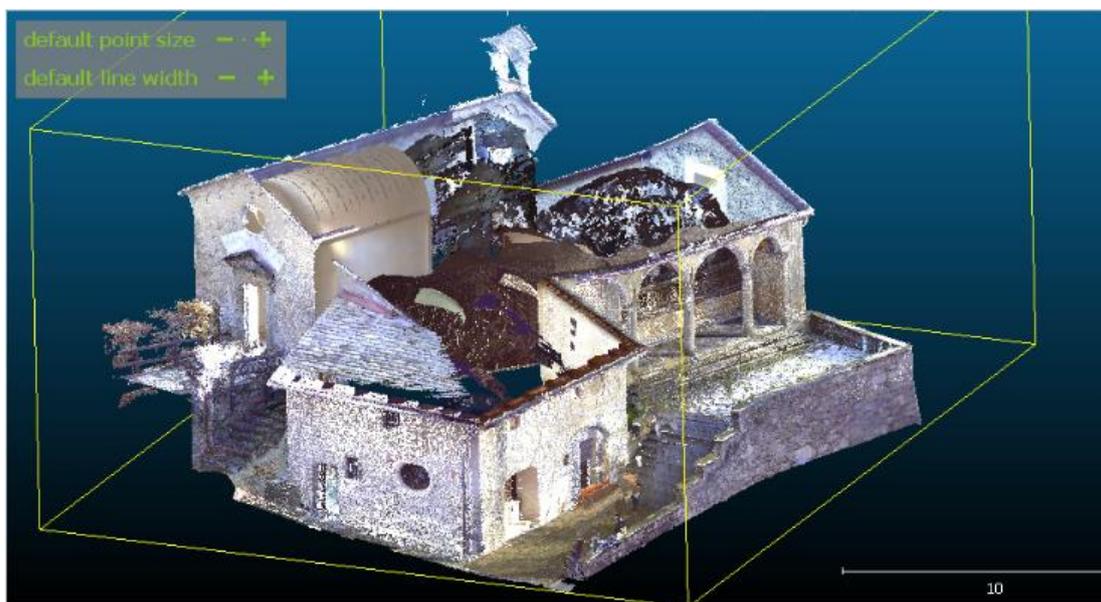


Figura 72 - Nuvola ottenuta mediante Laser Scanner

5.2.2 Pulitura della nuvola fotogrammetrica

La pulitura delle nuvole ottenute mediante UAV è stata eseguita in modo analogo alla prima. In questo caso gli unici elementi che sono stati mantenuti sono le coperture, la facciata del retro e la vegetazione presente nelle vicinanze della facciata del retro. Queste ultime infatti non sono state rilevate bene con il *laser scanner* in quanto la zona fosse poco accessibile.

Un'altra zona che non è potuta essere stata rilevata in modo soddisfacente, come si evince da *Figura 73*, è quella presente subito sotto la copertura della cappella due.

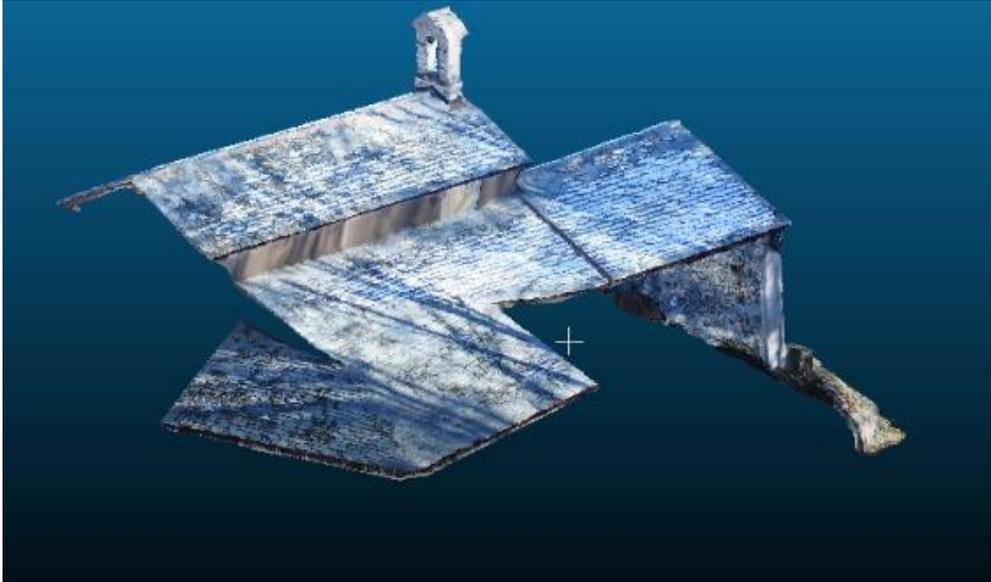


Figura 73 - Nuvola Fotogrammetrica

5.3 Filtraggio

Il filtraggio è stato eseguito al fine di rendere più facilmente lavorabile le nuvole ottenute, in quanto risultano pesanti e di difficile elaborazione. Inoltre, la modellazione in *BIM* risulta possibile anche con un numero inferiore di punti.

Anche questo procedimento è stato effettuato con *CloudCompare* mediante il comando *Subsample a point cloud* stabilendo un intervallo minimo tra i punti di 1.5 cm. Questa operazione è stata eseguita una seconda volta perché si è notato che la nuvola risultava ancora ben dettagliata e lo sarebbe stata anche effettuando un'ulteriore operazione di filtraggio, ottenendo così un intervallo minimo tra i punti di 3 cm.

5.4 Unione

L'unione delle nuvole rappresenta anche l'unione fra metodi di rilievo differenti: il rilievo metrico a terra e il rilievo aereo. È il passaggio indispensabile e il fine ultimo del rilievo e l'elaborazione dei dati, per ottenere la nuvola completa e pronta per essere modellata in *BIM*.

Le due nuvole estratte da *Scene* e *ContextCapture*, dopo essere state pulite e filtrate, sono state inserite nel software *CloudCompare* sovrapponendosi automaticamente.

L'operazione è stata effettuata selezionando tutte le esportazioni presenti sulla sinistra dell'interfaccia e poi selezionando il comando *Merge multiple clouds*.

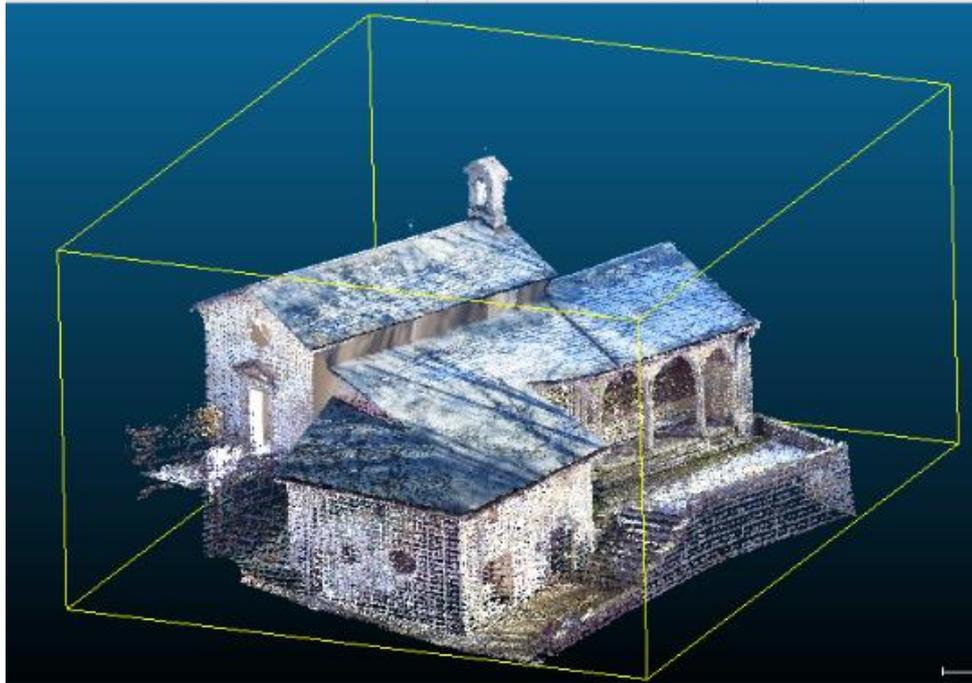


Figura 74 - Nuvole Pulite Filtrate e Unite

Il risultato ottenuto [Figura 74] è stato successivamente elaborato con altri *software* per ottenere il modello *BIM*.

VI. II BIM

6.1 Metodologia

Con la metodologia *BIM* è stato possibile cambiare l'approccio alla progettazione grazie all'introduzione di tutte le informazioni in un unico *database* condiviso tra i vari professionisti e basato sul concetto di interoperabilità.

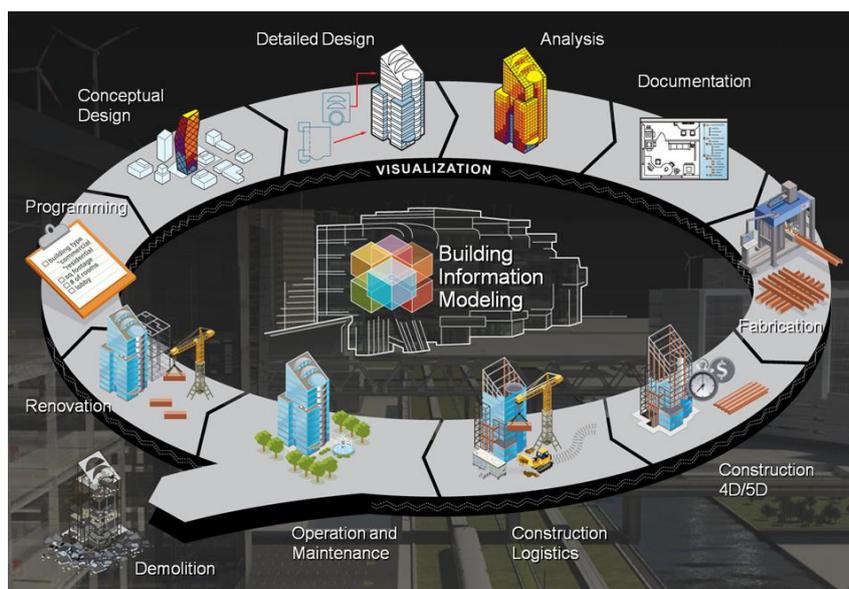


Figura 75 - BIM
(Fonte: *neuralenergy.info*)

È una metodologia operativa per la progettazione e la gestione di un edificio in formato di digitale grazie alla quale si riesce a avere un'analisi e un controllo più efficiente rispetto ai processi operativi tradizionali. Infatti a ogni elemento che si modella sono correlate una serie di parametri e definizioni geometriche integrate tra loro in maniera non ridondante, definendo così oggetti parametrici, che facilitano e migliorano la progettazione. In questo modo a ogni variazione del modello corrisponde il cambiamento delle informazioni a esso associate, evitando tutte le incongruenze che possono sorgere durante la costruzione del modello, le quali con il *CAD*, in cui bisogna fare le modifiche manuali in piante prospetti e sezioni, spesso non sono individuate in fase di progettazione e si propagano fino alla fase di esecuzione.

L'acronimo di *BIM* spiega quanto appena detto: **Building** fa riferimento sia al sostantivo "Edificio" che al verbo "Costruire"; **Information** fa riferimento all'insieme di

informazioni e di dati che consentono la rappresentazione tridimensionale del modello; *Modelling* fa riferimento ai processi di modellazione.

Nella realtà alla lettera M dell'acronimo possono essere associate anche i significati di *Model*, che fa riferimento al modello generato e *Management*, che fa riferimento all'organizzazione, gestione e controllo del processo. Ma nello svolgimento di questa tesi è stato sfruttato il primo acronimo (*BIModelling*), in quanto oltre alla rappresentazione dell'oggetto architettonico è stata effettuata un'attività di gestione delle informazioni connesse ad esso che mirano a essere utili e implementabili in futuro da altri soggetti.

Attualmente, il *BIM* è utilizzato per lo più nella progettazione degli edifici, ma vi è un forte sviluppo anche in altri settori, dovuto alla concreta possibilità e prospettiva che questa metodologia di lavoro offre nel memorizzare informazioni in formato digitale, per una semplice e rapida interrelazione tra settori e gruppi di lavoro.

6.2 Il concetto di interoperabilità

Lo scopo ultimo della nascita di questa nuova metodologia consiste nell'*interoperabilità* [Figura 76], che consente la collaborazione simultanea al progetto di diverse figure professionali e che implica un grosso risparmio di tempo e di energie.



Figura 76 - Schema interoperabilità
(Fonte:www.acca.it)

Infatti, da sempre nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni è richiesta la collaborazione tra i diversi partecipanti al processo edilizio, ma questo non è

mai stato semplice anche a causa del fatto che i diversi professionisti utilizzando vari *software* con diverse caratteristiche, non riescono a condividere le informazioni simultaneamente.

Non esiste un'unica applicazione in grado di gestire l'associazione di tutti i lavori ma l'interoperabilità tra i *software* diventa il requisito principale e necessario per corrispondervi e, contestualmente, per diffondere l'effettivo impiego della metodologia *BIM*.

L'interoperabilità quindi consiste nella possibilità della condivisione dei dati tra i diversi *software* e diverse applicazioni in modo che ogni singolo partecipante al processo possa immettere e acquisire dati nel modello.

6.3 Il BIM applicato al patrimonio architettonico

La metodologia *Building Information Modelling* è utilizzata prevalentemente per le nuove costruzioni, ma la sua applicabilità è estendibile anche al patrimonio storico e l'acronimo diventa *HBIM* dove H significa *Heritage* (patrimonio) oppure *Historic* (storico).

In aggiunta ai parametri inseriti in un modello *BIM* ne sono stati aggiunti altri circa la composizione interna, l'anno di costruzione, gli interventi di restauro effettuati e quelli da effettuare, documenti di archivio, ecc.

Si tratta di uno strumento immaginato per il monitoraggio dello stato di conservazione del patrimonio edilizio, volto a individuare tutte quelle situazioni di rischio per programmare nel tempo interventi di ristrutturazione, manutenzione, e adeguamento. Per esempio in passato la conservazione del fascicolo era in capo a amministratori di condominio e proprietari, doveva contenere una quantità e una qualità di elaborati estremamente completa come planimetrie e grafici indicativi delle peculiarità dell'immobile, la documentazione delle caratteristiche del sottosuolo, la tipologia delle strutture di fondazione e di elevazione, la segnalazione di eventuali fenomeni di dissesto come crepe e fessurazioni, la rispondenza tecnica alle normative degli impianti e un giudizio sintetico circa il livello di degrado dell'immobile. Anche se l'obbligatorietà della redazione del fascicolo è stata abrogata nel tempo, ciò non toglie che sia stato uno degli esempi di raccolta informativa catalogata, spesso in forma digitale, delle conoscenze multidisciplinari che gravitano attorno a un organismo edilizio consolidato.

Se da un lato il *BIM* aiuta a coordinare le diverse figure del processo edilizio introducendone le competenze nei modelli (distinti in architettonici, strutturali,

impiantistici e di manutenzione) così da pianificarne la realizzazione e computarne le quantità per il cantiere, *HBIM* si concentra invece sul rilievo, sulla definizione dello stato di conservazione dei luoghi e dei materiali, per meglio pianificarne interventi consapevoli.

È chiaro che la conoscenza dell'organismo architettonico dev'essere molto ampia e questo richiede molti sforzi per investigare tutte le possibili fonti d'informazione che un modello *HBIM* può ospitare. Anche la definizione di rilievi geometrici mirati è un aspetto delicato.

6.4 Preparazione delle nuvole di punti per Revit: Recap 360

Per importare le nuvole dei punti unite, pulite e filtrate su *Revit* è stato utilizzato come *software* di “passaggio” *ReCap360 (RealityCapture)* che consente di preparare le nuvole di punti per l'uso all'interno di un'ambiente *CAD* e *BIM* tramite l'esportazione in formato *.rcp* che è supportato da *Revit*.

Prima di esportarle in *Revit* è stata effettuata una suddivisione in componenti architettonici:

- Volte;
- Muri;
- Colonne;
- Pavimenti;
- Tetti;
- Scale;
- Portale

In *Figura 77* è stato riportato un esempio di elemento architettonico ritagliato dalla nuvola dei punti dell'intero complesso di Nazareth, che dopo essere stato ridefinito in modo dettagliato su *Recap360*, eliminando gli eventuali disturbi non ancora rimossi su *CloudCompare* durante l'elaborazione delle nuvole, è stato esportato in formato riconoscibile da *Revit*.

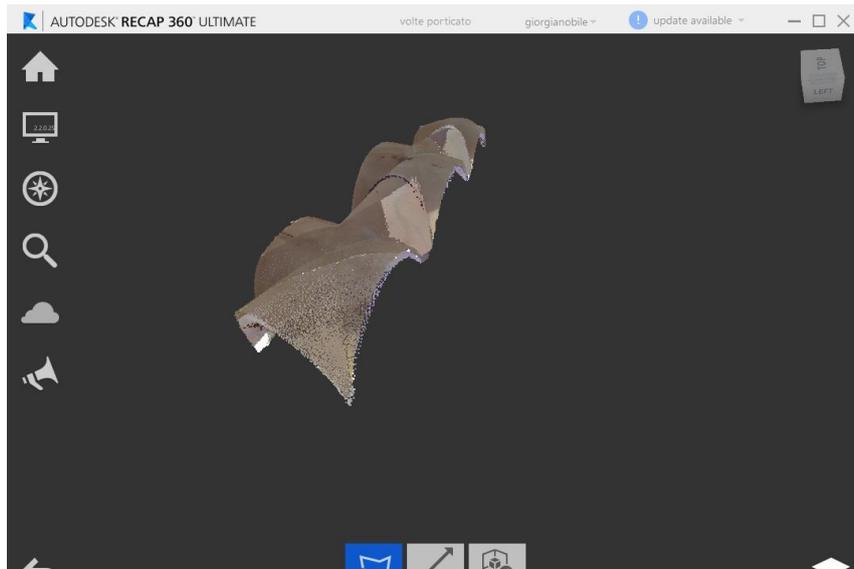


Figura 77 - Volte di nuvole di punti esportate da ReCap 360

Dopo aver finito di elaborare tutte le nuvole, eliminando i punti in eccesso e ridefinendo la forma, è possibile esportare l'elemento in diversi formati leggibili in *Revit*. In questo caso sono state esportate in formato *.rcp* [Figura 78], poiché consente di mantenere le proprietà di georeferenziazione.

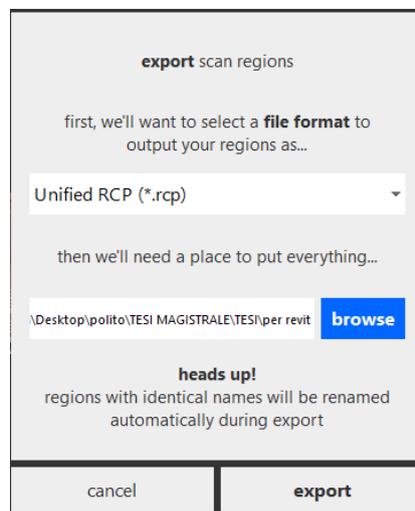


Figura 78 - Esportazione nuvole da ReCap 360

Non sono stati riportati anche tutti gli altri elementi architettonici per non dare informazioni ridondanti, ma a ogni modo il procedimento effettuato su questo *software* è stato quanto appena descritto per ciascun elemento architettonico.

6.5 Creazione del modello 3D: Revit

In ambiente *Revit*, prima di creare il modello, è stata effettuata un'organizzazione dei *workset* per riuscire a avere un maggior controllo e coordinamento delle diverse parti che costituiscono il modello. Successivamente avviene l'importazione delle nuvole di punti e l'impostazione delle coordinate del punto di progetto e del punto di rilievo, che serviranno per poter effettuare una georeferenziazione globale corretta. Solo dopo aver impostato questa organizzazione si è proceduto con la generazione del modello tridimensionale. Di seguito sono stati riportati tutti i passaggi.

6.5.1 I workset

I *workset* sono come scatole, *layer* in cui suddividere le varie parti del progetto, come muri interni e esterni, tetti, solette, nuvole di punti o impianti, e che danno la possibilità ai vari professionisti di lavorare singolarmente in un *file locale* connesso a un *file centrale* che può essere periodicamente aggiornato tramite una sincronizzazione.¹¹

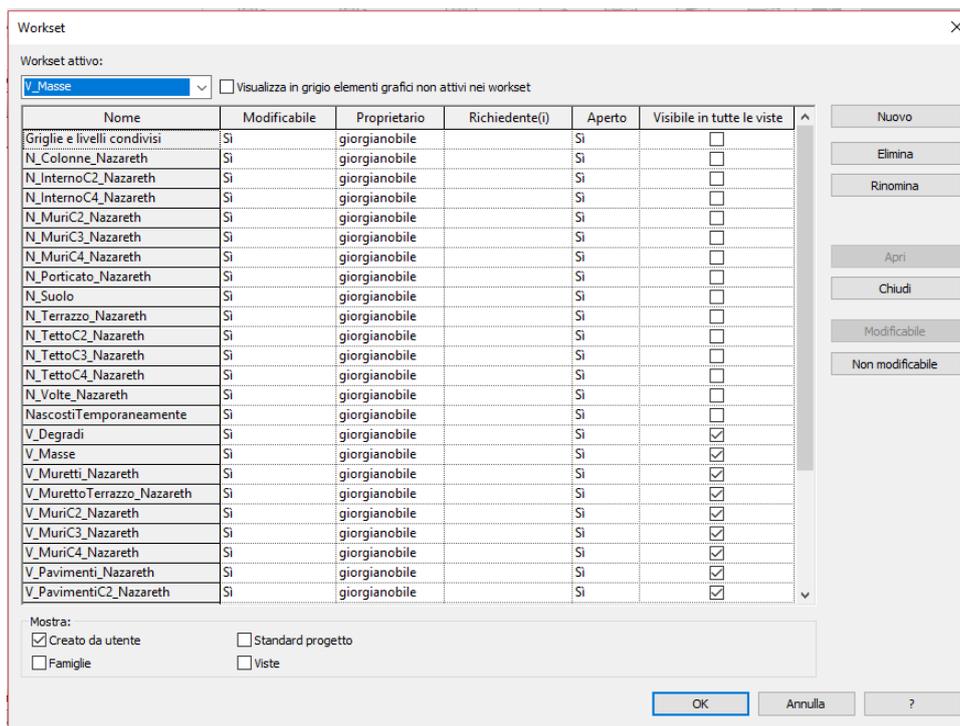


Figura 79 - Workset

¹¹ DEL GIUDICE Matteo, OSELLO Anna, *BIM for cultural heritage*, in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France, pag. 227.

