

# POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea in Ingegneria Edile  
Tesi di Laurea Magistrale

**Rilievo metrico e metodologie H-BIM per il patrimonio storico.**

**Applicazioni alla Chiesa di "S. Stefano al Monte" di Candia Canavese.**

Relatore:

Arch. Marco Zerbinatti

Correlatori:

Prof. Ing. Andrea Maria Lingua

Prof. Ing. Anna Osello

Candidata:

Martina Muscarà

Dicembre 2017



<b>Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>1.Candia Canavese .....</b>	<b>9</b>
1.1. Cenni storici.....	13
1.2. L'area oggetto di studio .....	20
1.2.1. Descrizione dell'organismo architettonico: la Chiesa di Santo Stefano al Monte ....	22
1.2.2. Materiali e tecniche costruttive .....	27
1.3. Riferimenti normativi per la descrizione dello stato di conservazione.....	35
<b>2.Tecniche e metodologie di rilievo 3D applicate al Patrimonio Architettonico .....</b>	<b>41</b>
2.1. Il rilievo topografico .....	43
2.2. La tecnologia LiDAR.....	45
2.2.1. Il <i>laser scanner</i> .....	47
2.2.3. Acquisizione delle misure mediante laser scanner terrestre.....	50
2.3. La fotogrammetria .....	51
2.3.1. Classificazione e principi di funzionamento.....	53
2.3.2. Rilievo fotogrammetrico: acquisizione, orientamento e restituzione .....	56
2.3.3. Fotogrammetria aerea da UAV .....	59
<b>3.Acquisizione dei dati di indagine .....</b>	<b>61</b>
3.1. La campagna di rilevamento .....	61
3.2. La rete di inquadramento e di dettaglio .....	62
3.3. L'acquisizione delle scansioni tramite <i>laser scanner</i> .....	64
3.4. L'acquisizione dei fotogrammi tramite UAV .....	66
<b>4.Elaborazione dei dati di indagine .....</b>	<b>69</b>
4.1. La compensazione della rete.....	69
4.2. Elaborazione dei dati acquisiti con Laser Scanner terrestre .....	71

4.2.1. Il software FARO SCENE .....	72
4.2.2. Caricamento delle scansioni .....	73
4.2.3. Collocazione e registrazione dei marker .....	75
4.2.4. Impostazione delle coordinate e collocazione delle scansioni .....	78
4.2.5. Verifica della tensione dei marker .....	81
4.2.6. Colorazione delle scansioni .....	83
4.2.7. Esportazione della nuvola di punti.....	84
4.3. Elaborazione dei dati acquisiti con fotogrammetria aerea da UAV .....	85
4.3.1. Il software Photoscan .....	86
4.3.2. Scelta, caricamento e allineamento dei fotogrammi .....	87
4.3.3. Impostazione del sistema di riferimento e posizionamento dei marker .....	90
4.3.4. Costruzione ed esportazione della nuvola di punti e del report finale .....	92
<b>5. Elaborazione delle nuvole di punti .....</b>	<b>95</b>
5.1. Pulitura delle nuvole di punti .....	95
5.1.1. Il software 3DReshaper .....	95
5.1.2. La pulizia e l'esportazione delle nuvole di punti .....	96
5.2. La nuvola laser scanner e la nuvola fotogrammetrica a confronto .....	101
5.1.1. Il software CloudCompare .....	101
5.1.2. Importazione e pulizia delle nuvole di punti .....	102
5.1.3. Confronto e unione tra le nuvole di punti .....	104
5.3. Preparazione della nuvola di punti .....	110
5.3.1. Il software ReCap360 .....	111
5.3.2. Esportazione della nuvola di punti.....	111
<b>6. La condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni .....</b>	<b>113</b>
6.1. La metodologia H-BIM .....	117
6.1.1. Importazione della nuvola di punti in Autodesk Revit .....	119

6.1.2. Il <i>Plug-in PointSense</i> .....	120
6.2. I LOD (Level Of Development).....	124
6.2.1. Riferimenti normativi .....	124
<b>7. Il linguaggio di programmazione visuale per la gestione dei dati del restauro .....</b>	<b>127</b>
7.1. Il software di programmazione logico-grafica <i>Dynamo</i> .....	127
7.2. La descrizione della tessitura muraria mediante RGB e sviluppi futuri .....	129
7.3. La visualizzazione dei risultati attraverso la Realtà Aumentata.....	134
<b>Conclusioni .....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>143</b>
<b>Allegati .....</b>	<b>149</b>
<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>169</b>



## **Introduzione**

Negli ultimi anni uno dei temi che più ha suscitato l'interesse e sul quale numerosi professionisti nell'ambito dell'ingegneria e dell'architettura si trovano a confrontarsi è sicuramente quello della valorizzazione e della salvaguardia del patrimonio architettonico esistente. L'Italia, culla della cultura e dell'arte, è il paese che ha il maggior patrimonio artistico, storico e paesaggistico al mondo; per questo motivo risulta fondamentale porre l'attenzione sul monitoraggio e la conservazione del patrimonio attraverso un'adeguata documentazione e con l'ausilio dei più aggiornati strumenti a disposizione.

L'organismo architettonico oggetto di studio è la Chiesa di Santo Stefano al Monte a Candia Canavese. La chiesa sorge sulla sommità di una delle dodici colline moreniche del Canavese, createsi a seguito dello scioglimento del ghiacciaio Balteo più di 20.000 anni fa. Non si hanno notizie certe sull'anno della sua costruzione ma essa costituisce una delle principali testimonianze dell'architettura romanica presenti nella Diocesi di Ivrea.

La tesi si compone di tre parti principali: la prima relativa alla raccolta di tutta la documentazione di archivio disponibile in riferimento alla storia, ai materiali, alle tecniche costruttive utilizzate e alla consultazione dei riferimenti normativi fondamentali per la descrizione dello stato di conservazione e dei principali fenomeni di degrado che interessano l'edificio; la seconda riguarda l'acquisizione e l'elaborazione dei dati di indagine per la creazione di un modello integrato che nasce dal confronto tra la nuvola di punti *laser scanner* e fotogrammetrica; la terza concerne l'analisi delle proprietà della nuvola di punti attraverso la metodologia H-BIM e l'automatizzazione del processo di visualizzazione della stessa, attraverso l'utilizzo di un *software* per la programmazione logico-grafica e la realtà aumentata, con l'intento di descrivere la tessitura muraria.

Il lavoro di tesi svolto si pone dunque come obiettivo quello di applicare le tecniche di rilievo metrico 3D che meglio consentono di indagare sull'edilizia storica (tecnica LiDAR e la fotogrammetria aerea tramite UAV), e di usufruire delle più innovative metodologie sviluppate intorno al mondo dell'H-BIM per la gestione dei dati del restauro, cercando, al contempo, di descriverne i pregi e i difetti al fine di valutare la loro efficienza e applicabilità al patrimonio edilizio esistente.

## 1.Candia Canavese

Candia Canavese, situato lungo l'asse ferroviario Torino-Aosta nel tratto compreso tra Chivasso e Ivrea, è uno dei numerosi centri medio-piccoli del Canavese che si estende per una superficie complessiva di circa 9 chilometri quadrati, si trova a 285 m sul livello del mare e ospita attualmente 1'281 abitanti.

L'area in questione risulta interessante non solo dal punto di vista paesaggistico e naturalistico con le sue colline, le sue pianure e i suoi fitti boschi percorsi da numerosi sentieri, ma anche dal punto di vista architettonico grazie alla presenza di edifici che sono una vera e propria ricchezza storico-culturale.



Figura 1: Candia Canavese  
Fonte: [www.google.com](http://www.google.com)

Il Comune di Candia ha origini antichissime: sorto sul versante orientale di una delle 12 colline moreniche, formatasi grazie ai detriti trasportati nei secoli successivi allo scioglimento di un immenso ghiacciaio, ha sin da subito occupato una posizione ritenuta soprattutto in periodo medioevale strategica sia dal punto di vista difensivo che economico. Questo è uno dei motivi che da sempre lo hanno reso luogo conteso, oltre al

fatto di essere punto nodale di passaggio grazie anche alla presenza di vie di comunicazioni che lo mettevano in collegamento con il nord dell'Europa.

Il tessuto urbano risulta essere caratterizzato da un'orditura mistilinea determinata dalla sovrapposizione dell'impianto originario e dal riutilizzo dello stesso nel periodo medievale; si presuppone infatti che l'assetto urbano del paese venne definito in epoca romana (con assi principali le attuali via Roma e via Castiglione) e ciò è testimoniato dal riutilizzo di pochi resti del periodo come materiale di riempimento per la costruzione di edifici in epoche successive. Proprio a partire dai suddetti tracciati il paese vide il suo massimo sviluppo in epoca medioevale; maggiori sono infatti le testimonianze architettoniche risalenti a quel periodo che furono il fulcro attorno al quale avvenne l'evoluzione dell'abitato e che, ancora oggi, sono presenti sul territorio consentendo dunque una miglior lettura ed interpretazione della crescita che ha interessato Candia Canavese.



Figura 2: Chiesa Parrocchiale di San Michele (a sinistra) e Campanile Parrocchiale (a destra).

Fonti: [www.comune.candia.to.com](http://www.comune.candia.to.com).

Sono punti focali e di impianto medioevale proprio le due chiese più importanti del paese ovvero la Chiesa Parrocchiale di San Michele e la Chiesa di Santo Stefano al Monte. La Chiesa di San Michele, attuale Parrocchia del paese, fu edificata al centro del paese lungo l'attuale via Castiglione, asse che la collega alla Chiesa di Santo Stefano al Monte. Una serie di recenti campagne di scavi hanno permesso di portare alla luce numerose tombe sovrapposte che consentono di ricollegare l'edificio sotto la giurisdizione dei Canonici della Chiesa di Ivrea risalente all'anno 1000 ed inoltre hanno garantito il rinvenimento di una fonte battesimale probabilmente risalente all'epoca paleo-

cristiana. La Chiesa di Santo Stefano al Monte, edificio oggetto del presente lavoro di tesi, fu edificata intorno ai primi anni del XI Secolo e divenne Priorato dell'Abbazia di Fruttuaria nel secolo successivo alla sua costruzione.



Figura 3: Prospetto principale e vista aerea della Chiesa di Santo Stefano al Monte.  
Fonti: foto di Paolo Maschio.

L'odierna Candia è però il risultato dell'unione di due feudi, due castelli e due ville. Infatti, intorno al XII secolo, l'intera area risultava essere suddivisa in due paesi distinti: Castiglione e Candia.

Castiglione, immersa nei fitti boschi del monte di Santo Stefano, era situata nella parte più alta del paese, oggi testimonianza della sua passata esistenza è la Torre del castello di Castiglione, distrutto nel 1338 durante la guerra del Canavese; Candia invece, situata nella parte bassa del paese, comprendeva il lago e tutta l'area pianeggiante e aveva come fulcro la Chiesa di San Michele.

La distinzione di questi due paesi fa presupporre che il loro sviluppo, seppur in parallelo, in un primo momento fosse avvenuto separatamente e che solo a seguito della guerra del Canavese intorno al XIV secolo fu avviata la definitiva unificazione dei due centri abitati. Altri due tracciati che hanno determinato l'evoluzione del paese sono sicuramente l'attuale via Gaio e la Via del lago che conduce direttamente al Lago di Candia Canavese.

Il lago di Candia è la testimonianza di ciò che rimane del ghiacciaio Balteo che ricopriva l'area geografica denominata Anfiteatro Morenico di Ivrea più di ventimila anni fa; il ghiacciaio, migrando dalla Valle d'Aosta verso sud, modificò radicalmente l'aspetto di

queste aree infatti, a seguito del suo scioglimento, l'originaria pianura subì una depressione nella sua parte centrale consentendo la formazione di bacini lacustri; *"l'alta pianura pianese passò, in questo lungo intervallo di tempo, da condizione di steppa fredda a Graminacee e rare conifere arboree, a un popolamento vegetale forestato e dominato da latifoglie di clima temperato, mentre le conifere si ritiravano progressivamente verso le montagne o le valli più interne"*<sup>1</sup>.



Figura 4: Vista sul Lago di Candia.  
Fonte: foto di Alessandro Vecchi.

Il lago di Candia ricopre una superficie complessiva di circa 160 ettari e si trova ad una quota di 225 m sul livello del mare, esso rappresenta sicuramente una delle più importanti aree umide presenti sul territorio piemontese. Le colline attorno al lago, le quali non superano i 450 m di altitudine, sono ricche di fitti boschi di castagni.

Il lago di Candia, donato nel medioevo ai candiesi dal Duca di Monferrato, costituì in passato fonte di sostentamento per gli abitanti delle zone vicine e ancora oggi assume un ruolo fondamentale per lo sviluppo turistico del paese da cui prende nome.

Per il suo immenso valore naturalistico, insieme alle zone paludose limitrofe, è rientrato nella lista dei biotopi della regione Piemonte ed è stato riconosciuto come sito di

---

<sup>1</sup> NISBET R., *"Considerazioni sulle vicende forestali e l'utilizzazione dell'ambiente vegetale olocenico nel Canavese"* in *"L'Anfiteatro Morenico di Ivrea"* di RAMELLA P., Ivrea, 1990.

importanza Comunitaria dall'Unione Europea diventando dunque Parco Naturale del Lago di Candia.

### 1.1. Cenni storici

Candia si inserisce all'interno di un contesto più ampio che è quello del Canavese per il quale non risulta facile individuarne i limiti geografici in maniera netta e precisa.

ANTONIO MASELLI in una sua opera dichiara: *"Il Canavese non ha attualmente, né mai ebbe una circoscrizione propria. Né la storia né la geografia gli danno precisi confini"*<sup>2</sup>.

Si tratta infatti di una realtà territoriale i cui confini subirono numerosi mutamenti imposti dalla natura come anche legati ad avvenimenti storici, economici e politici.

Volendo ad ogni modo darne un'indicazione potremmo asserire che: la vasta area del Canavese risulta delimitata a nord dalla Valle d'Aosta (tra Carema e Pont S. Martin), a est dalla Serra e dalla Dora Baltea fino alla confluenza con il Po a sud e infine a ovest dal torrente Malone, dalle Vaude e dal Parco Nazionale del Gran Paradiso seguendo i confini con la Francia<sup>3</sup>.

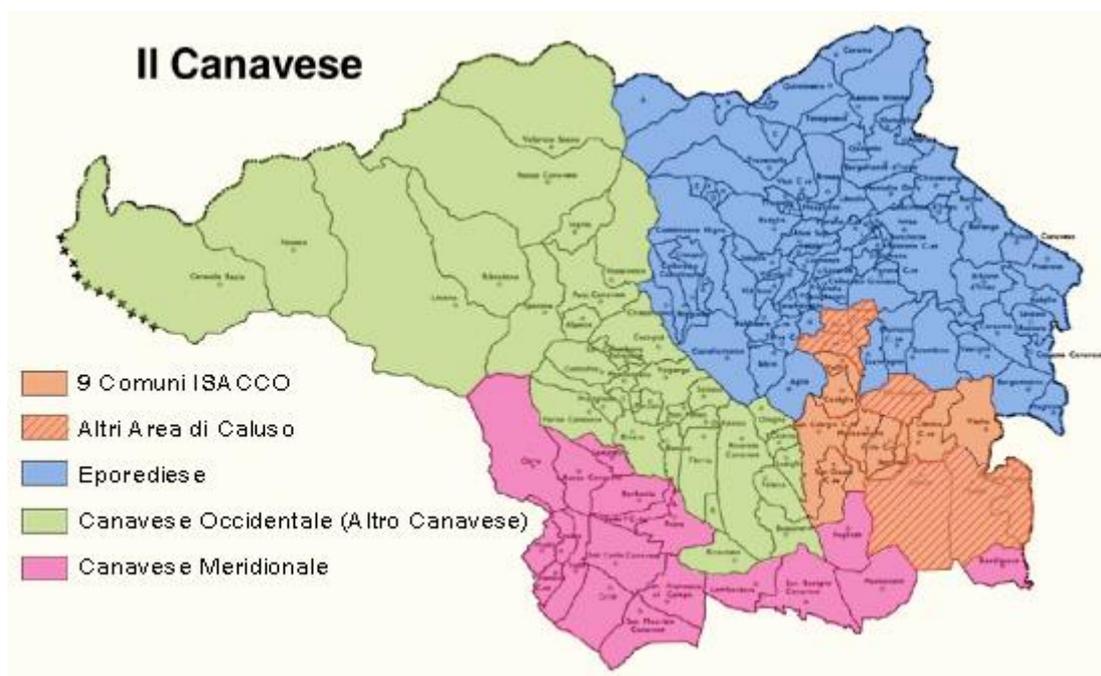


Figura 5: I confini della regione storico-geografica del Canavese.

Fonte: [www.boscarol.com](http://www.boscarol.com)

<sup>2</sup>MASELLI A., "Guida del Canavese", Ivrea, 1904.

<sup>3</sup>RAMELLA P., "Civiltà del Canavese", Chieri, 1977, p. 21.

I suddetti confini ricalcano verosimilmente quelli indicati dal giurista e cronachista medievale PIETRO AZARIO in una delle sue opere più importanti, risalente al 1363, il "De Bello Canapeciano"; in essa l'autore narra come numerosi scontri e profonde discordie tra le famiglie dei Conti discepoli del Re Arduino, i Principi di Savoia e i Marchesi di Monferato resero il Canavese territorio di cruente guerre feudali nel XIV Secolo. L'autore definisce il Canavese come un contado appartenente alle cinque famiglie comitali che, in quel periodo, esercitavano il loro dominio su tutto il territorio ovvero: i Conti di Valperga, i Conti di Biandrate, i Conti di San Martino, i Conti di Masino e i Conti di Mazzè.



Figura 6: Mappa della spartizione del Canavese in casati in "De Bello Canapeciano", Pietro Azario.

Fonte: [www.mattiaca.it/debellocancartina](http://www.mattiaca.it/debellocancartina)

Numerosi sono ancora gli autori che, trattando di questa terra ricca di storia, hanno cercato di delinearne i confini.

Di seguito viene riportata un'interessante, e a tratti poetica, descrizione che lo storico e folklorista GAETANO DI GIOVANNI fa del territorio Canavese e dei suoi confini:

*"[...] intendo io per Canavese quella cospicua e bella regione del forte e glorioso Piemonte, che è circoscritta ad occidente dalla Savoia; a tramontana dal circondario d'Aosta; ad oriente dai due circondari di Biella e Vercelli; ed a scirocco da alcune delle vecchie terre Monferrine [...], o meglio da quel tratto della riva sinistra del Po, che dalla foce della Dora Baltea, risalendo verso libeccio, va sin oltre la Stura di Lanzo, dappresso la città di Torino. Quivi il confine, [...], volge a maestro, tra la Stura e la Dora Riparia, e va ad incontrare in alto la linea nordica del circondario di Sasa, con la quale chiudesi, appena incontra le terre orientali della Savoia. Entro quest'ambito sono 180 comuni, alcuni in pianura e sulle colline; molti sulle Alpi e sui contrafforti di queste. Dei quali paesi, quasi tutti frazionati in innumerevoli borghi e borghicelli, [...]. Il Canavese adunque è tutto in provincia di Torino, comincia proprio vicino questa nobilissima città, e si allarga bellamente a maestro, a tramontana ed a greco di essa, dalle pianeggianti terre bagnate dal Po, alle più sublimi creste delle Alpi Graje[...]”<sup>4</sup>.*

Etimologicamente il nome "Canavese" viene attribuito, nei documenti medievali, a differenti entità e per tale ragione non è possibile definirlo con estrema certezza ma ciò che si può dire a riguardo è che l'origine più attendibile sia quella che lega il nome della "regione" alla "curtis Canava".

Essa rappresentava un'entità economica-agraria basata su una porzione di suolo che disponeva di terre di diverso genere; si presentava costituita da un fondo dominante e da una serie di fondi dipendenti. La "curtis" Canavese rappresentava un grande punto

---

<sup>4</sup> PITRE G., DI GIOVANNI G., "Usi credenze e pregiudizi del Canavese", Libreria Internazionale L. Pedone Lauriel di Carlo Clausen, Palermo, 1889.

viario di notevole rilevanza commerciale, importante inoltre proprio per il passaggio di un tratto della via Francigena<sup>5</sup>.

Osservando poi tutta l'area che costituisce il Canavese si può notare la ricchezza geografica che la contraddistingue: si passa da una fascia montuosa, a nord, a una pianeggiante, a sud, attraverso una striscia collinare che è il cuore di quella che potremo definire una regione storico-grafica.

L'azione possente del ghiacciaio Balteo ha contribuito alla formazione del paesaggio del Canavese infatti proprio le colline, che costituiscono la fascia centrale del territorio, vennero a formarsi più di 20.000 anni fa a seguito del suo lento scioglimento.

Il ghiacciaio, migrando dal Monte Bianco fino alla pianura, invase tutta la zona del Canavese erodendo i monti circostanti e trascinando con sé i detriti che, nei millenni successivi e a seguito del suo ritiro, occuparono la pianura generando grossi e prolungati rilievi che presero il nome di morene.

Secondo alcuni autori<sup>6</sup> lo scioglimento del ghiacciaio diede vita ad un immenso lago che, nei secoli successivi, venne in parte colmato dai detriti costituenti le vicine colline moreniche, altri<sup>7</sup> invece sostengono che il lento e inesorabile evento naturale portò alla formazioni di numerosi ma piccoli bacini lacustri; a ogni modo sono testimonianza del suo passaggio i laghetti situati a nord di Ivrea insieme a quelli di Viverone e Candia<sup>8</sup>. A seguito di questo evento si verificò la nascita delle prime civiltà palafitticole; quest'ultime si insediarono nelle vicinanze dei laghi e dei fiumi del Canavese costruendo le prime abitazioni mediante l'impiego di piattaforme sostenute da pali infissi nel fondale.

La prima popolazione che si insediò nel territorio del Canavese, e probabilmente nella zona dell'attuale Candia, si presume sia stata quella dei Salassi<sup>9</sup>. Questa popolazione, di origine celtica, si espansero dalle Alpi verso sud fino alla valle della Dora Baltea e al Canavese, zone scarsamente abitate.

---

<sup>5</sup> Fonte: [www.corsac.org/curtem](http://www.corsac.org/curtem).

<sup>6</sup> BRUNO L., GASTALDI B. e SACCO F..

<sup>7</sup> CARRARO F. e PETRUCCI F..

<sup>8</sup> RAMELLA P., "YPOREGIA, Ivrea e Canavese nel Medioevo", Ivrea, 1997, p.21-22.

<sup>9</sup> Alcune notizie vengono riportate da Strabone, geografo e storico greco antico, in "Geografia".

I Salassi, celebrati da numerosi scrittori dell'antichità, si occupavano di caccia, di pesca e mostravano una dedizione all'industria mineraria in particolare alla ricerca dell'oro; fu proprio quest'ultimo che destò l'interesse dei Romani che, desiderosi di appropriarsene, trovano pretesto per dichiarare loro guerra.

Al tempo la popolazione dei Libui, presenti nel Vercellese, si lamentava dell'eccessivo spreco d'acqua da parte dei Salassi per il lavaggio dell'oro così i Romani, alleati ai Libui, trovano pretesto per muovere loro guerra.

Una prima battaglia fu vinta dai Salassi che però furono sconfitti durante una seconda battaglia proprio nei pressi del lago di Candia.

Così i romani riuscirono ad impossessarsi delle miniere d'oro e anche del territorio pianeggiante di Candia lasciando al popolo sconfitto solo la zona collinare.

Nel 100 a.C. fu fondata dai Romani la città di *Eporedia* (attuale Ivrea) strategicamente edificata sia come avamposto per controllare la popolazione dei Salassi, i quali recuperate le forze provarono nuovamente a riprendere potere con scarsi risultati, sia come punto di controllo per la via delle Gallie che passava per i valichi alpini della Valle D'Aosta.

Solo nel 22 a.C. la popolazione dei Salassi venne definitivamente sconfitta nei pressi della Valle d'Aosta per mano del console Varrone il quale fece schiavi i superstiti<sup>10</sup>.

Candia, come anche il resto del Canavese, divenne presto territorio conteso in quanto punto nodale di passaggio grazie alla rete di strade che vennero via via edificate e che misero in comunicazione i punti vitali del Nord Europa.

Si tratta quindi di una località strategicamente importante proprio perché dislocata lungo le grandi vie di comunicazione e ritenuta importante grazie al grande transito che prese a svilupparsi nel periodo medioevale.

Numerosi documenti del periodo riportano informazioni sulle principali vie di comunicazioni che vennero realizzate proprio in territorio Canavese; tra le più importanti va ovviamente citata la Via Francigena. Essa risultava essere il percorso più breve per raggiungere il Mare del nord partendo da Roma, collegando di fatto l'Italia all'Europa.

---

<sup>10</sup> FORNERIS G., *"Candia Canavese – Due passi e cento ricordi"*, Tipografia Litografia D. Bolognino, Ivrea, 1999, p. 15-24.

Nei secoli del medioevo suddetta via assunse numerose denominazioni: una volta intitolata *Strata Francexia* in onore dei Franchi, che ne avviarono la ristrutturazione per motivi probabilmente militari, successivamente chiamata *Via Romea* in ricordo dei pellegrini che si dirigevano verso Roma<sup>11</sup>.

Questa via di comunicazione è per la prima volta riportata e descritta nel resoconto di viaggio dell'arcivescovo di Canterbury Sigerico che, una volta eletto Vescovo intorno al 990, si diresse verso Roma dal Papa per partecipare alla cerimonia che lo avrebbe consacrato vescovo. Nel lungo viaggio, durato più di 80 giorni, il Vescovo Sigerico si fermò a visitare le chiese e i luoghi sacri del Canavese documentando tutto in un diario oggi custodito a Londra presso la *British Library*.



Figura 7: Cartografia Storica - La via Francigena.  
Fonte: [www.archiviofotografico.societageografica.it](http://www.archiviofotografico.societageografica.it)

---

<sup>11</sup> RAMELLA P., "YPOREGIA, Ivrea e Canavese nel Medioevo", Ivrea, 1997, p.30.

Si narra inoltre che il Vescovo Sigerico, durante la sua visita ad Ivrea, ebbe modo di incontrare il Vescovo Warmondo che, agli albori del suo pontificato, era impegnato nella ricostruzione della Chiesa di Ivrea.

Attorno all'anno Mille il potere episcopale esercitato dal Vescovo Warmondo sulla odierna diocesi di Ivrea entrò in conflitto quello laico istruito dal Marchese Arduino, successivamente divenuto re d'Italia.

Noti sono infatti gli aspri conflitti che si vennero ad instaurare tra questi importanti personaggi della scena politica del tempo.