Per ogni elemento architettonico è stato creato il workset *Nuvole* e il workset *Volumi*, [Figura 79] a cui è stato assegnato un nome composto da un prefisso N oppure V a seconda che si tratti di una nuvola di punti esportata da *Recap360* oppure di un volume creato direttamente su *Revit*; al prefisso segue il nome dell'elemento architettonico e un suffisso che è uguale per tutti e risponde al nome di *Nazareth*.

Quest'ultimo è stato aggiunto in modo tale che non si crei confusione nel momento in cui si andrà a unire il modello tridimensionale che si sta generando, che rappresenta per l'appunto il complesso di Nazareth, con gli altri modelli che rappresentano gli altri edifici del Sacro Monte di Varallo. A titolo di esempio, al workset *N_Colonne_Nazareth*, se non ci fosse il suffisso che identifica il complesso, una volta uniti i modelli locali a un unico modello centrale, si creerebbe un'ambiguità dovuta all'omonimia dell'elemento.

La creazione di questi workset mi consente di avere un controllo dal punto di vista grafico e della gestione dei volumi. Per esempio, questo modello, è stato ottenuto modellando una cappella alla volta, mantenendo tutte le altre “spente” e nella modellazione di ogni singola cappella venivano “accesi” gli elementi architettonici uno alla volta.

6.5.2 Importazione e georeferenziazione globale delle nuvole di punti

Per il collegamento della nuvola di punti è necessario aprire la sezione *Inserisci* e scegliere il comando *Nuvola di punti*, Figura 80.

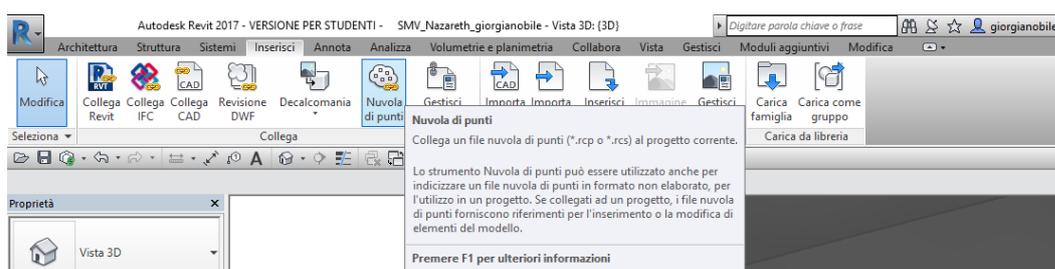


Figura 80 - Importazione nuvole su Revit

Dopo aver selezionato il comando di inserimento si apre una finestra all'interno della quale è possibile scegliere i *file* da collegare.

Nella casella *Posizionamento* è necessario selezionare il comando *Automatico: da origine a origine*, Figura 81. In questo modo, la nuvola si posizionerà lontano dal punto base di progetto di *Revit* poiché ha mantenuto le proprietà di georeferenziazione.

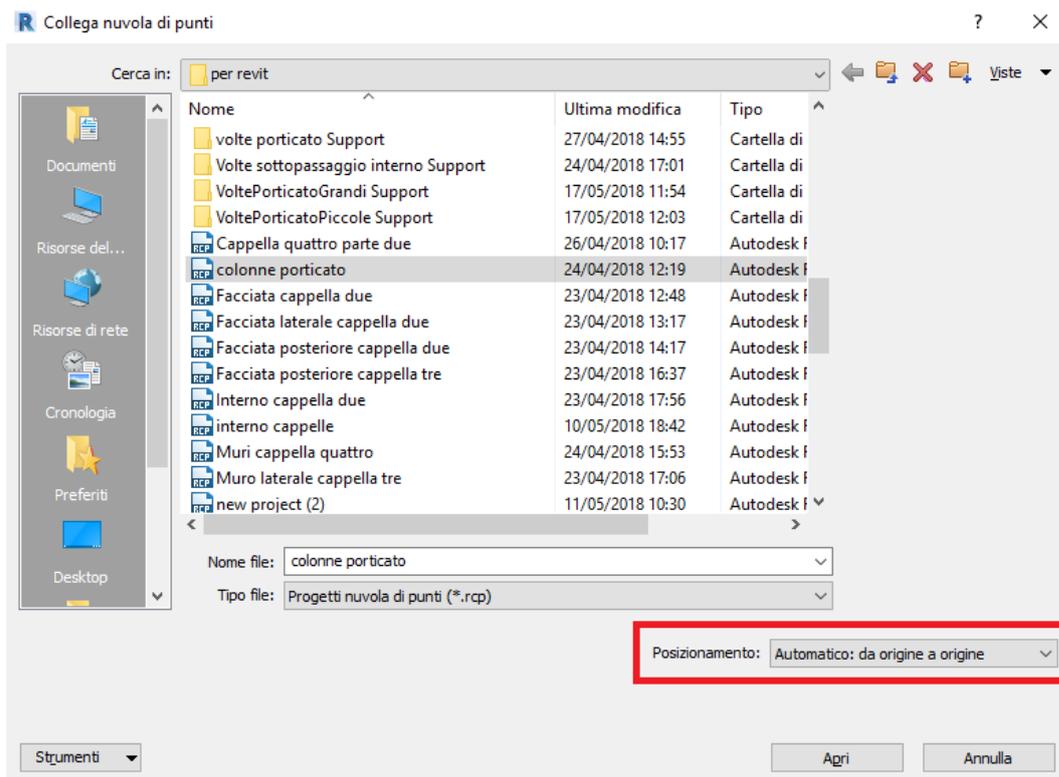


Figura 81 - Posizionamento nuvole di punti

È possibile ripetere l'operazione per ogni singolo file oppure selezionare in una volta sola le nuvole di punti da importare fino a ottenere l'intera nuvola completa.

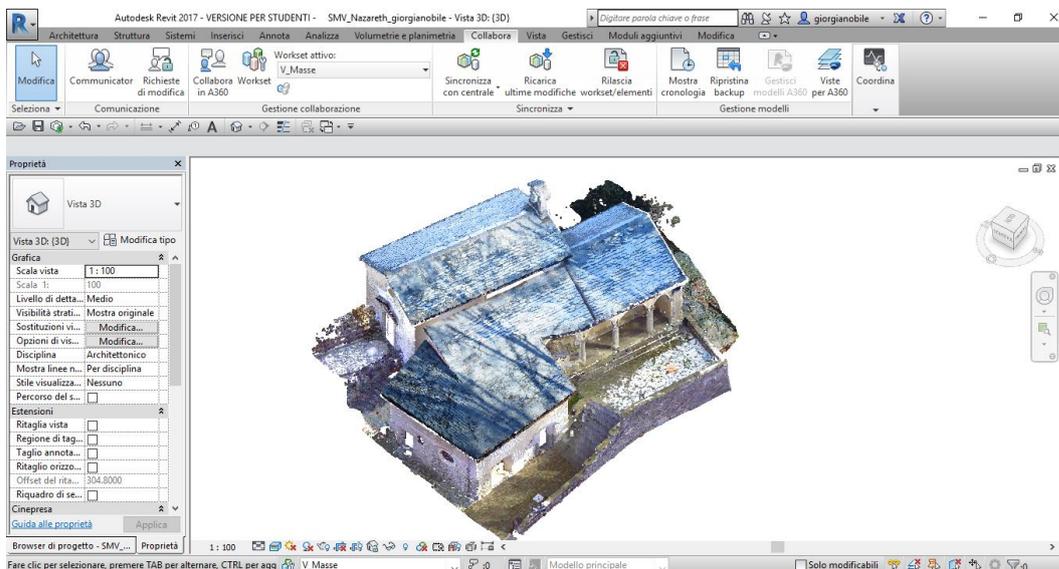


Figura 82 - Nuvole di punti importate su Revit

In questo momento la nuvola avrà la georeferenziazione corretta ma lontana dal punto di progetto predefinito di Revit e quindi anche dalle quattro frecce che consentono

la visualizzazione dei prospetti. Questo rende il processo di difficile elaborazione, motivo per cui sono state effettuate le opportune modifiche alle coordinate del punto di progetto e uno spostamento manuale delle quattro frecce che consentono la vista dei prospetti.

Posizionandosi sulla vista *Top*, è stato selezionato il punto base di progetto, cliccando sulla *clips* presente a lato in modo da impedire lo spostamento di tutto il modello e sono state assegnate le seguenti coordinate.

- N/S = 4268.1363;
- E/O = 206.5513;
- Quota altimetrica = 593.3563.

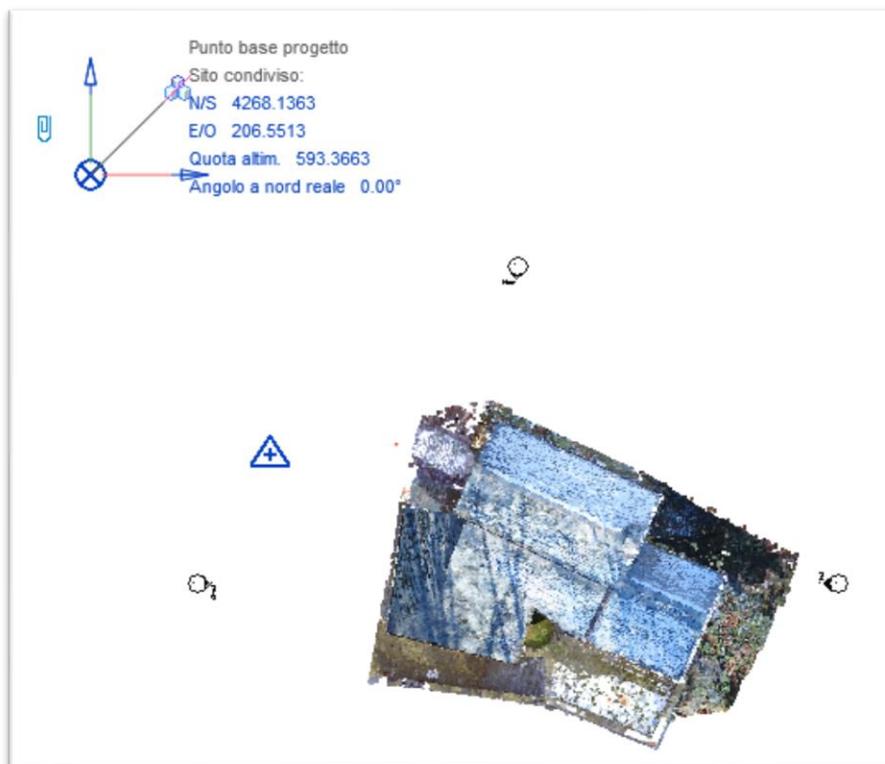


Figura 83 - Coordinate punto base di progetto

Questo punto costituisce il *Punto di Georeferenziazione* del modello [Figura 83] prodotto e rappresenta anche il punto che ha consentito la georeferenziazione di tutti i modelli che sono stati creati precedentemente.

Infatti, inserendo il modello delle masse, di cui nei capitoli a seguire è stato spiegato il motivo e le modalità della creazione, nel modello federato in cui sono presenti anche

gli altri modelli georeferenziati correttamente si nota come questo si collochi al posto giusto [Figura 84].

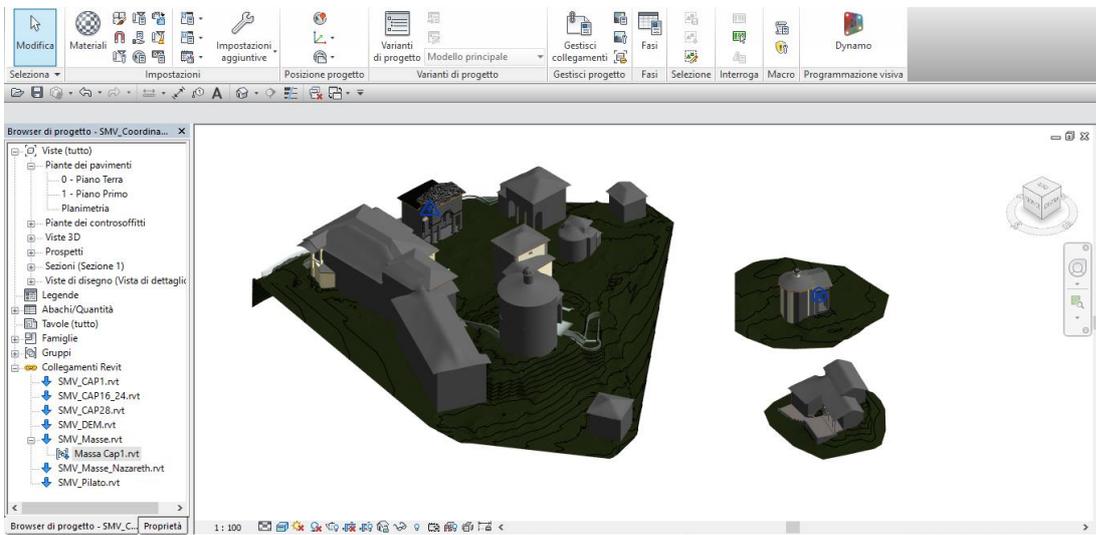


Figura 84 - Modello di Coordinamento

Per il caricamento di un modello, nella sezione **Gestisci**, selezionando il comando **Gestisci Collegamenti** e poi **Aggiungi**, è possibile caricare il file [Figura 85].

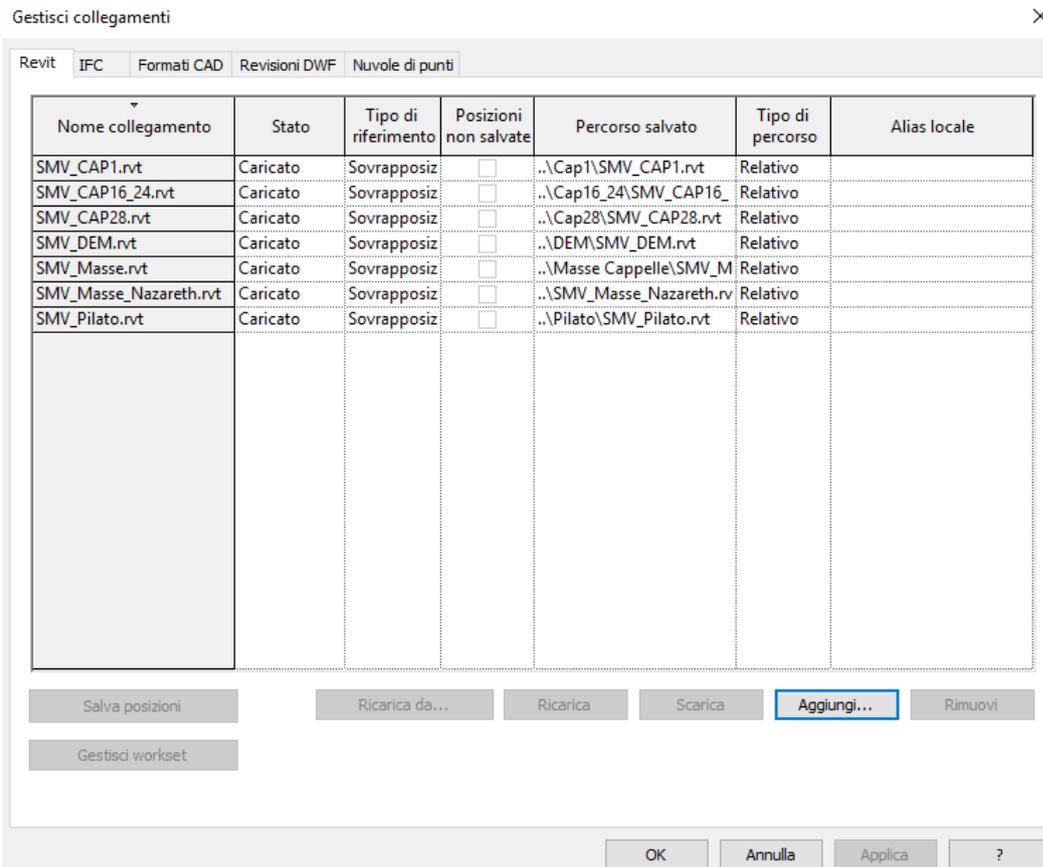


Figura 85 - Collegamento File

Essendo un collegamento di file, non si possono apportare modifiche all'interno del modello federato. Per far ciò è possibile selezionare, tramite la finestra **Browser di progetto**, la scheda relativa a **Collegamenti Revit** [Figura 86].

Cliccando con il tasto destro del *mouse* su uno di essi è possibile selezionare il comando **Apri e scarica** che permette di aprire il modello collegato apportando le dovute modifiche. Una volta chiuso il *file* collegato comparirà una **X** rossa a indicare che il collegamento ha bisogno di essere ricaricato.

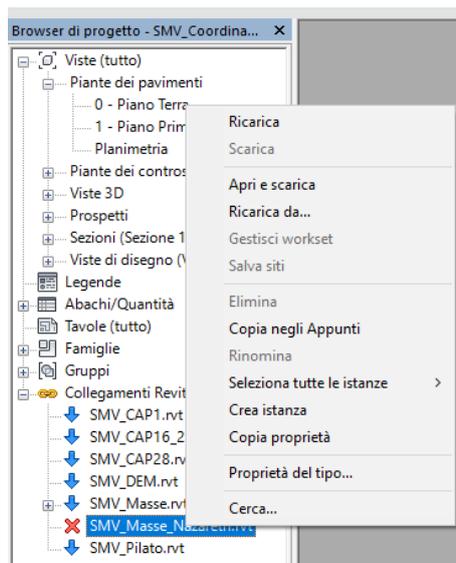


Figura 86 - Ricarica Collegamento

Si può agire sempre sulla stessa scheda cliccando con il tasto destro del mouse su **Ricarica** oppure dal menu degli strumenti **Gestisci** tasto **Ricarica**.

6.5.3 Funzionalità e *plugin*

La modellazione del complesso di Nazareth è stata effettuata a partire dalle nuvole di punti mediante l'ausilio di alcuni *plugin* di *Revit*, in particolare *Pointsense* e *Rhinoceros*.

Il primo è stato utile principalmente per la creazione di muri e elementi lineare, mentre il secondo per la creazione di elementi dalla forma irregolare e curvilinea.

- **POINTSENSE**

Questo *software* fornisce diversi strumenti per la gestione e l'elaborazione delle nuvole di punti, ma in questa modellazione è stato utilizzato solo per la creazione dei muri, in quanto la versione di prova aveva una durata di soli 15 giorni e per sperimentare tutti i comandi il tempo a disposizione non è stato sufficiente. Infatti, i comandi utilizzati

maggiormente sono stati quelli utili a identificare il perimetro dei muri, lo spessore e l'altezza, assegnandone una tipologia predefinita nel *software* e eventualmente modificandola successivamente.

In particolare il comando **Fit Wall** [Figura 87] permette di realizzare i muri, specificando il vincolo superiore di quota a cui il muro deve arrivare, che successivamente può essere modificato.

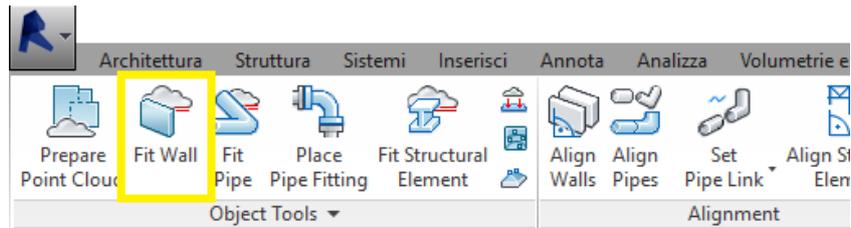


Figura 87 - Comando *FitWall*

Dopo aver impostato i parametri richiesti è stato possibile proseguire con il comando **Start Wall Fitting** [Figura 88] che ha dato la possibilità di scegliere i due punti estremi del muro, anche se nella realtà si possono scegliere i punti indipendentemente dal loro posizionamento. Non devono essere necessariamente gli estremi, ma per praticità è stata effettuata questa scelta in modo da ottenere la lunghezza con un solo passaggio. Dopodiché si apre automaticamente una finestra di dialogo, che consente la scelta dello spessore del muro fra i vari spessori di default che *PoitSense* propone: *Best Fit*, cioè quelli che potrebbero funzionare meglio, oppure i *Loaded Wall Types*, cioè quelli già presenti nel modello.

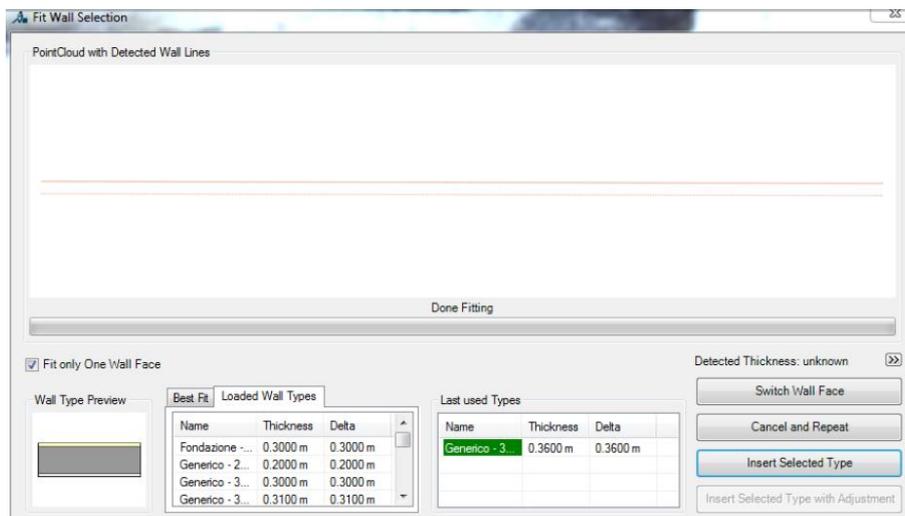


Figura 88 - Spessore muri *PoitSense*

Ne è stata selezionata una tipologia generica e con il comando *Insert Selected Type* è stata caricata nel modello.