Il più clamoroso tra tutti è sicuramente quello legato alla costruzione dell'Abbazia di Fruttuaria; infatti, proprio nel momento della conclusione dei lavori di ricostruzione che interessarono la Cattedrale di Ivrea, la famiglia del Marchese Arduino decise di edificare un maestoso luogo di culto che mise in ombra la Chiesa dedicata a Santa Maria fortemente voluta dal Vescovo Warmondo.

Fu proprio il nipote del Marchese Arduino, Guglielmo da Volpiano, una delle figure più importanti per la storia del romanico in Europa, noto abate riformatore e architetto di grande prestigio a guidare e promuovere la realizzazione dell'Abbazia di Fruttuaria<sup>12</sup>.



Figura 8: Campanile (sinistra) e facciata (destra) dell'Abbazia di Fruttuaria, San Benigno Canavese.  
Fonte: [www.archiviofotografico.societageografica.it](http://www.archiviofotografico.societageografica.it)

---

<sup>12</sup> FORNERIS G., *"Romanico in terre d'Arduino"*, Bolognino Editore, Ivrea, 1995 pag.2 - 5.

Essa venne costruita negli stessi territori diocesani, terreni in possesso della famiglia e noti con il nome di "*fructuariensis locus*". Questo luogo di culto fu anche centro di straordinaria diffusione di cultura per il Canavese e punto da cui numerosi monaci e laici qui istruiti partirono. Nonostante non si abbiano dati certi sull'anno di costruzione e di consacrazione del monastero, infatti alcuni documenti riconducono la sua consacrazione all'anno 1003 sotto il vescovato di Ottobiano altri asseriscono che l'anno di edificazione sia probabilmente il 1006, documentazioni storiche attendibili certificano che proprio la Chiesa di Santo Stefano al Monte fu Priorato dipendente da Fruttuaria nel XI secolo<sup>13</sup>.

## 1.2. L'area oggetto di studio

La Chiesa di Santo Stefano al Monte sorge sulla cima dell'antico Monte di Candia facente parte del complesso di colline moreniche formatesi nel corso dei successivi stazionamenti del ghiaccio Balteo che, trascinando con sé detriti e altri materiali, diede origine all'Anfiteatro Morenico di Ivrea. Si ritiene pertanto necessaria una descrizione, seppur breve, del contesto geografico all'interno del quale si inserisce l'edificio architettonico oggetto del presente lavoro di tesi.

L'Anfiteatro Morenico di Ivrea è un articolato complesso morenico testimonianza dell'episodio glaciale valdostano definito, per la sua morfologia e dimensione, "*il più chiaro, il più parlante, il più importante fatto geologico dell'alta valle del Po*"<sup>14</sup>.

Dal punto di vista geomorfologico è possibile distinguere quattro porzioni principali che costituiscono l'intero anfiteatro morenico.

Nella cartografia di seguito riportata vengono infatti rappresentati<sup>15</sup>:

- Il complesso delle cerchie moreniche (la cui altitudine non supera i 450 m) costituito da un settore frontale e due laterali che cingono la Dora Baltea e che in

---

<sup>13</sup> FORNERIS G., "*Candia Canavese – Due passi e cento ricordi*", Tipografia Litografia D. Bolognino, Ivrea, 1999, p. 38 - 41.

<sup>14</sup> GASTALDI B., "*Iconografia di alcuni oggetti di remota antichità rinvenuti in Italia*", Stamperia Reale, TORINO, 1869.

<sup>15</sup> GIANOTTI F., "*Stratigrafia dell'Anfiteatro Morenico di Ivrea*", Tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi di Torino, 2007, p. 95-119.

- definitiva ricalcano i perimetri successivamente occupati dal ghiacciaio Balteo durante il suo passaggio;
- Le colline rocciose, dovute al processo di erosione dei substrati del ghiaccio, che corrispondono ai Colli d'Ivrea;
  - La pianura esterna la cui formazione è stata favorita dai corsi d'acqua generati dallo scioglimento del ghiacciaio;
  - La depressione interna caratterizzata dalla presenza di una zona pianeggiante, avente quota inferiore a quella che circonda le cerchie moreniche, e dai laghi di Viverone e Candia, testimonianze dell'originario vasto lago che occupava l'intera parte centrale.

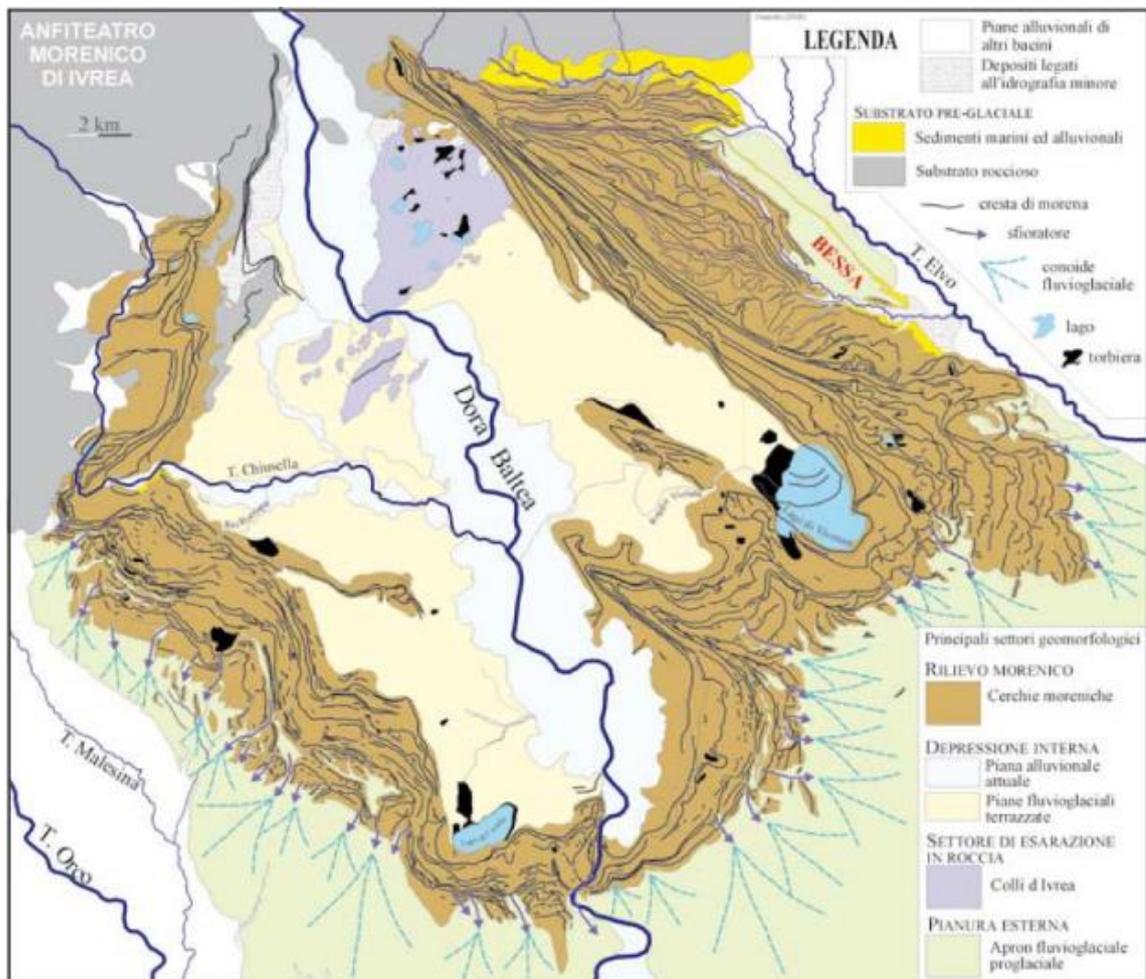


Figura 9: Rappresentazione cartografica delle principali porzioni che costituiscono l'Anfiteatro Morenico d'Ivrea.  
Fonte: F. Giannotti, "L'Anfiteatro Morenico d'Ivrea" in [www.nimbus.it](http://www.nimbus.it), p. 96.

### 1.2.1. Descrizione dell'organismo architettonico: la Chiesa di Santo Stefano al Monte

La chiesa di Santo Stefano al Monte sorge sul colle morenico di Santo Stefano, antico monte di Candia, da cui prende il nome. Si tratta della più grande chiesa romanica non urbana, ancora esistente, appartenente alla diocesi di Ivrea.

Non si hanno notizie certe sull'anno di costruzione ma si presume che, la sua edificazione, risalga al XI secolo periodo in cui fu resa Priorato dei Benedettini.

Il suo nome figura per la prima volta il 18 Giugno 1177 nella bolla papale: *"ecclesiam Sancti Stephani de Monte cum decimis et aliis partenentis suis"*<sup>16</sup> con la quale, il Papa Alessandro III, dichiara di prendere sotto la propria protezione questo luogo di culto e di concederlo ai canonici dell'Ospizio di San Bernardo, che alloggiavano in fabbricati realizzati sul versante sud della chiesa, come sito di ricovero per i pellegrini che, attraversando i faticosi varchi alpini, partivano dalle terre nei pressi del Mar del Nord per recarsi a Roma.

La chiesa di Santo Stefano al Monte svolse dunque un ruolo molto importante nel lungo periodo storico che va dal preromano fino al cristianesimo. Risale infatti alle tradizioni preromane una delle più antiche pratiche che in questo luogo di culto veniva svolta: l'utilizzo della chiave guaritrice in contrasto alla rabbia.

Alcune testimonianze<sup>17</sup> asseriscono che fedeli, viandanti e abitanti della zona si recavano in questa Chiesa per curare le ferite inferte da cani rabbiosi: una chiave rovente, resa incandescente negli ambienti della cripta, veniva posta sui lembi di pelle infetti con lo scopo di avviare il processo la cicatrizzazione e guarigione.

In riferimento a questa pratica si riporta un passo presente all'interno dell'opera di G. Cuffia:

*"[...]e quando taluno viene morso da cane arrabbiato lo si vede peregrinare al Santuario a dimandare la grazia della guarigione, e si conserva tuttora la chiave, colla quale solevano i Monaci nei tempi di mezzo cauterizzare la piaga del morsi-*

---

<sup>16</sup> BOBBIO C., "Le Chiese del Canavese", Tipografia Ditta F. Viassone, Ivrea 1910, p.20

<sup>17</sup> FORNERIS G., "Candia Canavese – Due passi e cento ricordi", Tipografia Litografia D. Bolognino, Ivrea, 1999, p. 119.

*cato arroventandone la punta alla fiamma accesa presso l'altare di Santo Stefano[...]"*.

Intorno al XII secolo, la Chiesa di Santo Stefano al Monte, fu protagonista di una prima sostanziale ricostruzione: l'abside centrale, crollata a causa dell'insistenza del notevole peso della costruzione su terreno instabile o forse a seguito del terremoto che colpì violentemente questa e altre terre, venne ricostruita.

Allo stesso momento è riconducibile la realizzazione della cripta situata in fondo alla navata centrale ad un livello di calpestio inferiore rispetto a quello di tutta la chiesa; essa si compone di tre piccole navate scandite dalla presenza di due file di colonne.

Per la realizzazione delle tre colonne e dei tre capitelli posti sulla destra vennero utilizzati materiali di reimpiego riconducibili al periodo longobardo, con buona probabilità, allocati nella cripta della pieve del paese, mentre, le restanti cinque colonne furono realizzate durante la costruzione della cripta.



Figura 10: Cripta di Santo Stefano - Dettagli dei capitelli di origine longobarda  
Fonte: foto di Ing. GROSSO M. A., [www.fondazione-isper.eu/chiese\\_piemonte/](http://www.fondazione-isper.eu/chiese_piemonte/)

La cripta fu dedicata a Santa Maria; al suo interno fu custodita per anni una statua raffigurante la Vergine Maria con in braccio il Bambino che si nutre di uva rossa (fino al 1970 anno in cui la chiesa venne restaurata e dopo il quale si decise di rimuovere la statua per motivi di sicurezza). Solo successivamente la chiesa fu intitolata a Santo Stefano.

Ma questo non fu l'unico lavoro di ricostruzione che interessò l'abside maggiore di questo edificio sacro infatti, in epoca barocca, l'abside, per ovviare a problemi di stabi-

lità, fu privata della sua parte superiore mentre venne lasciata integra la parte più bassa in corrispondenza della cripta.

Questa demolizione modificò l'altezza interna del coro rendendolo un luogo stretto e angusto, perciò si procedette con l'ampliamento della cripta a discapito della navata centrale. Venne rimossa la scala centrale, realizzate due rampe laterali per garantire l'accesso al presbiterio superiore e un muro piano sostituì definitivamente la concavità absidale della navata centrale.

Una prima descrizione è quella prodotta a seguito dalla visita pastorale di Monsignore Asinari che, nel 1651, si recò nella Chiesa di Santo Stefano.

Di seguito vengono riportati alcuni passi di questo importante documento, ritenuti fondamentali per conoscere lo stato di fatto, a quel tempo, e comprende gli aspetti artistici e architettonici di questo luogo sacro.

*"[...] questa chiesa molto antica, come appare dalla sua struttura, è formata da tre navate oblunghe, delle quali la media e la destra, entrando, hanno ancora interamente il tetto coperto da nude tegole, la sinistra non ha addirittura nessun tetto ed è tutta aperta; le pareti sono completamente rozze; il pavimento non è omogeneo, ma in parte di pietra e in parte di nuda terra.*

*Alla metà circa della navata maggiore è costruito il coro di questa chiesa, in luogo un poco elevato al quale si sale per tredici gradini di pietra disuguali.*

*Il coro ha il fornice intonacato, imbiancato e in parte rivestito con tavole di legno. Nel coro è costruito l'altare adorno di croce e di due candelieri di bronzo e di altri di legno molto antichi, un'unica tovaglia e una certa tela piegata in due al posto delle altre due tovaglie, la pietra sacra, che venne trovata senza sigillo, la cartagloria, un contraltare di lana lavorata in diversi colori e una piccola predella di legno.*

*Sull'altare sono poste tre tavole dipinte o quadri, dei quali quello di mezzo porta l'immagine di Santo Stefano e gli altri due ai lati: uno San Carlo e l'altro San Gerolamo; queste immagini sono apparse annerite e deformi.*

*Questa chiesa viene chiusa da una grande porta in fondo alla navata maggiore, presso la quale, alla sinistra entrando, ma all'esterno, era costruito il campanile,*

*al presente diroccato per metà e che serve soltanto come piccola abitazione di un certo eremita, che abita qui per tenere in ordine la chiesa. [...].*

*Sotto il coro predetto di questa chiesa è costruita una cappella in forma di chiesetta, costituita da tre piccole navate sostenute da tre colonnette per parte. Questa cappella ha il fornice abbastanza integro, ma alquanto annerito.*

*Il pavimento è selciato con piccole pietre: questa cappelletta si chiude con un unico uscio costruito dirimpetto alla porta della chiesa.*

*Ha due piccole finestre, o meglio due feritoie ai lati dell'altare. E' lunga otto e larga circa sei passi. Ha un unico altare situato in capo alla navata di mezzo, aderente al fondo, di mattoni e fisso, abbastanza piccolo, [...].*

*Sull'altare, invece dell'icona, è collocata una piccola statua di legno colorata della Madonna, al cui nome è dedicata questa cappella, col Bambino in braccio, chiusa in una nicchia di legno che si apre solo all'altezza del capo con un usciolo per il quale si può vedere la statua.*

*Dal lato dell'Epistola, sotto la navata destra di questa cappella, vi è un uscio per il quale si entra in una stanza rustica, che serve di abitazione all'eremita, il quale stanzino è quasi grande metà della navata destra della chiesa maggiore.*

*Dal lato del Vangelo, sotto la navata di sinistra, vi è un altro uscio, chiuso da un muro a secco, per il quale si entra nella navata sinistra della chiesa maggiore. [...]<sup>18</sup>.*

Oggi la Chiesa si presenta composta da tre navate scandite dalla presenza di due file di colonnati, a pianta rettangolare, collegati tra loro attraverso archi a tutto sesto.

Alcune fonti<sup>19</sup> a seguito di sopralluoghi e campagne di sondaggi svolti prima dell'inizio dei restauri del 1970, sostengono però che, in origine, la chiesa fosse ad un'unica navata e che solo in seguito fosse stata ampliata attraverso la creazione delle due navate laterali.

---

<sup>18</sup> FORNERIS G., "Candia Canavese – Due passi e cento ricordi", Tipografia Litografia D. Bolognino, Ivrea, 1999, p. 135 - 136.

<sup>19</sup> FORNERIS G., "Romanico in terre d'Arduino" (Diocesi di Ivrea), Bolognino Editore, Ivrea, 1995 pag.107

La navata centrale, la maggiore sia in altezza che in larghezza, è sormontata da capriate di legno<sup>20</sup>, mentre, le due navate laterali sono ricoperte da volte a crociera in muratura e intonacate.

In fondo alla navata centrale è allocato il presbiterio che risulta sopraelevato ad una quota pari a circa tre metri rispetto al piano di calpestio della restante chiesa; la pavimentazione della cripta sottostante si trova ad una quota inferiore rispetto a quella del pavimento delle tre navate (dislivello pari a circa 0,40 m).

Sul fondo della navata sud, in corrispondenza della penultima campata, si trova una cappelletta rettangolare detta "Il Paradiso" con volta a cupola affrescata<sup>21</sup> ai cui vertici sono posti quattro capitelli che sostengono le statue in stucco dei quattro evangelisti. Non si tratta dell'unico affresco presente all'interno della chiesa infatti, sui pilastri della navata centrale vengono raffigurate scene riguardanti il martirio degli apostoli Sant'Andrea e San Pietro mentre sulla facciata principale sono ancora visibili frammenti di affreschi dedicati alla passione di Cristo.

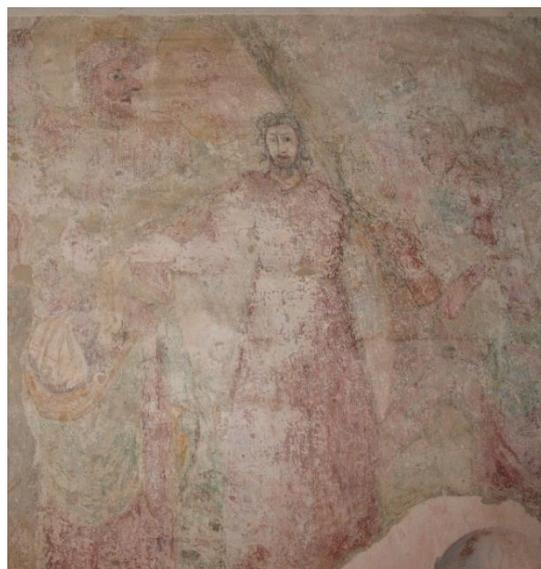


Figura 11: A sinistra "L'incoronazione della Vergine", affresco presente sulla volta della cappelletta in fondo alla navata sud, e a destra "la Passione di Cristo", affresco ritrovato sulla facciata principale.

Fonti: [www.chiesasantostefano.it](http://www.chiesasantostefano.it), [www.fondazione-isper.eu](http://www.fondazione-isper.eu).

---

<sup>20</sup> Nel 1970, durante gli interventi di restauro, la rimozione della volta centrale ha riportato in vista le capriate.

<sup>21</sup> Si tratta di una decorazione pittorica raffigurante l'incoronazione della Vergine. Al centro, tra il Padre e il Figlio, viene rappresentata la Vergine Maria che porta sul capo una corona di foggia medioevale; la colomba sovrastante rappresenta lo Spirito Santo. A contornare questa scena vi sono rappresentati dei putti e quindici uomini tra i quali vi sono gli undici apostoli. C. Caramellino, Ivrea 1980, p. 25, G. Forneris, Candia Canavese, op. cit., p. 149.

### 1.2.2. Materiali e tecniche costruttive

La descrizione dei materiali e delle tecniche costruttive è il risultato combinato della consultazione di testi, riportanti informazioni sui sistemi costruttivi e sui materiali impiegati per la realizzazione di edifici riconducibili al XI secolo presenti sul territorio, con le deduzioni personali scaturite dall'esame dell'edificio oggetto di studio.

Guardando l'edificio nel suo complesso emerge chiaramente come la scelta dei materiali da impiegare e delle tecniche costruttive da mettere in atto sia stata fortemente influenzata dalle risorse ambientali del luogo.

I muri d'ambito si compongono di ciottoli di fiume, di dimensione variabile, e frammenti di laterizi (in percentuale sostanzialmente inferiore) legati da abbondante calce.

Lo schema costruttivo utilizzato per la loro realizzazione è quello del doppio paramento infatti la muratura risulta ben apparecchiata e legata.

Questa tecnica costruttiva prevede anzitutto la realizzazione dei cantonali, zone dell'apparato murario che garantiscono l'ammorsatura dei muri d'ambito; si procede dunque all'apparecchiatura, in contemporanea, del paramento interno e del paramento esterno per tutto la lunghezza perimetrale.

L'impiego di diatoni, posti ortogonalmente al piano murario, garantisce il corretto ingranamento dei due paramenti.

L'elevazione della muratura avviene procedendo per fasce; tra due fasce consecutive vengono realizzati dei ricorsi disposti in filari orizzontali detti di ripianamento che, attraversando l'intero spessore del muro, hanno il compito di creare un piano livellato, regolarizzando l'andamento della muratura, e conferire qualità strutturale alla muratura.

La distanza tra un ripianamento e l'altro risulta regolare e, a quel tempo, si basava su uno dei sistemi di misurazione geometrica in uso nel medioevo ovvero il "piede di *Liutprando*<sup>22</sup>". Ai fini di questo caso di studio si è preso come misura di riferimento quella attribuita al piede di *Liutprando* di Torino; questa scelta è supportata dal fatto, come

---

<sup>22</sup> Una leggenda narra che il re dei Longobardi Liutprando, a seguito di alcune lamentele mosse dai propri sudditi nei confronti dei mercanti circa inganni durante le transazioni commerciali, decise di fissare una unità di misura definitiva da seguire durante le procedure di compravendita; la base di questa precisa unità di misura era proprio la dimensione del suo piede. Fonte: [www.tuttostoria.net/medio-evo](http://www.tuttostoria.net/medio-evo).

riportano diverse fonti<sup>23</sup>, non esiste un'univoca misurazione attribuibile al piede infatti, il suo valore varia da epoca a epoca e da località a località mantenendosi in un intervallo che va da 39,2 cm a 54,4 cm. La misura originaria, considerata da diversi storici la più probabile, è quella che definisce il piede di Liutprando pari a 44,32 cm ovvero pari al cubito romano.

Piede di <i>Liutprando</i>		Piede di <i>Liutprando</i> di Torino	
Piede	44,32 cm	Piede	51,44 cm
Oncia	3,69 cm	Oncia	4,28 cm

Tabella 1: Valore e sottomultiplo attribuito al piede di Liutprando.

Nella tabella sono riportati e confrontati: il valore del piede di *Liutprando* considerato il più attendibile e l'oncia, sottomultiplo che corrisponde ad un dodicesimo del suo valore; il valore del piede di Liutprando di Torino e il valore della corrispondente oncia<sup>24</sup>. Un'attenta osservazione della tessitura muraria permette a questo punto di ipotizzare che il ritmo di erezione risulti legato ad uno sviluppo, in verticale, pari a circa 2 Piedi di Liutprando di Torino che quindi corrispondono a 22 oncie.

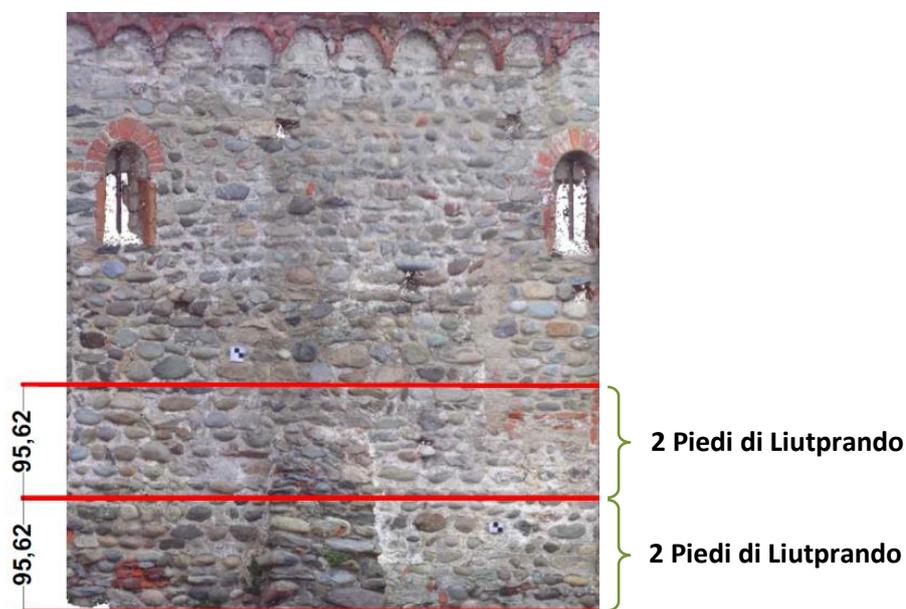


Figura 12: Stralcio dell'ortofoto del prospetto Sud ottenuto dalla nuvola di punti della Chiesa di Santo Stefano. Schema proprio di misurazione basato sul "Piede di Liutprando" (le quote sono in cm).

<sup>23</sup> MARTINI A., "Manuale di metrologia, ossia misure, pesi e monete in uso attualmente e anticamente presso tutti i popoli, Torino, 1883; A. Arecchi, "La leggenda di Liutprando e il piede di Liutprando"; [www.liutprand.it](http://www.liutprand.it).

<sup>24</sup> I valori riportati sono stati dedotti da comparazioni e calcoli personali tenendo conto delle seguenti fonti: [www.liutprand.it/articoliPavia](http://www.liutprand.it/articoliPavia), [www.verbanensia.org](http://www.verbanensia.org).

Poiché diversi sono stati gli interventi di restauro e ripristino che hanno interessato la chiesa di Santo Stefano al Monte si è scelto di procedere descrivendo l'edificio oggetto di studio dividendola per parti; si procederà dunque analizzando i prospetti e relativi componenti architettonici singolarmente.

### **Prospetto Ovest**

La facciata a salienti denuncia la pianta basilicale a tre navate ed è caratterizzata dalla posizione decentrata del portale di ingresso poiché, come testimonia il documento riportato<sup>25</sup>, in origine la parte centrale del prospetto era occupato da un campanile a pianta quadrata.

Uno dei quattro lati della torre campanaria, quello ad est, era completamente inglobato nella facciata orientata della chiesa mentre gli altri tre risultavano esterni all'edificio. Oltre ai resti basali, di cui ancora oggi rimane traccia visibile, la presenza di una coppia di specchiature con archetti pensili binati nella controfacciata confermerebbe quanto detto.



Figura 13: Chiesa Santo Stefano al Monte. Prospetto Ovest.  
Fonte: fotogramma acquisito da drone.