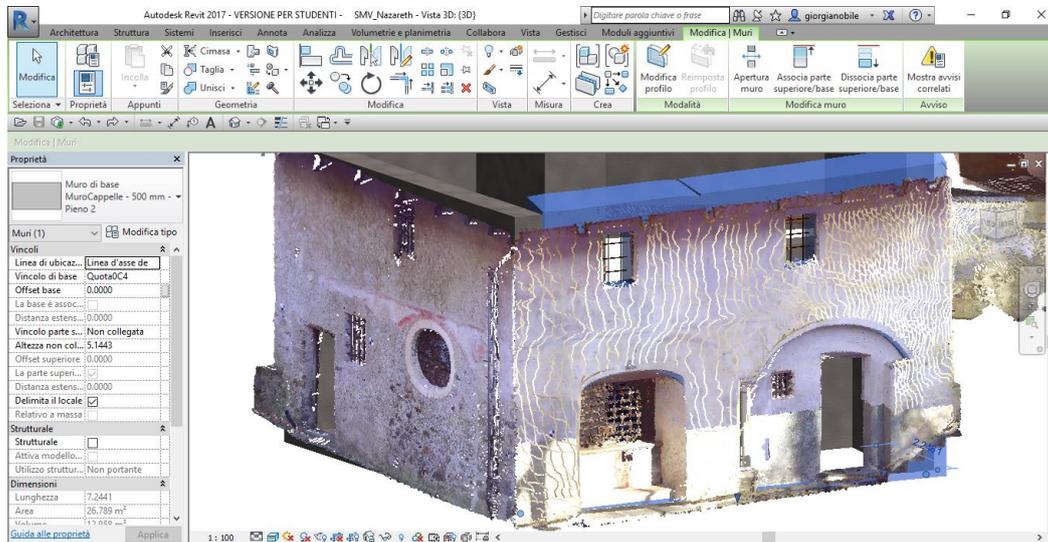


Figura 89 - Muro Creato con PointSense

Poi successivamente attraverso la finestra di proprietà del muro, sono state modificate le proprietà. I muri sono stati suddivisi, creando nuove opportune *Famiglie*, in funzione dello spessore, dal momento che quest'ultimo non è costante, ma varia dai 60 ai 100 centimetri. I risultati ottenuti [Figura 89] risultano essere abbastanza fedeli alla nuvola di punti.

- **RHINOCEROS**

Questo *software* è risultato utile per la creazione non solo delle volte, ma anche delle coperture, che, provando a modellarle direttamente con il comando che consente di creare i tetti e falde, restituivano un risultato piuttosto lineare e lontano dall'aspetto più "morbido" che realmente hanno questi tetti a falda con manti di beole.

Come primo step è necessario importare la nuvola dell'elemento architettonico, precedentemente suddivisa e salvata con estensione *.pts* con *Recap360*, tramite il comando *Importa* dalla barra delle applicazioni su Rhino.

Prima di creare la superficie, la nuvola è stata ritoccata e pulita con il comando *Curve - Nuvola di punti - Elimina punti*.

Successivamente con il *plugin MeshFlow* è stato possibile gestire le nuvole di punti e crearne le mesh.

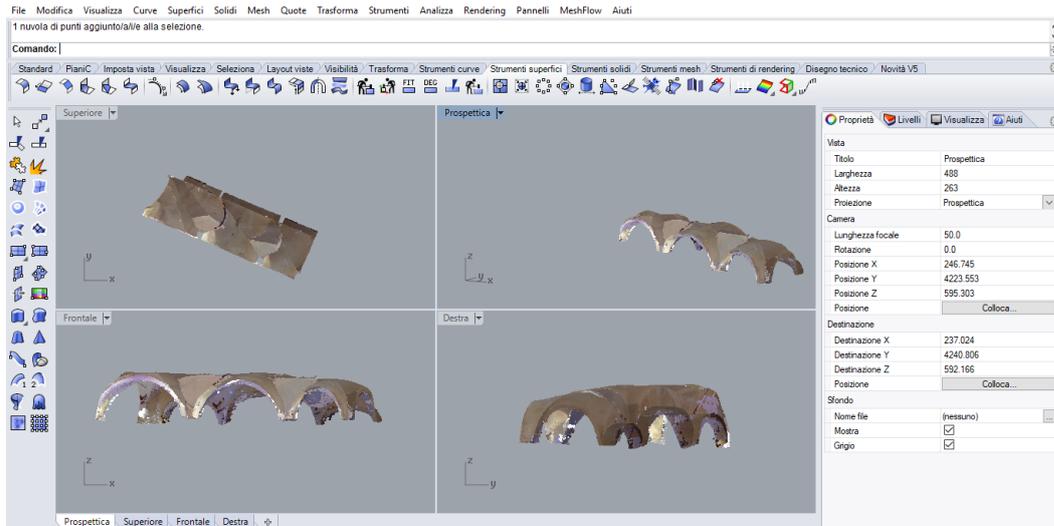


Figura 90 - Volte importate su Rhino

Dopo aver impostato l'unità di misura in metri, con il comando *Fit all Surf By Point Cloud*, è stata aperta una finestra di comando [Figura 91], che ha permesso di creare dei piani di massa dalla nuvola di punti.

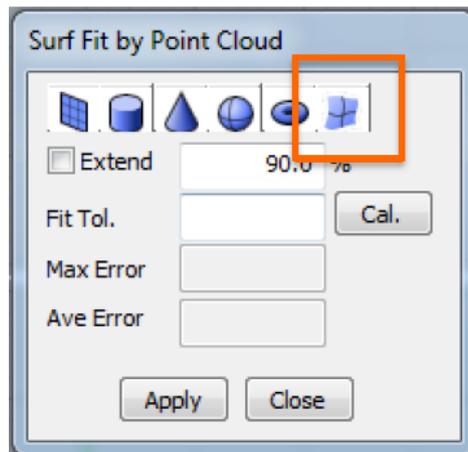


Figura 91 - Finestra di dialogo per la creazione della superficie

Selezionando la nuvola di punti e successivamente il comando sopra riportato si genera una superficie che ha più o meno lo stesso andamento della nuvola di punti importata [Figura 92]. Questa superficie così creata deve essere modificata in quanto, come si evince dall'immagine riportata, non rispetta le stesse forme dell'elemento architettonico. Quindi con il comando *Suddividi superficie* nella barra degli *Strumenti Superfici* è stata effettuata una ridefinizione della forma.

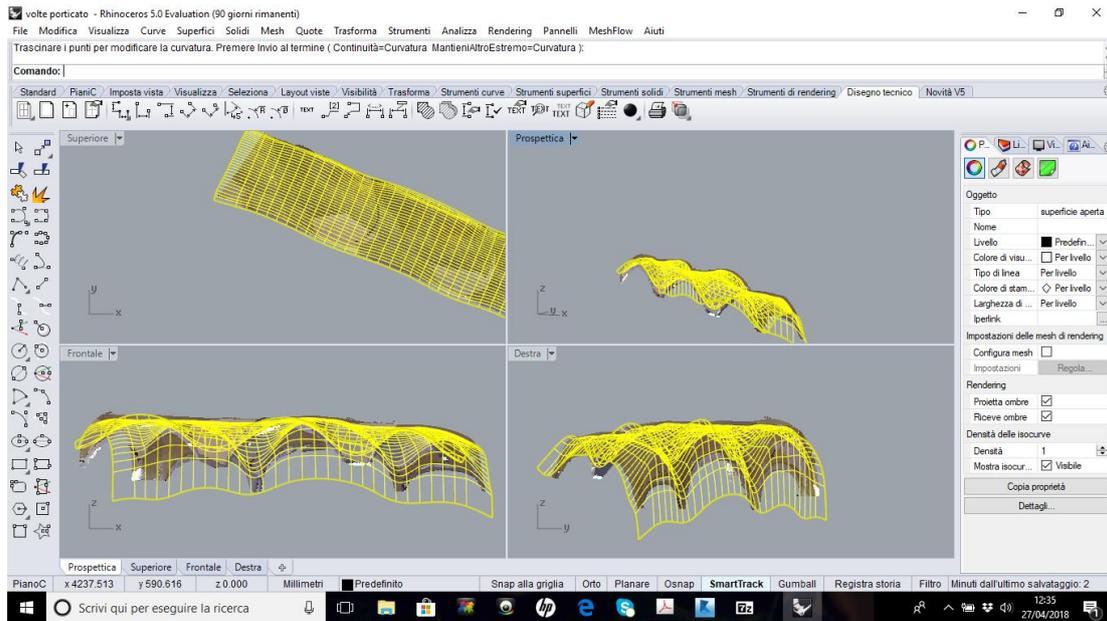


Figura 92 - Superficie non modificata

Dopo aver modificato correttamente gli elementi architettonici, creando superfici che potessero assomigliare a quelle reali, è avvenuta l'importazione su Revit. Tramite il comando **Importa CAD** è stato selezionato il file precedentemente salvato in formato **.sat** su Rhino, si imposta l'unità di misura e il tipo di posizionamento [Figura 93].

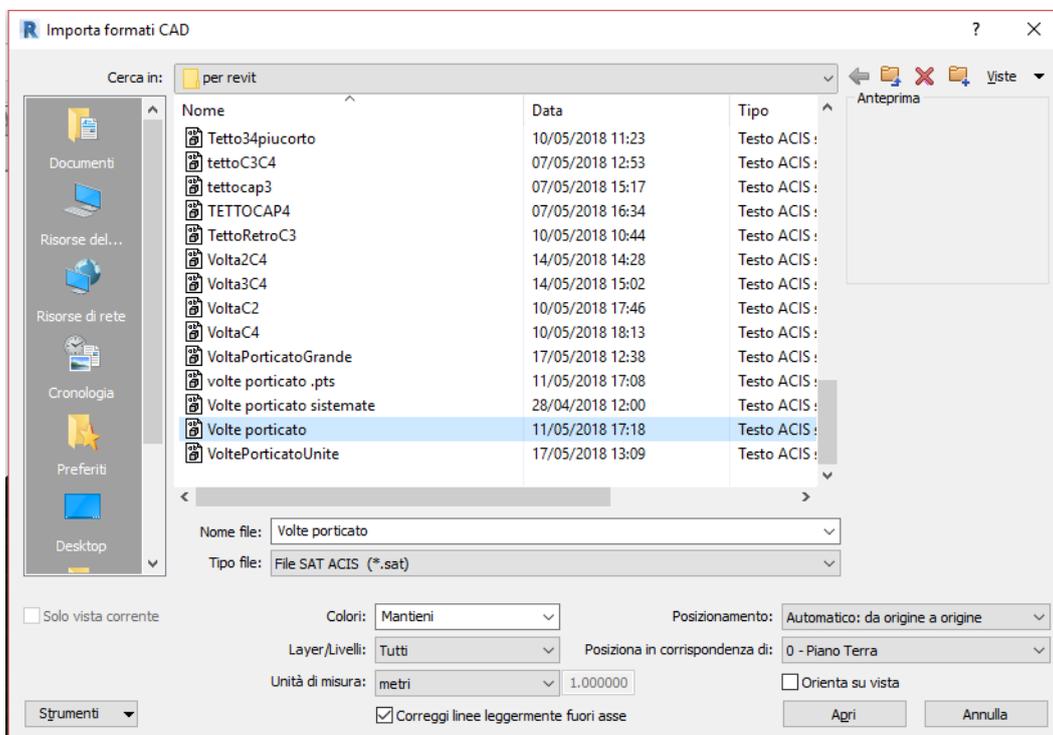


Figura 93 - Importazione superficie da Rhino a Revit

A questo punto la superficie si colloca nella giusta posizione, poiché nonostante sia stata lavorata su Rhino, essa mantiene comunque le proprietà di georeferenziazione [Figura 94].

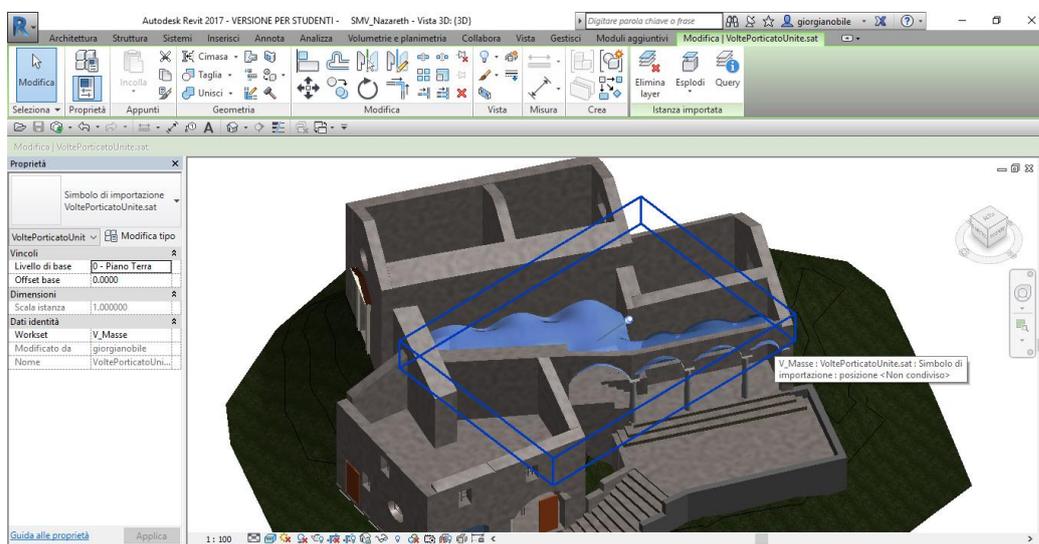


Figura 94 - Superficie importata da Rhino a Revit

Dopo aver caricato le volte, è stato necessario “sbloccarle” dall’apposito “chiodino” evidenziato in Figura 94 per poterle modificare e, anche se si tratta di una volta e non di una copertura, il volume è stato generato tramite il comando *Crea Tetto da Superficie* assegnando un valore di estrusione molto sottile, altrimenti non si riuscirebbe a crearla.

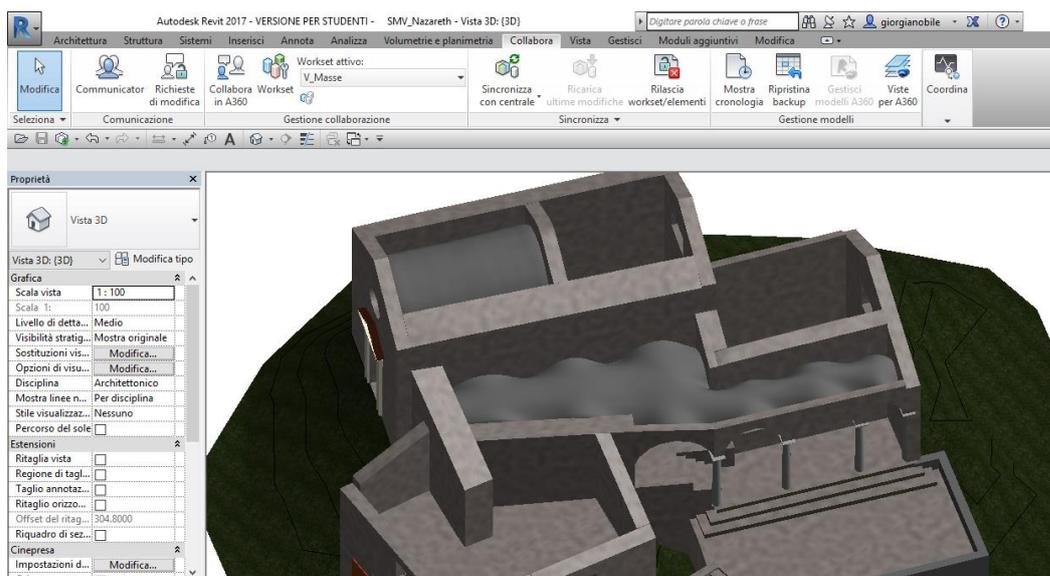


Figura 95 - Volte create da Tetto da Superficie

Questo stesso procedimento è stato adottato per la realizzazione delle volte interne della cappella quattro e per le coperture a falde [Figura 96].

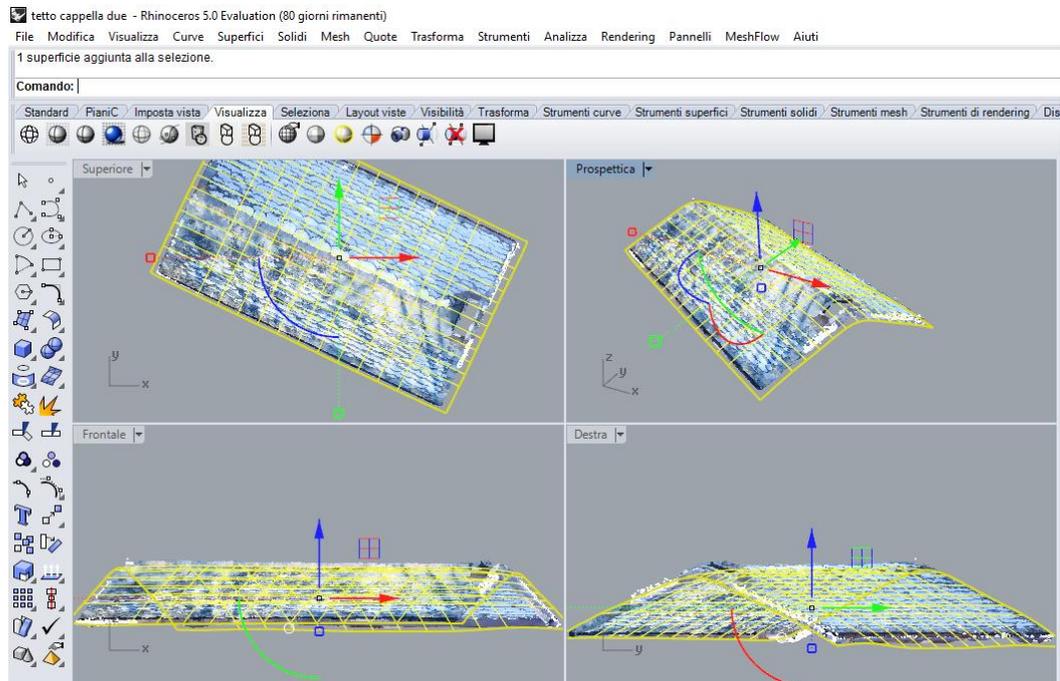


Figura 96 - Copertura Cappella Due su Rhino

Per quanto riguarda tutti gli altri elementi architettonici, quindi escludendo le volte, le coperture e i muri, sono stati modellati tramite le funzionalità presenti su *Revit* senza l'installazione di altri *plugin*.

6.5.4 Realizzazione del terreno

Il complesso di Nazareth non rientra nella DEM (*Modello digitale di elevazione*) realizzata nei precedenti anni e sulla quale sono stati posizionati i modelli creati successivamente al primo, motivo per cui è stata realizzata una nuova porzione di terreno che ospita le tre cappelle oggetto di studio.

A differenza di quello realizzato in precedenza con il *software* Lidar, si è deciso di provare a realizzarlo direttamente tramite le funzionalità di *Revit* per poter capire se queste ultime sono utilizzabili solo nel caso di elementi topografici semplici o anche in casi, come questo, in cui il terreno non è piano ma assomiglia a una collinetta, motivo per cui i piani su cui sorgono le tre cappelle non si trovano alla stessa quota.

Come primo *step* per la realizzazione del terreno è stata importata, così come per gli altri elementi che costituiscono il complesso, la nuvola di punti dell'area limitrofa alle tre cappelle, ripulita da tutti quei "disturbi" che ne deturpano la lettura del modello in sé e che appesantiscono il file inutilmente, ovvero dando informazioni di cui non si necessita nella consultazione.

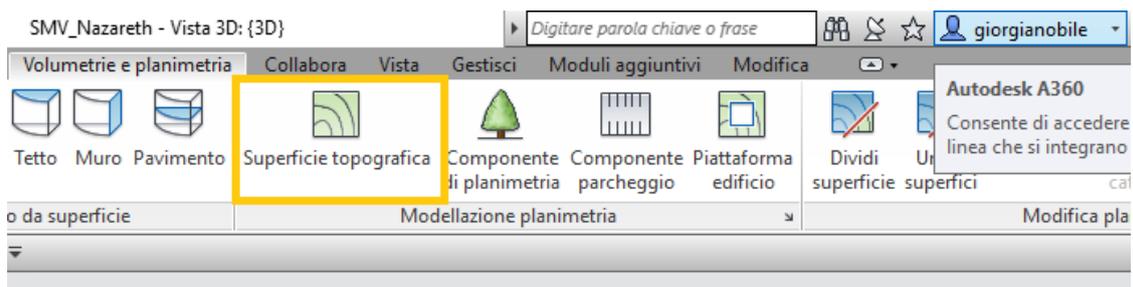


Figura 97 - Comando Superficie Topografica

Successivamente con il comando *Superficie Topografica* [Figura 97], nella sezione *Volumetrie e Planimetria*, scegliendo *Inserisci Punto* tra le diverse modalità di creazione della superficie topografica sono stati inseriti tutti quei punti che definiscono le curve di livello, seguendo l'andamento rappresentato dalla nuvola di punti del suolo, cercando di effettuare una rappresentazione fedele del terreno.