---

<sup>25</sup> Si fa riferimento al documento redatto dal Mons. Asinari a seguito della visita pastorale avvenuta nel 1651.

Sopra l'architrave della porta è posto un arco di scarico a sesto rialzato; la lacuna sovrastante il portale di accesso in corrispondenza della navata centrale fa presupporre l'originaria presenza di un affresco<sup>26</sup>. Nella controfacciata sopra la porta vi è una monofora cieca.



Figura 14: Arco a sesto rialzato e affresco al di sopra del portale di ingresso (a sinistra) e finestra monofora cieca e impronta della coppia di specchiature con archetti pensili binati nella controfacciata (a destra).

Fonte: foto di Martina Muscarà, [www.fondazione-isper.eu](http://www.fondazione-isper.eu).

### **Prospetto Nord**

L'assenza di aperture rende il prospetto completamente cieco. I giunti, in malta di calce, sono sensibilmente evidenti e, in alcune parti, sono chiaramente visibili rabbocchi interstiziali atti a colmare lo spazio tra i ciottoli.

La parte superiore del muro d'ambito, in corrispondenza della navata sinistra, risulta intonacata e affrescata: si presume che, sui rinzaffi di ripianamento, sia stata operata la stilatura dei giunti per livellare e preparare la superficie alla successiva intonacatura. Gli esigui frammenti di affresco presenti sulla parete sono quello che rimane di un antico affresco popolare noto come "Danza della Morte"<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Si ipotizza che nell'affresco fosse rappresentato San Cristoforo protettore dei viandanti.

<sup>27</sup> Esso viene anche indicato con il titolo di "Danza Macabra" o "Trionfo della Morte" nell'opera di Fornaris G., op. cit, p. 141.

Nella mezzeria della facciata è presente uno sperone; la parte superiore del prospetto è suddivisa in cinque parti da quattro lesene.



Figura 15: Chiesa di Santo Stefano al Monte. Prospetto Nord.  
Fonte: Ortofoto ottenuta dalla nuvola di punti finale.

Un filare di materiale lapideo, opportunamente squadrato, è posto sulle sommità dei muri a supporto del sovrastante manto di copertura in coppi.



Figura 16: Resti dell'affresco della "Danza della Morte".  
Fonte: foto di Martina Muscarà.

### **Prospetto Est**

Il prospetto est si compone di tre absidi semicircolari ed è caratterizzato dalla presenza di un campanile a base triangolare risalente all'epoca barocca.

L'abside centrale intonacata risulta suddivisa in tre parti da due paraste in prossimità delle quali emergono due bolzoni; l'illuminazione della cripta, dedicata alla Vergine Maria, è garantita dalla presenza di tre monofore doppiamente strombate con archivolto in mattone.

Come precedentemente detto, l'abside maggiore è stata protagonista di interventi di demolizione e ricostruzione che hanno richiesto la realizzazione di un arco di sostegno per i muri d'ambito (nord e sud).



Figura 17: Vista aerea del prospetto absidale (a sinistra) e focus sull'abside centrale (a destra).

Fonte: fotogramma da drone, foto di Paolo Maschio.

L'abside di sinistra è caratterizzata dalla disposizione dei ciottoli e dei frammenti di laterizio a lisca di pesce.

La tessitura muraria è visibile solo nella parte inferiore dell'abside che, attraverso una lesena, viene suddivisa in due parti nelle quali sono collocate due monofore doppiamente strombate con archivolto in mattoni; la parte superiore risulta intonacata e presenta due aperture rettangolari di cui una tamponata.

La muratura dell'abside di destra è in buona parte costituita da laterizi. Una lesena suddivide l'abside in due parti.



Figura 18: Operazione di rigatura nell'abside sud (a sinistra), lesena e monofora dell'abside nord.

Fonte: foto di Paolo Maschio.

### **Prospetto Sud**

Il prospetto sud è scandito dalla presenza di paraste che, sviluppandosi per tutta l'altezza della facciata, dividono lo stesso in quattro parti distinte.

Nella parte inferiore della facciata sono presenti cinque monofore a doppia strombatura con archivolt in laterizio e due porte di cui la prima, posta in mezzeria, conduce direttamente alla navata sud della chiesa, la seconda, in fondo alla navata, si trova in corrispondenza dell'ultima campata dove è stata ricavato un piccolo ambiente di servizio. La parete è stata rinforzata attraverso la realizzazione di due contrafforti a sperone.

Nella parte superiore del prospetto troviamo quattro aperture: due monofore sulla sinistra e due ampie finestre rettangolari sulla destra; tracce di tamponatura fanno ipotizzare che originariamente questa parte fosse scandita dalla presenza di cinque finestre tutte rettangolari e della stessa dimensione.

L'intera facciata è caratterizzata dalla presenza di archetti pensili continui su peducci divisi da lesene in gruppi il cui numero non risulta essere omogeneo; per tale motivo non risulta possibile risalire al periodo esatto della sua realizzazione ma rimane verosimile l'ipotesi che, questa parte della chiesa, sia stata realizzata nel XI secolo (anno presunto di costruzione della chiesa).



Figura 19: Chiesa di Santo Stefano al Monte. Prospetto Nord.  
Fonte: Ortofoto ottenuta dalla nuvola di punti finale.



Figura 20: Archetti pensili ad armilla falcato su peducci.  
Fonte: foto di Martina Muscarà.

### 1.3. Riferimenti normativi per la descrizione dello stato di conservazione

Negli ultimi anni i temi riguardanti la valorizzazione, la salvaguardia e la conservazione del patrimonio architettonico sono al centro dell'interesse di tutte le figure professionali del settore dell'edilizia e del restauro.

Numerosi sono i trattati che hanno affrontato suddette tematiche tra questi sono citati la Carta di Atene e la Carta del Restauro.

Il primo documento ovvero la Carta di Atene del 1931<sup>28</sup> sottolinea come l'interesse verso la conservazione del patrimonio artistico e archeologico debba essere universalmente condiviso e viene manifestata la necessità di acquisire strumenti per l'archiviazione della documentazione riguardante il bene culturale censito.

Segue poi, nel 1972, la Carta del Restauro che, nel definire l'intervento conservativo come operazione *"volta a mantenere in efficienza l'edificio, a facilitarne la lettura e a trasmetterlo integralmente al futuro, senza alterare e rimuovere le patine e senza attuare rimozioni o demolizioni che cancellino il passaggio dell'opera attraverso il tempo"*<sup>29</sup>, chiarisce come sia importante in tal senso una manutenzione periodicamente programmata.

La chiesa di Santo Stefano al Monte è stata protagonista di diversi interventi di demolizione, ripristino e restauro; l'ultimo, risalente al 1970, ha previsto<sup>30</sup>:

- lo scrostare l'intonaco lungo il perimetro esterno e in certi punti dell'interno riportando alla luce la struttura muraria;
- il rifacimento del tetto della navata centrale con la sostituzione della volta in muratura in capriate lignee (intervento avallato dall'ipotesi che questa fosse la copertura originaria);
- il rifacimento della pavimentazione interna in mattonelle in cotto;
- la riapertura di porte e finestre che risultavano essere state tamponate.

---

<sup>28</sup> Approvata a seguito della Conferenza internazionale di esperti per la protezione e la conservazione dei monumenti di arte o storia.

<sup>29</sup> SCARZELLA P., ZERBINATTI M., "Recupero e conservazione dell'edilizia storica", Alinea Editrice, Firenze 2009, p. 5.

<sup>30</sup> Fonte: documento pdf redatto dell'Arch. Clara Castelnuovo in [www.chiesasantostefano.it](http://www.chiesasantostefano.it), 1992, p.4.

L'impostazione di un'attività volta alla conoscenza del manufatto storico è di fondamentale importanza ed è punto di partenza per lo sviluppo di un progetto di conservazione e recupero nel rispetto dell'edificio sul quale si intende intervenire.

Suddetta attività richiede di indagare sugli aspetti storici che legano il manufatto al contesto, interpretando in maniera critica quali sono gli aspetti culturali e ambientali che hanno contribuito alla sua evoluzione; il tutto dovrà infine essere accompagnato da un rilievo attraverso il quale sarà possibile leggere le caratteristiche architettoniche che contraddistinguono il manufatto<sup>31</sup>.

La conoscenza dei materiali e delle tecniche costruttive impiegate per la realizzazione del manufatto è attività imprescindibile per un'attenta analisi dello stato di conservazione e delle patologie di degrado che interessano l'edificio.

In Italia, per quanto riguarda quest'ultima tematica, si è ritenuto importante procedere alla classificazione di quei parametri che, direttamente o indirettamente, possono incidere sullo stato conservativo dei materiali.

Gli strumenti normati a cui fare riferimento sono:

- Raccomandazioni Normal 1/88, *"Alterazioni dei materiali lapidei e trattamenti conservativi. Proposte per l'unificazione dei metodi strumentali di studio e di controllo"*, 1988;
- UNI 11182:2006, *"Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni"*.

Tutti i materiali, in relazione alle loro caratteristiche intrinseche, in determinate condizioni ambientali e sotto l'azione di agenti di natura fisica, chimica e biologica, sono soggetti a fenomeni di alterazione e di degrado.

Per alterazione si intende quel processo di trasformazione del materiale che non implica necessariamente un peggioramento sotto il profilo conservativo<sup>32</sup>, mentre, per degrado si intende quel processo di trasformazione che determina un passaggio da una

---

<sup>31</sup> SCARZELLA P., ZERBINATTI M., "Recupero e conservazione dell'edilizia storica", Alinea Editrice, Firenze 2009, p. 7-8.

<sup>32</sup> La definizione è tratta dal documento Normal 1/88 *"Alterazioni Macroscopiche dei materiali lapidei: Lessico"*.

condizione superiore ad una inferiore; sotto il profilo conservativo questa trasformazione implica comunque un deterioramento dell'integrità fisica e dell'efficienza prestazionale del materiale che però è da considerarsi nella norma quando legata al naturale invecchiamento degli elementi architettonici sottoposti agli agenti atmosferici, viceversa, può assumere carattere patologico quando la presenza di situazioni di perturbazione accelerano il naturale degrado dell'edificio.

Bisogna inoltre considerare che ogni patologia di degrado accertata non può essere ricondotta ad un singolo fattore scatenante poiché, all'origine, vi è sempre una concausa di eventi che sostanzialmente dipendono dalle caratteristiche proprie del materiale, dalle tecniche costruttive adottate e dai fattori che si presentano successivamente alla costruzione.

Il processo degenerativo può quindi essere considerato come la risposta del materiale alle sollecitazioni esterne. Tale risposta può essere di:

- natura chimica, con conseguente variazioni dello stato di fatto del materiale;
- natura fisica, con la determinazione di stress meccanici, tensioni, fratture, deformazioni e aumento di porosità dei materiali;
- natura biologica (presenza di biodeterogeni), che possono provocare disgregazione e distacco dei materiali.

Sudette sollecitazioni risultano essere riconducibili a fattori climatici naturali e a fattori antropici.

I principali fattori climatici che, mediante un azione prolungata nel tempo, provocano l'insorgere di patologie di degrado sono la pioggia, il vento, le radiazioni solari, e la variazione di temperatura.

L'acqua piovana, ad esempio, può essere causa o concausa del deterioramento del substrato materico che la trattiene.

Il vento può provocare abrasioni poiché spesso è veicolo di parti solide, o ancora, in base alla sua intensità, può accelerare l'evaporazione dell'acqua con cristallizzazione di sali determinando l'aumento di volume dei materiali porosi.

L'azione combinata della pioggia e del vento può provocare erosioni ed esportazione del materiale danneggiato.

Le radiazioni solari sono alla base del fenomeno di alterazione cromatica e, l'eccessivo irraggiamento del materiale può provocare dilatazione termica con conseguenti deformazioni e fessurazioni.

La variazione di temperatura, che provoca stress meccanici nel materiale, è la principale causa del fenomeno di inversione termica che provoca il ristagno di agenti inquinanti.

Il fenomeno di crioclasismo è tra i più ricorrenti fenomeni fisici legati alla variazione di temperatura; questo si presenta quando, a basse temperature, l'acqua presente nel materiale poroso si trasforma in ghiaccio. Se la temperatura si mantiene bassa i cristalli di ghiaccio, che si vengono a formare all'interno dei pori del materiale, tendono a crescere assorbendo l'acqua ancora allo stato liquido: il risultato è che alla contrazione di volume del materiale si accosta la pressione esercitata dai cristalli di ghiaccio provocando così decoesione tra i vari strati, microfessurazioni e disgregazione.

I fenomeni di origine chimica provocano processi di decadimento dovuti sostanzialmente alla cristallizzazione salina; l'acqua, carica di sali, migra dall'interno delle murature verso l'esterno delle superfici dove evapora lasciando depositare i sali che si cristallizzano. Tale processo può provocare l'erosione alveolare delle superfici esposte al vento.

I fenomeni di natura biologica, attraverso l'innescò di organismi biodeteriogeni nel materiale, possono comportarne il biodeterioramento; spesso, tale degrado, si manifesta a seguito di un processo di degrado già avviato dovuto, ad esempio, all'esposizione del materiale all'aggressività dell'ambiente.

Ad ogni modo, il principale agente di degrado è senza dubbio l'acqua che, penetrando nel materiale, ne causa il deterioramento.

La presenza di umidità, per quanto riguarda le parti della muratura più vicine al terreno, può essere dovuta alla concausa di molteplici fattori; tra le principali concorrono sicuramente: l'acqua meteoriche (pioggia e neve depositate sul suolo), l'acqua di risalita capillare, l'acqua di condensazione e quella di infiltrazione<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> SCARZELLA P., ZERBINATTI M., "Recupero e conservazione dell'edilizia storica", Alinea Editrice, Firenze 2009, p. 54.

Una delle patologie di degrado che va ricondotta al fenomeno dell'umidità è sicuramente la disgregazione dei giunti esterni dei muri d'ambito; l'acqua che è presente nel terreno, per via di precipitazioni meteoriche o per la presenza di falda nel sottosuolo, risale per capillarità avviando il processo degenerativo della muratura.

L'esposizione prolungata all'acqua può causare l'indebolimento e la variazione delle proprietà intrinseche del materiale che, in questo modo, diviene sede di colonizzazioni biologiche; la crescita di microrganismi conduce a fenomeni di biodeterioramento del materiale.



Figura 21: Abside Nord della Chiesa di Santo Stefano al Monte: Disgregazione dei giunti e presenza di colonizzazione biologica.

Fonte: foto di Paolo Maschio.

La presenza di fessurazioni e lesioni, possono interessare sia gli strati più superficiali che quelli sottostanti, è spesso sono da imputare ad uno stato di stress meccanico a cui è soggetto il materiale; questo stato degenerativo può a sua volta accelerare il processo di infiltrazione dell'acqua piovana negli strati che compongono la muratura fino a giungere all'interno dell'edificio.

La presenza di umidità all'interno della muratura è causa dell'aumento del tasso di umidità degli ambienti chiusi e direttamente a contatto con essa; nello specifico, le zone che presentano un elevato tasso di umidità relativa, sono spesso soggette alla presenza di "muffe", variazione di colore della superficie e disgregazione superficiale.

In definitiva la presenza di questo fenomeno, tra i più comuni nell'edilizia storica, influisce notevolmente sullo stato di conservazione di tutte le parti che compongono l'edificio e causa l'insorgere di numerose patologie di degrado.

Come già detto la Chiesa di Santo Stefano al Monte sorge sulla cima di una collina, pertanto in continuo e diretto contatto con gli agenti climatici e ambientali; inoltre, l'edificio, è circondato da un fitto bosco di alberi di notevole dimensione (alberi di castagno) che nello specifico invadono il perimetro sud ed est dell'edificio; risulterebbe pertanto opportuno monitorare questa situazione contemplando possibili interventi manutentivi.

La porosità della pietra, la presenza di umidità, l'apporto di sostanze organiche, l'esposizione dell'edificio alle intemperie unitamente ad una probabile scarsa manutenzione hanno portato sono tutte condizioni che influenzano il possibile insorgere di organismi vegetali.

Detto ciò risulta chiara la necessità di avviare una programmazione di interventi per la conservazione e la manutenzione con lo scopo di salvaguardare il presente bene storico, testimonianza architettonica ed artistica del romanico nella diocesi di Ivrea.

## **2. Tecniche e metodologie di rilievo 3D applicate al Patrimonio**

### **Architettonico**

In Italia il tema della salvaguardia e della conservazione del patrimonio culturale, in tutte le sue forme (architettonica, artistica, archeologica, paesaggistica), riveste un ruolo molto importante ed è argomento condiviso da molteplici enti e figure professionali.

Negli ultimi anni l'avvento di nuove tecnologie, nell'ambito del rilievo e della modellazione tridimensionale, ha fornito un notevole contributo in termini di valorizzazione e di condivisione delle conoscenze dimostrandosi, innanzitutto, efficiente supporto per la documentazione dello stato di fatto dei beni architettonici e poi mezzo utile per un'analisi del suo stato di conservazione, punto di partenza per le procedure di restauro e manutenzione.

L'impiego di tecnologie innovative, supportate da quelle tradizionali, consente di ottenere un risultato in termini di precisione, tempistiche e risoluzione finale ottimale presupponendo però la conoscenza e la comprensione delle forme geometriche, architettoniche, delle caratteristiche materiche, costruttive che la compongono.

La scelta e la combinazione delle differenti tecnologie, con lo scopo ultimo di generare modelli di altissima qualità in grado di fornire informazioni sulle coordinate spaziali e sulle caratteristiche cromatiche, presuppongono una pianificazione preventiva e delle accortezze operative a partire dalla fase di acquisizione dei dati; va in definitiva stabilito a priori che risultato si vuole ottenere durante le procedure di rilievo e quale l'accuratezza a cui si tende della sua rappresentazione finale.

Tra le tecniche innovative oggi a nostra disposizione, sono state impiegate per questo lavoro di tesi: la tecnica LiDAR<sup>34</sup> che si basa sulla misurazione di distanza attraverso un sistema di impulsi *laser* e che permette di ottenerne una rappresentazione grafica e la fotogrammetria aerea che a partire da un dato bidimensionale (immagine) acquisito tramite UAV<sup>35</sup>, permette di generare un modello finale tridimensionale e texturizzato.

---

<sup>34</sup> LiDAR è l'acronimo di *Light Detecting And Ranging*.

<sup>35</sup> UAV è l'acronimo di *Unmanned Aerial Vehicle*.

In definitiva l'uso di metodologie e strumentazioni tipiche della topografia, della fotografia e del laser scanning permette di ottenere un rilievo dotato di precise caratteristiche che prende il nome di rilievo metrico<sup>36</sup>.

Detto ciò l'integrazione di queste due tecnologie innovative, supportate dalle tecniche di rilevamento topografico tradizionali, ha permesso di ottenere un modello finale georeferenziato e completo nelle sue informazioni e caratteristiche.

METODI		STRUMENTI	APPLICAZIONI
Diretto e strumentale		Distanziometri	Rilievo di oggetti architettonici
		Stazione totale	
		Strumentazione tradizionali	
Fotogrammetria stereoscopica	Aerea	Camera	Rilievo di complessi architettonici a grande scala
		Software di restituzione stereoscopica	
	Terrestre	Camera	Rilievo di superfici architettoniche
		Software di restituzione stereoscopica	
Fotogrammetria da singolo fotogramma	da camera metrica	Camera metrica	Rilievo di superfici architettoniche perfettamente planari
		Cavalletto	
		Software di calcolo	
	speditiva	Camera	Rilievo di superfici architettoniche perfettamente planari. Ortogonalità tra i piani di definizione dell'oggetto
		Software di raddrizzamento	
Restituzione fotogrammetrica 3D	multimmagine monoscopica	Camera	Rilievo e modellazione di oggetti architettonici
		Software per fotomodellazione	
	da panoramica sferica	Camera	Rilievo e modellazione di oggetti architettonici. Documentazione realistica dalle superfici
		Cavalletto	
		Software per mappatura panorami sferici	
		Software di restituzione	
	Scanner Laser 3D	aerea	Scanner Laser 3D
Notebook			
terrestre		Scanner Laser 3D	Rilievo di superfici e oggetti architettonici
		Notebook	
del vicino		Scanner Laser 3D	Rilievo di particolari e piccoli oggetti
		Notebook	

Tabella 2: Schematizzazione dei metodi, degli strumenti e delle applicazioni per il rilievo metrico.  
Fonte: CLINI P., "Il rilievo dell'architettura. Tecniche, metodi ed esperienze", Alinea Editrice, Firenze, 2008, p. 14.

<sup>36</sup> Dispense TEAM DIRECT, TEAM POLICYCLE, "Rilievo metrico 3D. Aspetto organizzativo della tecnica topografica", Politecnico di Torino, p. 30.

## **2.1. Il rilievo topografico**

Il rilievo topografico è definito come “l’insieme delle operazioni di misurazione e dei procedimenti che è necessario portare a termine per ottenere una rappresentazione grafica, a scala ridotta, e/o numerica (coordinate spaziali in un dato sistema di riferimento scelto) del territorio”<sup>37</sup>.

Suddette operazioni possono essere distinte in:

- operazioni di campagna: ovvero l’insieme delle operazioni che, mediante l’impiego di apposite strumentazioni, permettono di acquisire le misure di un numero limitato di punti e attraverso le quali è possibile ottenere una rappresentazione grafica dell’oggetto rilevato;
- operazioni di calcolo: consistono in tutte le iniziative di calcolo che interessano i dati acquisiti e che sono volte a ottenere la posizione spaziale dei punti caratteristici scelti per la rappresentazione spaziale;
- operazioni di disegno: ovvero il complesso delle procedure finali del rilievo topografico che permettono di trasformare le informazioni ottenute dalle operazioni precedenti in rappresentazioni grafiche.

La buona riuscita di un rilievo topografico presuppone anzitutto la conoscenza morfologica dell’ambiente che ci si avvia a rilevare, la precisione a cui tende il rilievo e la definizione preventiva della scala di rappresentazione che si vuole ottenere; quest’ultima infatti condiziona la scelta degli strumenti da utilizzare nelle operazioni di rilievo così come il numero totale di punti da acquisire.

Nel rilievo di piccole porzioni di terreno e, come nel caso del lavoro di tesi, di manufatti architettonici sarà necessario procedere dal “generale al particolare”<sup>38</sup> impostando in primis una rete di appoggio, attraverso la quale verrà definita la geometria generale, poi questa potrà essere intensificata da nuovi punti generando così una rete di raffit-

---

<sup>37</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., *“Genesi e definizioni”* in *“Misure, rilievo, progetto”*, Zanichelli, Bologna, 2012, p. 11.

<sup>38</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., *“Inquadramento generale”* in *“Misure, rilievo, progetto”*, Zanichelli, Bologna, 2012, p. 2.

timento fino a ottenere quella che prende il nome di rete di dettaglio attraverso la quale si potrà ottenere la mappa dell'area rilevata.

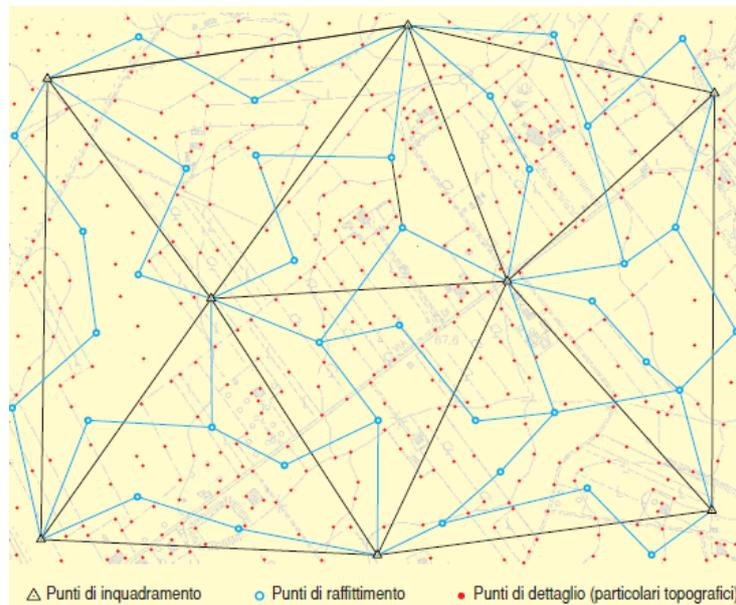


Figura 22: Schema di copertura di un territorio con la classica metodologia topografica: "dal generale al particolare".

Fonte: CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "Inquadramento generale" in "Misure, rilievo, progetto", Zanichelli, Bologna, 2012, p. 3.

Il principio fondamentale su cui il rilievo si basa, è quello di considerare sin da subito il manufatto nel suo insieme e non per parti distinte e scollegate tra loro; per questo motivo la procedura di raffittimento dei punti caratteristici dovrà interessare tutte le porzioni che lo compongono e con lo scopo di metterle in relazione tra loro e con il complesso<sup>39</sup>.

Nella procedura di rilievo il mezzo più comunemente usato è la stazione totale che, attraverso l'integrazione tra il classico teodolite elettronico, il distanziometro e un computer, permette di misurare distanze e direzioni, di verificarle prontamente attraverso un display integrato, di eseguire calcoli preliminari sulla base delle misure effettuate e infine di archiviare l'insieme dei dati acquisiti<sup>40</sup>.

---

<sup>39</sup> Dispense TEAM DIRECT, TEAM POLICYCLE, "Rilievo metrico 3D. Aspetto organizzativi della tecnica topografica", Politecnico di Torino, p. 34.

<sup>40</sup> MIGLIACCIO F., "Sistemi informatici e cartografia", Maggioli Editore, Milano, 2007, p.115.

Oggi la classica metodologia di rilevamento topografico è stata integrata da quella satellitare che vede l'introduzione del GPS<sup>41</sup> come strumento in grado di determinare la posizione reciproca tra i punti caratteristici con elevata precisione e senza che essi siano necessariamente intersvisibili, di definire direttamente le coordinate dei vertici in un sistema di riferimento assoluto e infine, il suo impiego su mezzi in movimento come per esempio, aerei, elicotteri e droni, permette di definirne la traiettoria seguita in ogni punto.

Quanto fino a questo punto descritto è stato impiegato nel lavoro di tesi svolto come punto di partenza e poi integrato con le più moderne tecnologie nell'ambito del rilievo metrico.

Di seguito si procederà alla loro descrizione analizzandone le caratteristiche, i principi di funzionamento, le modalità di applicazione e le possibili restituzioni finali.

## 2.2. La tecnologia LiDAR

La tecnologia LiDAR<sup>42</sup> consente di acquisire, in maniera sistematica e automatica, informazioni sulle coordinate spaziali di una superficie o di un'oggetto attraverso l'uso di un sistema di impulsi *laser*.