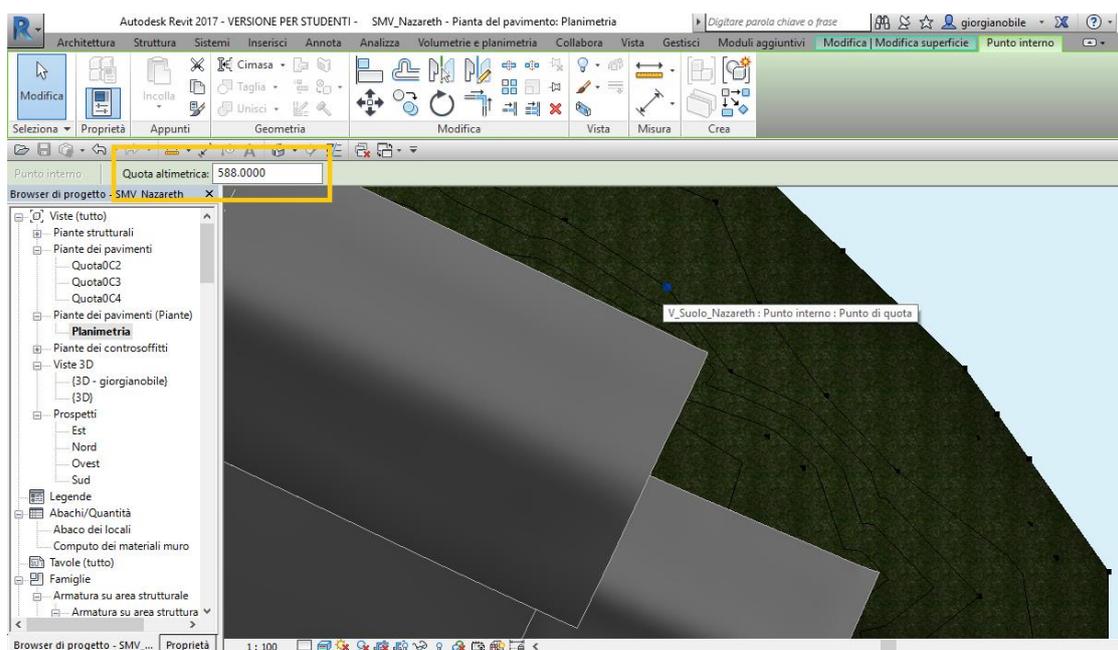


Figura 98 - Inserimento quota altimetrica punti superficie topografica

Infatti, tramite questo comando, è possibile specificare punto per punto la quota altimetrica del terreno [Figura 98] fornita dalla nuvola di punti.

Questo procedimento non è molto veloce, in quanto consiste in un inserimento manuale di ciascuna quota dei punti delle curve di livello e quindi procedere con il software *EnviLidar* dal punto della rapidità probabilmente converrebbe in quanto effettua un riconoscimento automatico delle altezze della superficie topografica, senza il bisogno di recuperarle dalla nuvola dei punti manualmente.

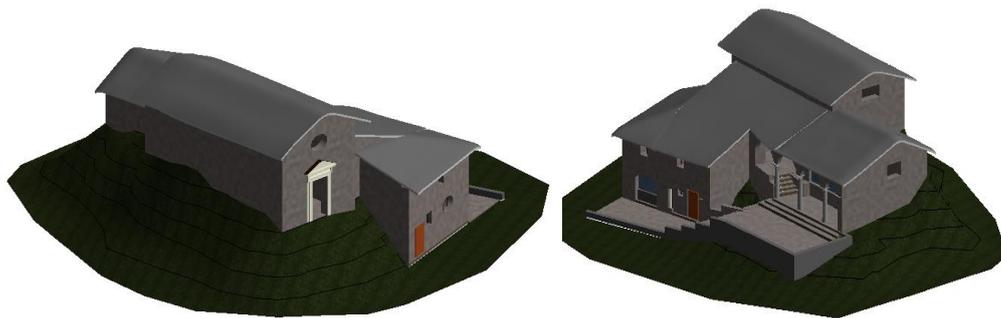


Figura 99 - Suolo creato su *Revit* da due diverse prospettive

Tuttavia la restituzione ottenuta tramite questo approccio manuale [Figura 99] sembra piuttosto fedele all'andamento reale del terreno e non molto distante dal risultato che si otterrebbe mediante il software automatizzato, quindi nel caso in cui non si disponesse di *EnviLidar*, per esempio perché non vi è una “free trial” disponibile sul web, *Revit* potrebbe rappresentare una valida alternativa.

6.6 I LOD

I *Level of Development* definiscono la misura della sicurezza e dell'affidabilità delle informazioni, raccolte e inserite nelle varie fasi di elaborazione e destinate ai diversi team di progetto. Infatti, la metodologia *BIM* prevede tra i principi fondamentali della propria tecnica operativa l'accurata gestione dell'informazione e l'utilizzo dei *LOD* favorisce proprio lo scambio delle informazioni tra le diverse società interessate alla gestione e alla realizzazione di un progetto e la specifica tecnica suddivide i livelli di sviluppo secondo le fasi operative in cui il progetto si trova. Questa suddivisione però è valida per gli edifici di nuova costruzione.

Nell'elaborazione degli edifici del Sacro Monte di Varallo è presa in considerazione una scala di sviluppo per costruzioni di tipo esistente:

- LOD 0: il livello corrisponde alla fase di rilievo, il quale può essere condotto con diverse tecniche, dalla tradizionale celerimensura alle moderne tecniche di aerofotogrammetria da UAV e *laser scanner*;
- LOD 1: il livello di dettaglio contiene la modellazione della topografia. Il modello può derivare da una nuvola di punti oppure dalle curve di livello;
- LOD 2: il livello prevede gli edifici individuati da semplici masse, mentre non interessa la geometria delle coperture;
- LOD 3: il livello include gli edifici rappresentati da masse e l'indicazione, anche con semplici superfici, della geometria delle coperture;
- LOD 4: il livello prevede l'edificio modellato nel dettaglio. Tutti gli elementi del modello sono noti per quantità, forma, dimensioni, posizione e orientamento;
- LOD 5: il livello prevede l'associazione di informazioni al modello, come ad esempio la realizzazione di un *database*.



Figura 103 - LOD 0



Figura 102 - LOD 1

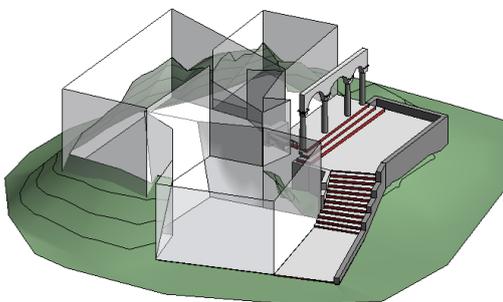


Figura 101 - LOD 2

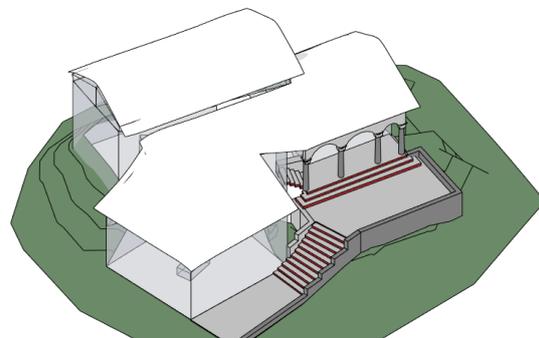


Figura 100 - LOD 3



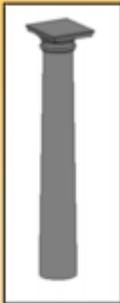
Figura 105 - LOD 04



Figura 104 - LOD 05

I risultati ottenuti hanno consentito di determinare l'affidabilità delle informazioni raccolte e di inserirle nelle varie fasi di elaborazione.

Colonna



Dati

Nome complesso: _____

Edificio: _____

Cappella: _____

Id elemento: _____

Disciplina

Architettonico:

MEP:

Generico:

...

Metodologia di Costruzione

Standard

Pilastro

Fam. Pilastro Metrico

Fam. Modello gen. met.

Fam.

Nuvola di punti

Point Sense

Rhinoceros

Altro

.....

Criticità riscontrate

Il fusto e il capitello della colonna nella realtà non sono perfettamente integri motivo per cui la restituzione grafica non può essere del tutto fedele alla realtà

Informazione		Risultati		LOD HBIM	
Grafica	<input type="checkbox"/>	La colonna è stata realizzata secondo il suo stile senza tener conto delle parti erose dovute	LOD 0	<input type="checkbox"/>	LOD 3 <input type="checkbox"/>
Strutturale	<input type="checkbox"/>		LOD 1	<input type="checkbox"/>	LOD 4 <input type="checkbox"/>
Materiale	<input type="checkbox"/>		LOD 2	<input type="checkbox"/>	LOD 5 <input type="checkbox"/>
Degrado	<input type="checkbox"/>				
Storica	<input type="checkbox"/>				
Altro.....	<input type="checkbox"/>				

Figura 106 - LOD

In *Figura 106* è illustrata una scheda consultativa e compilativa per la definizione dei livelli di dettaglio (*LOD-Level of Detail*), che fa invece riferimento alla precisione grafica di ogni singolo componente architettonico. I livelli di dettaglio sono relativi al numero di informazioni negli elaborati di progetto.

VII. Riconoscimento del degrado

7.1 La procedura seguita

Per avere una conoscenza più approfondita circa i materiali utilizzati per la realizzazione delle cappelle oggetto di studio e i relativi fenomeni di degrado, il giorno 15 maggio è stato effettuato un ulteriore sopralluogo, che ha permesso di effettuare un riconoscimento in situ di alcune patologie. Infatti, il fine ultimo di questa tesi è la realizzazione di un *database* in cui sono inseriti i diversi generi di problemi, le possibili cause e/o concause e le eventuali soluzioni, in modo tale che questo sia consultato e anche implementato in futuro per avere sotto controllo costantemente le condizioni delle tre cappelle in questione.

In sostanza, durante questo sopralluogo, è stata prestata maggiore attenzione ai materiali rispetto alle visite precedenti, che avevano come scopo il rilievo per la realizzazione della nuvola dei punti utile per effettuare la modellazione tridimensione in *Revit*.

Infatti, si è proceduto a un'osservazione più attenta sulle singole facciate e su alcuni elementi strutturali che compongono il complesso, cercando di individuare le forme visibili di degrado e poi successivamente di valutare le soluzioni praticabili.

In sostanza i passaggi effettuati in loco sono stati:

- Individuazione dei materiali di cui sono composti gli elementi architettonici e stato conservativo in cui si trovano attualmente;
- Individuazione fenomeni di degrado;
- Documentazione fotografica che servirà da supporto nello studio successivo dei fenomeni di degrado e che sarà inserita nel *database*.

I passaggi effettuati in un momento successivo al sopralluogo sono stati:

- Ricerca di possibili forme di degrado che possono subire i materiali di cui sono composti i diversi elementi architettonici;
- Selezione di quelli che potrebbero rientrare nel caso specifico;
- Confronto fra le forme di degrado trovate in letterature e quelle riscontrate in loco;
- Ricerca di soluzioni plausibili alle forme di degrado riscontrate.

7.2 Il Portale della cappella due

Durante questo studio dei materiali, maggiore attenzione è stata prestata al portale presente sulla facciata della cappella due [Figura 107], motivo per cui è stata effettuata una ricerca che restituisse informazioni precise sulla tipologia di materiale lapideo e relative caratteristiche.



*Figura 107 - Portale Cappella 2
(Foto di G. Nobile)*

Sul sito ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) è fornita la documentazione relativa alla carta geologica d'Italia [Figura 108], sulla quale sono riportate le diverse tipologie di rocce presenti sulla superficie terrestre rappresentate da colori convenzionali.



Figura 108 - Carta Geologica Italiana
 (Fonte: <http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione/milione5ed/milione.htm>)

Nel nostro caso è stato preso in considerazione il foglio numero 30 [Figura 109] di questa documentazione, che restituisce appunto un quadro generale di Varallo.



Figura 109 - Carta Geologica Varallo
 (Fonte: http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/tavoletta.php?foglio=30)

Avendo la documentazione relativa alle rocce presenti nella zona di Varallo e sapendo che, nello specifico, il materiale utilizzato per la costruzione di queste tre cappelle del

Sacro Monte veniva recuperato da Rocca Pietra¹², è stato possibile risalire al materiale utilizzato per la realizzazione del portale.

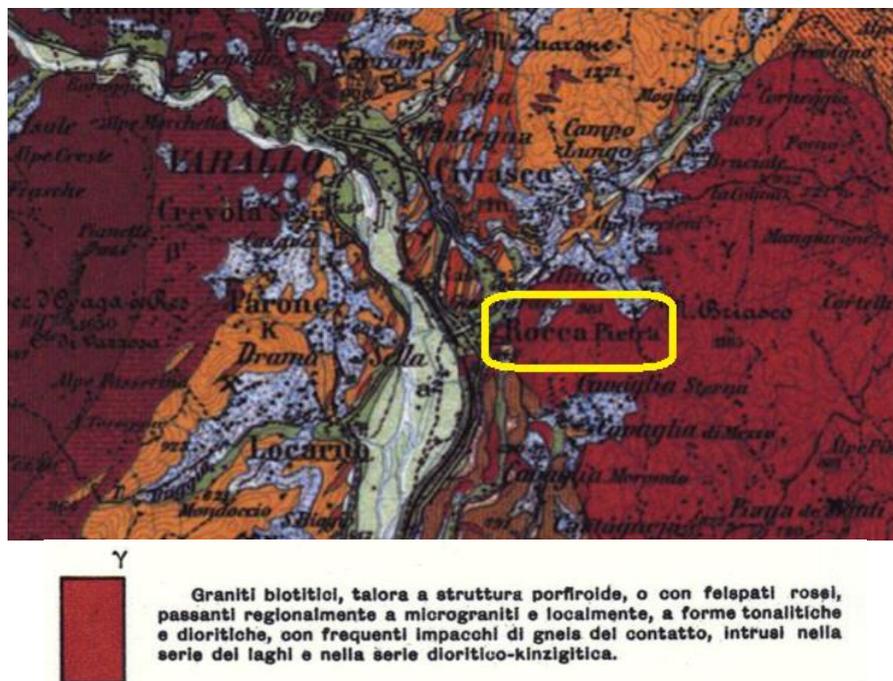


Figura 110 - Sopra zoom su località Rocca Pietra. Sotto legenda relativa alla zona (Fonte: http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/tavoletta.php?foglio=30)

Si tratta quindi di *granito biotitico*, ovvero una roccia silicatica di genesi magmatica intrusiva largamente utilizzata nelle costruzioni, come il marmo.

GENESI	COMPOSIZIONE			
		SILICATICHE		CARBONATICHE
		SIALICHE	FEMICHE	
MAGMATICHE	INTRUSIVE	GRANITO	SIENITE DIORITE	PERIDOTITE
	FILONIANE		PORFIDO	GABBRO
	EFFUSIVE		TRACHITE	BASALTO
METAMORFICHE	ORTO	GNEISS		SERPENTINITE
	PARA	QUARZITE		MARMO
SEDIMENTARIE	CLASTICHE	ARENARIA CONGLOMERATO	OFICALCE	
	CHIMICHE			TRAVERTINO ALABASTRO
	ORGANOGENE			LUMACHELLA AMMONITICO

Figura 111 - Rocce utilizzate come marmi (Fonte: www.archeologiametodologie.com)

¹² Rocca Pietra è una località in provincia di Varallo famosa per le sue cave di granito e marmo verde di Cilimo. Quest'ultimo è stato ampiamente utilizzato al Sacro Monte di Varallo per le decorazioni di maggior pregio, come per esempio negli interni della Basilica.

Il granito ha una struttura granulare con grana da media a grossa. Il colore è variabile, dal bianco al rosa al rosso, con punteggiatura nera dovuto appunto al minerale di cui è costituito, la biotite.

7.2.1 Classificazione dei fenomeni di degrado

I fenomeni di alterazione che interessano i materiali lapidei possono essere classificati a seconda dell'azione che essi esercitano sul materiale lapideo:

1. Senza peggioramento delle condizioni: Alterazione cromatica, Macchia, Patina, per esempio;
2. Perdita di materiale della superficie: Erosione, Pitting, Alveolizzazione, per esempio;
3. Perdita della morfologia del manufatto: Disgregazione, Polverizzazione, Esfoliazione, Scagliatura, Distacco, Mancanza, Lacuna, per esempio;
4. Deposizione e formazione di prodotti secondari: Deposito Superficiale, Crosta Nera, Efflorescenza, Pellicola, Patina biologica, per esempio;
5. Riduzione della resistenza meccanica: Deformazione, Rigonfiamento, Fratturazione, per esempio;
6. Colonizzazione Biologica.

Da una prima analisi sul portale si evince la presenza di buona parte dei fenomeni sopra riportati, in particolare: alterazione cromatica, erosione, mancanza e lacuna, patina biologica e colonizzazione biologica.

- **Alterazione cromatica e Macchie:**

Il cambiamento di colore di substrati lapidei naturali è dettato dall'escrezione di pigmenti e melanine da parte di microrganismi, così come le macchie sono il risultato di prodotti di degrado delle clorofille e di altri pigmenti.



*Figura 112 - Alterazione cromatica
(Foto di G. Nobile)*

I pigmenti contenenti metalli possono cambiare colore dopo una reazione di ossidazione. Sono riconoscibili colorazioni verdi, nere, gialle, arancio, rosa e rosse. La foto sopra riportata [Figura 112], scattata in data 15 Maggio, ritrae una porzione del portale, dalla quale si evince una alterazione cromatica, prevalentemente di tonalità arancio, dovuta agli ossidi di ferro presenti nel materiale lapideo, che ne alterano appunto le caratteristiche cromatiche. Si parla di alterazione cromatica perché è dovuta ai componenti di cui consta la materia del portale stesso.

Lo stesso fenomeno ha avuto luogo sulla colonna presente sulla facciata della cappella numero quattro [Figura 113].

Si tratta di un elemento non monolitico costituito dello stesso materiale lapideo del portale e soggetto anch'esso a alterazione cromatica dovuta all'ossidazione di metalli presenti nel materiale di cui è composto.



*Figura 113 - Colonna cappella 4
(Foto di G. Nobile)*

Infatti questi fenomeni, sia l'alterazione cromatica sia le macchie, hanno interessato, non solo il portale, ma anche buona parte di elementi architettonici e delle facciate delle cappelle.

Nella fotografia di seguito riportata [Figura 114], è stato fatto uno *zoom* su una macchia presente sulla facciata della cappella numero due, alla sinistra del portale. Ha una tonalità verde-azzurra e è dovuta alla dissoluzione del rame di cui è composto l'elemento di protezione della tettoia del portale.

Infatti la pioggia attecchisce sull'elemento di lattoneria, provocando la colatura del rame rilasciato, che a sua volta finisce sulla superficie del maschio.



*Figura 114 - Macchia azzurra
Foto di G. Nobile*

Il rilascio del rame dipende dall'acidità e dalla quantità di pioggia che interessa la protezione dell'elemento superiore del portale. Dopo un periodo di tempo quest'ultima lascia delle tracce che assumono il colore rappresentato in foto, dato dai sali di rame persi, motivo per cui si tratta di macchia sulla parete e non di alterazione cromatica della parete, in quanto non è funzione dei componenti che costituiscono il muro. Infatti sempre sulla stessa facciata, ma dalla parte destra del portale si riscontra la stessa tipologia di macchia derivante sempre dallo stesso meccanismo di degrado.

- **Patina**

La patina può essere definita come un'alterazione strettamente limitata a quelle modificazioni naturali della superficie dei materiali non collegabili a manifesti fenomeni di degradazione e percepibili come una variazione del colore originario del materiale. Può essere vista come documentazione di autenticità dell'opera, in quanto la materia di cui è costituita l'opera, nel caso specifico il portale, non ha le stesse identiche connotazioni di quando è stato realizzato, ma assume un carattere storico, motivo per cui la patina deve essere rispettata. A meno che quest'ultima non si configuri come una patina artificiale, ovvero un'alterazione indotta artificialmente dall'operato dell'uomo.

Nel caso del portale, ma anche nella valutazione di tutti gli altri elementi che compongono le cappelle oggetto di studio, si sono riscontrate solo patine naturali, che testimoniano l'autenticità dell'opera.

- **Patina biologica**

Il fenomeno di degrado presente sul cornicione del portale [*Figura 115*], in prima battuta è stato interpretato erroneamente come crosta nera.



Figura 115 - Patina Biologica
Foto di G. Nobile

Infatti quest'ultima è uno strato superficiale di alterazione del materiale lapideo, di spessore variabile. È dura e fragile, distinguibile dalle parti sottostanti per le

caratteristiche morfologiche e per il colore. Può distaccarsi, anche spontaneamente, dal substrato che, in genere è degradato e polverulento. Dal punto di vista morfologico è un deposito di colore scuro, aderente al supporto che ricopre il substrato in modo omogeneo.

Può assumere anche la consistenza di incrostazioni di forma irregolare, compatta e ancorata al substrato. Si trovano come depositi di piccolo spessore sulle superfici verticali non sottoposte al dilavamento e in forma di spesse incrostazioni nelle zone protette dalla pioggia, come cornici e mensole.

I motivi appena descritti hanno fatto dedurre che si potesse trattare di crosta nera, ma basandosi sui risultati delle analisi delle croste effettuate al SEM¹³, che hanno evidenziato la composizione di tali incrostazioni, questa possibilità è stata esclusa. Esse infatti sono costituite principalmente da gesso e da particolato, che in una zona come il Sacro Monte di Varallo è difficile trovare, in quanto immerso nel *verde* e lontano da fonti di *smog*.

Si è giunti quindi alla conclusione che si tratti di patina biologica, anch'essa costituita da uno strato superficiale di spessore e colore variabile, ma costituita da microrganismi a cui possono aderire polvere, terriccio, ecc.

- **Erosione**

Sul portale si manifestano grandi porzioni in cui il materiale lapideo ha subito un'erosione. Quest'ultima è imputabile al fenomeno di risalita capillare e dilavamento.

Infatti l'acqua di risalita capillare trasportata dal portale presenta elevate concentrazioni di ioni di varia natura, provenienti in prevalenza dalle acque del terreno assorbite. Ulteriori apporti ionici sono dovuti a dissoluzione dei materiali costituenti il portale a opera delle acque. L'evaporazione, alla superficie del portale e all'interno dei pori, provoca la cristallizzazione di sali solubili. A seguito dell'evaporazione, nuova acqua ricca di ioni è richiamata dal terreno nella parte bassa del portale, mentre nuovi sali cristallizzano più in alto nelle zone di evaporazione.¹⁴

A tali sollecitazioni possono sommarsi quelle provocate dai cicli di gelo e disgelo.

¹³ Microscopio elettronico a scansioni

¹⁴ SCARZELLA, Paolo, ZERBINATTI, Marco, *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea Editrice, Firenze, 2009, pag. 61



Figura 116 - Risalita capillare
Foto di G. Nobile

Inoltre, i pigmenti originati dalle terre sono fra i più suscettibili all'attacco biologico. Sono molti i microrganismi responsabili di alterazioni come macchie marroni, patine violacee e efflorescenze biancastre. Si identificano diverse tipologie di funghi, batteri e alghe verdi.

Il fenomeno di erosione dovuta a risalita capillare si manifesta in molte zone del complesso oggetto di studio, infatti questo degrado è stato abbondantemente descritto nel *database* creato ai fini della manutenzione programmata del portale e degli altri elementi architettonici che compongono il complesso di Nazareth.

Oltre alla risalita capillare, un fenomeno che induce a questo tipo di degrado, l'erosione, è il dilavamento.



*Figura 117 - Muro cappella 3
Foto di G. Nobile*

Nella foto sopra riportata, in cui è rappresentato una parte di muratura che confina la cappella numero tre, si evince, così come al portale, un'erosione dovuta al fenomeno di risalita capillare fino a una certa altezza, l'altezza di risalita capillare per l'appunto, e una parte di erosione dovuta al dilavamento, in quanto questa parte di muratura non è protetta dagli agenti atmosferici come la pioggia.

7.2.2 Operazioni di recupero

Dopo aver completato la serie di indagini e avere individuato il quadro patologico generale, il recupero del portale necessita di un intervento conservativo teso a rallentare il deterioramento in corso.

Gli interventi di manutenzione, sia straordinaria che ordinaria, consistono in una serie di operazioni quali: pulitura, consolidamento e protezione.

Tali operazioni, non sono sempre tutte necessarie e non devono produrre effetti dannosi sulle zone circostanti la parte di manufatto da recuperare, quindi, la scelta del materiale e del metodo da impiegare, deve essere effettuata sulla base di opportune verifiche condotte in laboratorio.

- **Pulitura**

L'intervento di pulitura ha esclusivamente lo scopo di eliminare le sole patologie che risultano essere in grado di generare ulteriori degradi, senza preoccuparsi quindi, di migliorare e modificare l'aspetto estetico e cromatico dell'opera, in quanto quest'ultimo, seppur imperfetto, assume importanza grazie alla sua storicità.

La pulitura presenta problemi tecnici da affrontare con estrema cautela, in quanto consiste in una serie di operazioni che tendono a rimuovere dalla superficie del manufatto quelle sostanze estranee, patogene e generatrici di degrado, tramite azioni meccaniche e/o chimiche che comportano un certo margine di rischio per la superficie stessa. Per questi motivi qualsiasi tecnica adottata deve essere impiegata con diversa gradualità e intensità in funzione del tipo di sostanza che si vuole asportare, della natura dell'elemento lapideo e, soprattutto, dello stato di conservazione dell'oggetto da pulire. Buona parte dei sistemi di pulitura, infatti, danno origine a una azione comunque lesiva nei confronti dei materiali, azione che va, in qualche modo, a intaccare l'integrità dell'opera. Alla luce di quanto detto, si intuisce come non è possibile alcuna generalizzazione del problema di pulizia. L'unica cosa certa è avviare l'operazione gradualmente avendo l'accortezza di fermarsi poco prima del giusto.

Al fine di operare una corretta scelta del sistema di pulizia più idoneo per ogni singolo caso occorre seguire alcuni criteri:

- la rilevanza storica, artistica e culturale del manufatto;
- la natura petrografica;
- la natura della patologia da eliminare;

- la forma e la configurazione della superficie trattare.

Tra i vari metodi di pulitura, quelli che potrebbero essere utilizzati per l'opera in questione sono:

1. Acqua nebulizzata:

un getto d'acqua nebulizzato a temperatura ambiente raggiunge la superficie da pulire per ricaduta in modo da evitare effetti meccanici da parte delle gocce d'acqua. Tale metodo è comunque sconsigliato nel caso di pulizia di materiali molto porosi o quando vi sia pericolo di migrazione di sali solubili o di formazione di macchie.

2. Impacchi acquosi con materiali assorbenti:

Con questo metodo la superficie da pulire è a contatto diretto con una soluzione solvente e per un tempo sufficiente a ammorbidire sciogliere i depositi superficiali raggiungendo un soddisfacente grado di pulizia senza intaccare l'integrità del paramento.

I componenti solidi dell'impacco possono essere:

- argille assorbenti: utile per l'estrazione di sali;
- polpa di carta priva di sali solubili: per la rimozione di scialbature preesistenti;
- ovatta di cotone.

Mentre i metodi che probabilmente non rappresentano una scelta opportuna sono:

1. Metodi meccanici e chimici:

Sono adoperati solo su superfici compatte e che non hanno una importante rilevanza storica. Ne fanno parte:

- microsabbature di precisione;
- microsmerigliatura con trapani dentistici;
- pulitura a bisturi;
- resine scambiatrici di ioni;
- soluzioni acquose a azione solvente e/o complessate;
- pulitura laser.

2. Sistemi di pulizia pratici e veloci:

Sono utilizzati se la superficie da pulire è molto estesa e non ha alcun interesse storico artistico al fine di velocizzare i tempi di lavoro e conseguentemente abbattere gli alti costi.

Le tecniche utilizzate sono:

- acqua a pioggia a pressione di acquedotto;
- acqua a spruzzo a bassa pressione (2,5-3 atmosfere);
- seguita da applicazione di getti di vapore saturo;

- idrosabbie o sabbie a bassa pressione (massimo 5 atmosfere) con polveri a granulometria inferiore ai 0,15 mm e di durezza confrontabile con quella dei minerali costituenti il materiale lapideo da pulire.

Nel caso in cui il materiale da pulire risulti in uno stato avanzato di deterioramento, prima della pulizia è necessario un pre-consolidamento, in modo che nella pulizia stessa non si asporti parte di materiale scarsamente coeso.

- **Consolidamento**

Per trattamento consolidante si intende l'applicazione di prodotti capaci di penetrare in profondità migliorando la coesione del materiale degradato e l'adesione fra questo e il substrato sano. I consolidanti, sia organici che inorganici, devono penetrare all'interno del

- Compatibilità chimica con il substrato in modo da non provocare la formazione di sottoprodotti dannosi;
- Compatibilità fisica come materiale inorganico;
- Assorbimento uniforme da parte del materiale sottoposto a trattamento;
- Non ridurre la permeabilità al vapor d'acqua, in modo da permettere all'eventuale acqua presente nel materiale di evaporare;
- Stabilità chimica e termica in modo evitare fenomeni di alterazione cromatica della superficie trattata.

La scelta del consolidamento deve essere ritenuta percorribile solo laddove lo stato di degrado è così avanzato da pregiudicare la durata e la stabilità dell'opera.

Le modalità di impiego del consolidante sono diverse:

- applicazione a spruzzo
- applicazione a impacco
- applicazione a percolazione
- applicazione a pennello.

I consolidanti più utilizzati per il recupero dei materiali sono:

- Silicati di etile (estere etilico dell'acido silicico);
- alchil-alcossi-silani;
- alchil-aril-polisilossani;
- Resine acriliche;
- Miscele di resine acriliche e siliconiche.

- **Protezione**

I protettivi hanno unicamente lo scopo di rallentare i processi di deterioramento. L'applicazione di protettivi chimici sulla superficie alterata si rende necessaria ogni qual volta siano individuati, come fattori che generano il degrado, agenti esterni alla superficie stessa, come inquinanti atmosferici e condensazione di umidità.

I protettivi devono avere le seguenti caratteristiche:

- Inerzia chimica nei riguardi del materiale lapideo;
- Assenza di sottoprodotti dannosi;
- Stabilità chimica ai raggi ultravioletti;
- Idrorepellenza;
- Buona permeabilità al vapore acqueo;
- Minima influenza sull'aspetto cromatico del supporto.

Come per i consolidanti, anche nel caso dei protettivi non è possibile stabilire quale prodotto sia il migliore in assoluto, quelli più utilizzati sono:

- resine acriliche;
- resinose siliconiche;
- miscele di resine acriliche e siliconiche;
- cere microcristalline.

Il restauro quindi varia a seconda del monumento o dell'opera d'arte in oggetto, a seconda delle condizioni in cui si trova e delle aggressioni che ha subito. Se l'aggressione è principalmente dovuta a agenti fisici, e in particolare a azioni della acqua, si ricorre normalmente al trattamento con sostanze idrorepellenti che diminuiscono la porosità e quindi tutti fenomeni collegati all'imbibizione.

Per quel che riguarda l'eliminazione delle patine biologiche il procedimento di restauro varia da materiale a materiale. Se il manufatto è in cattive condizioni e si prevede un successivo consolidamento con resine e sostanze idrorepellenti, si possono usare sostanze biocide forti come l'acqua ossigenata o aldeide formica; se invece il manufatto è in buono stato di conservazione e non si prevede nessun altro intervento, normalmente si usano biocidi più blandi tipo detergenti cationici quaternari, sali di boro, solfiti, ecc. Per rimuovere alcune alghe molto consistenti, dopo l'asportazione meccanica, si lava con una miscela di acqua, alcol etilico.

7.3 Altri elementi architettonici

Oltre al portale, è stato fatto un riconoscimento dei degradi presenti anche sugli altri elementi architettonici delle cappelle, in particolare sulle parti di muratura e sugli elementi lapidei. Consultando il *database* creato e integrato con documentazione fotografica del fenomeno riconosciuto in loco, è possibile essere a conoscenza di tutte le tipologie di degrado che si è riusciti a individuare. Sono state inoltre inserite le cause che hanno generato il degrado, senza le quali non sarebbe possibile risalire alla soluzione, anch'essa inserita nel *database* a eccezione di quelle che riguardano la parte strutturale.



*Figura 118 - Cantonal incrociati
Foto di G. Nobile*

Per esempio, nel *database* non saranno citate le plausibili soluzioni a alcuni dei degradi presenti nel vano superiore della cappella numero quattro.

Dalle foto si evince la presenza di:

- una disgregazione dei cantonal incrociati che provocano una diminuzione della capacità portante del maschio murario [Figura 118];
- Un puntone vecchio, ovvero non facente parte dei puntoni di sostituzione, che non sorregge i correnti, ma al contrario grava su di loro in quanto è stato chiodato a loro e deve essere quindi considerato come un carico aggiuntivo [Figura 119];



*Figura 119 - Puntone che non sorregge i correnti
Foto di G. Nobile*

- un puntone [Figura 120] che grava direttamente su un telaio in legno avente delle dimensioni probabilmente insufficienti per poter sorreggere il peso;

Come anticipato, di questi fenomeni sopra citati, così come di altri simili, che rientrano in quel tipo di degrado per il quale la soluzione deve essere ricercata attraverso uno studio strutturale, non si farà cenno sul *database* in quanto sarà oggetto di studio della tesi svolta da Andrea Ursini.

Per il resto dei fenomeni di degrado, anche quelli non descritti nel testo di questa tesi, vi è una soluzione descritta mediante il *database*.



*Figura 120 - Puntone che grava su un telaio in legno
Foto di G. Nobile*

7.4 Lessico del degrado – NorMaL 1/88

La rappresentazione dei fenomeni di degrado effettuata in ambiente *BIM* [Cap. VIII pag.123] può essere definita come una mappatura qualitativa, utile all’associazione tra i parametri di progetto e il *database*.

Affinché si possa effettuare una corretta lettura dei problemi presenti però, è necessario affidarsi alle Raccomandazioni NorMaL (*Normativa Materiali Lapidèi*), secondo le quali esiste una retinatura specifica per ogni tipologia di degrado presente sul materiale lapideo.

“[...] Con il termine materiale lapideo vengono sempre intesi oltre che i marmi e le pietre propriamente detti, anche gli stucchi, le malte, gli intonaci ed i prodotti ceramici impiegati in architettura (laterizi e cotti). [...]”¹⁵

Per questo motivo, le retinature [Figura 121] sono state utilizzate non solo per i materiali lapidei presenti sulle facciate, il portale della cappella due per esempio, ma anche per gli altri elementi architettonici.

Alterazione cromatica. Alterazione che si manifesta attraverso la variazione di uno o più parametri che definiscono il colore: tinta (*hue*), chiarezza (*value*), saturazione (*chroma*). Può manifestarsi con morfologie diverse a seconda delle condizioni e può riferirsi a zone ampie o localizzate.

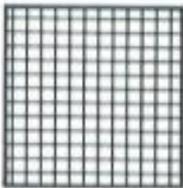


Figura 121 - Estratto NorMaL - 1/88

La mappatura effettuata mediante il metodo appena descritto è stata effettuata sui prospetti importati in ambiente *CAD*, e non direttamente sul modello tridimensionale in ambiente *BIM*, per una più pratica creazione e gestione dei *retini*, infatti alcuni di essi erano già presenti nel *database AutoCAD* mentre altri sono stati creati con le funzionalità presenti nel programma.

¹⁵ Raccomandazioni NorMaL - 1/88, *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*, CNR-ICR, 1990, Roma, pag. 2

Fenomeni di degrado presenti sul portale

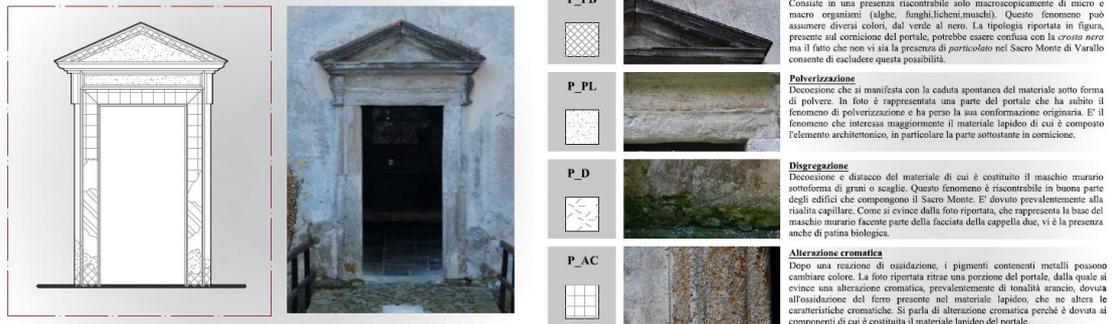


Figura 122 - Estratto dalla tavola del lessico dei degradi

Oltre ai prospetti in scala 1:100, la rappresentazione dei fenomeni di degrado mediante l'utilizzo dei retini è stata effettuata anche sulla riproduzione del portale in scala 1:50 [Figura 122], affinché la suddivisione fosse ben visibile.

VIII. Il *database*

8.1 La manutenzione programmata

L'attività di ricerca iniziata da alcuni anni al Sacro Monte di Varallo ha come obiettivo la realizzazione di uno strumento tecnologico, il *database*, atto a fornire un contributo per l'attuale piano di manutenzione programmata.

Dal punto di vista organizzativo, ma anche da quello operativo, le attività di manutenzione, se attuate secondo adeguate strategie, sono in grado di massimizzare i risultati in termini di conservazione, fruizione e valorizzazione del costruito in relazione ai diversi casi applicativi.

Il termine manutenzione si utilizza per indicare attività costanti e tempestive da intendersi come alternative al restauro, o quanto meno come attività dirette a allontanare nel tempo un intervento di restauro, certamente più invasivo. Questo tipo di attività può essere classificato in due categorie:

1. Manutenzione ordinaria: interventi mirati a tutti quegli elementi che hanno la necessità di un'attenzione quotidiana (riparazione di coperture, grondaie, ecc.);
2. Manutenzione straordinaria: interventi mirati a ristabilire (rifacimento della finitura di una muratura) o a riparare gravi danni (coperture) che avvengono con cadenza periodica.

Dal punto di vista legislativo, a partire dal Codice per i Beni Culturali e il paesaggio (art. 29, D.Lgs. N.42/2004), si fa una classificazione di operazioni che mirano alla salvaguardia dell'edilizia storica:

- La conservazione del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro;
- Per prevenzione si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto;
- Per manutenzione si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento

dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti.

Una mancata manutenzione periodica del bene e dei suoi componenti comporta la generazione di maggiori costi di intervento e altrettanti ulteriori extra costi indotti.

Il programma di manutenzione deve quindi articolarsi con attenzioni e finalità diverse, con una cadenza temporale che sia in grado di prevenire l'insorgere di patologie o rischi che a lungo termine potrebbero incidere sullo stato del bene.

8.2 Gestione del database

Questa tesi si pone come obiettivo la realizzazione di un *database* che mira a raccogliere tutti quei dati, consultabili periodicamente ai fini manutentivi, che restituiscono informazioni circa i degradi riconosciuti in loco, l'analisi delle cause e la scelta delle possibili soluzioni.

Queste informazioni sono state assegnate direttamente su Revit, in cui è stata creata una mappatura del degrado e a ogni porzione corrispondono dei parametri condivisi.

8.2.1 Creazione dei parametri condivisi

I parametri condivisi possono essere considerati come contenitori di informazioni per famiglie e progetti e in questo caso sono serviti per la correlazione tra modello e tabelle di *Access*.

La realizzazione dei parametri si esegue mediante il comando ***Crea Parametri Condivisi*** [Figura 123] che si trova nella sezione ***Gestisci***.

In particolare sono stati creati otto parametri condivisi:

- *id_complesso*: è un parametro di testo e rappresenta un codice che indica il nome del complesso, in questo caso SMV (*Sacro Monte di Varallo*);
- *id_edificio*: è un parametro di testo e indica il nome dell'insieme delle tre cappelle, in questo caso *Nazareth* e, così come il precedente parametro descritto, nel *database* creato in questa tesi, sarà uguale per tutti gli elementi;
- *nome_attività*: è un parametro di testo e rappresenta il nome generico del lavoro che sarà svolto, per esempio se occorre fare una pulitura il titolo di questa attività sarà *Manutenzione Straordinaria* perché la pulitura rientra nelle attività di manutenzione straordinaria;
- *nome_cappella*: è un parametro di testo e si distingue in funzione dell'appartenenza dell'elemento architettonico di cui si sta svolgendo il restauro;

- *num_cappella*: è un parametro numerico e indica, appunto, il numero della tabella;
- *elemento_architettonico*: è un parametro di testo e indica l'elemento sul quale è presente il degrado;
- *id_causa*: è un parametro di testo e indica il codice per descrivere la causa che ha determinato il degrado presente sull'elemento architettonico, per esempio C_RC sta per *causa risalita capillare*;
- *id_soluzione*: è un parametro di testo e indica il codice per descrivere la soluzione adatta al degrado presente sull'elemento architettonico, per esempio S_PAN sta per *pulitura con acqua nebulizzata*;
- *id_degrado*: è un parametro di testo e indica il codice per descrivere il degrado presente sull'elemento architettonico, per esempio D_AC sta per *alterazione cromatica*;
- *foto_problema*: è un allegato e rappresenta la documentazione fotografica creata durante il sopralluogo;
- *id_masse*: è un parametro numerico e indica il numero di una delle tre masse create a cui sono collegati gli altri parametri.

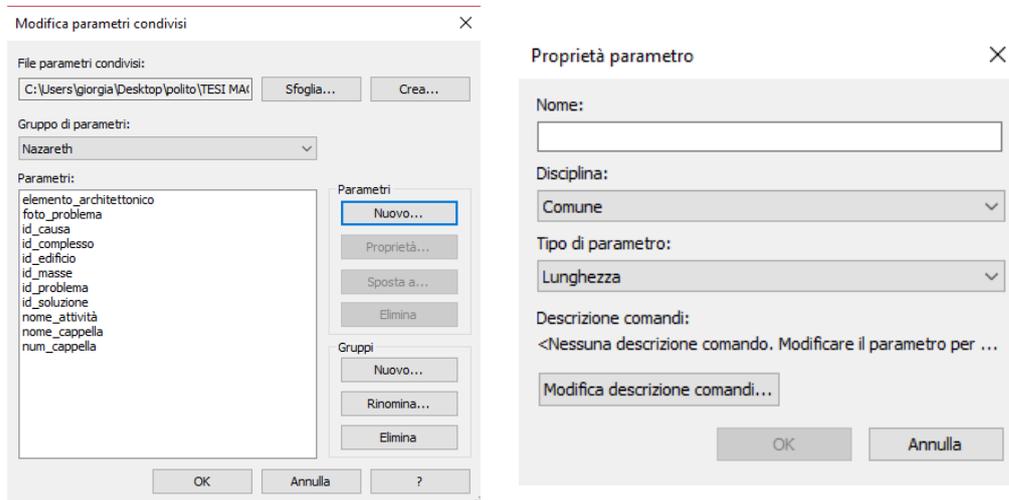


Figura 123 - Crea parametri condivisi

I primi tre parametri (*id_complesso*, *id_edificio*, *id_attività*) avranno lo stesso titolo per tutti gli elementi e servono nel momento in cui avviene l'unione del *database* creato in questa tesi con gli altri *database*. I due parametri successivi (*num_cappella*,

nome_cappella) potranno avere tre diverse denominazioni a coppie rispettivamente: 2 Annunciazione, 3 Visitazione, 4 PrimoSognoGiuseppe.

Per i parametri relativi al degrado, le cause e le soluzioni, trattandosi di codici sono state create delle ulteriori tabelle su *Access*, collegate alla tabella dei *Modelli Generici*, nelle quali è descritto il significato di ogni codice per una più facile comprensione durante la consultazione.