Essa è nota anche come tecnica *laser scanning* e prende il nome dalla sorgente del sistema che è appunto il *LASER*<sup>43</sup>; si tratta di un fascio luminoso direzionale a elevata intensità che, una volta intercettata la superficie riflettente, è in grado di ritornare alla sorgente da cui è stata emessa.

La radiazione luminosa svolge dunque un ruolo principale nelle operazioni di misurazione e, per tale motivo, i sensori impiegati in questa tecnologia di rilevamento prendono il nome di sensori ottici attivi poiché non dipendono da altre fonti luminose<sup>44</sup>.

---

<sup>41</sup> GPS è l'acronimo di *Global Positioning System*; si tratta di un sistema di posizionamento satellitare globale costituito da una costellazione di 24 satelliti che emettono degli impulsi elettromagnetici in direzione della terra, questi vengono captati da particolari ricevitori che ne determinano la posizione.

<sup>42</sup> LiDAR è l'acronimo *Laser Imaging Detection and Ranging*.

<sup>43</sup> LASER è l'acronimo di *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*.

<sup>44</sup> RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p. 170.

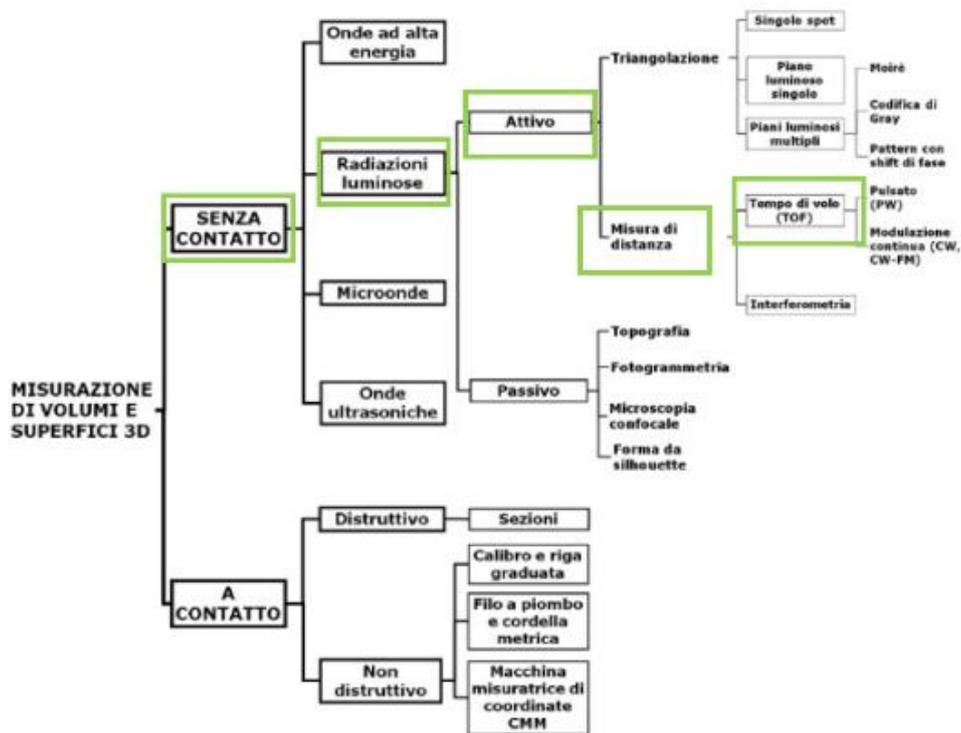


Figura 23: Schema degli strumenti di acquisizione 3D - sensori ottici attivi.

Fonte: RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI F., "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p. 171.

Il principio su cui si basano i sistemi a scansione distanziometrici è la misura della distanza che intercorre tra il punto di emissione del segnale laser (coincide con la posizione dello strumento) e gli oggetti colpiti dal fascio luminoso; tale distanza viene calcolata attraverso il tempo di volo (TOF<sup>45</sup>) ovvero il tempo che l'impulso emesso impiega per ritornare al trasmettitore e applicando la seguente espressione:

$$Distanza = (tempo\ di\ volo \times\ velocit\grave{a}\ della\ luce) / 2$$

Note poi le direzioni del sensore *laser* (angoli zenitali e azimutali) sarà possibile ottenere una rappresentazione ordinata nello spazio dei punti misurati che prende il nome di nuvola di punti.

Gli strumenti di rilievo che si fondano su suddetto principio sono ampiamente impiegati per l'acquisizione di dati architettonici e territoriali, permettono di raggiungere pre-

<sup>45</sup> TOF è l'acronimo di *time of flight*.

cisioni dell'ordine di qualche centimetro e possono operare sia su mezzi in movimento che fissi.

Diverso è il caso dei sistemi di scansione a triangolazione che, utilizzati esclusivamente per l'acquisizione di dati di piccola dimensione in modalità fissa (terrestre), registrano una quantità inferiore di punti, attraverso l'intersezione di due rette aventi direzioni note, ma permettono di ottenere una precisione superiore (al di sotto del centimetro).

### 2.2.1. Il laser scanner

Il laser scanner è uno strumento capace di acquisire e registrare informazioni relative alle coordinate spaziali, e in alcuni casi anche colore, di un'elevata quantità di punti distribuiti sulla superficie di un oggetto; esso è infatti costituito da un emettitore, fisso o rotante, dal quale parte il fascio luminoso, da uno o due specchi che ruotano in direzione ortogonale e da un rilevatore che registra la risposta.

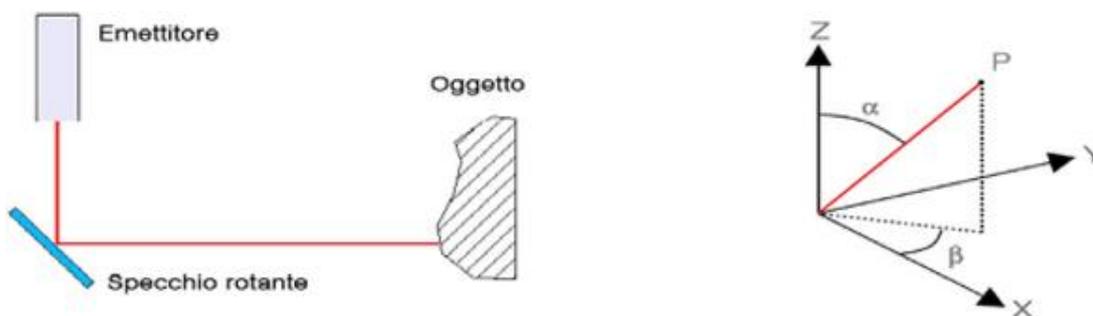


Figura 24: Schema di funzionamento dei sistemi a scansione distanziometrici.

Fonte: F. RINAUDO, "Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio", Alinea Editrice, Firenze, 2007, p.17.

Nel caso di oggetto da rilevare di grandi dimensioni, come nel nostro caso, lo strumento deve essere dotato di un distanziometro integrato che, contemporaneamente produca l'impulso laser e misuri il tempo che lo stesso impiega per intercettare la superficie riflettente e tornare allo strumento emittente, in questo modo verrà garantire un'elevata precisione nell'acquisizione delle misurazioni<sup>46</sup>.

---

<sup>46</sup> RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p. 175.

Come già detto questa tipologia di strumento può operare sia su mezzi mobili che fissi; queste due diverse condizioni esecutive richiedono differenti accorgimenti e per questo motivo si è soliti distinguere due categorie di *laser scanner*:

- *laser scanner* mobile o aereo;
- *laser scanner* fisso terrestre.

La prima categoria ovvero i *laser scanner* mobili consente il rilevamento rapido e preciso di porzioni di territorio e, per adempiere al loro compito, necessitano dell'integrazione di determinate dotazioni che permettano l'acquisizione delle coordinate di tutti i punti costituenti l'oggetto rilevato quando il mezzo che lo supporta è in movimento. Tali apparati consistono in un ricevitore GPS/GNSS, mediante il quale viene determinata la posizione del centro strumentale nel sistema di riferimento WGS84, una piattaforma inerziale, attraverso la quale vengono definiti gli assetti angolari rispetto alla posizione strumentale<sup>47</sup> e infine un distanziometro che consente di misurare la distanza, basandosi sul tempo di volo, tra il punto di emissione e quello intercettato dal *laser* tenendo conto della media delle distanze reali degli impulsi di ritorno.

La precisione di questa strumentazione, ad oggi non superiore ai 10 cm, è ovviamente funzione della precisione dei singoli apparati integrativi.

Il risultato finale consiste nella restituzioni di DTM e DSM<sup>48</sup> che consistono in modelli e superfici digitalizzate del terreno.

Nella seconda categoria rientrano tutti quei sistemi di scansione che consentono l'acquisizione di dati solo mediante apparecchiature installate a terra. Il principio di funzionamento è del tutto simile a quello delle tradizionali stazioni totali che, attraverso la lettura di una distanza e due direzioni angolari, permettono di determinare le coordinate spaziali dei punti rilevati rispetto al centro strumentale; la differenza sostanziale tra i due strumenti sta nel fatto che, i *laser scanner terrestri* permettono di definire un'area complessiva da registrare e non di selezionare i singoli punti da collimare poiché non sono dotati di un puntatore ma di uno specchio che consente di direzione il

---

<sup>47</sup> RINAUDO F., GUARNERI A., VETTORE A., VISINTINI D., BONORA V., TUCCI G., BINI M., FORLANI G., "Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio", Alinea Editrice, Firenze, 2007, p.18.

<sup>48</sup> DTM e DSM sono gli acronimi di *Digital Terrain Model* e *Digital Surface Model*.

fascio luminoso emesso dallo strumento verso la superficie da rilevare. Il risultato finale consiste della registrazione automatica di *range scan* (scansioni) riferite all'intera area e la conseguente nuvola di punti la cui densità può essere preventivamente selezionata. La portata massima raggiungibile da questa tipologia di strumento è pari a 800 m per punti naturali e 1000 m per punti ad alta riflettività<sup>49</sup>.

Le due tipologie di strumenti possono inoltre essere dotati di fotocamera digitale integrata; questa permette l'acquisizione di fotogrammi durante il processo di scansione utilizzabili per la texturizzazione del modello finale.

Risulta chiaro come i due strumenti fin qui descritti, differenziandosi per la struttura meccanica e per le caratteristiche interne, differiscono anche per l'accuratezza nella misurazione, per le modalità e la velocità di acquisizione dei dati e per la risoluzione dell'*output* finale.

L'accuratezza è un aspetto fondamentale di cui bisogna tenere conto soprattutto nel caso in cui l'oggetto che si vuole scansionare è manufatto architettonico complesso e ricco di dettagli; essa è legata sicuramente alle caratteristiche proprie dello strumento ma incidono notevolmente anche le condizioni al contorno (geometria del manufatto e condizioni ambientali).

Per quanto riguarda invece la velocità di acquisizioni dei dati questa può variare notevolmente ed è influenzata da molteplici fattori come la distanza tra lo strumento e l'oggetto rilevato, il campo visivo di acquisizione e le proprietà del segnale laser.

Infine per quanto riguarda la risoluzione dei risultati finali essa dipende sicuramente dalla densità della nuvola di punti che si desidera ottenere ma anche da fattori legati alla riflettanza delle superfici registrate e alle condizioni atmosferiche al momento dell'acquisizione dei dati.

Nella scelta dello strumento adeguato non va infine sottovalutata l'importanza di aspetti come la facilità e la comodità di trasporto legate al peso e all'ingombro dello strumento.

---

<sup>49</sup> Ibidem, p. 21.

### 2.2.3. Acquisizione delle misure mediante laser scanner terrestre

Le operazioni di acquisizione delle misure tramite *laser scanner* terrestre vanno prece-  
dute da una rigorosa e dettagliata fase di progettazione che tiene conto di due aspetti  
fondamentali ovvero:

- la geometria dell'oggetto da rilevare (bisogna considerare se si sta rilevando la parte esterna o quella interna al manufatto);
- i punti di presa nei quali andrà posizionato lo strumento di acquisizione (bisogna considerare che il sistema di riferimento di due *range scan* consecutive non coincide poiché, per ogni singola scansione, esso risulta solidale allo strumento).

Per quanto riguarda il primo aspetto questo determinerà il percorso seguito dallo strumento per l'acquisizione delle scansioni mentre, per quanto concerne il secondo fattore, questo richiederà che una percentuale (almeno il 30%) della totalità dei punti rilevata risulti comune a due scansioni successive in modo tale da permettere, in fase di registrazione, la rototraslazione del sistema di riferimento di una in rispetto all'altra o di entrambe in funzione di un sistema di riferimento scelto<sup>50</sup>.

L'iter di elaborazione dei dati, svolte in laboratorio e descritta dettagliatamente nel capitolo dedicato, prevede una prima operazione di allineamento delle scansioni, che permette la registrazione approssimata delle stesse, e una seconda procedura che consiste nel riconoscimento automatico e/o manuale di specifici punti all'interno delle scansioni che permettono di determinarne la corrispondenza.

Tali entità puntuali, nel caso in cui siano artificiali, prendono il nome di *marker* o *target* e sfruttano la capacità dello strumento di misurare la riflettività dell'oggetto colpito dal fascio luminoso; l'utilità dell'impiego di suddette entità consiste inoltre nella possibilità di ottenere un modello tridimensionale finale georeferito e inoltre consente la sua integrazione con modelli riferiti allo stesso manufatto ma derivanti da diverse elaborazioni.

---

<sup>50</sup> Ibidem, p. 25.

Tutto ciò però può avvenire solo se, in fase di acquisizione dei dati, il loro posizionamento rispetti determinate specifiche.

Un criterio da seguire per la scelta del loro posizionamento è la visibilità; essi dovranno infatti risultare facilmente acquisibili dallo strumento e nello specifico, al fine di ottenere un corretto allineamento e una corretta registrazione delle scansioni, ad ogni punto di presa dovranno essere visibili un numero non inferiore a tre *marker* correttamente posizionati<sup>51</sup>.

### **2.3. La fotogrammetria**

La fotogrammetria è una tecnica di rilevamento che permette di acquisire, mediante l'impiego di sensori terrestri, aerei o satellitari, informazioni accurate sulle caratteristiche (geometria, dimensione, posizione) di un oggetto e/o dell'ambiente che lo circonda attraverso una sua rappresentazione che è il fotogramma.

Questa disciplina, che fa parte delle metodologie di rilievo indiretto, presenta molteplici vantaggi; tra questi vi è la possibilità di acquisire i dati direttamente in loco e in tempi molto ridotti rispetto a quelli tipici del rilievo diretto, la capacità di registrare all'interno un unico fotogramma una moltitudine di informazioni (metriche, stato di conservazione, morfologiche, tessitura, ecc.), l'opportunità di rilevare un manufatto senza necessariamente avere un contatto fisico con lo stesso ed infine, tra gli aspetti più importanti, la possibilità di effettuare le misurazioni a posteriori permette di poter controllare i dati acquisiti, ripetere più volte le misure e limitare al massimo gli errori grossolani, interpretativi e numerici.

Questo metodo di misura, poiché direttamente dipendente dalla luce naturale, utilizza sensori che vengono chiamati sensori passivi<sup>52</sup>.

---

<sup>51</sup> I marker sono correttamente posizionati quando risulta facilmente determinabile il suo punto centrale ad esempio attraverso la stazione totale.

<sup>52</sup> RUSSO M., REMONDINO M., G. GUIDI, "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p. 170.

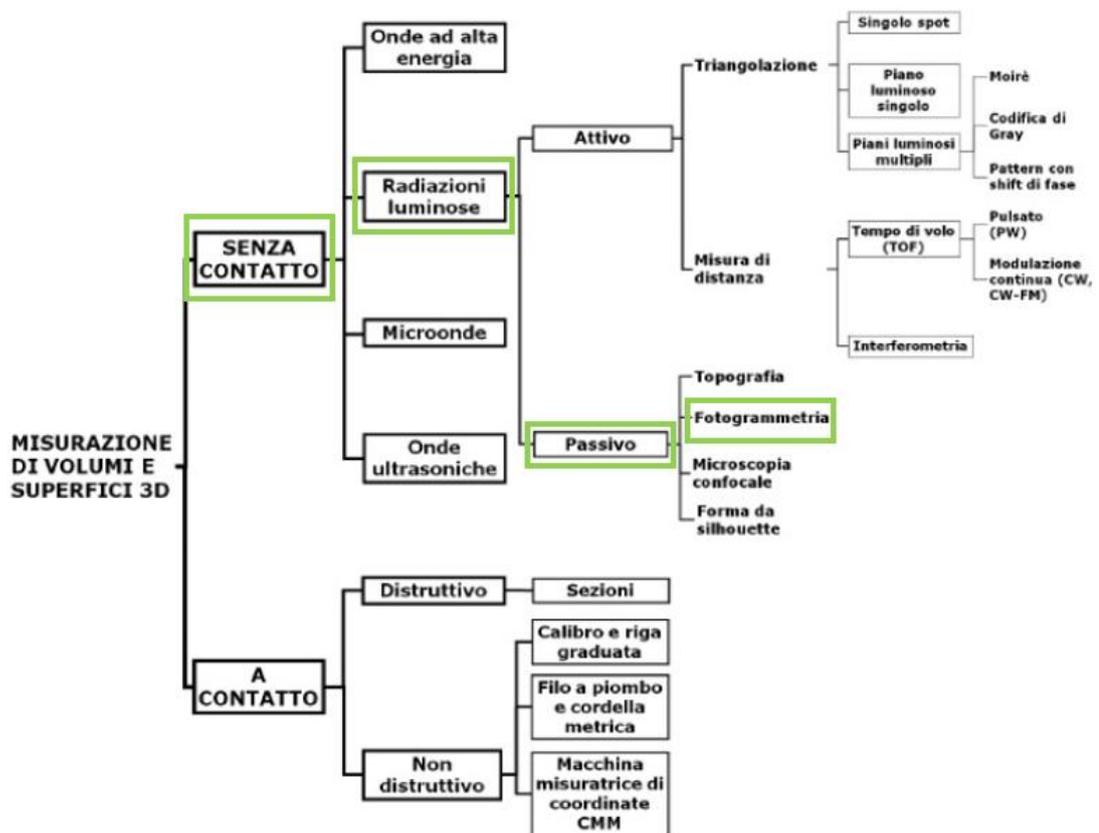


Figura 25: Schema degli strumenti di acquisizione 3D - sensori ottici passivi.  
 Fonte: M. RUSSO, F. REMONDINO, G. GUIDI, "Principali tecniche e strumenti...", op. cit., p. 171.

La fotogrammetria può essere suddivisa, in funzione del tipo di rilievo che si vuole effettuare e del tipo di presa utilizzata, in due categorie:

- fotogrammetria terrestre;
- fotogrammetria aerea.

La fotogrammetria terrestre, o anche detta dei vicini, è ampiamente impiegata nelle operazioni di rilievo architettonico, nello specifico quando la distanza tra la camera di presa e il manufatto non supera i 200 m; la fotogrammetria aerea, o anche detta dei lontani, è principalmente utilizzata per la produzione di cartografie e in questo caso la distanza tra sensore e terreno è superiore ai 200 m<sup>53</sup>.

<sup>53</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "Principi e strumenti della fotogrammetria" in "Misure, rilievo, progetto", Zanichelli, Bologna, 2012, p. 4.

La fotogrammetria permette di effettuare il fotoraddrizzamento di una singola immagine, che consiste nella rotazione del fotogramma rispetto ad un piano di riferimento quando sono note le coordinate di almeno 4 punti caratteristici e, partendo da due immagini, consente di creare una visualizzazione tridimensionale di un oggetto a partire da due fotogrammi ripresi da due punti di vista diversi.

Infine, l'evoluzione della disciplina, ha portato alla fotogrammetria tramite UAV che, dall'acquisizione e l'elaborazione di dati topografici, fotogrammi terrestri e aerei consente di ottenere da semplici ortofoto a dettagliati modelli tridimensionali.

### **2.3.1. Classificazione e principi di funzionamento**

Una prima classificazione della disciplina può essere fatta tenendo conto del tipo di fotogramma impiegato e dello strumento attraverso il quale lo stesso viene processato; si distingue la fotogrammetria analogica, che vede l'impiego di dispositivi meccanici per l'elaborazione dell'immagine, da quella analitica che, partendo sempre da un fotogramma impiega sistemi di calcolo computerizzati per estrapolare le informazioni. Un'ulteriore classificazione si basa poi sulla natura dell'immagine; la fotografia tradizionale, ottenute dallo sviluppo su pellicola, è oggi stata completamente rimpiazzata da quella digitale che, organizzata in una matrice di pixel, è in grado di adempiere a tutte le richieste e alle esigenze nell'ambito del rilievo cartografico e di dettaglio mediante l'uso di calcolatori per tutto l'iter di rilevamento (dalla sua acquisizione alla sua restituzione finale)<sup>54</sup>.

Al fine di ottenere un'accurata rappresentazione grafica e una ricostruzione tridimensionale precisa dell'oggetto fotografato è necessario che, durante la ripresa fotografica, si tenga conto delle relazioni geometriche che intercorrono tra la posizione tridimensionale dei punti nella realtà e la loro trasposizione sul piano fotografico.

Uno dei principi cardine su cui si basa la disciplina della fotogrammetria è la prospettiva centrale; da un punto di vista geometrico, infatti, è possibile accomunare una foto-

---

<sup>54</sup> CLINI P., *"Il rilievo dell'architettura. Tecniche, metodi ed esperienze"*, Alinea Editrice, Firenze, 2008, p.38.

grafia ad una rappresentazione prospettica dell'oggetto su un piano mediante l'uso dei raggi proiettanti (raggi luminosi) che, passando dal centro di proiezione (centra di presa dell'obbiettivo della camera), congiungono i punti dell'oggetto ai corrispondenti punti sul piano (sensore ottico della camera).

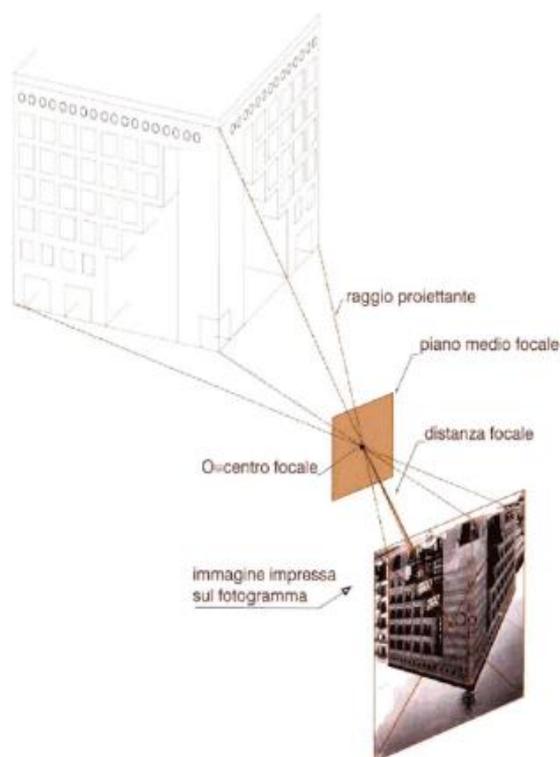


Figura 26: Schema che rappresenta la corrispondenza tra procedimento prospettico e presa fotografica.  
Fonte: P. CLINI, "Il rilievo dell'architettura. Tecniche, metodi ed esperienze", Alinea Editrice, Firenze, 2008, p. 49.

Per ottenere la posizione esatta e univoca di un punto appartenente ad un oggetto tridimensionale basterà disporre di due immagini raffiguranti lo stesso oggetto da due punti di presa diversi; esso verrà materializzato in un unico punto coincidente con il punto di intersezione dei raggi proiettanti passanti per i punti omologhi sui due fotogrammi.

Quanto detto fa capo alla risoluzione di un modello matematico costituito da un sistema di equazioni dette di collinearità.

Le misurazioni fotogrammetrica si basa infatti sul principio secondo cui il centro di presa della camera, il punto appartenente all'oggetto tridimensionale e il suo corrispondente punto sul fotogramma risultano allineati sul medesimo raggio proiettante.

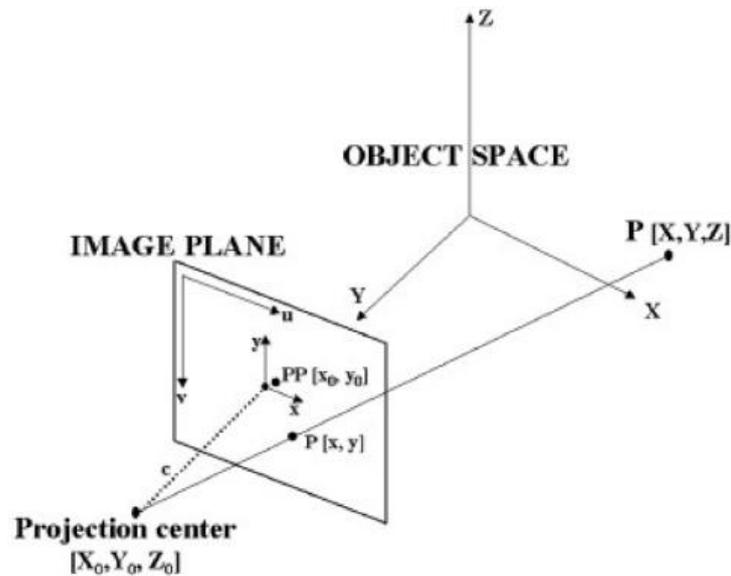


Figura 27: Principio di collinearità.

Fonte: M. RUSSO, F. REMONDINO, G. GUIDI, "Principali tecniche e strumenti...", op. cit., p. 183.

Dove:

- $X, Y, Z$  sono le coordinate spaziali del punto appartenente all'oggetto;
- $X_0, Y_0, Z_0$  sono le coordinate del centro di presa;
- $x$  e  $y$  sono le coordinate del punto sull'immagine;
- $x_0, y_0$ , sono le coordinate del punto principale;
- $c$  è la distanza principale.

Noti infine i parametri della trasformazione spaziale che intercorre tra i due sistemi di riferimento<sup>55</sup>, applicando le equazioni di collinearità, è possibile passare dalle coordinate dei punti appartenenti all'immagine alle coordinate dell'oggetto reale.

Si fa notare, infine, che le equazioni di collinearità dominano sulle fasi che costituiscono il completo processo fotogrammetrico.

<sup>55</sup> Si fa riferimento alla rototraslazione tra il sistema di riferimento assoluto riferito all'oggetto rilevato e al sistema di riferimento interno del fotogramma.

Fonte: CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "Orientamento e restituzione" in "Misure, rilievo, progetto", Zanichelli, Bologna, 2012, p. 83.

### 2.3.2. Rilievo fotogrammetrico: acquisizione, orientamento e restituzione

Le fasi che compongono l'intero processo di rilievo fotogrammetrico possono essere così distinte:

- fase di acquisizione (o presa);
- fase di orientamento;
- fase di restituzione.