8.2.2 Creazione dei parametri di progetto

I parametri condivisi sono stati messi in relazione ai parametri di progetto [Figura 124] in modo tale che fossero visibili nella finestra delle Proprietà durante la modellazione. Si effettua infatti un'assegnazione dei parametri di progetto alle *Categorie*. In questo lavoro l'unica categoria selezionata sarà *Modelli Generici* in quanto il *database* si concentra unicamente sui fenomeni di degrado, che nel modello sono stati creati proprio con questa funzionalità.

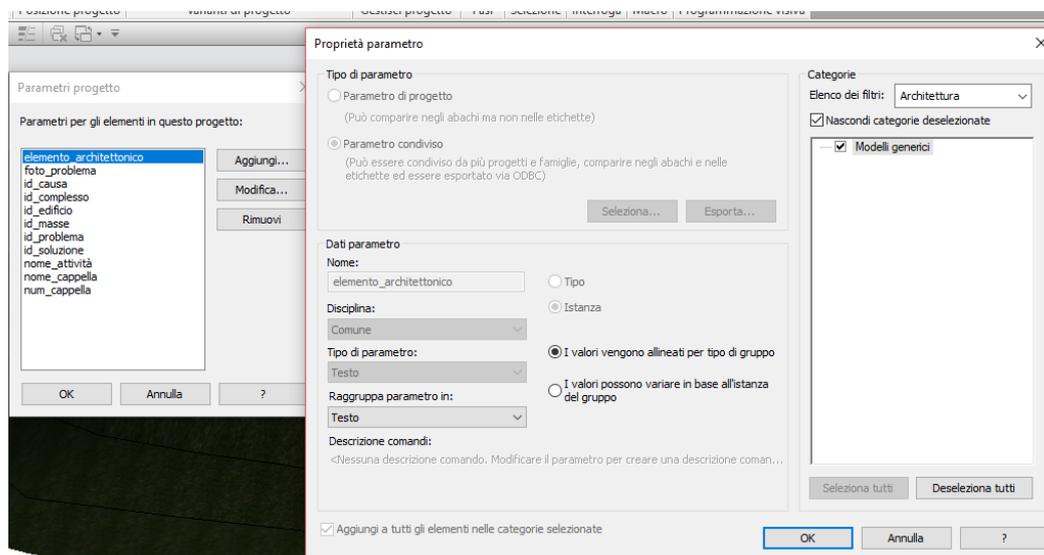


Figura 124 - Parametri di progetto

Infatti è stato deciso di identificare i fenomeni di degrado utilizzando questa funzionalità in quanto consente di assegnare le proprietà e modificare la forma anche successivamente, per esempio nel caso in cui il fenomeno dovesse svilupparsi in superficie.

Per creare i modelli generici è stato selezionato il comando *Crea Componente* dalla sezione *Architettura* e selezionando *Modelli Generici* [Figura 125].

La forma dei “degradi” è stata realizzata mediante il comando *Spline* tramite il quale si definisce con precisione grossolana l’estensione in superficie del fenomeno, senza rispettare delle misure in quanto non sarebbero comunque fedeli alla realtà. Infatti lo scopo della rappresentazione del degrado è quello di localizzarlo e definirne grossolanamente l’estensione.

Dopo avere creato la superficie tramite il comando Spline è stata effettuata un’estrusione, tramite l’apposito comando *Estrusione*, di piccolo spessore.

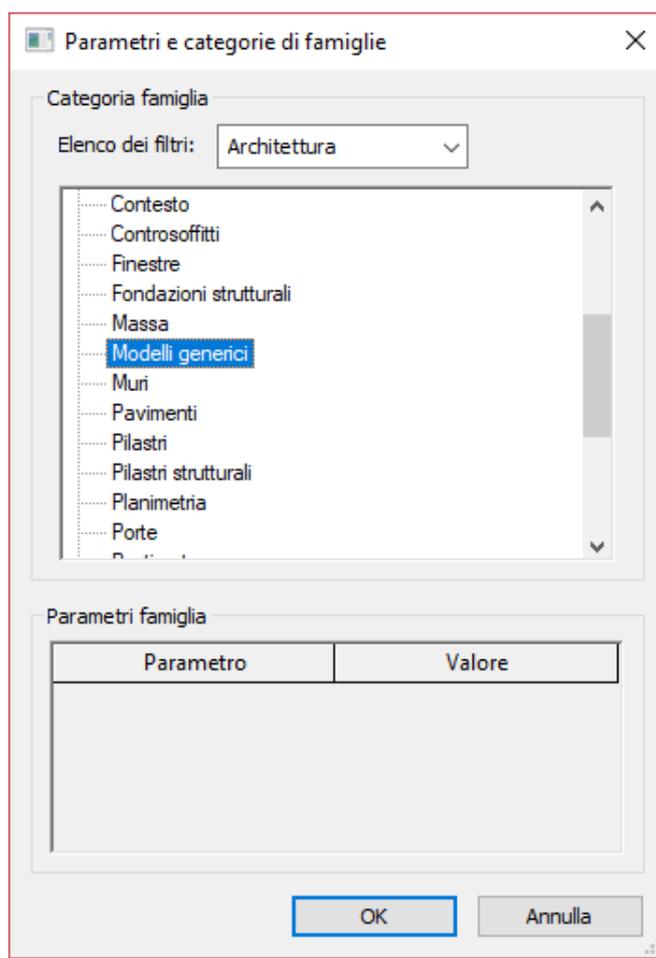


Figura 125 - Creazione di modelli generici

Ogni tipologia di degrado è identificata con un colore rappresentativo [Figura 126], che chiaramente non fa nessun riferimento all’aspetto del degrado.

Infatti per avere un’informazione circa tale aspetto è stata allegata fra i parametri di progetto una documentazione fotografica che rende l’idea dello stato di fatto del fenomeno.



Figura 126 - Mappatura dei fenomeni di degrado sul modello

Per esempio, selezionando l'area evidenziata in figura si può risalire a tutte le informazioni sopra citate e anche alla foto [Figura 127] che è stata scattata più o meno in corrispondenza della superficie creata.

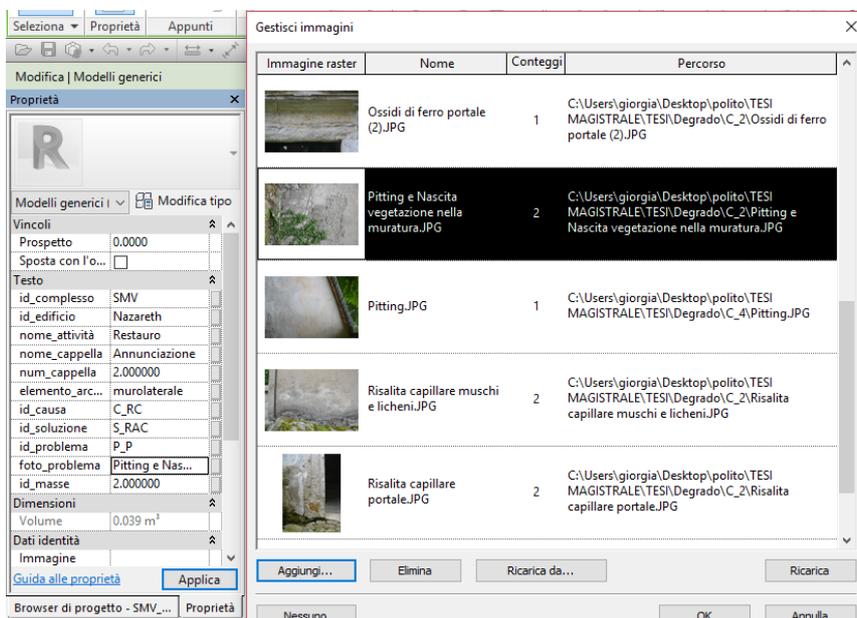


Figura 127 - Documentazione fotografica allegata ai parametri di progetto

8.2.3 Esportazione dei dati da Revit e creazione del database

Le informazioni inserite su Revit si esportano tramite un *plugin* aggiuntivo di Revit, DBLink, in una tabella di Access al fine di creare il *database*. Questo *plugin* consente

anche di importare le modifiche effettuate direttamente da Access su *Revit*, motivo per cui in futuro non solo sarà consultabile, ma sarà anche modificabile periodicamente in funzione dello stato di conservazione del complesso.

Nella sezione **Moduli Aggiuntivi** è presente il comando **Revit DB Link** [Figura 128], il quale una volta selezionato apre una finestra di dialogo che consente di *Esportare* o *Importare* un *database* tramite l'apposito comando.

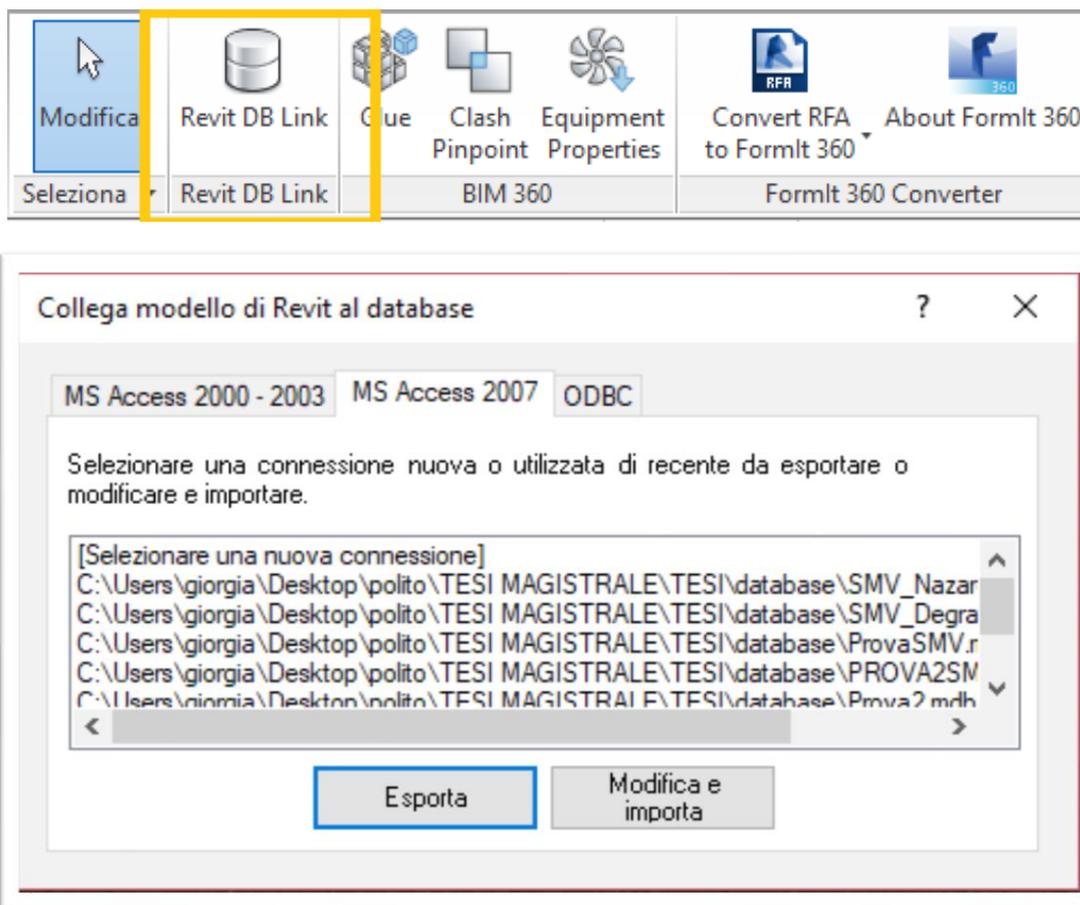


Figura 128 - Collegamento DB Link

Il primo passo è stato quello di creare un *database* vuoto su *Access* al quale è stato assegnato solo il nome per poterlo riconoscere nell'elenco durante l'esportazione. Successivamente è stato esportato il *database* creato da *Revit*, il quale, riaprendolo da *Access*, sarà creato da una serie di tabelle che hanno il nome dei componenti in inglese [Figura 129].

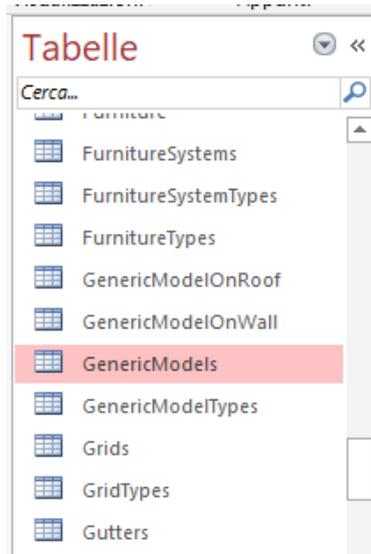


Figura 129 - Tabelle create automaticamente su Access

Nella sezione **Strumenti DataBase**, con il comando **Relazioni**, è possibile prendere visione di tutti i collegamenti presenti fra i vari componenti [Figura 130], dal quale si evince un ordine poco chiaro e di difficile utilizzo.

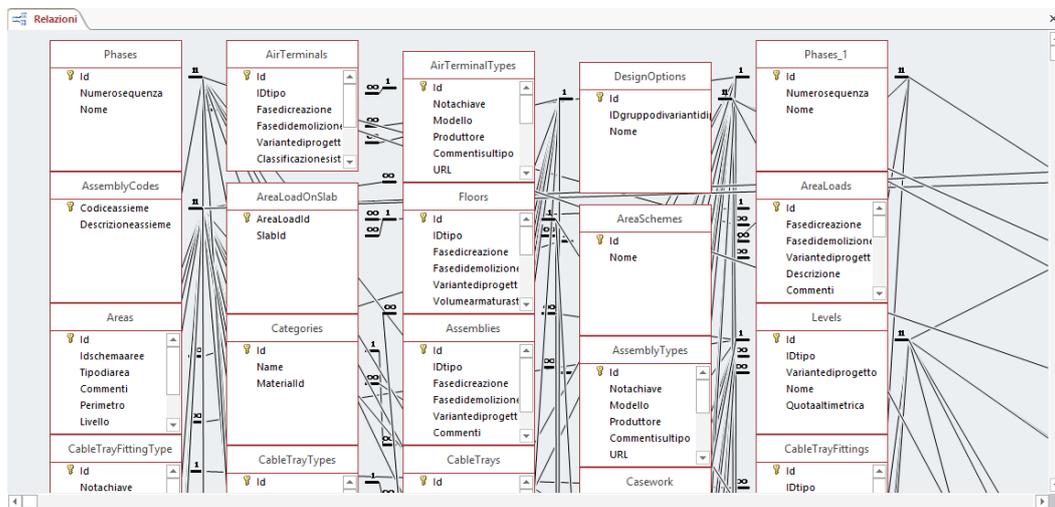


Figura 130 - Relazioni create automaticamente da Access

Motivo per cui sono state rimosse queste relazioni (che qualora dovessero servire in futuro potrebbero essere ricreate) e ne sono state realizzate delle altre, in funzione della finalità della tesi.

La tabella **GenericModels** [Figura 131] restituisce le informazioni create in Revit mediante una serie di righe (tante quanti sono i fenomeni riscontrati) e colonne (tante quanti sono i parametri associati).

id_complesto	id_edificio	nome_attività	nome_cappella	num_cappella	elemento_architettonico	id_problema	id_causa	id_soluzione
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	Distacco ed erri	C_RC	S_RC
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_AC	C_DR	S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_F	C_AU	S_RC
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_AC	C_OF	S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_E	C_RC	S_CP
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_E	C_D	S_CP
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_CN		S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_DE	C_RC	S_OCS
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_CB	C_RC	S_AMCB
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_P		
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_CB	C_RC	S_AMCB
SMV	Nazareth	Manutenzione	PrimoSognoGiuseppe	4	murofacciata		C_RC	
SMV	Nazareth	Manutenzione	PrimoSognoGiuseppe	4	murofacciata	P_LA	C_D	S_P
SMV	Nazareth	Manutenzione	PrimoSognoGiuseppe	4	murolaterale		C_RC	
SMV	Nazareth	Manutenzione	PrimoSognoGiuseppe	4	colonna	P_AC	C_OF	S_PP
SMV	Nazareth	Manutenzione	PrimoSognoGiuseppe	4	muroretro	P_P	C_RC	S_RAC
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_E	C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale		C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_CB		
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	muroretro		C_RC	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	murolaterale		C_RC	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	murolaterale		C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	muroretro		C_RC	

Figura 131 - Estratto della tabella Generic Models

In ambiente Access sono state create quattro ulteriori tabelle: *Mass*, *Abaco Problemi*, *Abaco Cause* e *Abaco Soluzioni*.

La prima è una tabella legata a un altro modello *Revit*, quello relativo alle masse:

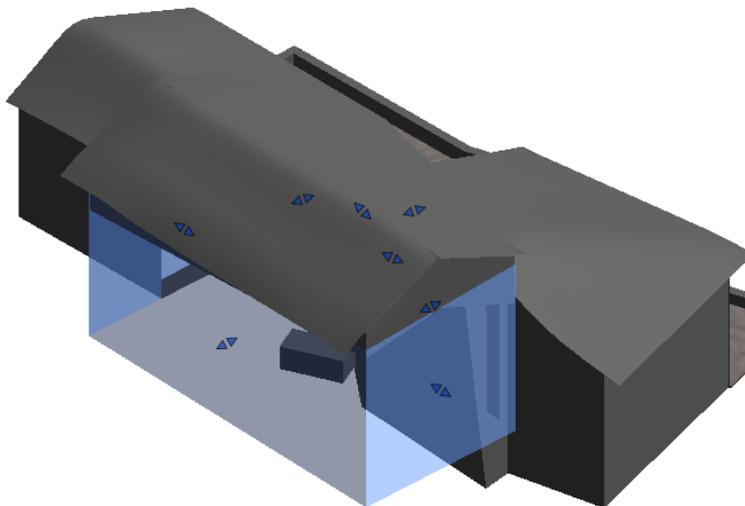


Figura 132 - Masse

All'interno di ognuna è stato creato un volumetto al quale sono stati associati i parametri condivisi di cui nei precedenti paragrafi si è parlato, con la differenza che nel momento in cui si fa l'associazione fra i parametri condivisi e i parametri di progetto, l'unico componente associato sarà *Masse* [Figura 133]

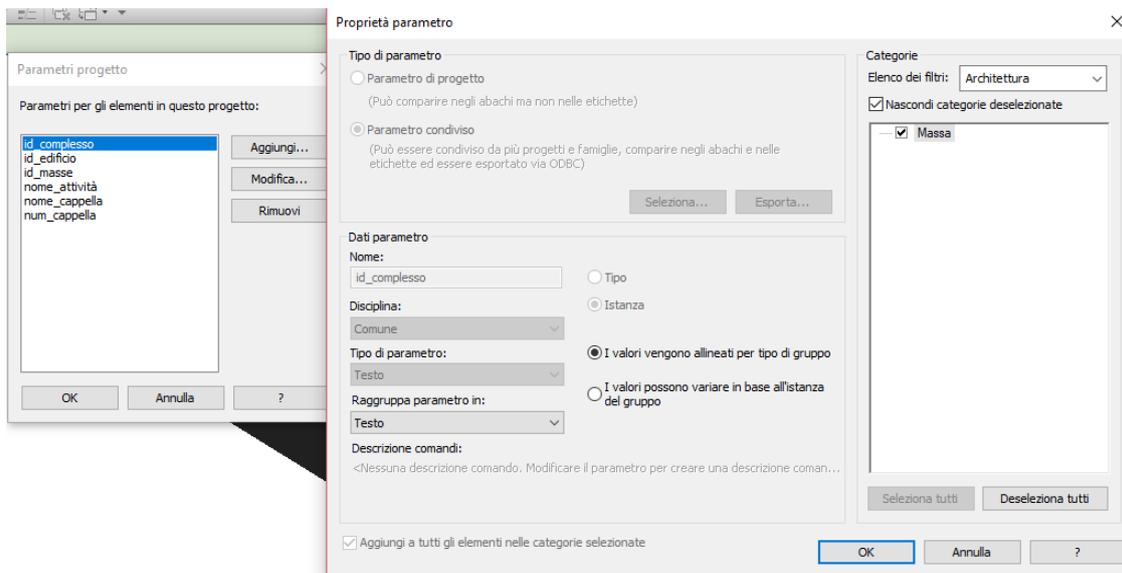


Figura 133 - Parametri di progetto nel modello delle masse

Tramite DB Link è avvenuta l'importazione del *database* creato nel modello delle masse e in questo modo è stata creata la tabella *Mass* [Figura 134], la quale è collegata alla tabella *GenericModels*.

	id_complesso	id_edificio	nome_attivi	nome_capp	num_cappe
+	SMV	Nazareth	Restauro	Annunciazione	2
+	SMV	Nazareth	Restauro	Visitazione	3
+	SMV	Nazareth	Restauro	PrimoSognoGi	4
*					

Figura 134 - Estratto dalla tabella del DataBase Mass

Ovviamente in questa tabella non sono presenti informazioni circa l'elemento architettonico su cui è presente il degrado, i problemi, le cause e le soluzioni, in quanto ha il solo scopo di raggruppare tutti i fenomeni riscontrati in funzione della massa, rendendo esplicito il collegamento fra la cappella e la sua posizione. Aprendo il menu a tendina si ritrovano infatti i raggruppamenti citati [Figura 135].

id_comples	id_edificio	nome_attivi	nome_capp	num_cappe	elemento_a	id_causa	id_soluzioni	id_problem
SMV	Nazareth	Restauro	Annunciazione	2				
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	Distacco ed erosione	C_RC	S_RC
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_AC	C_DR	S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_F	C_AU	S_RC
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_AC	C_OF	S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_E	C_RC	S_CP
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_E	C_D	S_CP
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	portale	P_CN		S_PAN
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_DE	C_RC	S_OCS
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_CB	C_RC	S_AMCB
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_P		
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_CB	C_RC	S_AMCB
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murofacciata	P_E	C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale		C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	murolaterale	P_CB		
SMV	Nazareth	Manutenzione	Annunciazione	2	muroretro		C_RC	
*								
SMV	Nazareth	Restauro	Visitazione	3				
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	murolaterale		C_RC	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	murolaterale		C_D	
SMV	Nazareth	Manutenzione	Visitazione	3	muroretro		C_RC	
*								

Figura 135 - Estratto tabella Mass con menù a tendina

Le altre tabelle, *Abaco Problemi* [Figura 136], *Abaco Cause* [Figura 137] e *Abaco Soluzioni* [Figura 138], sono state create direttamente su Access con la finalità di rendere esplicito il significato dei codici inseriti nella tabella.

ID	id_problem	descrizione	Note
1	P_AC	Alterazione Cromatica	Approfondimento nella stesura della tesi
2	P_F	Fori Affissione Cartelli	
3	P_E	Erosione	Approfondimento nella stesura della tesi
4	P_D	Distacco	
5	P_CB	Colonizzazione Biologica	
6	P_P	Pitting	Approfondimento nella stesura della tesi
7	P_PL	Lacuna Affreschi	
8	P_CN	Crosta Nera	Approfondimento nella stesura della tesi
9	P_DE	Distacco ed Erosione	

Figura 136 - Estratto Abaco Problemi

ID	id_causa	descrizione	Note
1	C_RC	Risalita Capillare	Approfondimento nella stesura tesi
2	C_OF	Ossidi Ferro	Approfondimento nella stesura tesi
3	C_D	Dilavamento	
4	C_ST	Stress Termico	
5	C_AU	Azioni uomo	
6	C_DR	Dissoluzione Rame	Approfondimento nella stesura tesi
7	C_P	Particolato presete nell'aria	
8	C_IP	Inserimento passerella	

Figura 137 - Estratto Abaco Cause

ID	id_soluzioni	descrizione	Note
1	S_RC	Risarcimento e Consolidamento	Approfondimento nella stesura della tesi
2	S_C	Consolidamento	Approfondimento nella stesura della tesi
3	S_PAN	Pulitura con acqua nebulizzata	Approfondimento nella stesura della tesi
4	S_P	Protezione	
5	S_OCS	Operazione Cuci Scuci	
6	S_AMCB	Asportazione Meccanica della Colonizzazione Biologic	
7	S_RMAC	Rimozione manuale alghe e consolidazione	
8	S_CP	Consolidamento e Protezione	Approfondimento nella stesura della tesi
9	S_PP	Pulitura e Protezione	Approfondimento nella stesura della tesi

Figura 138 - Estratto Abaco Soluzioni

Il collegamento fra le diverse tabelle è stato generato mediante il comando **Modifica Relazioni**, che ha consentito di eliminare quelle che Access crea automaticamente e crearne delle altre.

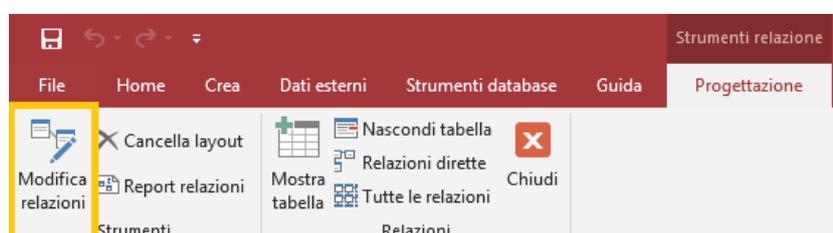


Figura 139 - Comando Modifica Relazioni

Successivamente si apre una tabella di dialogo, che consente di decidere il tipo di connessione, che in questo caso risponderà alla voce di *Uno a molti*, e i parametri da rendere dipendenti l'uno dall'altro.

Modifica relazioni ? X

Tabella/query:	Tabella/query correlata:	
Mass	GenericModels	OK
id_masse	id_masse	Annulla
		Tipo join...
<input checked="" type="checkbox"/> Applica integrità referenziale <input checked="" type="checkbox"/> Aggiorna campi correlati a catena <input checked="" type="checkbox"/> Elimina record correlati a catena		Crea nuova..
Tipo relazione: Uno-a-molti		

Figura 140 - Connessione dei parametri delle relazioni

La relazione creata fra le diverse tabelle [Figura 141] prevede che a ogni massa corrispondano una serie di modelli generici (*fenomeni di degrado*) e a ognuno di questi ultimi corrispondano una serie di problemi cause e soluzioni descritti negli abachi.

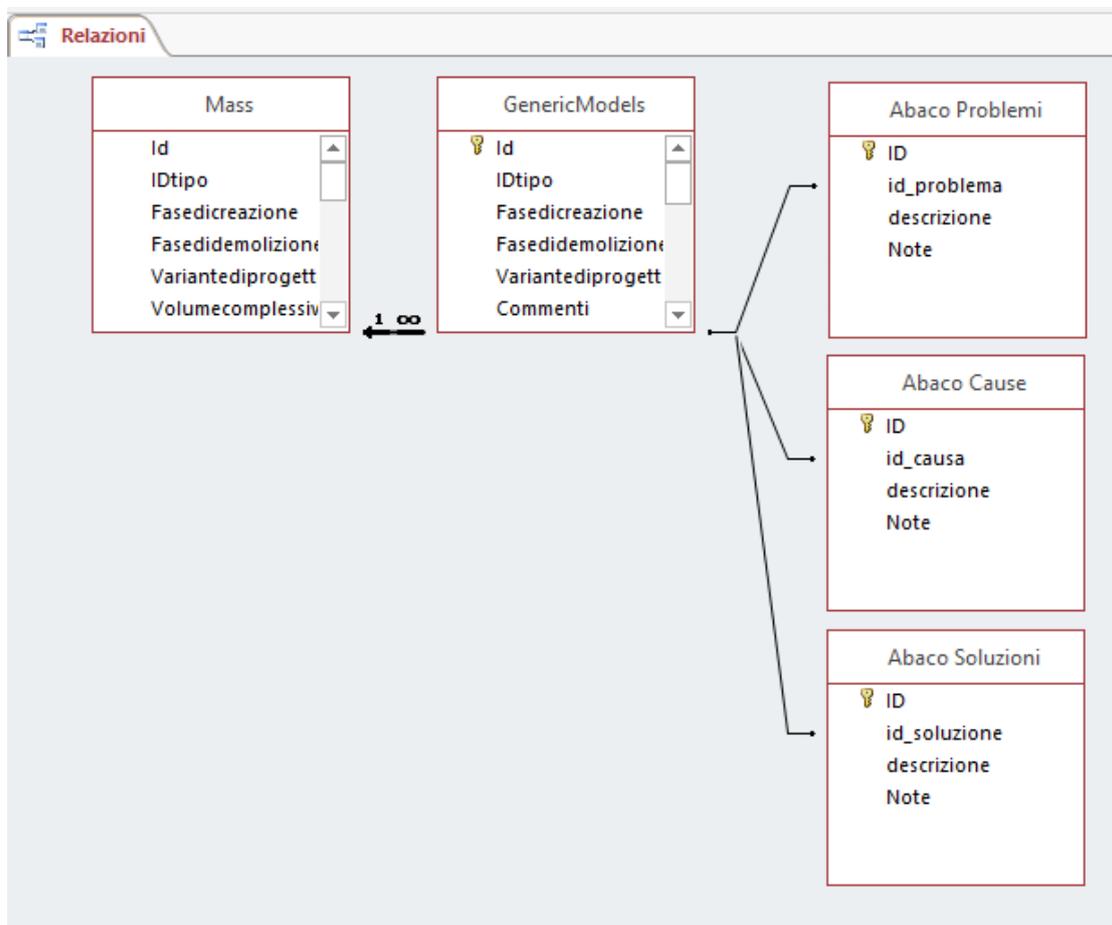


Figura 141 - Relazioni DataBase

8.2.4 Consultazione dei dati

Il *database* creato su *Access* è stato poi unito agli altri già esistenti, frutto del lavoro svolto nei precedenti anni da altri tesisti. In particolare, l'ultimo è stato proprio quello di raggruppare tutti i *database* esistenti in un'unica fonte di consultazione.

Per questo motivo, per l'accesso principale alla banca dati, non è stato necessario creare una nuova maschera di consultazione, ma è stata utilizzata quella già creata dal precedente tesista [Figura 142].

I SACRI MONTI DELLA REGIONE PREALPINA

MARTELLI 26 GIUGNO 2011

19:06:00

IN COLLABORAZIONE CON



I NOVE SACRI MONTI DELL'ITALIA SETTEENTRIONALE SONO GRUPPI DI CAPPELLE E ALTRI MANUFATTI ARCHITETTONICI ERETTI FRA IL XVI E IL XVII SECOLO, DEDICATI A DIFFERENTI ASPETTI DELLA FEDE CRISTIANA. IN AGGIUNTA AL LORO SIGNIFICATO SIMBOLICO E SPIRITUALE, POSSIEDONO NOTEVOLI DOTI DI BELLEZZA, VIRTÙ E GRADEVOLTEZZA, E RISULTANO INTEGRATI IN UN AMBIENTE NATURALE E PAESAGGISTICO DI COLLINE, BOSCHI E LAGHI. CONTENGONO INOLTRE REPERTI ARTISTICI MOLTO IMPORTANTI (AFFRESCI E STATUE)". CON QUESTA MOTIVAZIONE, NEL 2003 L'UNESCO HA ISCRITTO IL SITO "SACRI MONTI DEL PIEMONTE E DELLA LOMBARDIA" NELLA LISTA DEL PATRIMONIO MONDIALE. IL PRESTIGIOSO RICONOSCIMENTO ATTRIBUISCE UN VALORE UNIVERSALE A SETTE SACRI MONTI DEL PIEMONTE (BELMONTE, OREA, DOMODOSSOLA, GHIFFA, OROPA, ORTA E VARALLO) E DUE DELLA LOMBARDIA (OSSUCCIO E VARESE), METTENDO IN LUCE LA STRAORDINARIA RICCHEZZA, LA QUALITÀ E I VALORI DI QUESTI

SELEZIONARE IL COMPLESSO DEVOZIONALE

SACRO MONTE DI VARALLO

Figura 142 - Indice generale

Selezionando la voce nel *menu* a tendina “Sacro Monte di Varallo” si ha accesso ad una ulteriore maschera già presente nel *database* [Figura 143].

IL SACRO MONTE DI VARALLO

RICERCA PER SINGOLA CAPPELLA

SELEZIONARE LA CAPPELLA PARAMETRI DA RICERCARE

RICERCA GLOBALE

RICERCA RESTAURI PER CAPPELLA

RICERCA STATUE PER CAPPELLA

RICERCA AFFRESCI PER CAPPELLA

Figura 143 - Maschera SMV

Quest'ultima permette di avere accesso a tutte le informazioni che fino a questo momento sono state reperite grazie allo studio effettuato nei precedenti anni fra cui restauri, statue e affreschi, motivo per cui sono state aggiunte anche quelle che rappresentano il frutto dello studio svolto in questa tesi.

In particolare, nei parametri da ricercare è stata aggiunta, oltre a “Colonne” “Muri” “Pavimenti” e “Tetti”, la voce “Degradi” [Figura 144].

Figura 144 - Parametri di ricerca

In questo modo, selezionando una delle cappelle oggetto di studio e il parametro di ricerca “Degradi” si ottengono delle nuove maschere di consultazione create. Chiaramente se nella selezione delle cappelle se ne sceglie una che non appartiene al complesso di Nazareth e si clicca su “Cerca” non sarà aperta nessuna nuova schermata, perché lo studio sui fenomeni di degrado è stato effettuato solo su quelle tre cappelle e il parametro di ricerca aggiunto è stato collegato solo a queste mediante la relazione rappresentata in *Figura 145*.

```

☐ If [ElencoCappelle]="Cappella 2" Then
    ☐ If [ParametroRicerca]="Degradi" Then
        ApriMaschera
            Nome maschera Cappella 2
            Visualizzazione Maschera
            Nome filtro
            Condizione WHERE
            Modalità immissione dati
            Modalità finestra Normale
    
```

Figura 145 - Relazione fra parametri di ricerca

La relazione a titolo di esempio sopra riportata è stata ripetuta per le cappelle tre e quattro. Selezionandone una sarà aperta la maschera di consultazione contenente:

- L’elemento architettonico su cui è presente il fenomeno di degrado;
- Il codice identificativo del problema;
- Il codice identificativo della causa;
- Il codice identificativo della soluzione;
- Il numero identificativo della massa a cui appartiene la cappella.

Per ogni degrado presente è stata creata una scheda come quella riportata in *Figura 146*.

ELEMENTO_ARCHITETTONICO	MURDFACCIATA	
ID_PROBLEMA	P_AC	VEDI
ID_CAUSA	C_DR	VEDI
ID_SOLUZIONE	S_PAN	VEDI
ID_MASSE	2	

Figura 146 - Esempio schede degrado

Il pulsante “Vedi” è stato creato mediante le funzionalità che consentono di crearlo e inserendo una nuova *macro* che rispetta la relazione di seguito riportata [Figura 147].

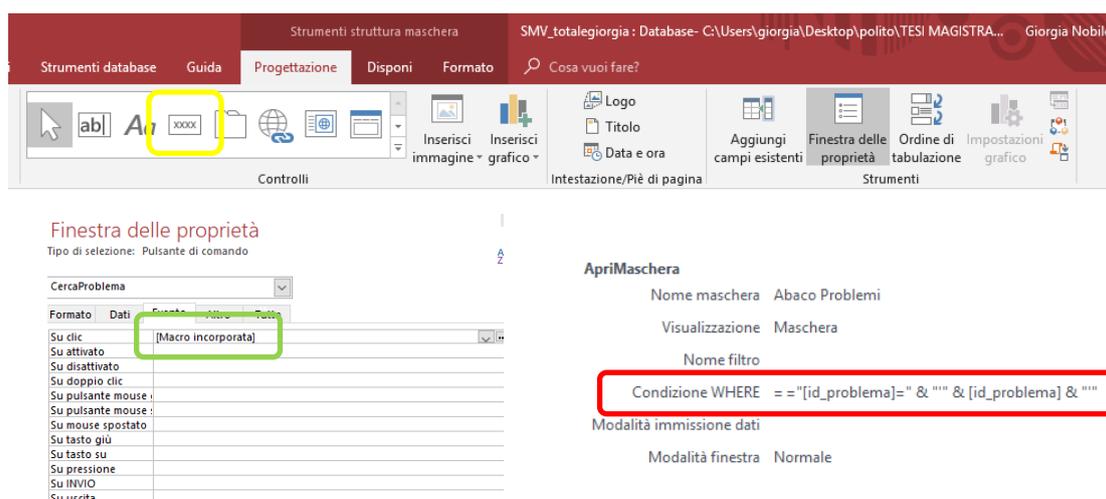


Figura 147 - In giallo il comando "pulsante"; in verde la macro creata; in rosso la relazione

Cliccando sul pulsante così creato saranno aperte nuove schede di consultazione che rappresentano gli abachi, i quali consentono di saperne di più circa problemi cause e soluzioni.

Figura 148 - Esempio di una scheda dell'abaco problemi

Se si vuole effettuare un'ulteriore ricerca è sufficiente aprire il menù a tendina presente affianco alla didascalia “Cerca” e selezionare il codice identificativo del problema di cui si vuole scoprire di più.

Selezionando il pulsante “Vedi Foto” sarà aperta una nuova scheda contenente la documentazione fotografica del problema.

Figura 149 - Esempio di una scheda di documentazione fotografica

Gli abachi delle cause e delle soluzioni sono stati strutturati allo stesso modo appena descritto.

Conclusioni

I metodi di rilevamento metrico dei beni architettonici trattati in questa tesi hanno permesso di effettuare un'acquisizione dei dati in tempi abbastanza ristretti. La tecnica fotogrammetrica ha consentito di integrare il rilievo effettuato mediante *laser scanner* che, a causa dell'inaccessibilità di alcune zone, ha mostrato delle lacune.

In sostanza dalle nuvole fotogrammetriche sono state estratte le coperture e da quelle ottenute mediante *laser scanner* sono stati estratti gli interni degli edifici e le parti murarie.

I tempi di elaborazione, al contrario di quelli di acquisizione, si sono rivelati molto lunghi. Le cause possono essere imputabili alla ricerca della precisione di 1 cm e nel fatto che con le attuali tecniche si acquisiscono milioni di punti che appesantiscono i *file*.

I *software* utilizzati per la generazione delle nuvole sono tre e qualora si volesse elencarli in funzione della rapidità si otterrebbe al primo posto *VisualSFM*, al secondo *Scene* e al terzo *Context Capture*. Il più rapido però, a confronto con l'altro software di elaborazione delle nuvole fotogrammetriche, *Context Capture*, ha restituito risultati nettamente meno precisi.

Per quanto riguarda le nuvole di punti *laser scanner*, i problemi relativi alla difficoltà di elaborazione con *Scene* sono legati alla presenza di vegetazione che ha impedito di rilevare alcune zone.

Per l'unione, il confronto, la pulizia e la decimazione delle nuvole fotogrammetrica e *laser scanner* è stato utilizzato un ulteriore *software*: *Cloud Compare*.

La nuvola finale, prima di essere riportata in ambiente BIM, è stata suddivisa in elementi architettonici mediante *Recap360*. Le coperture e le volte sono state elaborate con *Rhinoceros* mentre tutti gli altri elementi architettonici sono stati creati con le funzionalità presenti in *Revit*. Il modello tridimensionale così ottenuto è stato confrontato con la nuvola dei punti riscontrando un risultato abbastanza soddisfacente.

A partire dalla rappresentazione qualitativa dei fenomeni di degrado riportata sul modello BIM, è stato strutturato un *database*, esportato direttamente da *Revit*, in cui sono stati inseriti tutti gli approfondimenti legati alle cause e le soluzioni.

Per la visione di questa banca di dati da parte dell'Ente Gestore sono state create le maschere di consultazione direttamente su *Access* e degli elaborati in formato A2 in cui

è stata riportata una rappresentazione quantitativa dei fenomeni riscontrati, eseguita mediante le linee guida della *Normal 1/88*.

Le conclusioni che si possono trarre dopo aver sperimentato questa metodologia, seppure siano presenti dei punti critici, ne suggeriscono l'utilizzo sui beni architettonici.

Indice delle figure

<i>Figura 1 - Il sacro Monte di Varallo</i>	5
<i>Figura 2 - Interno della cappella 5 "Arrivo dei Magi"</i>	6
<i>Figura 3 - Mappa del Sacro Monte di Varallo</i>	8
<i>Figura 4 - Interno della Cappella 11 "La Strage degli Innocenti"</i>	9
<i>Figura 5 - Piazza dei Tribunali</i>	10
<i>Figura 6 - Piazza del Tempio</i>	11
<i>Figura 7 - Copertura della Cappella 4</i>	13
<i>Figura 8 - Figure schematiche con e senza accorgimenti per l'infiltrazione d'acqua</i>	14
<i>Figura 9 - Mappa del complesso Nazareth</i>	15
<i>Figura 10 - Facciata della Cappella 2</i>	16
<i>Figura 11 - Statue della Cappella numero due</i>	17
<i>Figura 12 - Collegamento dalla cappella due alla cappella tre</i>	18
<i>Figura 13 - Statue della Cappella numero Tre</i>	19
<i>Figura 14 - Cappella numero quattro</i>	20
<i>Figura 15 - Statue cappella quattro</i>	21
<i>Figura 16 - Tecniche di Rilievo</i>	24
<i>Figura 17 - Rete di inquadramento, raffittimento e dettaglio</i>	26
<i>Figura 18 - Proiezione centrale</i>	27
<i>Figura 19 - Laser Scanner a Triangolazione</i>	30
<i>Figura 20 - Laser Scanner a misura diretta</i>	31
<i>Figura 21 - Marker per il rilievo topografico e per il rilievo LiDAR</i>	33
<i>Figura 22 - Marker per il rilievo UAV</i>	34
<i>Figura 23 - Rete principale di inquadramento e raffittimento</i>	35
<i>Figura 24 - Leica Nova Scan Station</i>	36
<i>Figura 25 - Monografia vertice 24200</i>	37
<i>Figura 26 – Eidotipo</i>	38
<i>Figura 27 - Faro CAM 2</i>	39
<i>Figura 28 - Phantom 4 Pro</i>	40
<i>Figura 29 - Scansioni Caricate</i>	44

<i>Figura 30 - Individuazione marker</i>	45
<i>Figura 31 - Checkerboard</i>	45
<i>Figura 32 - Estratto dal file di coordinate compensate</i>	46
<i>Figura 33 - Risultato della compensazione della rete</i>	47
<i>Figura 34 - ScanFit</i>	48
<i>Figura 35 - Foto interno della cappella quattro</i>	49
<i>Figura 36 - Vista in corrispondenza</i>	49
<i>Figura 37 - Scansioni dopo la registrazione</i>	50
<i>Figura 38 - Tensione dei target</i>	50
<i>Figura 39 - Verifica target su scansione</i>	51
<i>Figura 40 - Scansione Colorata</i>	52
<i>Figura 41 - Nuvole Colorate</i>	53
<i>Figura 42 - Esportazione nuvole in .E57</i>	53
<i>Figura 43 - Importazione Fotogrammi in ContextCapture</i>	54
<i>Figura 44 - Output Block Name</i>	55
<i>Figura 45 - Settings</i>	55
<i>Figura 46 - Aereotriangulation processing</i>	56
<i>Figura 47 - ContextCaptureEngine</i>	56
<i>Figura 48 - 3D view</i>	57
<i>Figura 49 - Aereotriangolazione ripetuta diverse volte</i>	57
<i>Figura 50 - Estratto report positivo</i>	58
<i>Figura 51 - GroundControlPoint</i>	58
<i>Figura 52 - Errore nell'assegnazione delle coordinate</i>	59
<i>Figura 53 - Estratto report positivo parte 2</i>	59
<i>Figura 54 - Reconstruction</i>	60
<i>Figura 55 - Parametri Reconstruction</i>	60
<i>Figura 56 - Spatial framework</i>	60
<i>Figura 57 - Tile</i>	61
<i>Figura 58 - Reference 3D model</i>	61
<i>Figura 59 - Production</i>	62
<i>Figura 60 - Estratto della mesh ottenuta da ContextCapture</i>	62
<i>Figura 61 - Estratto Nuvola di Punti ContextCapture 2</i>	63