La prima fase consiste nella presa dei fotogrammi; è necessario che questa avvenga tenendo conto di molteplici fattori tra i quali: la dimensione e la complessità geometrica del manufatto che si vuole rilevare, le caratteristiche morfologiche del contesto nel quale lo stesso si inserisce, la relazione tra la scala media del fotogramma e quella di rappresentazione e inoltre, non meno importanti, il tipo di camera che si intende impiegare.

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla dimensione, alla complessità dell'organismo e al contesto che si vuole rilevare, una completa e corretta acquisizione dei dati può avvenire mettendo in atto tre tecniche di ripresa fotografica differenti: la ripresa fotografica ad assi paralleli, la ripresa fotografica ad assi convergenti e la ripresa fotografica panoramica<sup>56</sup>; esse possono essere combinate tra loro e si differenziano in funzione della configurazione degli assi della camera.

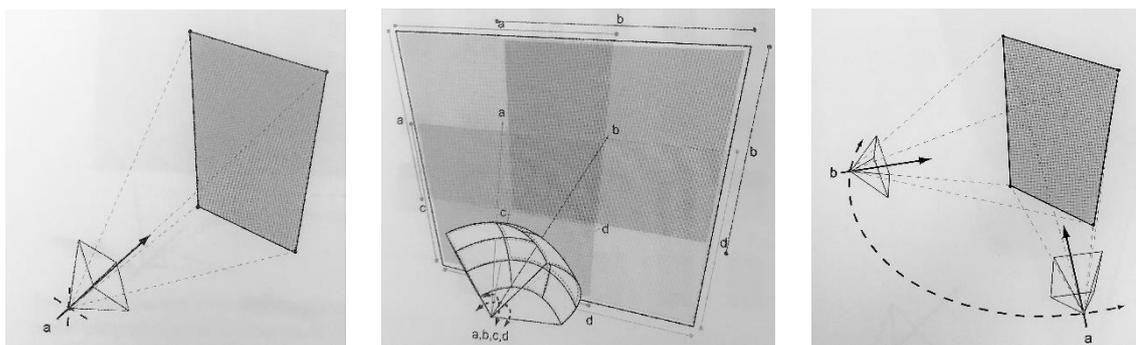


Figura 28: Ripresa fotogrammetrica ad assi paralleli (sin), ripresa fotogrammetrica panoramica (centro), ripresa fotogrammetrica ad assi convergenti (dex).

<sup>56</sup> DE LUCA L., "La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie", Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2011, p. 46 – 61 (per approfondimenti).

Per ciò che concerne la relazione tra scala media dei fotogrammi<sup>57</sup> e scala del disegno è consigliabile non utilizzare scale eccessivamente differenti in modo da garantire una corretta riproduzione dei dati nella scala di rappresentazione scelta; si seguirà quindi, nel caso di rilievo fotogrammetrico terrestre, la relazione secondo cui<sup>58</sup>:

$$N_f = (2 \div 4) N_d$$

Con :  $N_f$  scala media dei fotogrammi e  $N_d$  scala del disegno.

Mentre nel caso di rilievo fotogrammetrico aerea basterà fare riferimento a rapporti tabellati:

Scala della carta	Scala dei fotogr.		Altezza volo $H$ (per alcuni valori di $p$ ) (m)					
	min.	max.	$p = 300$ mm		$p = 152$ mm		$p = 88$ mm	
1:500	1:3000	1:2000	900	600				
1:1000	1:5000	1:3500	1500	1050	760	530		
1:2000	1:8000	1:6500	2400	1950	1220	1000		
1:5000	1:18000	1:12000	5400	3600	1730	1830		
1:10000	1:27000	1:20000	8100	600	4100	3100	2210	1770
1:25000	1:50000	1:40000			7600	6080	4520	3530
1:50000	1:70000	1:60000			10620	9130	6180	5310
1:100000	1:90000	1:80000					7960	7070

Figura 29: Rapporto tra scala media dei fotogrammi e scala della carta.

Fonte: CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "La presa dei fotogrammi", op. cit., p. 38.

Infine gioca un ruolo molto importante, nella fase di acquisizione delle immagine, la scelta della strumento adeguato. Lo strumento attraverso il quale si effettua l'acquisizione dei fotogrammi e la camera fotografica.

Oggi il mercato mette a disposizione diverse tipologie di fotocamere; si va dalla classica fotocamera compatta alla più professionale reflex passando per la nota *bridge* che può essere considerata una via di mezzo tra le prime due citate; passando quindi da un livello amatoriale a uno più professionale le anzidette differiscono tra loro per dimensione, modalità di utilizzo e qualità del risultato finale.

<sup>57</sup> La scala media dei fotogrammi rappresenta il rapporto tra la dimensione massima dell'immagine e la dimensione dell'oggetto reale ad essa associata.

<sup>58</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "Fotogrammetria" in "Misure, rilievo, progetto", Zanichelli, Bologna, 2012, p. 17.

Ma una più importante distinzione può essere fatta tenendo conto delle caratteristiche geometriche interne alla camera stessa; tale distinzione permette di distinguere tre tipologie di camera<sup>59</sup>:

- la camera metrica, tra le quali rientrano tutte le camere professionali impiegate per rilievi fotogrammetrici, la cui peculiarità è quella di limitare al massimo le distorsioni radiali e per la quale risulta noto l'orientamento interno che rimane invariato nel tempo;
- la camera semimetrica, utilizzata anche questa per rilevamenti fotogrammetrici ma ritenuta meno affidabile poiché l'obiettivo di cui è dotata produce distorsioni dovute al fatto che l'orientamento interno è noto ma non costante nel tempo;
- la camera amatoriale, che viene impiegata per tutte quelle operazioni che non richiedono elevata precisione e per la quale l'orientamento interno è incognito e variabile nel tempo.

La seconda fase del processo fotogrammetrico consiste nell'orientamento, interno ed esterno dei fotogrammi, ovvero nell'insieme delle operazioni che permettono la collocazione spaziale della stella di raggi proiettanti appartenenti ai singoli fotogrammi nella medesima posizione che questa ha assunto al momento dell'acquisizione dell'immagine.

Per effettuare l'orientamento interno dei fotogrammi bisogna essere a conoscenza dei parametri della fotocamera; tra questi abbiamo la distanza principale dell'obiettivo, le coordinate del punto principale e infine il valore della distorsione dovuti agli errori legati alla forma e all'imperfezione dell'obiettivo; per quanto riguarda l'orientamento esterno, invece, è necessario conoscere i parametri estrinseci che, una volta nota la posizione e l'orientamento della fotocamera rispetto al sistema di riferimento dell'immagine, possono essere determinati attraverso le operazioni di rototraslazioni che interessano i tre assi e i tre angoli intorno ad ogni asse<sup>60</sup>.

---

<sup>59</sup> Ibidem, p.9.

<sup>60</sup> DE LUCA L., *"La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie"*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2011, p. 72 – 74.

A seguito del corretto orientamento è possibile in conclusione avviare la fase di restituzione che consiste nel complesso delle procedure analitiche attraverso le quali si ottiene il passaggio dal modello binoculare alla riproduzione grafica o numerica della scena fotografata; sarà possibile ottenere quindi una rappresentazione bidimensionale (ortofoto) e/o modelli tridimensionale dell'oggetto rilevato.

### 2.3.3. Fotogrammetria aerea da UAV

Negli ultimi anni la continua ricerca e la voglia di innovazione ha portato, nell'ambito della fotogrammetria aerea, all'impiego di dispositivi aerei non convenzionali a volo autonomo che vengono chiamati UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Attraverso questi mezzi, associati a fotocamere ad elevata risoluzione, è possibile acquisire fotogrammi aerei e a bassa quota utili alla realizzazione di rilevamenti fotogrammetrici che interessano il settore archeologico, paesaggistico e architettonico<sup>61</sup>. Inizialmente questi velivoli venivano utilizzati solo in ambito militare mentre oggi il loro impiego ha garantito il rilevamento fotogrammetrico anche in ambito civile di siti soggetti a disastri ambientali, e ai quali risulta impossibile accedere direttamente, permettendo di stimare i danni, mappare gli eventuali rischi senza mettere a repentaglio la vita umana<sup>62</sup>.

Una classificazione<sup>63</sup> di questi velivoli può essere fatta in base al campo nel quale vengono esse vengono adottate: *Tactic, Strategic e Special Purpose*; queste tre categorie possono essere ulteriormente suddivise in sottocategorie in funzione delle proprietà e delle prestazioni fornite.

Nella tabella che segue vengono riportate suddette distinzioni ed evidenziati i sistemi utilizzati, come nel caso oggetto di studio, per il rilievo e documentazione del patrimonio architettonico esistente.

---

<sup>61</sup> CHIABRANDO F., LINGUA A., MASCHIO P., RINAUDO F., SPANÒ A., "Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico", Maggio 2012, p.1.

<sup>62</sup> LINGUA A., "Fotogrammetria da drone", dispense del corso di "Utilizzo dei droni/SAPR per il rilevamento metrico e tematico del territorio", p. 9.

<sup>63</sup> Ci si riferisce alla classificazione redatta dall' *Unmanned Vehicle Systems International Association*.

Tactic UAVs Sottocategorie	Acronimo	Capacità di volo [Km]	Max quota di volo raggiungibile [m]	Autonomia [ore]	Peso [Kg]
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150-300	< 2	150
Close Range	CR	10-30	3000	2-4	150
Short Range	SR	30-70	3000	3-6	200
Medium Range	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8000	10-18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50-9000	0,5-1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14000	24-48	1500

Figura 30: Classificazione degli UAVs redatta dall' Unmanned Vehicle System International Association.

Fonte: CHIABRANDO F., LINGUA A., MASCHIO P., RINAUDO F., SPANÒ A., "Mezzi aerei non convenzionali...", op. cit., Maggio 2012, p.3.

I *Nano UAV* hanno dimensioni ridotte e, in campo militare sono usati come velivoli spia mentre, in campo civile sono usati per effettuare video o fotogrammi di bassa qualità.

I *Micro UAV*, hanno una dimensione che varia dai 30 ai 50 cm e, non raggiungendo elevate velocità, e possono rimanere in condizioni di volo stazionario.

I *Mini UAV* o *MUAV* hanno dimensioni variabili dai 50 ai 100 cm e il loro peso non superiore i 20 kg con un raggio d'azione che fino ai 10-15 km di distanza; vengono lanciati a mano e possono essere ad ala fissa o rotante.

Per le loro modeste dimensioni e per le loro potenzialità di volo questi tre tipi di velivoli sono chiamati *Small UAV*<sup>64</sup>.

<sup>64</sup>CHIABRANDO F., LINGUA A., MASCHIO P., RINAUDO F., SPANÒ A., "Mezzi aerei non convenzionali...", op. cit., Maggio 2012, p.3-4.

### 3.Acquisizione dei dati di indagine

In data 10 Gennaio 2016, a Candia Canavese, è stata svolta una campagna di acquisizione dati che, attraverso l'utilizzo di strumentazioni tradizionali come la stazione totale e l'applicazione di tecniche innovative come la fotogrammetria aerea da UAV e il *laser scanner* terrestre, ha permesso di rilevare le superfici esterne della Chiesa di Santo Stefano al Monte.

L'obiettivo è quello di ottenere un modello tridimensionale georeferenziato, attraverso l'utilizzo di differenti tecnologie di rilevamento, che possa essere mezzo utile per la gestione dei dati del restauro.

#### 3.1. La campagna di rilevamento

Per prima cosa sono stati individuati tutti i punti necessari per la realizzazione della rete di inquadramento e raffittimento; questi sono stati identificati attraverso il posizionamento dei *target* a terra disposti lungo tutto il perimetro dell'edificio oggetto di rilievo e opportunamente codificati.

Successivamente sono stati posizionati i *target* sulle superfici esterne della Chiesa utilizzati sia per il rilievo topografico che per la successiva elaborazione dei dati di indagine. Dopo aver posizionato tutti i *marker* si è proceduto al loro rilevamento mediante l'impiego della stazione totale e in parallelo sono stati realizzati gli eidotipi contenenti le informazioni sulla posizione di tutti i punti collimati ai quali è stato assegnato un codice univoco.



Figura 31: Posizionamento dei *target* a terra e sulle pareti dell'edificio rilevato.

In seguito sono state individuate le posizioni dei punti di appoggio e partire da questi sono stati misurati i punti di raffittimento, i punti di dettaglio e le coordinate spaziali di tutti i marker posizionati. Nella stessa giornata sono state effettuate, mediante l'impiego del *laser scanner* terrestre, 14 scansioni che hanno interessato tutti i prospetti della chiesa; attraverso il volo del drone sono stati acquisiti i fotogrammi riguardanti la copertura dell'edificio.

### 3.2. La rete di inquadramento e di dettaglio

La rete di inquadramento rappresenta la struttura portante del rilievo attraverso la quale si ottiene una copertura completa dell'area e la conoscenza geometrica dell'ambiente rilevato.

I punti di inquadramento costituiscono solo una piccola parte del totale dei punti rilevati e la loro posizione deve essere determinata con elevata precisione e con un'accuratezza superiore di quella richiesta dalla scala di rappresentazione scelta per la restituzione finale.<sup>65</sup>

Durante il sopralluogo sono stati dunque scelti i punti di appoggio che andranno a costituire la rete di inquadramento; nella tabella che segue sono stati riportati le coordinate compensate dei suddetti punti:

Stazione	Coordinate	
1000	Est [m]	384289,97
	Nord [m]	5005919,00
	Quota [m]	468,3495
2000	Est [m]	384301,45
	Nord [m]	5005921.59
	Quota	467,4365

Tabella 3: Coordinate compensate dei vertici della rete di inquadramento.

Tali vertici dovranno essere posizionati in punti facilmente accessibili e, quando possibile su oggetti già presenti sul luogo, in alternativo potranno essere materializzati attraverso chiodi di riferimento.

---

<sup>65</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "Inquadramento generale" in *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna 2012.

Ogni vertice è stato prontamente fotografato, codificato e inserito all'interno di un eidotipo inoltre per ognuno di esso è stata registrata l'altezza strumentale.



Figura 32: materializzazione e localizzazione dei punti collimato.

A questi punti d'appoggio sono stati poi aggiunti ulteriori vertici (3000, 4000, 5000, 6000 e 7000) utilizzati per la misurazione dei punti della rete di dettaglio.

Per effettuare il rilievo è stata utilizzata una stazione totale di tipo Leica TCR 3 .

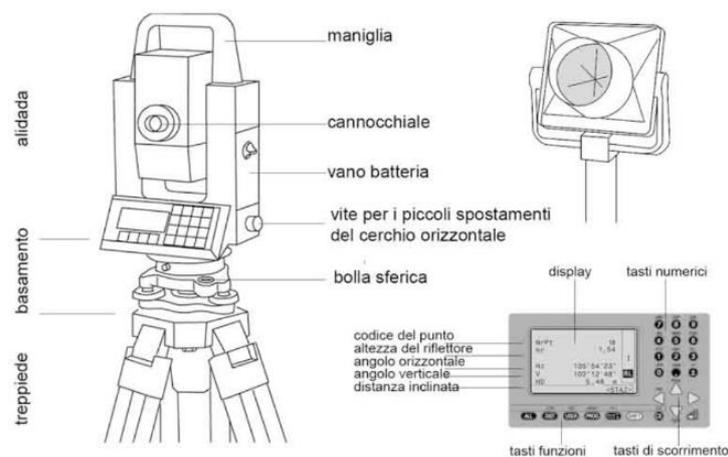


Figura 33: Stazione totale.

Fonte: [www.rilievoarcheologico.it](http://www.rilievoarcheologico.it)

L'operazione successiva riguarda la realizzazione della rete di dettaglio. I punti che la costituiscono sono in numero decisamente superiore a quelli appartenenti alle reti di inquadramento e raffittimento; è proprio dai vertici appartenenti a queste due reti che vengono effettuate le misurazioni dei punti che forniscono la rete di dettaglio. Attraverso essi vengono rappresentate le caratteristiche del suolo e dell'edificio rilevato e, poiché richiedono una precisione minore il loro rilevamento avviene in tempi abba-

stanza rapidi<sup>66</sup>. Materialmente questi punti sono stati segnalati mediante il posizionamento, sulle pareti dell'edificio, di *target*.

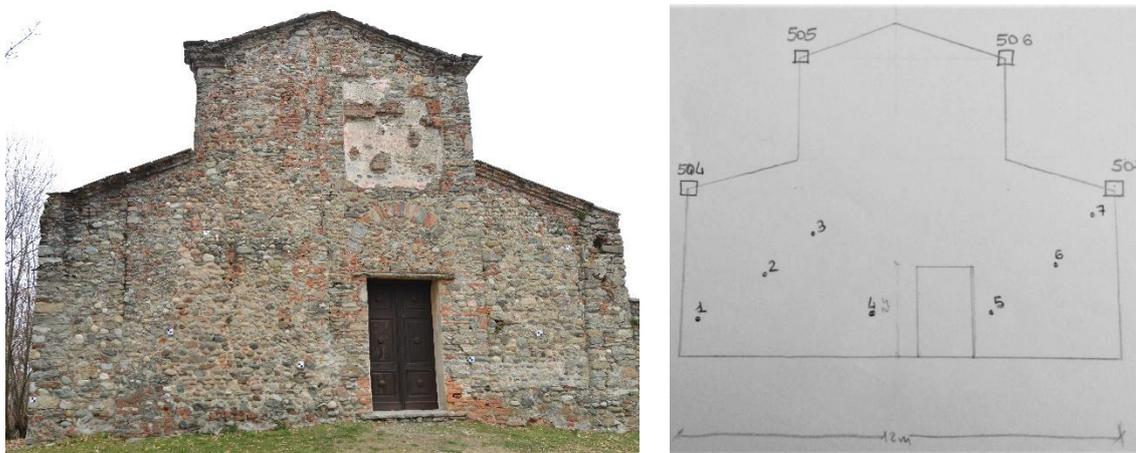


Figura 34: collocazione dei target sulle pareti del prospetto ovest e relativo eidotipo.

### 3.3. L'acquisizione delle scansioni tramite *laser scanner*

Per quanto riguarda l'acquisizione delle scansioni lo strumento utilizzato è stato il *laser scanner* terrestre FARO FOCUS 350 CAM2. Si tratta di uno strumento dotato di una fotocamera integrata e di un *display touchscreen* attraverso il quale è possibile gestire le opzioni di scansione ottenendo così un insieme di coordinate tridimensionali a colori che restituiscono fedelmente l'oggetto che si sta rilevando.



Figura 35: Laser scanner FARO FOCUS CAM2.  
Fonte: [www.faro.com](http://www.faro.com)

Si riporta di seguito uno stralcio delle caratteristiche tecnico dello strumento e tra gli allegati il riporta il catalogo integrale.

---

<sup>66</sup> Ibidem, pag. 4.

### Ranging unit

<b>Focus<sup>3D</sup> X 130</b>	
Unambiguity interval:	> 130 m
Range:	0,6 m - 130 m indoor o outdoor con incidenza verticale su superficie riflettente (90%)

<b>Focus<sup>3D</sup> X 330</b>	
Unambiguity interval:	da 122 fino a 488 kpts/sec.: 614 m a 976 kpts/sec.: 307 m
Range:	0,6 m - 330 m indoor o outdoor con incidenza verticale su superficie riflettente (90%)
Ambiente:	lavora anche in condizioni di luce solare diretta

Velocità di misura (punti/sec.):	122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000			
Errore di distanza lineare <sup>1</sup> :	±2 mm			
Rumore <sup>2</sup> :	10 m	10 m - filtrato <sup>3</sup>	25 m	25 m - filtrato <sup>3</sup>
90% refl.	0,3 mm	0,15 mm	0,3 mm	0,15 mm
10% refl.	0,4 mm	0,2 mm	0,5 mm	0,25 mm

### Gestione dati e controllo

Memorizzazione dei dati:	SD, SDHC™, SDXC™; scheda da 32 GB inclusa nella fornitura
Controllo dello scanner:	tramite touchscreen e WLAN
Accesso WLAN:	il controllo e la visualizzazione delle scansioni a distanza sono possibili su dispositivi mobile con Flash®

### Multi-Sensor

Compensatore biassiale:	fornisce per ogni scansione informazioni relative al livello; precisione 0,015"; range di misurazione ± 5°
Sensore di altezza:	grazie a un barometro elettronico è possibile determinare per ogni scansione l'altezza relativa rispetto a un punto di riferimento
Bussola <sup>4</sup> :	la bussola elettronica individua l'orientamento della scansione; è inoltre disponibile una funzione di calibrazione
GPS:	ricevitore GPS integrato

Figura 36: Stralcio delle caratteristiche del laser scanner FARO CAM2.

Fonte: www.faro.com

Lo strumento, posizionato su un treppiedi in posizione fissa ad una distanza opportuna dall'oggetto che si intende rilevare, permette, mediante un movimento rotatorio lungo due assi tra loro ortogonali, di effettuare la scansione di un elevato numero di coordinate spaziali in maniera automatica e in tempi abbastanza ridotti.

In tal senso è stata anzitutto pianificata la posizione dei punti di presa del *laser scanner*; nel caso in esame, poiché si è deciso di rilevare esclusivamente le superfici esterne, è stato necessario muoversi lungo tutto il perimetro della chiesa in modo da poterla rilevare in ogni sua parte.

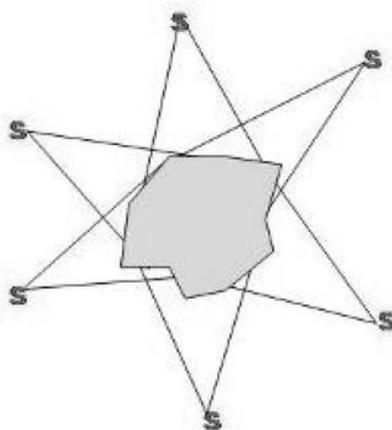


Figura 37: Schema tipo per l'acquisizione di un oggetto concavo chiuso.

Fonte: www.gexcel.it

In definitiva sono state acquisite 14 scansioni, codificate e memorizzate all'interno di una scheda micro SD, che nella loro totalità hanno contribuito alla creazione della nuvola di punti *laser scanner* della Chiesa di Santo Stefano al Monte.

Per una corretta e completa acquisizione della geometria dell'oggetto, e per la successiva elaborazione dei dati in laboratorio, riveste un ruolo fondamentale anche l'opportuna disposizione dei *marker*.

I *marker*, elementi a scacchiera, hanno permesso l'unione delle scansioni durante le operazioni di elaborazione dei dati in laboratorio. Essi sono stati posizionati in modo tale da essere ben visibili allo strumento e presenti in un numero almeno pari a 3 in due scansioni successive.

Poiché le coordinate spaziali rilevate dal *laser scanner* sono riferite al centro stesso dello strumento e stato necessario rilevare topograficamente tutti i punti attraverso la stazione totale; ciò anche se non rientra nelle fasi di rilevamento laser ha consentito di ottenere una nuvola di punti correttamente georeferita.



Figura 38: Individuazione dei marker posizionati nella scansione del prospetto sud.

### **3.4. L'acquisizione dei fotogrammi tramite UAV**

Il modello tridimensionale che si otterrà dell'elaborazione delle scansioni potrà essere completato grazie alla costruzione della nuvola di punti ottenuta dall'elaborazione dei fotogrammi acquisiti da drone.

Anche in questo caso sono state risultate necessarie una serie di operazioni preliminari che permettessero di ottenere come risultato finale il rilievo di tutta l'area oggetto di studio.

La Chiesa di Santo Stefano al Monte, come già detto, sorge sulla sommità di una collina; essa rimane circondata da un fitto bosco di alberi di castagno che, seppur quasi nella loro totalità risultassero spoglio, hanno in parte ostacolato le manovre di volo e quindi l'acquisizione delle immagini di alcune delle porzioni superiori dei prospetti.

Ad ogni modo il risultato ottenuto dall'elaborazioni è stato ritenuto ampiamente accettabile consentendo quindi la realizzazione di un modello integrato di alta qualità.

Nello specifico l'acquisizione dei fotogrammi è stata effettuata mediante la fotocamera DJI FC330 fissata sul drone PHANTOM 4.



Figura 39: Drone DJI PHANTOM 4.

Fonte: [www.dji.com](http://www.dji.com)

Nella seguente tabella vengono riportate le caratteristiche tecniche del drone e della fotocamera:

CARATTERISTICHE TECNICHE			
Drone DJI PHANTON 4		Fotocamera FC330	
Peso	1380 g	Modello	FC330
Velocità massima di salita	6 m/s	N. Pixel	12,4 M
Velocità massima di discesa	4 m/s	Sensore	1/2.3" CMOS
Velocità massima	20 m/s	Lente	35 mm
Tempo di volo massimo	28 minuti	Dimensione immagine	4000x3000 pi
Sistema di posizionamento satellitare	GPS/GLONASS		

Tabella 4: Specifiche tecniche degli strumenti utilizzati per l'acquisizione dei fotogrammi.

Il drone è stato guidato, per tutta la durata del volo, da un tecnico specializzato e la camera è stata settata in modo tale da acquisire una singola fotografia a un determinato intervallo di scatto costante per tutta la durata del volo.

Il drone ha seguito il volo ad una quota di 14,8 m mantenendo delle traiettorie rettilinee a una velocità costante.

Al fine di ottenere delle immagini adeguate e caratterizzate da tutte le proprietà utili ad ottenere il risultato desiderato, ancora prima di effettuare il volo con il drone, è di fondamentale importanza definire alcuni parametri progettuali<sup>67</sup>. Tra questi abbiamo:

- H: l'altezza media dal suolo mantenuta dal drone durante le strisciate;
- L: l'abbracciamento, il lato del quadro di terreno contenuto in un fotogramma;
- B: la base di presa, la distanza tra due centri di presa consecutivi;
- l: il lato effettivo utile del fotogramma;
- p: la distanza principale della camera (coincide alla distanza focale dell'obiettivo);
- $\mu$ : il ricoprimento longitudinale (in genere pari al 60% di L);
- $\varepsilon$ : il ricoprimento laterale (in genere pari al 20% di L)
- i: l'interasse delle strisciate.

L'altezza di volo H è però riferita alla distanza che c'è tra il drone e il terreno; quella che è fondamentale conoscere è invece la quota assoluta, ovvero la quota che tiene conto anche della quota media del terreno; quest'ultima si ottiene dalla media aritmetica delle quote di punti noti appartenenti al terreno. In definitiva abbiamo che:

$$Q_v = Q_m + H$$

La quota così ottenuta permette di riprodurre correttamente i fotogrammi, con la precisione ideale, e in funzione della scala di rappresentazione scelta.

---

<sup>67</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., "La presa dei fotogrammi" in *Misure, rilievo, progetto*, Zanichelli, Bologna 2012, p. 37.