<i>Figura 62 - Importazione immagini Visual SFM</i>	64
<i>Figura 63 - GCP-based transform</i>	65
<i>Figura 64 - Coordinate target</i>	65
<i>Figura 65 - Match the images</i>	66
<i>Figura 66 - NView</i>	66
<i>Figura 67 - Run Dense Reconstruction</i>	67
<i>Figura 68 - Nuvola di punti Visual SFM</i>	67
<i>Figura 69 - Nuvola VSFM e Nuvola CC</i>	70
<i>Figura 70 - Densità Nuvola di Punti Visual SFM</i>	70
<i>Figura 71 - Zona di interesse della nuvola esportata Scene</i>	71
<i>Figura 72 - Nuvola ottenuta mediante Laser Scanner</i>	72
<i>Figura 73 - Nuvola Fotogrammetrica</i>	73
<i>Figura 74 - Nuvole Pulite Filtrate e Unite</i>	74
<i>Figura 75 - BIM</i>	76
<i>Figura 76 - Schema interoperabilità</i>	77
<i>Figura 77 - Volte di nuvole di punti esportate da ReCap 360</i>	80
<i>Figura 78 - Esportazione nuvole da Recap 360</i>	80
<i>Figura 79 - Workset</i>	81
<i>Figura 80 - Importazione nuvole su Revit</i>	82
<i>Figura 81 - Posizionamento nuvole di punti</i>	83
<i>Figura 82 - Nuvole di punti importate su Revit</i>	83
<i>Figura 83 - Coordinate punto base di progetto</i>	84
<i>Figura 84 - Modello di Coordinamento</i>	85
<i>Figura 85 - Collegamento File</i>	85
<i>Figura 86 - Ricarica Collegamento</i>	86
<i>Figura 87 - Comando FitWall</i>	87
<i>Figura 88 - Spessore muri PointSense</i>	87
<i>Figura 89 - Muro Creato con PointSense</i>	88
<i>Figura 90 - Volte importate su Rhino</i>	89
<i>Figura 91 - Finestra di dialogo per la creazione della superficie</i>	89
<i>Figura 92 - Superficie non modificata</i>	90
<i>Figura 93 - Importazione superficie da Rhino a Revit</i>	90

<i>Figura 94 - Superficie importata da Rhino a Revit</i>	91
<i>Figura 95 - Volte create da Tetto da Superficie</i>	91
<i>Figura 96 - Copertura Cappella Due su Rhino</i>	92
<i>Figura 97 - Comando Superficie Topografica.....</i>	93
<i>Figura 98 - Inserimento quota altimetrica punti superficie topografica.....</i>	93
<i>Figura 99 - Suolo creato su Revit da due diverse prospettive</i>	94
<i>Figura 100 - LOD 3</i>	95
<i>Figura 101 - LOD 2</i>	95
<i>Figura 102 - LOD 1</i>	95
<i>Figura 103 - LOD 0</i>	95
<i>Figura 104 - LOD 05</i>	96
<i>Figura 105 - LOD 04</i>	96
<i>Figura 106 - LOD</i>	96
<i>Figura 107 - Portale Cappella 2.....</i>	100
<i>Figura 108 - Carta Geologica Italiana</i>	101
<i>Figura 109 - Carta Geologica Varallo</i>	101
<i>Figura 110 - Sopra zoom su località Rocca Pietra. Sotto legenda relativa alla zona</i>	102
<i>Figura 111 - Rocce utilizzate come marmi</i>	102
<i>Figura 112 - Alterazione cromatica.....</i>	104
<i>Figura 113 - Colonna cappella 4.....</i>	105
<i>Figura 114 - Macchia azzurra</i>	106
<i>Figura 115 - Patina Biologica</i>	107
<i>Figura 116 - Risalita capillare</i>	109
<i>Figura 117 - Muro cappella 3.....</i>	110
<i>Figura 118 - Cantonali incrociati.....</i>	115
<i>Figura 119 - Puntone che non sorregge i correnti</i>	116
<i>Figura 120 - Puntone che grava su un telaio in legno</i>	116
<i>Figura 121 - Estratto NorMaL - 1/88</i>	117
<i>Figura 122 - Estratto dalla tavola del lessico dei degradi</i>	118
<i>Figura 123 - Crea parametri condivisi.....</i>	122
<i>Figura 122 - Parametri di progetto</i>	123
<i>Figura 125 - Creazione di modelli generici.....</i>	124

<i>Figura 126 - Mappatura dei fenomeni di degrado sul modello.....</i>	125
<i>Figura 127 - Documentazione fotografica allegata ai parametri di progetto.....</i>	125
<i>Figura 128 - Collegamento DB Link.....</i>	126
<i>Figura 129 - Tabelle create automaticamente su Access.....</i>	127
<i>Figura 130 - Relazioni create automaticamente da Access.....</i>	127
<i>Figura 131 - Estratto della tabella Generic Models.....</i>	128
<i>Figura 132 - Masse.....</i>	128
<i>Figura 133 - Parametri di progetto nel modello delle masse.....</i>	129
<i>Figura 134 - Estratto dalla tabella del DataBase Mass.....</i>	129
<i>Figura 135 - Estratto tabella Mass con menù a tendina.....</i>	130
<i>Figura 136 - Estratto Abaco Problemi.....</i>	130
<i>Figura 137 - Estratto Abaco Cause.....</i>	130
<i>Figura 138 - Estratto Abaco Soluzioni.....</i>	131
<i>Figura 139 - Comando Modifica Relazioni.....</i>	131
<i>Figura 140 - Connessione dei parametri delle relazioni.....</i>	131
<i>Figura 141 - Relazioni DataBase.....</i>	132
<i>Figura 142 - Indice generale.....</i>	133
<i>Figura 143 - Maschera SMV.....</i>	133
<i>Figura 144 - Parametri di ricerca.....</i>	134
<i>Figura 145 - Relazione fra parametri di ricerca.....</i>	134
<i>Figura 146 - Esempio schede degrado.....</i>	135
<i>Figura 147 - In giallo il comando "pulsante"; in verde la macro creata; in rosso la relazione.....</i>	135
<i>Figura 148 - Esempio di una scheda dell'abaco problemi.....</i>	136
<i>Figura 149 - Esempio di una scheda di documentazione fotografica.....</i>	136

Bibliografia

CARPINTERI, Alberto, *Il patrimonio pittorico murale dei Sacri Monti: monitoraggio, valorizzazione e recupero*, Aracne Editrice, Roma

DEFILIPPIS, Elena, *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Borgosesia 2006

MASSONE, Enrico, *Sacri Monti in Piemonte. Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos Edizione, Torino 1991

SCARZELLA, Paolo, ZERBINATTI, Marco, *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea Editrice, Firenze, 2009

AMMINISTRAZIONE VESCOVILE DEL SACRO MONTE DI VARALLO, *Il Sacro Monte. Raccolta storica dei testi delle Cappelle del Sacro Monte*, Varallo Sesia

GALETTO, R., SPALLA, A., *Lezioni di Topografia*, CUSL, Pavia, 1998

GOMARASCA, M.A., *Elementi di geomatica*, Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT), Milano, 2004

DEL GIUDICE Matteo, OSELLO Anna, *BIM for cultural heritage*, in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France

Raccomandazioni NorMaL - 1/88, *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*, CNR-ICR, 1990, Roma

Allegati

Tensioni dei target

Scansione	Marker	Dist. (mm)	Long. (mm)	Angolare(°)	Ort. (mm)
Scans10031	m101	3.4023	-3.3793	0.0112	0.3948
Scans10031	m102	5.9147	-4.289	0.1051	4.0768
Scans10031	m103	3.36	0.4104	0.0463	3.335
Scans10031	m108	6.1491	-1.255	0.0145	6.0198
Scans10031	m109	4.0282	-3.5458	0.0045	1.9118
Scans10035	p1	7.9997	-7.741	0.0212	2.0196
Scans10035	m136	7.9997	-2.8098	0.2469	7.4961
Scans10037	m139	0.6998	0.181	0.0057	0.6284
Scans10037	m140	0.6998	-0.2201	0.005	0.6675
Scans10016	m117	1.9464	0.2641	0.0151	1.9285
Scans10016	m122	2.3519	1.3673	0.05	1.9142
Scans10016	m118	4.0902	0.7599	0.0174	4.0191
Scans10017	m117	5.2505	-1.6591	0.165	
Scans10017	m122	5.4546	5.4022	0.0064	
Scans10017	m118	3.6576	1.8783	0.0353	
Scans10017	m125	2.6369	-1.8059	0.0106	
Scans10017	m148	1.7813	0.0481	0.0232	
Scans10028	m124	0.0264	-0.026	0.0002	0.0045
Scans10028	m128	0.0264	-0.0218	0.0001	0.0149
Scans10029	m124	0.0264	0.0238	0.0001	0.01
Scans10029	m128	0.0264	0.0196	0.0005	0.01
Scans10030	m124	1.9464	0.4008	0.13	1.9052
Scans10030	m127	2.3519	-0.8781	0.0139	2.1819
Scans10030	m128	4.0902	-1.1562	0.035	3.9237
Scans10023	-m144-	2.3823	0.1273	0.0877	2.37
Scans10023	-m146-	2.9007	2.8259	0.0062	0.65
Scans10023	-m147-	2.4563	-1.8377	0.0565	1.63
Scans10024	-m144-	0.4304	-0.2092	0.0039	0.3761
Scans10024	-m146-	1.778	-1.62	0.0206	0.7328
Scans10026	-m144-	2.3823	-0.8002	0.0234	2.244
Scans10026	-m146-	2.9007	-2.7459	0.0263	0.9355
Scans10026	-m147-	2.4563	-1.7101	0.0403	1.7638
Scans10018	m107	7.3158	-7.2158	0.0276	1.2072
Scans10018	m110	7.3597	5.3495	0.0558	5.0572
Scans10018	m111	13.4946	7.4666	0.2617	11.257
Scans10019	m107	1.4784	1.3623	0.005	0.5744
Scans10019	m110	0.7392	0.4168	0.0133	0.6105
Scans10021	m106	6.9991	-4.8025	0.0261	5.0926
Scans10021	m105	3.8367	2.0307	0.0129	3.2554
Scans10021	m110	1.4502	0.8696	0.0058	1.1607

Scans10022	m106	7.3578	-6.2909	0.0683	3.8197
Scans10022	m104	6.5493	4.1741	0.0594	5.0489
Scans10022	m105	6.9359	-3.08	0.1393	6.2183
Scans10027	m104	6.68	6.1235	0.0497	2.6718
Scans10027	m105	3.34	-3.1361	0.0113	1.1494
Scans10014	-m148-	2.7642	-0.0026	0.0187	2.7642
Scans10014	-m149-	1.6972	0.38	0.0114	1.6541
Scans10014	-m150-	1.2298	-0.6966	0.0197	1.0136
Scans10014	m117	2.0363	-1.4301	0.0164	1.4498
Scans10015	-m148-	2.7642	0.4011	0.0326	2.735
Scans10015	-m149-	1.6972	-0.4271	0.0234	1.6426
Scans10015	-m150-	1.2298	0.3821	0.0179	1.1689
Scans10015	m117-	2.0363	0.9353	0.0215	1.809

Coordinate compensate

	E	N	Elev. Description
20000	177.06100	4300.43000	598.13300
21000	265.40500	4312.14600	589.89800
22000	227.48500	4309.81500	591.51400
23000	214.32600	4278.55000	591.64100
23100	199.91500	4262.37900	592.93300
23300	212.46500	4260.75700	592.96800
23200	196.62800	4243.26000	594.63900
24100	216.70476	4224.17796	586.56829
24000	211.82876	4258.17469	592.92617
m0106	226.77116	4238.49167	594.63923
m0102	231.32164	4246.91826	594.63934
m0107	233.64328	4233.68175	594.63855
f0008	229.10184	4235.17180	594.63910
f0012	241.57313	4233.29702	594.63858
f0009	232.90302	4232.09119	594.63905
f0006	225.68604	4251.26426	594.63916
f0001	228.95508	4273.32642	596.43857
24500	233.82228	4247.59965	590.02770
m0101	232.79279	4249.94377	591.99466
m0102_2	231.32188	4246.91773	591.80890
m0103	229.12771	4245.44266	591.49471
m0104	215.97726	4254.02035	592.93423
m0108	209.17803	4257.49785	595.03931
m0109	210.10240	4260.33454	595.24334
f0006_2	225.68859	4251.25876	590.55320
f0001_2	218.49736	4260.15805	591.09355
f0002	237.86627	4266.52933	591.11623
f0100	222.17182	4256.53719	594.66641

	E	N	Elev. Description
f0101	228.09038	4252.40133	594.43301
f0102	230.50460	4245.88599	595.02818
f0103	231.84500	4248.64068	596.69135
f0104	227.22679	4246.08813	591.08252
24200	243.25996	4231.25176	588.19668
f0012_2	191.83528	4215.06280	588.08929
m0112	232.91132	4237.09044	586.44762
f0104_2	224.67652	4243.00775	586.45070
f0113	227.69676	4244.25582	586.59834
f0009_2	232.90000	4232.09346	584.76564
m0104_2	227.79395	4245.37966	588.51349
m0105	227.35251	4242.62514	588.44327
m0106_2	226.76778	4238.49053	587.29158
m0114	225.49199	4246.24645	587.17357
m0115	204.11459	4242.93351	592.54202
m0116	213.64440	4229.66891	588.95829
m0110	227.40936	4238.15796	587.60800
m0111	233.44825	4236.69883	587.94137
m0107_2	233.64030	4233.67999	587.50555
m0117	241.55599	4238.70675	590.75870
m0118	244.85548	4236.09739	590.57832
24300	255.02717	4225.83172	581.83465
m119	239.78162	4232.27602	588.78260
m120	234.56427	4237.25665	589.59851
m121	236.13252	4239.68464	590.88415
m122	236.17614	4243.38438	590.46731
m117	241.55528	4238.70843	590.86521
m115	204.10281	4242.84385	592.65180
m116	213.66489	4229.60252	589.06898
f012	241.58030	4233.30067	588.21028

	E	N	Elev. Description
f009	232.91472	4232.08442	584.83906
f008	229.10086	4235.14878	586.17176
f010	248.74567	4238.48689	587.66305
f011	252.97687	4233.14755	584.01418
24400	233.29668	4243.88571	589.75157
m0126	232.34173	4247.33563	590.89063
m0127	237.56259	4246.11502	590.77296
m0128	235.54795	4249.27106	591.33245
m0109_2	210.10681	4260.33036	595.24580
m21	235.24318	4240.64638	591.04575
m22	236.19755	4243.39578	590.36324
m23	240.25762	4241.04656	591.11072
m24	232.38563	4242.68149	590.82950
m25	231.40390	4243.52433	590.87505
m128	235.54829	4249.27156	591.33594
m129	244.79084	4232.87200	588.50762
m130	245.21145	4235.10751	590.64197
m131	246.87200	4239.03085	589.36993
m132	247.77031	4241.12068	590.41553
24600	239.03355	4268.94824	591.31299
m109	210.12765	4260.33885	595.24826
m136	245.80180	4242.30729	590.98559
m133	243.51994	4246.63773	592.22599
m137	243.72605	4246.41140	590.69198
m134	239.26229	4248.72184	590.81160
f002	237.89053	4266.52486	591.14885
f004	251.91912	4252.68711	588.05144
f003	241.64225	4250.67050	589.69325
f150	244.07362	4246.83073	594.97660
f151	242.88269	4244.51468	598.24898



Indagini geomatiche

Luogo: Sacro Monte di Varallo, Varallo (VC)

Data: 4 - 5 Dicembre 2017

Codice Monografia: 23200

Operatori: Nobile Giorgia, Ursini Andrea



Titolo Monografia: da capp. 2 a capp. 12 (viale)

Tipo di Materializzazione: chiodo su pietra

Strumento di rilievo: stazione totale

Altezza Strumentale: 1.60 m

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): NIKON D5200, Giorgia Nobile



Indagini geomatiche

Luogo: Sacro Monte di Varallo, Varallo (VC)

Data: 4 - 5 Dicembre 2017

Codice Monografia: 24500

Operatori: Nobile Giorgia, Ursini Andrea



Titolo Monografia: ingresso cappella due

Tipo di Materializzazione: chiodo

Strumento di rilievo: stazione totale

Altezza Strumentale: 1.58 m

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): NIKON D5200, Giorgia Nobile



Indagini geomatiche

Luogo: Sacro Monte di Varallo, Varallo (VC)

Data: 4 - 5 Dicembre 2017

Codice Monografia: 24000

Operatori: Nobile Giorgia, Ursini Andrea



Titolo Monografia: fronte cappella due

Tipo di Materializzazione: chiodo su pietra

Strumento di rilievo: stazione totale

Altezza Strumentale: 1.645 m

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): NIKON D5200, Giorgia Nobile



Indagini geomatiche

Luogo: Sacro Monte di Varallo, Varallo (VC)

Data: 4 - 5 Dicembre 2017

Codice Monografia: 24200

Operatori: Nobile Giorgia, Ursini Andrea



Titolo Monografia: cappella 3 angolo terrazzo

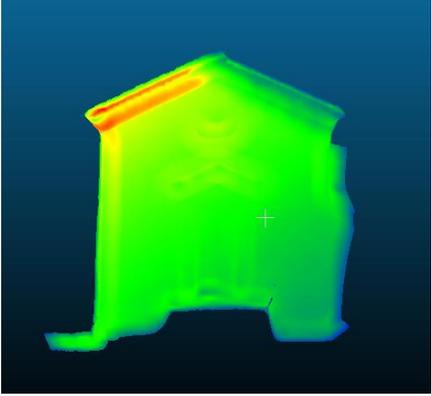
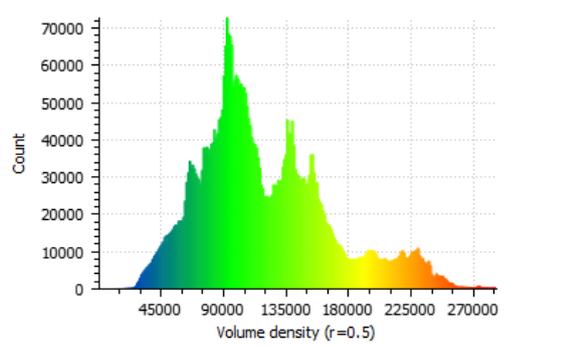
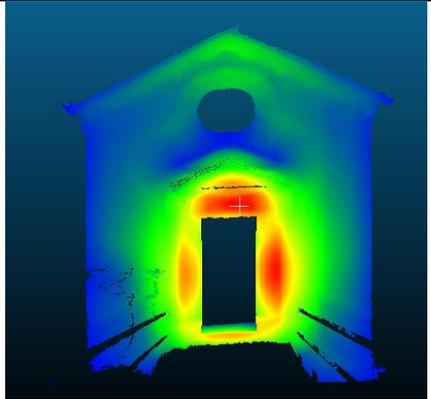
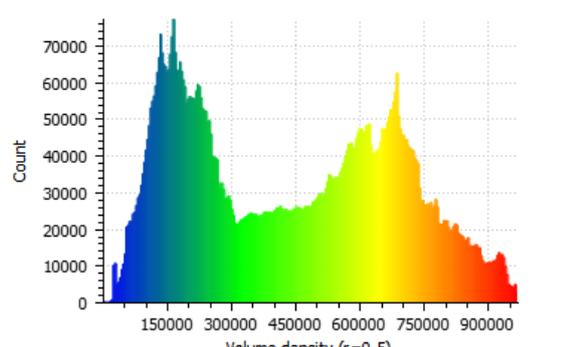
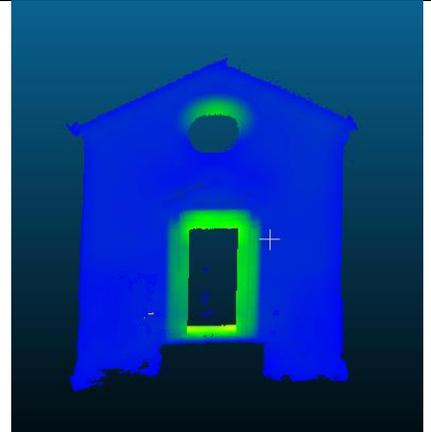
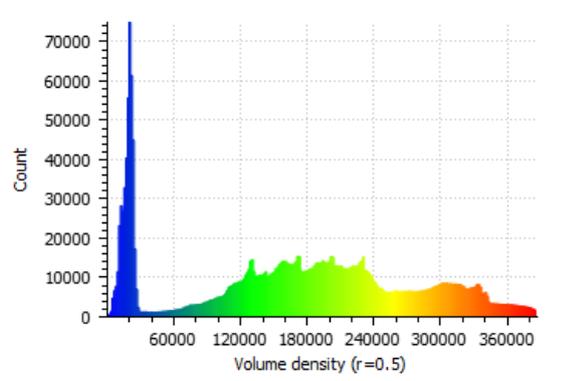
Tipo di Materializzazione: chiodo

Strumento di rilievo: stazione totale

Altezza Strumentale: 1.640 m

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): NIKON D5200, Giorgia Nobile

Confronto fra zone comuni estratte dalle nuvole dei punti elaborate con i tre software:

<i>Software</i>	Istogramma
Context Capture	Densità
	<p>Volume density (r=0.5) (4432955 values) [256 classes]</p> 
<i>Scene</i>	Densità
	<p>Volume density (r=0.5) (8217490 values) [256 classes]</p> 
<i>Visual SFM</i>	Densità
	<p>Volume density (r=0.5) (2205487 values) [256 classes]</p> 

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. Marco Zerbinatti e il prof. Andrea Maria Lingua per l'attenzione e la precisione dimostrata durante tutto il percorso.

Sono grata anche ai loro collaboratori, Francesca Matrone, Paolo Maschio e Matteo Del Giudice per la disponibilità che hanno avuto nei miei confronti.

Un ringraziamento a tutti i miei amici per aver condiviso insieme a me non solo i momenti felici di questi anni, ma anche i periodi più difficili.

Un sentito grazie ai miei genitori, ad Alice e a Niko che, con il loro dolce e instancabile sostegno, mi hanno aiutata a raggiungere questo traguardo.