## 4. Elaborazione dei dati di indagine

Il passo successivo all'acquisizione dei dati è stata l'elaborazione degli stessi mediante l'impiego di tre *software* differenti. Precisamente la compensazione della rete è stata eseguita con il *software Star\*Net*, per quanto riguarda l'elaborazione delle foto acquisite in volo dal drone e a terra dalla camera, l'uso del *software Agisoft Photoscan* ha permesso di ottenere tre differenti nuvole di punti e infine per l'elaborazione delle scansioni è stato impiegato il *software FARO Scene*.

### 4.1. La compensazione della rete

L'informazione di partenza per la compensazione della rete è stato un *file* di testo contenente le coordinate locali X,Y,Z dei punti collimati con la stazione totali.

Attraverso il *software Star\*Net* si è proceduto alla creazione della rete topografica con la correzione delle coordinate dei punti, tenendo conto della propagazione degli errori; il programma consente il completo settaggio dei parametri del rilievo: è possibile selezionare il tipo di rete che si vuole compensare, il sistema di coordinate utilizzato ed inoltre è possibile inserire le precisioni strumentali al fine di ottenere un risultato il più corretto possibile.

Nella tabella che segue sono state riportate le impostazioni, settate nella finestra di dialogo, in riferimento ai dati di progetto e alle precisioni strumentali.

IMPOSTAZIONI STAR*NET			
Project Option Setting		Instrument Standard Error Settings	
Type of Adjustment	3D	Distances	0,002 m
Project Units	Meters		2 PPM
	GONS	Angle	1 MilliGons
Coordinate System	UTM	Direction	1 MilliGons
	Zona 32	Zeniths	3 MilliGons
Ellipsoid	WGS84	Different Levels	0,005 m
Geoid Height	418 meters	Centering Error Instrument	0,001 m
Coordinate Order	Est-Nord	Centering Error Vertical	0,003 m

Tabella 5: Settaggio impostazioni di progetto e strumentali su STAR\*NET.

L'inserimento dei dati all'interno del programma è estremamente intuitivo; è possibile variare, commentare o anche escludere dal calcolo della compensazione alcune delle misure effettuate e in questo modo risulta anche più semplice verificare gli errori in-

terrogando ogni singolo punto. Il codice di scrittura è ben definito infatti se si tratta di punti d'appoggio o di stazione questi, essendo coordinate, dovranno essere precedute dalla lettera "C"; allo stesso modo avremo che per le direzioni azimutali dovranno essere inserite le lettere "DN", per le distanze bisognerà utilizzare la lettera "D" e infine gli angoli zenitali dovranno essere preceduti dalla lettera "V".

Stazione	H [m]	Punto collimato			
3000	1,545	1	DN 1 160,7873	V 3000-1 100,1737 1,545/0	D 3000-1 17,7507 1,545/0
3000	1,545	2	DN 2 165,9165	V 3000-2 95,1396 1,545/0	D 3000-2 15,6523 1,545/0
3000	1,545	3	DN 3 167,9738	V 3000-3 86,9492 1,545/0	D 3000-3 15,4775 1,545/0
3000	1,545	4	DN 4 173,5838	V 3000-4 97,5153 1,545/0	D 3000-4 13,8687 1,545/0
3000	1,545	5	DN 5 188,0593	V 3000-5 96,6609 1,545/0	D 3000-5 12,0301 1,545/0
3000	1,545	6	DN 6 196,0422	V 3000-6 93,76 1,545/0	D 3000-6 11,5227 1,545/0
3000	1,545	7	DN 7 200,6966	V 3000-7 83,5031 1,545/0	D 3000-7 11,5886 1,545/0
3000	1,545	8	DN 8 221,1496	V 3000-8 96,6346 1,545/0	D 3000-8 10,875 1,545/0
3000	1,545	501	DN 501 314,8621	V 3000-501 116,0274 1,545/0	D 3000-501 6,7633 1,545/0
3000	1,545	502	DN 502 135,9418	V 3000-502 108,7215 1,545/0	D 3000-502 7,4294 1,545/0

Tabella 6: Stralcio dell'elaborazione dati di STAR\*NET.

Tutti i punti noti di stazione non dovranno essere compensati, per questo motivo questi dovranno essere vincolati (attraverso il codice "!!!") in modo tale che il programma li riconosca; infine sarà necessario indicare le altezze strumentali della stazione totale e dei punti collimati.

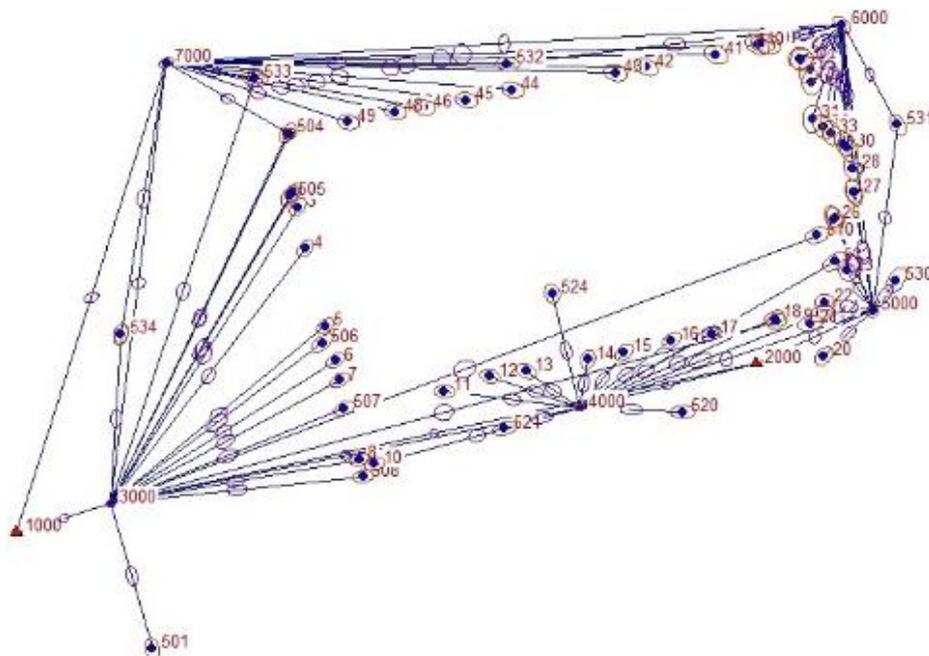


Figura 40: Risultato della compensazione con STAR\*NET.

Al termine sarà possibile esportare il risultato del processo di elaborazione dei dati in formato .DXF. Il *file* conterrà la rappresentazione grafica della rete di inquadramento con i corrispondenti ellissi di dispersione dei singoli punti collimati.

Le coordinate dei punti rilevati sono state esportate in un *file* in formato .txt e importate all'interno dei *software* utilizzati successivamente per ottenere nuvole di punti georeferite.

#### **4.2. Elaborazione dei dati acquisiti con Laser Scanner terrestre**

Il rilevamento mediante strumenti *laser scanner* permette, in tempi molto ridotti, un'acquisizione di tutte le caratteristiche geometriche dell'oggetto di studio; solo successivamente si procederà alla scelta degli elementi che saranno di interesse in fase di elaborazione. Risulta ovvio che la procedura di restituzione dei dati attraverso strumentazione *laser scanner* semplifica da una parte le operazioni di acquisizione dati mentre dell'altra richiede tempi di elaborazione degli stessi che dipendono dal risultato che si vuole ottenere. La peculiare caratteristica degli *scanner* 3D di rilevare completamente l'oggetto, abbinata a un'opportuna fase di progettazione del lavoro di campagna, garantisce di poter svolgere tutte le successive operazioni senza dover tornare sul punto di acquisizione<sup>68</sup>.

A ogni strumento *laser scanner* è associato un *software* che permette l'impostazione di determinati parametri durante l'acquisizione dei dati, i quali potranno quindi essere gestiti durante la fase di elaborazione.

Nello specifico, durante questa fase, si è proceduto alla selezione ed elaborazione, mediante *software FARO SCENE*, delle scansioni che hanno interessato la Chiesa di Santo Stefano al Monte.

Di seguito si riporta una planimetria, fuori scala, dell'area rilevata nella quale viene indicata la posizione dello strumento di presa che ha generato un totale di 14 scansioni.

---

<sup>68</sup> SGRENZAROLI M., VASSENA G.P.M., "Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner", 2007, Starrylink Editrice Brescia, Vol.1.

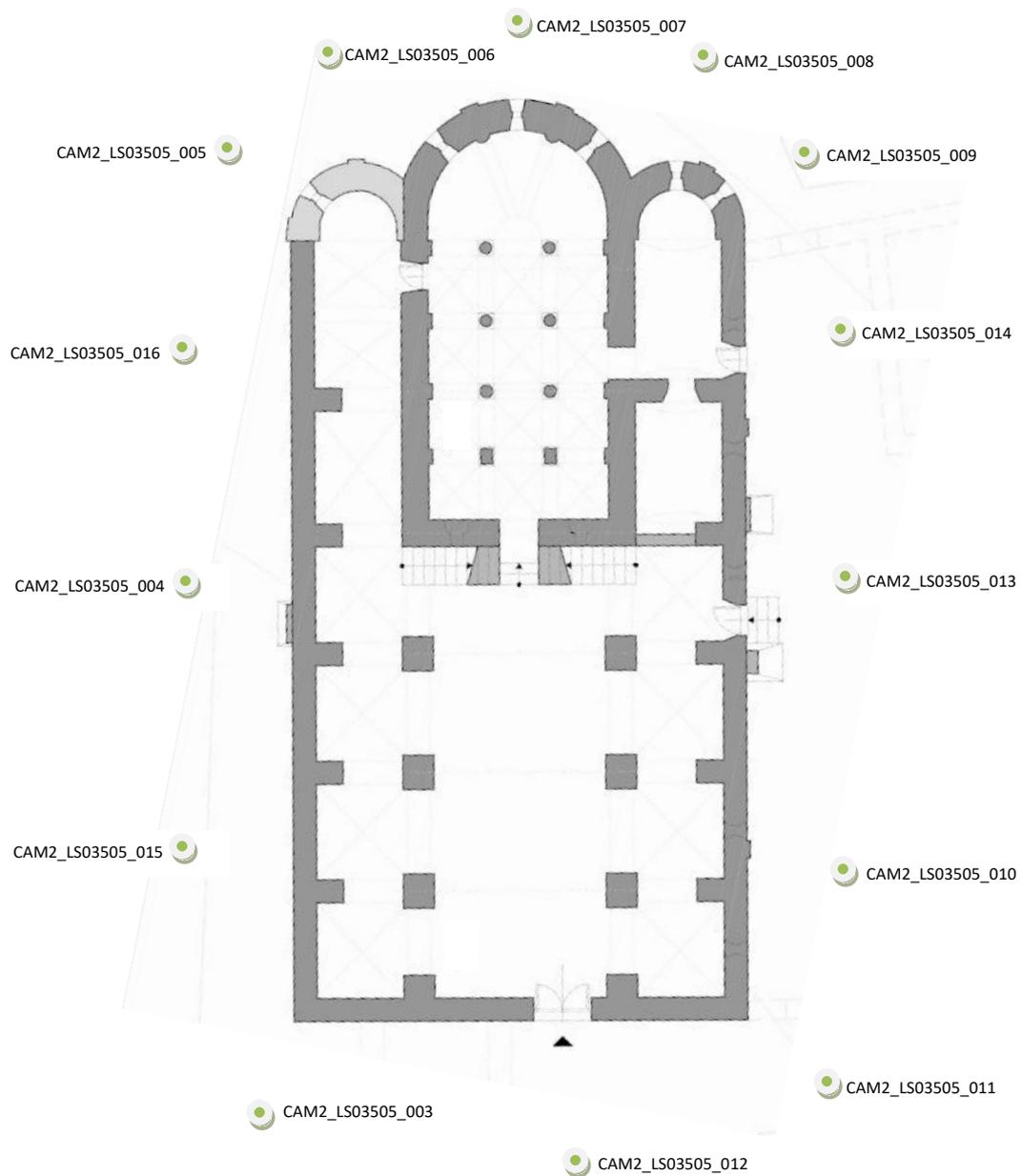


Figura 41: Posizionamento del laser scanner per l'acquisizione dei dati.

#### 4.2.1. Il software FARO SCENE

Il software FARO Scene è uno strumento intuitivo e di facile utilizzo che consente la gestione, l'elaborazione e la georeferenziazione delle diverse nuvole di punti ottenute mediante il Laser Scanner. Attraverso funzioni automatiche è possibile individuare oggetti, registrare e posizionare le scansioni che il software restituirà anche colorate e ad

alta qualità, inoltre sarà possibile esportare le nuvole di punti<sup>69</sup> processate in differenti formati, in modo da garantire una successiva gestione attraverso molteplici strumenti. *Scene* restituisce dati di elevata affidabilità e qualità grazie ad alcuni passaggi di verifica che permettono un ulteriore controllo sia sulla registrazione delle scansioni che sulla loro corretta collocazione, attraverso l'individuazione di eventuali errori commessi nella fase di registrazione dei *marker*. In definitiva il *software* consente molteplici operazioni che vanno dalla misurazione di distanze e aree, alla visualizzazione di un modello tridimensionale, fino alla realizzazione di un insieme di vertici, spigoli e facce che andranno a definire la nuvola di punti finale alla quale potrà essere applicata la *texture* fotografica. Il programma consente inoltre di esportare la *mesh* nei formati .XYZ, .IGES, .DXF e .VRML che potrà essere processata attraverso ulteriori strumenti digitali.

#### 4.2.2. Caricamento delle scansioni

All'avvio del *software* viene generato automaticamente il *workspace*<sup>70</sup>, ovvero lo spazio nel quale vengono organizzate gerarchicamente le cartelle di lavoro, dove sarà possibile importare le scansioni<sup>71</sup> da elaborare. La loro importazione può avvenire mediante semplice trascinamento dei file in formato .fls all'interno del *workspace*; fatto ciò nella vista Struttura verrà creata la cartella *Scan* che conterrà tutte le scansioni contrassegnate dal simbolo della nuvola.

I dati così inseriti non risultano ancora caricati quindi è necessario procedere al loro *upload*, ciò può avvenire o cliccando con il tasto destro su *Scan* e quindi su "Carica tutte le scansioni", o cliccando con il tasto destro su ogni singola nuvola e procedere clic-

---

<sup>69</sup> La nuvola di punti finale è il risultato della registrazione, dell'elaborazione e dell'eventuale colorazione di tutte le singole scansioni. Essa può essere considerata una nuvola di punti completa frutto dell'intero lavoro di scansione.

<sup>70</sup> Il *workspace* contiene tutti gli elementi utili all'analisi e all'elaborazione delle scansioni; essi permettono la collocazione dei file di scansione e la loro organizzazione in gruppi di scansioni facilmente gestibili, forniscono informazioni sui riferimenti a sistemi di coordinate esterni e a punti presenti in scansione definiti dall'utente.

<sup>71</sup> Le scansioni sono costituite da punti che vengono registrate dallo *scanner* e sono il risultato di dati relativi alla distanza, alla riflettanza e al colore che lo strumento cattura. Ogni scansione contiene informazioni sui singoli punti misurati come posizione e orientamento, immagini a colori registrate dallo *scanner* in formato .jpg e informazioni relative alla compensazione.

cando su "Caricato" oppure visualizzando le scansioni cliccando con il tasto destro sulle nuvole e poi su "Visualizza -> Vista Piana".

A questo punto il programma assocerà un quadrato verde pieno accanto al simbolo della nuvola, qualora i dati siano stati caricati ad alta risoluzione, mentre in caso di caricamento in risoluzione ridotta il quadrato sarà verde solo per metà infine, la presenza di una stella blu sulla nuvola indicherà che non è avvenuto.

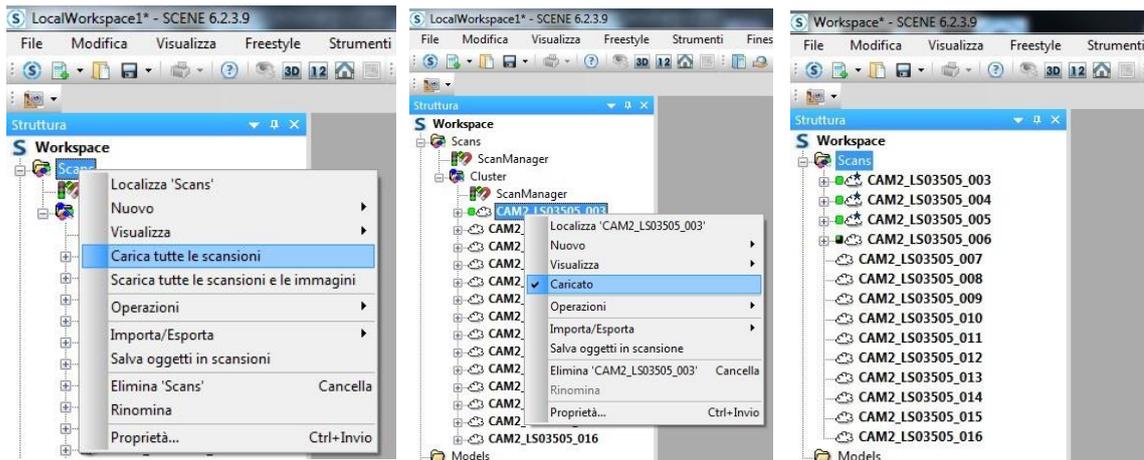


Figura 42: Procedura di caricamento delle scansioni nel workspace.

Caricate quindi tutte le scansioni sarà già possibile ottenere una prima visualizzazione spaziale attraverso la loro collocazione e la conseguente creazione di una nuvola di punti di scansione<sup>72</sup>. La nuvola di punti di scansione, in questa prima fase, risulta ottimale per una visualizzazione completa e rapida dei complessivi punti catturati dallo scanner. Essa si comporta similmente alle scansioni ma presenta alcuni importanti vantaggi tra i quali la registrazione interattiva nella "vista Corrispondenza"; attraverso quest'ultima sarà possibile trascinare le singole scansioni, o gruppi di esse, per un primo posizionamento corretto, soprattutto nel caso in cui la registrazione automatica non vada a buon fine.

<sup>72</sup> La nuvola di punti di scansione non è da confondersi con la nuvola di punti progetto poiché contiene informazioni significativamente ridotte rispetto a quella finale; essenzialmente risulta strumento utile per la visualizzazione simultanea dei dati e per una più rapida elaborazione. Ottenuta dalla collocazione delle singole scansioni si basa su una struttura di dati spaziale e non più basata su un sistema di tipo righe/colonne.

#### 4.2.3. Collocazione e registrazione dei *marker*

L'identificazione dei *marker*<sup>73</sup> presenti nelle scansioni è di fondamentale rilevanza per la corretta gerefenziazione, per questo motivo un parametro essenziale per la scelta della posizione di scansione è la corretta visibilità dei *marker* posizionati e inoltre l'inesatta collocazione dei suddetti potrebbe determinare un disallineamento e sfalsamento delle scansioni; si consiglia infatti di posizzarli in modo tale da creare un poligono chiuso attorno allo *scanner* e che la loro distanza reciproca non sia inferiore al metro.



Figura 43: Posizionamento manuale dei *marker* a scacchiera.

I *marker* presente nelle scansioni potranno essere ricavati dal software attraverso il comando di rilevamento automatico di oggetti oppure manualmente selezionando i punti di scansione opportuni ma, in ogni caso, questi dovranno essere contrassegnati da un nome che dovrà corrispondere a quello registrato dalla stazione totale al fine di potere associare a ognuno di essi le coordinate di ciascun punto. È altresì importante, al fine di permettere al *software* di collocare e calcolare matematicamente la posizione e l'orientamento delle nuvole di punti di scansione, che per ognuna di esse, siano registrati un numero non inferiore a 3 *marker* e che gli stessi risultino ben visibili in almeno

---

<sup>73</sup> I *marker*, anche detti *target*, possono essere oggetti naturali come punti d'angolo, grondaie, piani e linee, oppure artificiali, posizionati manualmente, come scacchiere cartacee, piatti circolati e sfere.

due scansioni successive; qualora ciò non fosse possibile si procederà alla registrazione di punti naturali ben visibili nelle scansioni e, se possibile, anch'essi collimati dalla stazione totale. La procedura da seguire per la collocazione dei *marker* richiede l'apertura della "Vista Piana" attraverso la quale è possibile selezionare punti appartenenti alle singole scansioni. Si procederà dunque all'individuazione automatica da parte del software dei *target* a scacchiera; cliccando con il tasto destro sulla nuvola basterà selezionare dal menu a tendina "Operazione->Trova oggetti->Scacchiere".

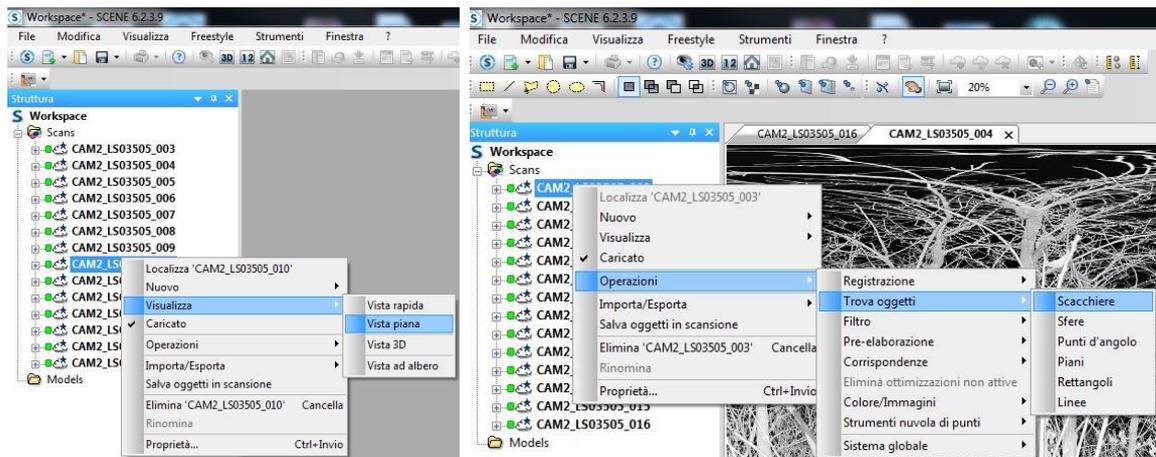


Figura 44: Apertura della "Vista Piana" e individuazione automatica dei *target*.

I punti così individuati verranno raccolti all'interno della cartella *Autofeatures* e denominati in serie come "*Checkerboard, Checkerboard2, Checkerboard3, ...*". Ora ogni singolo punto trovato automaticamente dovrà essere interrogato e rinominato.

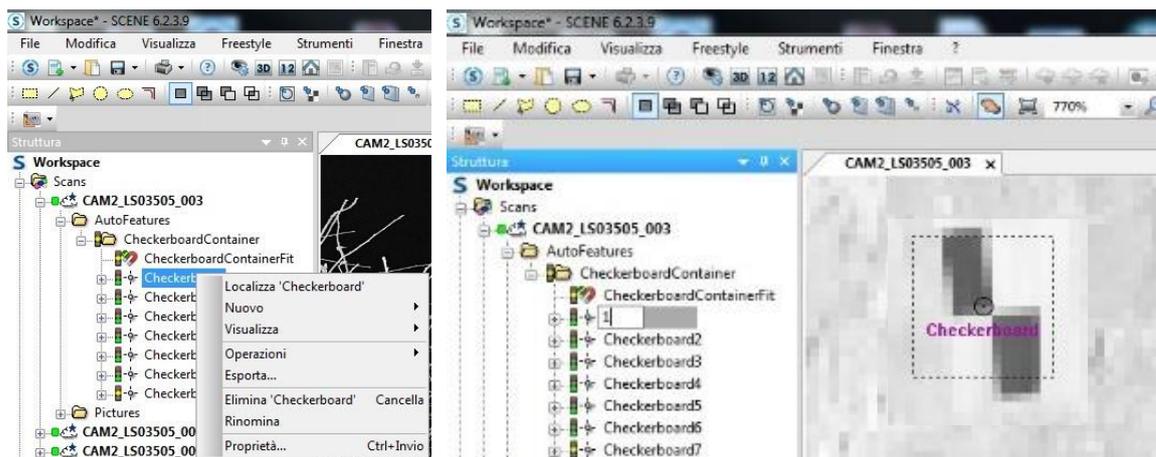


Figura 45: Creazione della cartella *AutoFeatures*, localizzazione e "Rinomina" dei *Checkerboard*.

Cliccando con il tasto destro sullo stesso, sarà possibile localizzarlo in modo da verificare che si tratti effettivamente di un *target* a scacchiera e che corrisponda il più possibi-

le al centro del *marker*; per rinominarlo sarà possibile o fare doppio clic del mouse sul punto aprendo così una finestra delle Proprietà della scacchiera in cui, nella scheda "Generale", si può cambiare il nome oppure cliccare semplicemente con il tasto destro sul punto e scegliere "Rinomina" dal menu a tendina. Non sempre però il *software* riconosce tutti i *target* a scacchiera presenti nella scansione, è quindi possibile individuarli manualmente attraverso il selettore rettangolare presente nella barra dei comandi seguendo due diversi percorsi: è possibile evidenziare l'area del *marker*, cliccare con il tasto destro e selezionare "Crea oggetti" a questo punto si può procedere o con il comando "Punto medio", che segna il punto medio all'interno dell'area selezionata, oppure con il comando "Punto medio di contrasto", che invece sceglie il punto generato dalla parte nera e bianca del *marker*, infine si può usare il comando "Crea scacchiera" che permette di selezionare, mediante il cursore del mouse, il punto centrale del *target* a scacchiera . I *marker* collocati manualmente verranno memorizzati nella cartella *Pictures* e da qui sarà possibile rinominarli. Per questi punti è necessario controllare che il semaforo risulti essere di colore verde, ciò sta ad indicare che il punto è stato posizionato correttamente<sup>74</sup>.

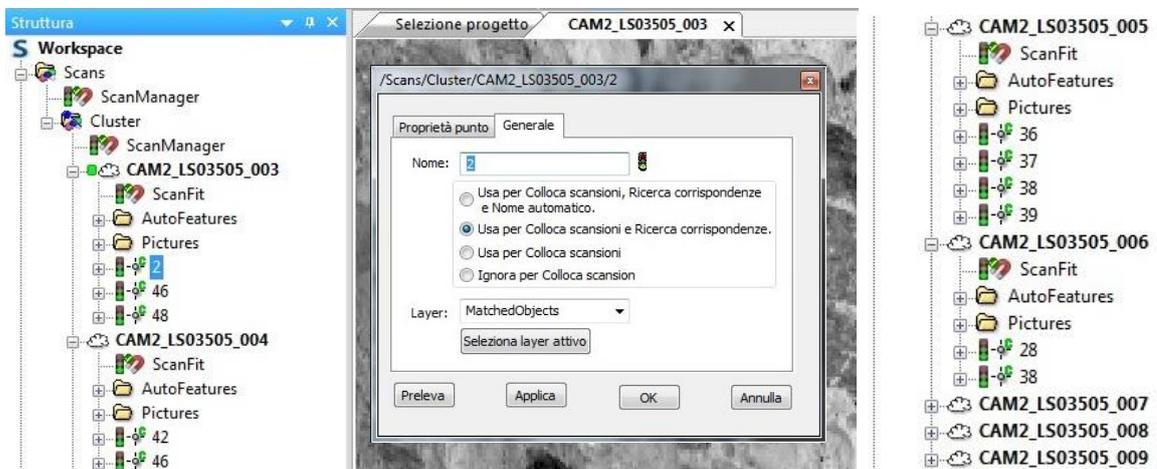


Figura 46: Verifica del semaforo verde per i *marker* posizionati manualmente e registrati nella cartella *Pictures*.

<sup>74</sup> Il simbolo del semaforo e il suo colore indica la qualità di questo criterio individuale in relazione al numero di punti in scansione (verde per valori >80, rosso per valori <20 e giallo per valori compresi tra 20 e 80), alla distanza dei punti di scansione (verde per valori <4mm, rosso per valori >20mm e giallo per valori compresi nell'intervallo) e allo scostamento del punto dal piano calcolato (verde per valori <1mm, rosso per valori >5mm e giallo per valori compresi tra questi due limiti).

#### 4.2.4. Impostazione delle coordinate e collocazione delle scansioni

Nel corso della campagna di raccolta dei dati ogni punto è stato registrato in un sistema di coordinate che è definito interno in quanto relativo allo *scanner*, ove il punto di coordinate  $x=0$ ,  $y=0$  e  $z=0$  coincide proprio con la posizione in cui si trova lo strumento. Al fine di procedere definitivamente alla registrazione e alla collocazione delle scansioni, passando dunque dal sistema di riferimento interno al nostro sistema di coordinate, è necessario importare un file contenente i dati dell'indagine o utilizzando il comando File->Importa oppure semplicemente trascinandolo all'interno della vista Struttura. Il suddetto *file* dovrà essere in formato *excel* e dovrà raccogliere le coordinate di ogni punto collocato in scansione. A questo punto il programma, in maniera automatica, creerà una nuova cartella denominata *References* dove saranno raccolti i dati di indagine e tutti i punti rilevati.

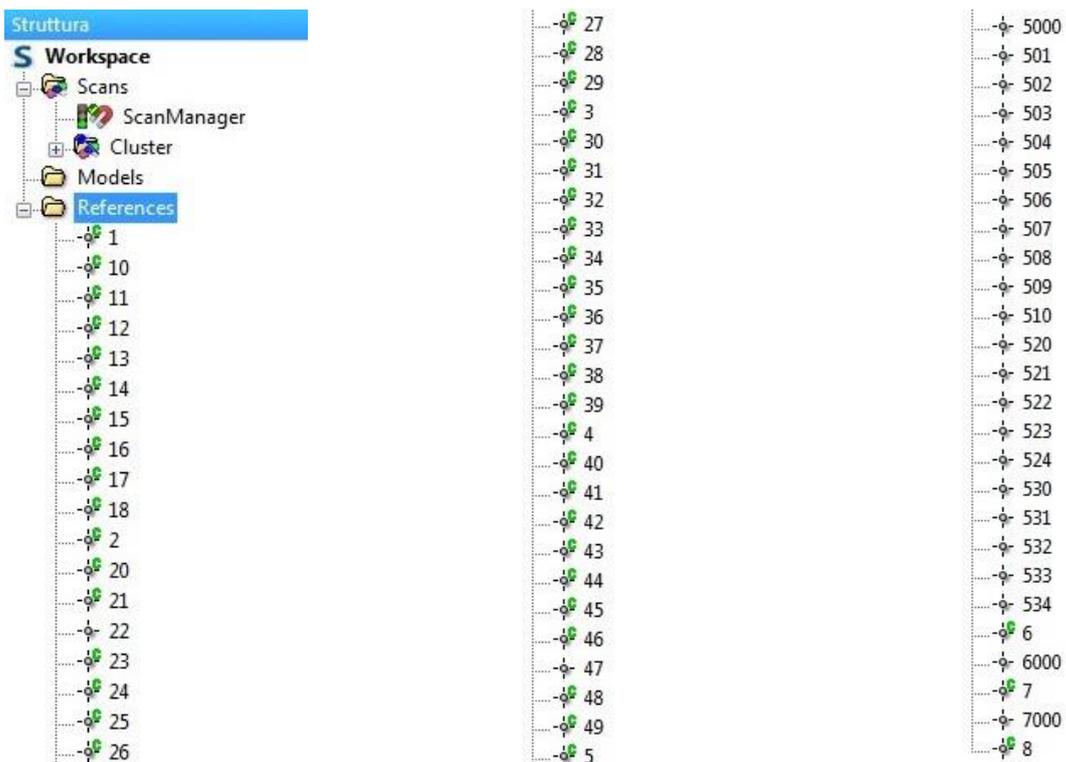


Figura 47: Punti raccolti all'interno della cartella *References*.

Solo ora sarà possibile procedere alla collocazione delle scansioni cliccando con il tasto destro sulla cartella *Scan* e quindi su "Operazione->Registrazione->Colloca scansioni"

con l'opzione "basata su *target*"<sup>75</sup>. Al termine dell'operazione il *software* avrà associato a tutti i marker le coordinate corrette e unito tutte le scansioni processate; seguirà, dopo una breve elaborazione, la verifica di corretta collocazione delle stesse che in caso di esito positivo determinerà un semaforo di colore verde vicino alla cartella *Scanfit*. Un'ulteriore verifica di tipo visivo può avvenire generando il modello 3D o la Vista Corrispondenza cliccando con il tasto destro sulla cartella *Scan* e quindi "Visualizza->Vista 3D/Vista Corrispondenza"; quest'ultima vista risulta essere molto utile perché consente di visualizzare tutti i dati contemporaneamente e di riscontrare possibili errori di sovrapposizione o disallineamento.

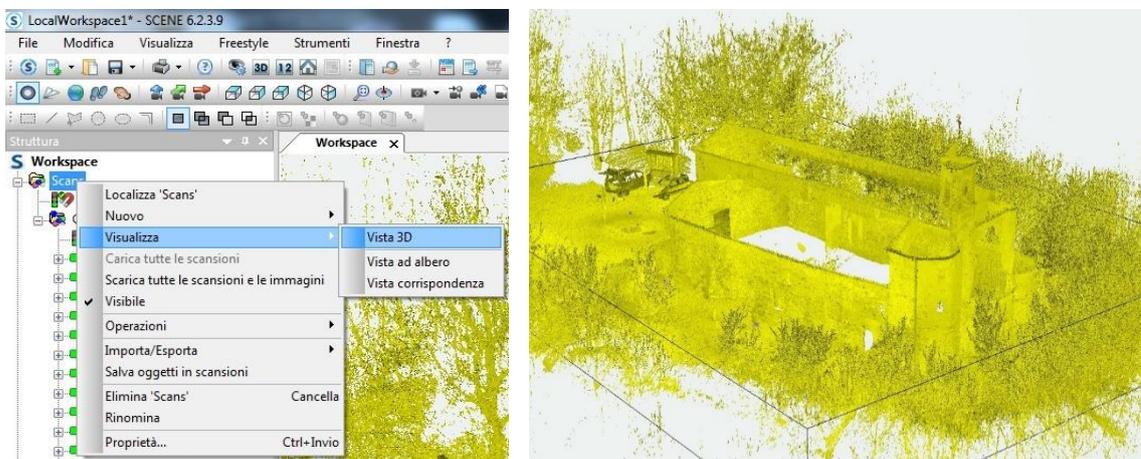


Figura 48: Verifica di corretta collocazione delle scansioni mediante modello 3D.

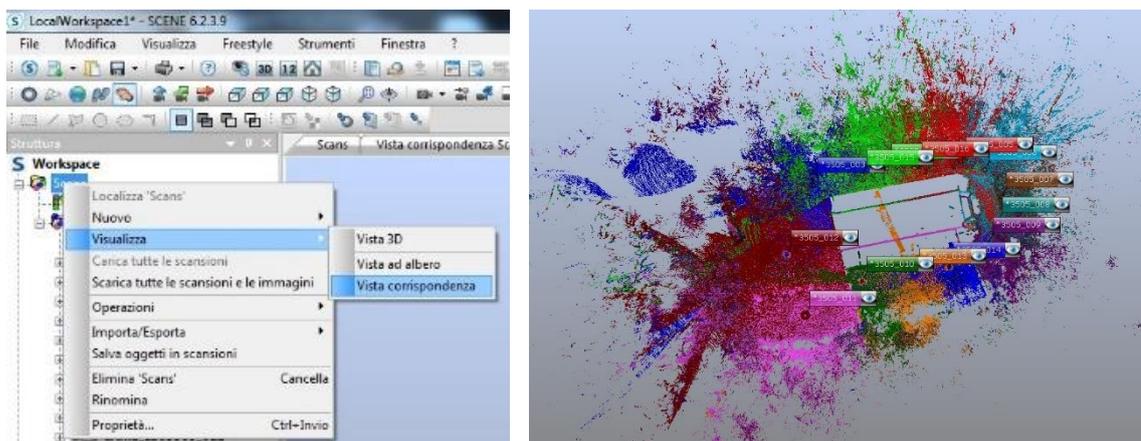


Figura 49: Verifica di corretta collocazione delle scansioni mediante la vista corrispondenza.

<sup>75</sup> La modalità di collocazione basata sui *target* è consigliata qualora si sia scelto di utilizzare marker artificiale correttamente misurati ed è l'unica che permette una registrazione incentrata su riferimenti esterni.

In una prima elaborazione il risultato della collocazione delle scansioni ha dato come esito, nello *ScanManager* generale, un semaforo rosso con conseguente raggruppamento delle nuvole in 4 *cluster* di cui 3 contrassegnati da un semaforo giallo.

Solo in seguito, grazie a diverse iterazioni, si è arrivati alla conclusione che il problema potesse essere legato alla presenza di un numero di *marker* visibili non sufficiente in alcune scansioni.

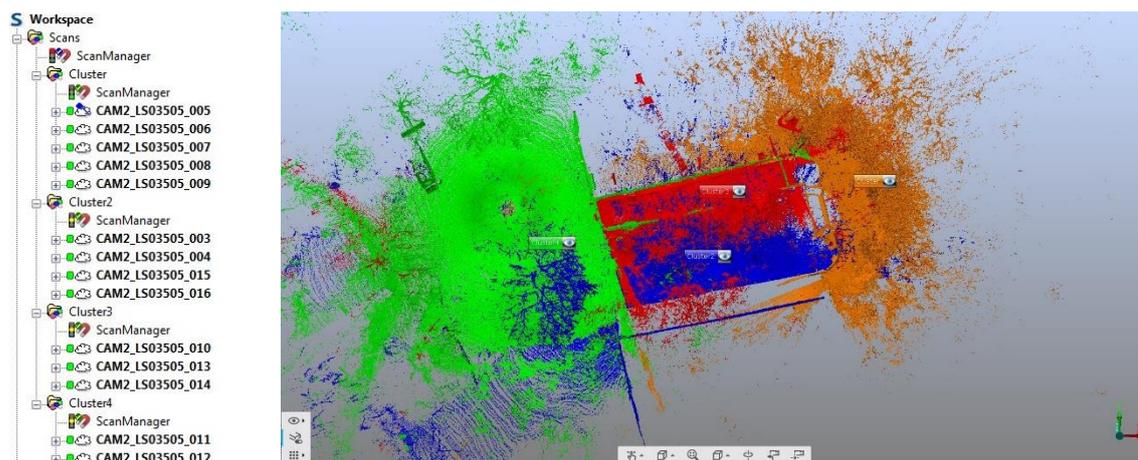


Figura 50: Errore di collocazione delle scansioni con conseguente semaforo rosso e creazione di quattro *cluster*.

Pertanto si è proceduto alla creazione di riferimenti naturali; alcuni di questi, corrispondenti a punti collimati con la stazione totale durante la fase di acquisizione dei dati altri invece, posizionati in scansione anche se sprovvisti di coordinate con l'obiettivo di ottenere una corretta registrazione. Anche per questi punti nel menù verrà ad essi associato un semaforo che ne indicherà la corretta codifica e il posizionamento nelle scansioni successive. Terminata questa procedura si è proseguito a un secondo tentativo di collocazione delle nuvole di punti di scansione che ha dato come esito finale un semaforo verde sia nella *Scanfit* delle singole scansioni che nella *ScanManager* complessivo e la creazione di un unico *cluster*. Per questo motivo si consiglia un'identificazione dei *marker* e una collocazione delle scansioni poco per volta, in modo da poter intercettare più velocemente eventuali errori derivanti dalla collimazione dei punti in scansione.

#### 4.2.5. Verifica della tensione dei marker

La fase successiva alla registrazione e alla collocazione delle scansioni riguarda la verifica della tensioni di ogni singolo *target*. Cliccando con il tasto destro sulla cartella *ScanManager* e selezionando dal menu a tendina "Proprietà" nella sezione "Risultati scansione" vengono visualizzati i semafori degli *ScanFit* riferiti ad ogni singola scansione e i relativi errori, mentre nella sezione "Tensioni dei *target*" vengono mostrate tutte le coppie di riferimenti utilizzate per la registrazione della scansione, ordinate per tensione.

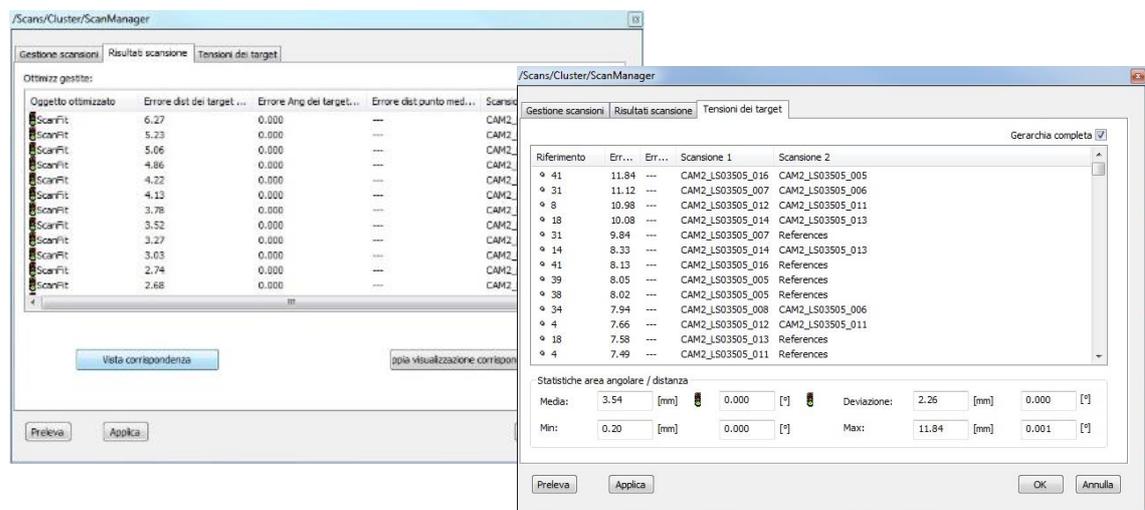


Figura 51: Finestre di verifica della tensione dei *marker*.

Nel dettaglio la tensione descrive la differenza nel sistema di coordinate complessivo tra la posizione e l'orientamento dei due oggetti di riferimento corrispondenti in due scansioni successive. I punti di riferimento, e nello specifico la loro distanza reciproca, servono da dato di input per il calcolo della tensione. In questo modo risulta più semplice verificare quali coppie hanno fornito apporto positivo alla registrazione e accertare quali invece sono le coppie di riferimenti problematiche e procedere alla loro correzione. Il procedimento di verifica della tensione dei *target* riguarda la precisione<sup>76</sup> entro la quale la stessa deve rimanere, che nel caso studio risulta essere entro i 10 mm, poiché la scala finale di rappresentazione scelta è di 1:50; suddetta verifica è stata mol-

<sup>76</sup> La "precisione" è l'indice di qualità delle misure eseguite, da non confondere con il termine "accuratezza" che indica invece la massima distanza che al 95% di probabilità può esserci tra le misure ricavabili dalla carta/rappresentazione e le dimensioni reali dell'oggetto (tolleranza).

to utile in fase di collocazione delle scansioni in quanto parametro significativo per capire quali *marker* necessitassero, a causa dell'eccessiva distanza dai punti collimati con stazione totale, di un secondo collocamento e quali invece causassero problemi alla qualità del risultato finale solo per via di incongruenza di codifica in scansioni differenti. Per fare ciò si è proceduto alla verifica della tensione dei marker collocati nelle scansioni infatti, cliccando con il tasto destro sulla cartella *ScanFit* di ogni singola scansione e selezionando quindi "Proprietà" è possibile verificare la tensione di ogni punto e ricontrollare che il semaforo risulti verde per tutti i parametri, infine, cliccando su "Visualizza", il programma permette di visualizzare la distanza che intercorre tra lo strumento di rilevamento laser e tutti i punti che sono stato individuati in scansione.

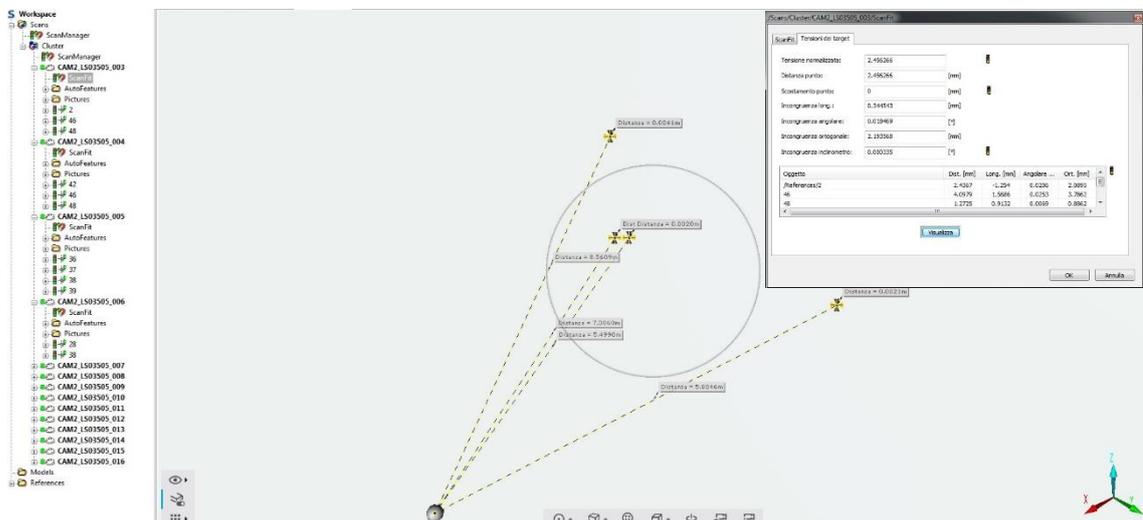


Figura 52: Visualizzazione della tensione dei *marker* e posizione degli stessi rispetto al *laser scanner*.

Nella tabella che segue sono stati riportati alcuni dei punti collocati in due scansioni successive con il relativo errore<sup>77</sup> :

Marker	Errore [mm]	Scansione 1	Scansione 2
41	11,84	CAM_LS03505_016	CAM_LS03505_005
31	11,12	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
8	10,98	CAM_LS03505_012	CAM_LS03505_011
18	10,08	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
14	8,33	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
41	8,13	CAM_LS03505_016	References

Tabella 7: Estratto delle tensioni dei *target*.

<sup>77</sup> Si rimanda agli Allegati per visionare la tabella completa.

In rosso sono stati evidenziati i punti aventi una tensione superiore a 10,99 mm e in giallo quelli con valore maggiore a 10 mm.

Il risultato finale è stato considerato soddisfacente poiché, su 148 punti collocati e riferite al file delle coordinate soltanto 4 superano il valore di precisione stabilito che si ricorda essere di 10 mm e comunque inferiori alla tolleranza (20 mm).

#### 4.2.6. Colorazione delle scansioni

Se le scansioni sono state effettuate attraverso uno strumento con l'opzione Colore sarà possibile aggiungere le informazioni sull'RGB<sup>78</sup> a tutte le scansioni; la scansione infatti conterrà tutte le immagini che lo scanner ha acquisito automaticamente durante la procedura di cattura dell'ambiente rilevato. Suddette immagini vengono memorizzate nella scansione ed è possibile visualizzarle nella vista Struttura cliccando su ogni singola scansione e aprendo la cartella *Pictures*. La colorazione delle scansioni può essere avviata in qualsiasi momento, contemporaneamente o per ogni singola scansione attraverso i comandi "Operazioni->Colore/Immagine->Applica immagini", ma si consiglia di avviare suddetta procedura solo nella fase finale poiché questa richiederà tempi lunghi di elaborazione e ovviamente andrà ad appesantire il *file* di progetto.

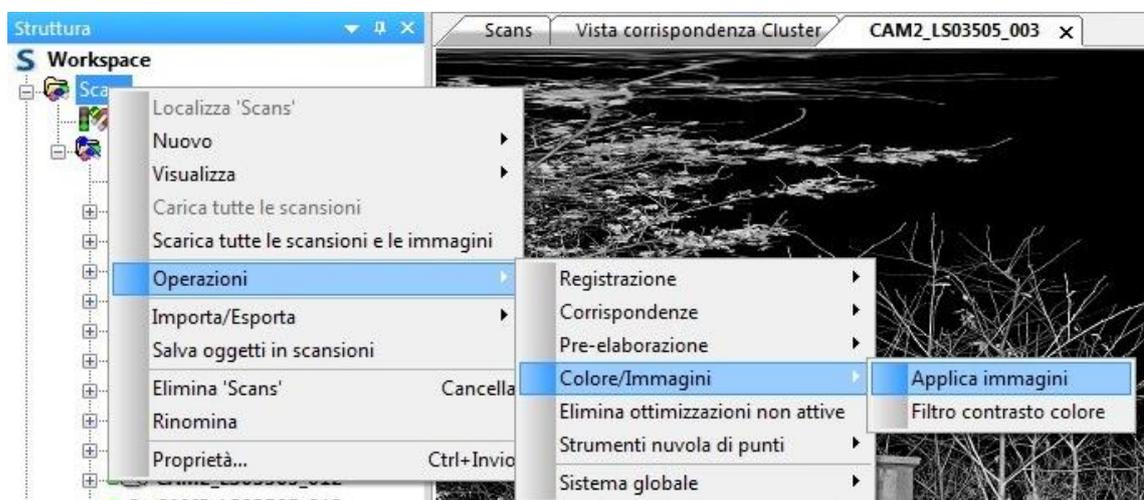


Figura 53: Procedura di caricamento delle immagini per la colorazione delle scansioni.

<sup>78</sup> RGB, acronimo di *Red-Green-Blue*, è un modello di colori di tipo additivo che si basa sul rosso, sul verde e sul blu; un'immagine infatti si compone di questi tre colori che, miscelati tra loro, danno luogo a quasi tutto lo spettro dei colori visibili.

In definitiva verranno caricate singolarmente le scansioni e le relative immagini, verranno rimosse eventuali distorsioni causate dall'obiettivo della fotocamera e infine verranno aggiunti le informazioni di colore alle nuvole di punti di scansione. Fatto ciò, bisognerà controllare le impostazioni inerenti le modifiche effettuate sui punti di scansione per precedere al salvataggio definitivo e alla visualizzazione del modello 3D cliccando sul comando presente nella barra degli strumenti.



Figura 54: Risultato finale dell'elaborazione della nuvola ottenuta con *laser scanner*.

Vi sono zone di rumore dovute alla presenza di alberi di castagno e, per quanto riguarda l'edificio rilevato, si evince la mancanza della copertura e della parte superiore dei prospetti nord, sud ed est. Ciò è dovuto al fatto che, poiché la Chiesa di Santo Stefano si erge su un'area collinare, non è stato possibile posizionare il laser scanner a una distanza opportuna; differente è invece il caso del prospetto principale (prospetto ovest) per il quale si è raggiunto un risultato abbastanza soddisfacente.

#### **4.2.7. Esportazione della nuvola di punti**

L'esportazione della nuvola di punti deve avvenire in un formato compatibile con i successivi programmi che verranno utilizzati per l'elaborazione dei dati fin qui ottenuti. Questa operazione si effettua cliccando con il tasto destro sulla cartella *Scan* quindi *Esporta->Esporta punti di scansione*, da qui si aprirà una cartella dove sarà possibile selezionare se esportare l'intera scansione o parte di essa, selezionare il formato desiderato e anche nel sistema di coordinate opportuno. Nel nostro caso si è scelto di espor-

tare l'intera scansione e quindi suddividerla, filtrarla e pulirla con l'ausilio di un altro *software*, inoltre il formato inizialmente scelto è stato .XYZ<sup>79</sup>. Ci si è accorti però, importando i *file* così ottenuti in *3DReshaper*, che la nuvola di punti risultava molto pesante da processare e sprovvista delle informazioni sull' RGB. Si è quindi proceduto con una seconda esportazione della nuvola di punti di ogni singola scansione scegliendo questa volta il formato .E57<sup>80</sup>; i *file* così ottenuti sono risultati meno pesanti e quindi più facilmente gestibili dal nuovo *software* e soprattutto hanno mantenuto tutte le informazioni acquisite nell'elaborazione precedente.

### **4.3. Elaborazione dei dati acquisiti con fotogrammetria aerea da UAV**

Dopo aver lavorato su tutte le scansioni ottenute mediante strumentazione laser sono state elaborate e processate le immagini acquisite mediante drone (quadricottero *Phantom4* della *Dji*) e fotocamera digitale (*Nikon D800E*), attraverso un *software* di *photo-processing* fotogrammetrico.

In un primo momento si è deciso di procedere all'elaborazione dei dati acquisiti in modo da ottenere tre risultati distinti ovvero: una nuvola di punti relativa a tutti i fotogrammi riguardanti sia le pareti che la copertura della Chiesa di Santo Stefano e acquisiti in volo dal drone, una *mesh* corrispondente alla sola copertura e ottenuta dall'elaborazione delle foto acquisite in volo dal drone e infine una nuvola riguardante i quattro prospetti generata dall'elaborazione degli scatti terrestri tramite fotocamera digitale. La scelta di procedere in tal modo è legata a molteplici fattori, tra questi la volontà di apprendere al meglio il funzionamento del *software* attraverso il confronto di risultati che riguardassero lo stesso soggetto.

I passaggi che verranno descritti nei paragrafi successivi riguarderanno quindi tutte e tre le elaborazioni e si specifica qui che per le elaborazioni successive si è deciso di concentrarsi su un'unica *mesh*, cioè quella ottenuta da tutti i fotogrammi nadirali e obliqui, acquisiti in volo dal drone.

---

<sup>79</sup> Il formato di testo .XYZ, creato direttamente dal *software* di scansione, identifica ogni punti di scansione in funzione delle tre coordinate cartesiane e dal valore di riflesso e li registra in uno schema di righe e colonne.

<sup>80</sup> Il *file* .E57 (*LIDAR Point Cloud Data file*) fa parte della categoria dei file di immagine 3D ed è creato per *ASTM E57 Committee on 3D Imaging Systems*.

Alfine di ottenere un risultato ottimale dall'elaborazione delle immagini acquisite, il primo passo è stato quello di selezionare i fotogrammi da processare in funzione di fattori fondamentali quali la nitidezza, l'illuminazione e il contrasto. L'obiettivo finale sarà quello di ottenere una nuvola di punti che potrà essere utilizzata nelle elaborazioni successive e che andrà ad integrarsi completamente con la *mesh* ottenuta dai dati elaborati con FARO SCENE.

#### 4.3.1. Il software Photoscan

Attraverso il software *Agisoft PhotoScan* si è proceduto all'elaborazione dei fotogrammi acquisiti dal drone e da fotocamera digitale.

Il software *Agisoft PhotoScan* è un programma di *photo processing* che permette di ottenere modelli tridimensionali e cromatici, modelli DEM<sup>81</sup>, ed elaborare ortofoto a partire da immagini aeree e non. Il programma si basa su un *workflow* autonomo e intuitivo suddiviso in tre sezioni: una deputata al caricamento delle foto, una relativa all'elaborazione dei dati da parte del software e una riguardante i fotogrammi caricati.

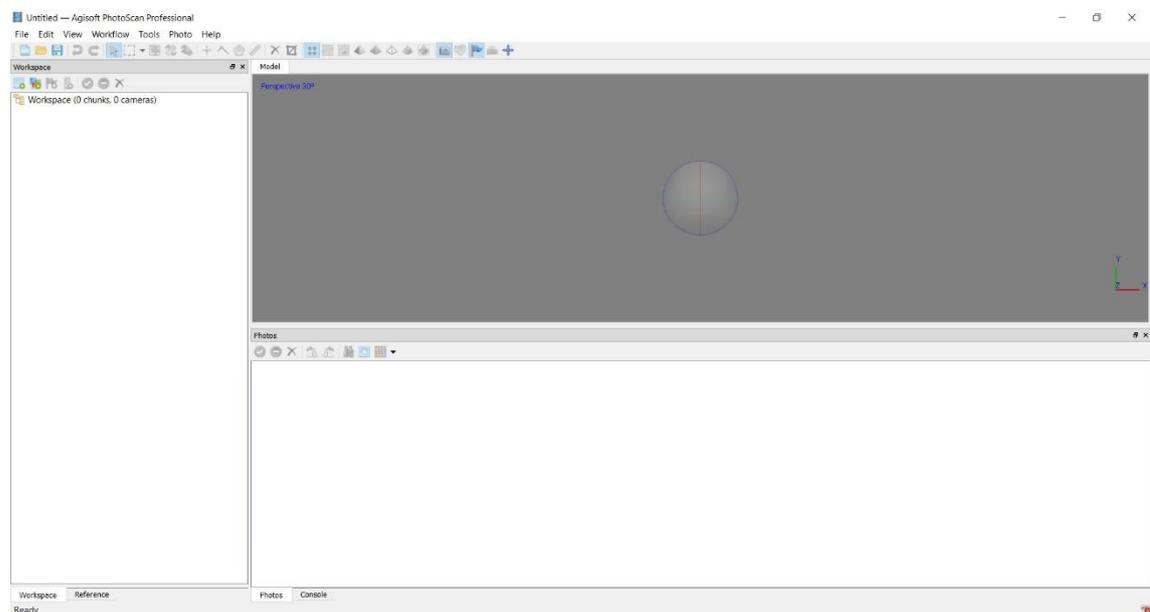


Figura 55: Schermata iniziale del software Photoscan.

*Photoscan* è in grado di elaborare un numero elevato di immagini che ritraggono l'oggetto di studio, individuando automaticamente i punti comuni in fotogrammi cattu-

---

<sup>81</sup> DEM è l'acronimo di *Digital Elevation Model*.

rati da diversi punti di vista. Il *software* consente di ottenere un risultato accurato e dettagliato, fornisce informazioni aggiuntive come la posizione e la rotazione delle singole foto e, nel caso in cui il risultato finale sia una *mesh*, associa ad ogni punti il corrispettivo colore. Per la realizzazione di un modello 3D finale il *software* procede nell'elaborazione dei fotogrammi seguendo quattro fasi principali:

- Allineamento della fotocamera e costruzione di una nuvola di punti sparsa;
- Costruzione di una nuvola di punti densa;
- Costruzione di una *mesh* poligonale;
- Creazione della nuvola di punti finale texturizzata ed eventuale *orthomosaic*.

#### 4.3.2. Scelta, caricamento e allineamento dei fotogrammi

Prima di procedere all'elaborazione dei dati è stato necessario selezionare le immagine da inserire in Photoscan; i fotogrammi utilizzati per l'elaborazione della nuvola di punti utilizzata nelle fasi successive, sono sia nadirali che oblique utilizzati dunque alla ricostruzione della copertura e dei prospetti dell'edificio. Su un totale di 197 scatti sono stati selezionati e importati 132 fotogrammi, eliminando sia le foto scattate in fase di ascesa e discesa del drone che quelle poco nitide cercando comunque di mantenere le immagini in cui risultassero presenti e ben visibili dei *marker*.

Per l'importazione dei dati è sufficiente cliccare con il tasto destro su *workspace* e quindi su "*add chunk*" in questo modo si creerà un *chunk* che è sostanzialmente un contenitore nel quale andranno caricate le foto.

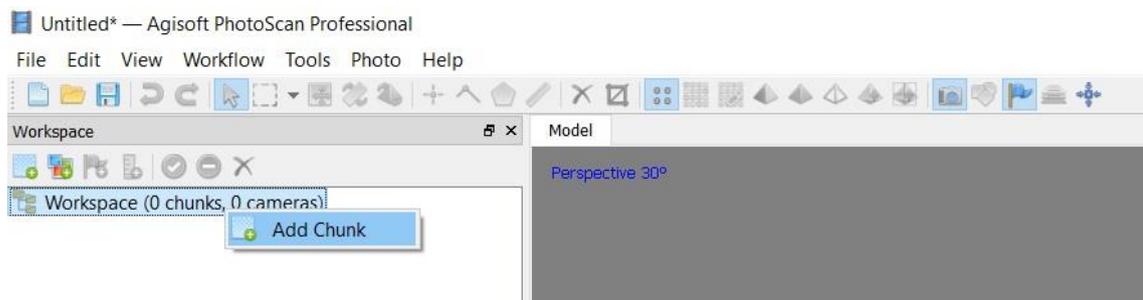


Figura 56: Creazione del *chunk* all'interno del *workspace*.

Creato il *chunk* sarà sufficiente cliccare con il tasto destro sullo stesso e dal menu a tendina selezionare "*add photos*".

A questo punto apparirà la cartella di caricamento e nel caso in cui sia già stata aperta quella contenente i fotogrammi selezionati, basterà selezionare il percorso e fare copia e incolla; si andranno infine a caricare le immagini desiderate cliccando semplicemente sul tasto "Apri".

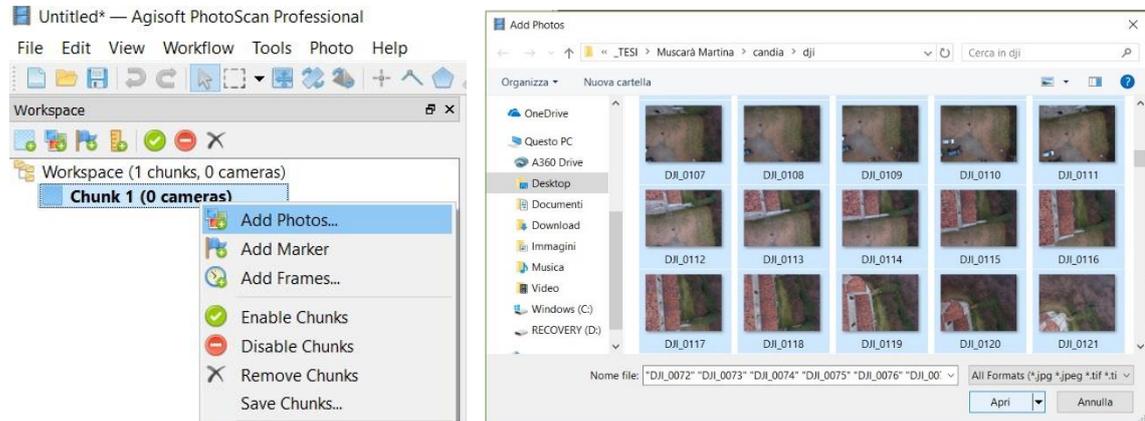


Figura 57: Caricamento di fotogrammi selezionati nella cartella chunk.

Una volta selezionate e caricate le immagini si procederà al loro allineamento; cliccando con il tasto destro sul chunk generato, all'interno del menu a tendina, bisognerà selezionare "Process"-> "Align Photos", a questo punto il *software* analizzerà i fotogrammi caricati e verificherà la possibilità di generare un contenuto tridimensionale dagli stessi. Per avviare la procedura di allineamento il software richiede di impostare quattro differenti parametri ovvero "Accuracy", "Pair selection", "Key point limit" e "Tie point limit"; il primo parametro riguarda l'accuratezza con la quale viene effettuato l'allineamento; essa muta al variare del numero di punti usati per eseguire l'*Image Matching* che stabilisce, in modo automatico, una corrispondenza tra punti estratti da due o più immagini digitali rappresentanti lo stesso oggetto<sup>82</sup> e richiede tempistiche differenti in funzione del livello di qualità desiderato. Per quanto concerne il caso studio si è deciso di impostare questo parametro su "Medium"<sup>83</sup>. Il secondo parametro, che si è deciso di disabilitare, consiste in una preselezione tra coppie di immagini tra loro confrontabili con lo scopo di snellire la procedura di *match* dei fotogrammi. Infine,

<sup>82</sup> A. LINGUA, Fotogrammetria digitale, Dispense del docente per il corso di Cartografia numerica e GIS, Politecnico di Torino.

<sup>83</sup> Il valore Medium corrisponde ad un utilizzo dell'immagine al 50% della risoluzione.

il terzo e quarto parametro indicano rispettivamente il numero limite di punti, funzione della dimensione della foto che il programma deve estrarre e il numero limite di punti che l'utente vuole che il *software* estragga da ogni immagine processata.

*Photoscan*, di *default*, imposta il *key point limit* su un valore di 40000 e il *tie point limit* su 4000 ovvero su 40000 punti per ogni fotogramma ne mantiene i migliori 4000 ma per quanto riguarda il lavoro di tesi entrambi i parametri sono stati impostati sul valore "0" chiedendo dunque al programma di tenere il maggior numero di punti possibili per ogni foto.

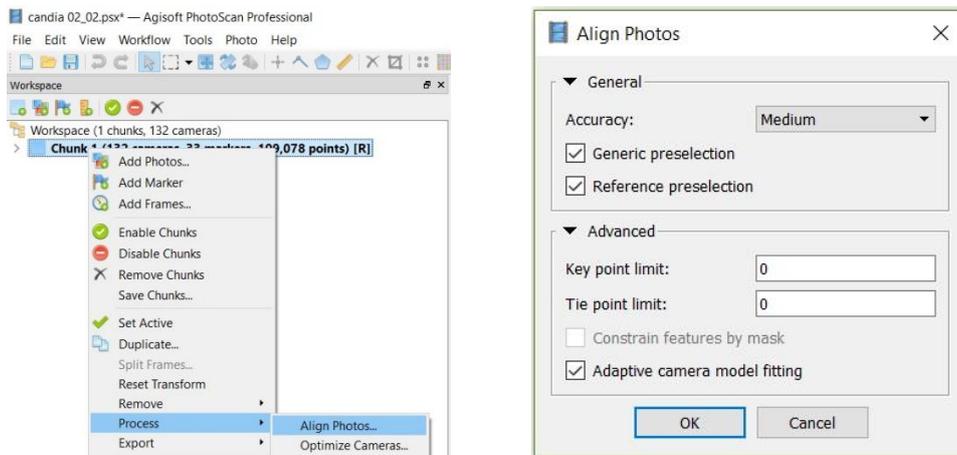


Figura 58: Settaggio dei parametri richiesti per avviare la procedura di allineamento delle immagini.

Alla fine del processo, nello spazio di elaborazione dei dati, verrà visualizzato un insieme di punti che costituiscono la cosiddetta *sparse cloud*, ovvero la nuvola di punti che il *software* ha utilizzato per allineare il sistema, e i quadrati blu che identificano le posizioni nello spazio della fotocamera utilizzata per l'acquisizione dei fotogrammi.

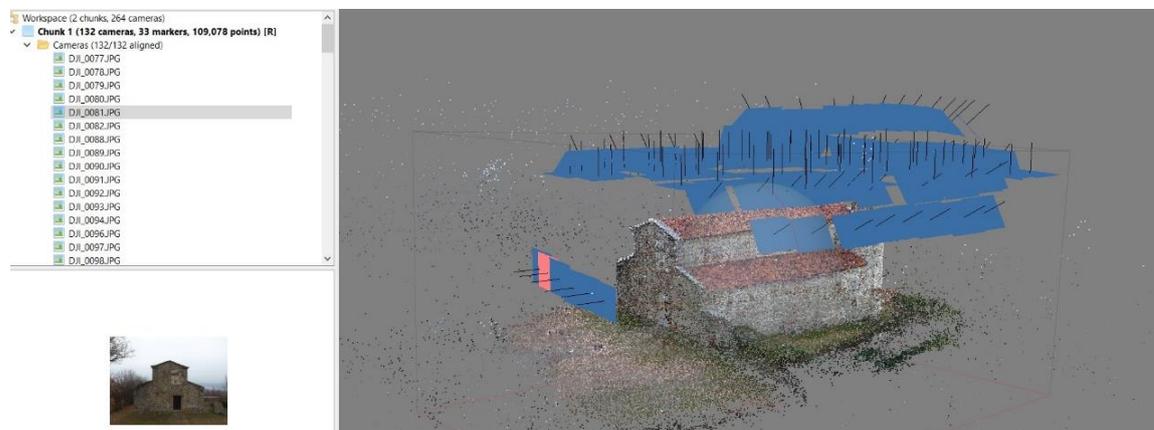


Figura 59: Creazione della *sparse cloud* e visualizzazione della posizione spaziale della fotocamera.

#### 4.3.3. Impostazione del sistema di riferimento e posizionamento dei *marker*.

Dopo aver allineato i fotogrammi e generato la nuvola di punti sparsa si può procedere all'importazione del *file* che contiene informazioni sulle coordinate spaziali dei *marker*. Per fare ciò bisognerà passare dalla cartella "*workspace*" alla cartella "*reference*" e quindi cliccando sul tasto "*Import*", posizionato in alto nella barra degli strumenti, si andrà a selezionare il *file* desiderato. È stato utilizzato lo stesso file importato in SCENE, solo che in questo caso è stato necessario convertirlo in formato .txt poiché il programma non supportava il formato .csv.

Una volta fatto ciò bisognerà impostare il corretto sistema di riferimento infatti il *software*, se non specificato, utilizza un sistema di coordinate cartesiane interne al sistema ma, nel caso in esame è stato impostato il Sistema WGS84, UTM fuso 32N. Avvenuto il corretto settaggio del sistema di riferimento e, al fine di assicurare la georeferenziazione della nuvola di punti, si è proceduto al posizionamento manuale dei *marker*. Il singolo punto verrà quindi selezionato e collocato in tutte le immagini in cui esso è presente, assicurando che ognuno venga registrato in almeno tre fotogrammi; il programma, a questo punto, restituirà un posizionamento abbastanza corretto dei *marker* così collocati agevolando e velocizzando i tempi inerenti questa procedura.

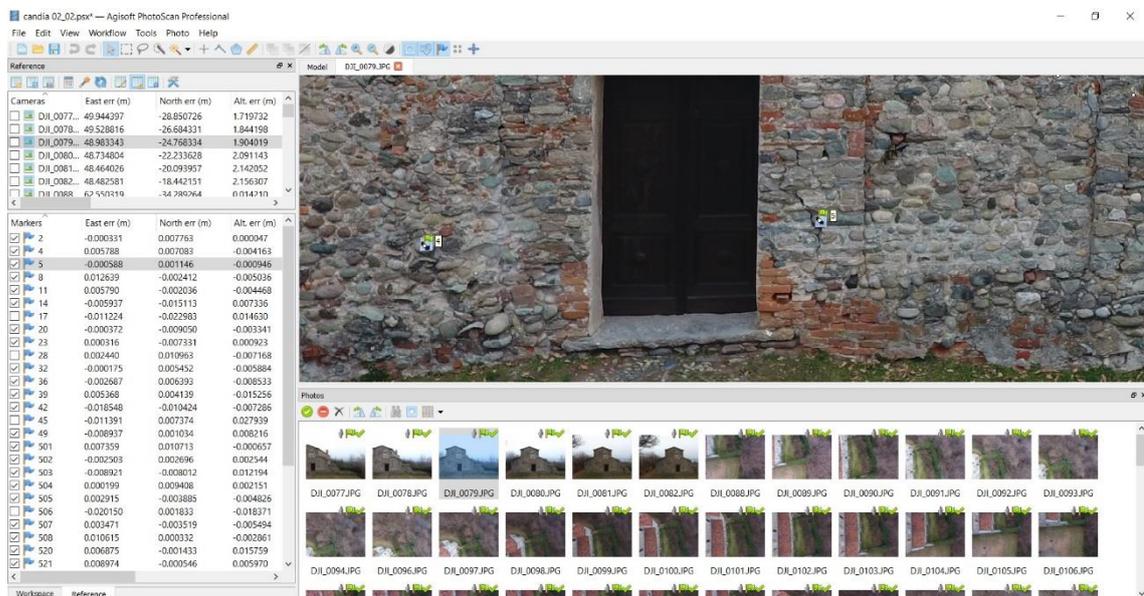


Figura 60: procedura di posizionamento manuale dei *marker* presenti nei fotogrammi.

Durante la procedura di collocazione dei *marker* è possibile verificare alcuni parametri che li caratterizzano come le coordinate spaziali corrispondenti al singolo punto e quel-

le stimate dal *software*, gli errori nelle tre direzioni riferiti ad ogni *marker*, quelli globali e l'accuratezza e il numero di proiezioni ovvero quante volte un dato *target* è stato collocato; infine, cliccando con il tasto destro su ogni singolo punto e possibile selezionare dal menu a tendina la voce "Show Info..." mediante la quale si potrà interrogare il *marker* circa l'errore in *pixel* presente in ogni immagine che lo contiene.

In questo modo sarà possibile selezionare i fotogrammi in cui la posizione del *marker* ha un errore elevato e quindi provvedere al ricollocamento o alla rimozione dello stesso. Si procederà quindi al ricollocamento dei punti fino a ottenere la precisione desiderata.

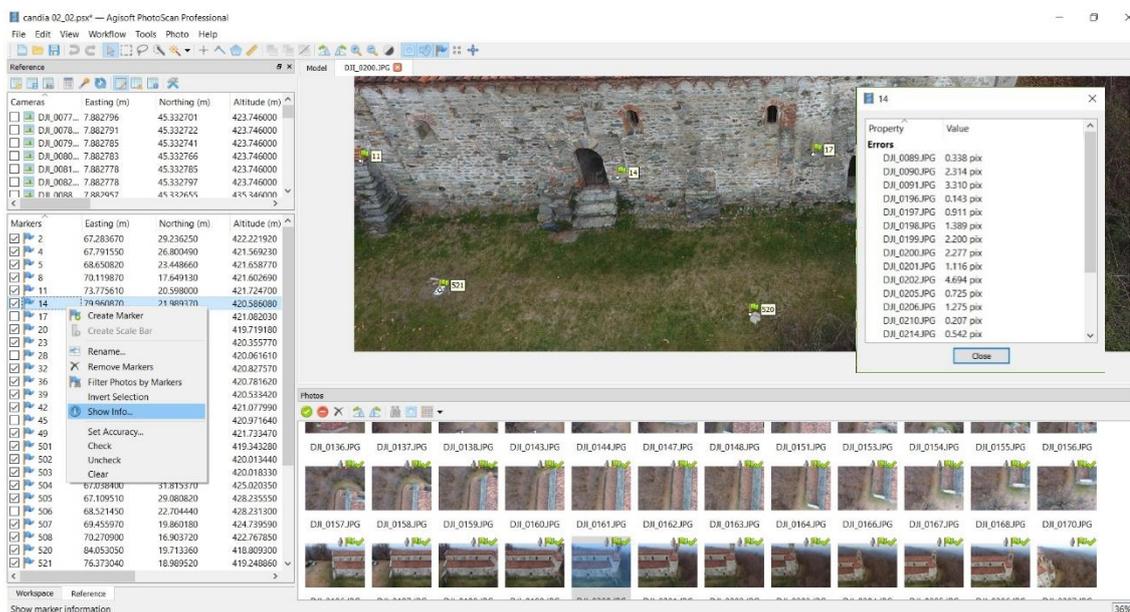


Figura 61: Visualizzazione dell'errore in *pixel* del singolo punto collocato.

Sulla base dei parametri descritti, nella fase finale del processo di elaborazione dei dati, alcuni dei *marker* collocati, nello specifico per un numero pari ad 1/5 dei GCPs<sup>84</sup>, sono stati identificati con *check point*. A questo punto si procederà al riallineamento dei fotogrammi e all'ottimizzazione dei parametri di orientamento ricalcolati secondo le proprietà acquisite dall'operazione di collocazione dei *marker*.

Il software produrrà una nuova nuvola di punti sparsa, ma questa volta georeferenziata secondo il sistema di riferimento desiderato.

<sup>84</sup> I GCPs (Ground Control Points) sono i punti di controllo a terra le cui coordinate, rilevate tramite stazione totale, sono utilizzati per migliorare l'accuratezza spaziale dell'intero progetto.

#### 4.3.4. Costruzione ed esportazione della nuvola di punti e del *report* finale

La fase successiva consiste nell'estrazione densa dei punti infatti, una volta che il sistema è stato orientato e georeferenziato, il software analizzerà ogni fotogramma per gruppi di punti cercando di estrarre da questi più informazioni possibili. Basterà quindi cliccare con il tasto destro su *Chunk*->*Process*->*Build Dense Cloud* e procedere al settaggio dei parametri richiesti per avviare la procedura di costruzione della nuvola di punti densa.

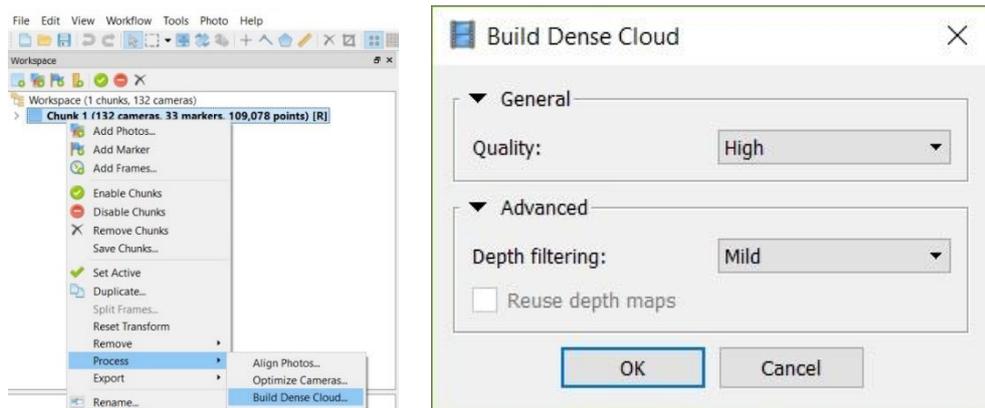


Figura 62: Procedura per costruire la nuvola di punti densa e impostazione dei parametri.

Per avviare questa procedura il programma richiede di impostare due parametri; il primo riguarda il livello di accuratezza con il quale verrà effettuata l'operazione di densificazione della nuvola, il secondo invece permette di scegliere il livello di filtraggio da usare per ridurre al minimo gli errori dovuti alla presenza di rumori e/o distorsioni nei fotogrammi. Nel caso in esame i valori scelti sono "High" per quanto riguarda l'accuratezza, il programma estrarrà un punto ogni 6 *pixels*, e "Mild" per quanto concerne il filtraggio dei punti.



Figura 63: Visualizzazione della Dense Cloud.

Il passaggio successivo riguarda la costruzione della *mesh* e la sua texturizzazione; cliccando con il tasto destro su *Chunk->Process->Build Mesh* il programma genera il modello poligonale a partire dalla nuvola di punti densa.

Anche per questi 2 *step* bisognerà impostare dei parametri. I primi tre determineranno la costruzione della *mesh* mentre i restanti tre né consentiranno la texturizzazione:

- "*Surface Type*", ovvero la tipologia di superficie che nel caso studio è stata impostata su "*Arbitrary*";
- "*Source data*", che consiste nel dato di partenza dal quale partire per costruire il modello poligonale che è stato settato su "*dense cloud*";
- "*Face count*", per il quale è stato selezionato "*High*" ovvero il più alto grado di qualità;
- "*Interpolation*", ovvero l'interpolazione che, nel caso in esame, è stata disabilitata al fine di poter costruire solo le superfici facenti parte della nuvola densa;
- "*Mapping Mode*", impostata su "*orthophoto*";
- "*Blending Mode*", che è stata impostata su "*mosaic*" la cui funzione è quella di selezionare il modo attraverso il quale i *pixels*, appartenenti a immagini diverse, vengono combinati tra loro per restituire la *texture*.

La costruzione di un modello poligonale texturizzato permetterà in fine di generare sia il modello DSM che eventuali ortofoto.



Figura 64: Risultato finale ottenuto generando il modello poligonale con *texture*.

Sarà infine possibile esportare sia la nuvola di punti in formati diversi, compatibili con i programmi che verranno utilizzati per le elaborazioni successive, sia un *Report* contenente dati relativi alle immagini, alla camera utilizzata per l'acquisizione dei fotogrammi e agli errori relativi al posizionamento dei marker nelle tre direzioni.

Il modello così ottenuto è stato ritenuto affidabile poiché gli errori rientrano in valori compresi tra 1 e 2 cm; si è scelto di esportare il modello 3D in formato .las e di procedere alla pulizia con l'ausilio del software *3DReshaper*.

Differentemente dalla nuvola ottenuta dall'elaborazione delle scansioni con il *software FARO SCENE* questa, ottenuta dall'elaborazione fotogrammetrica, è risultata molto più leggera da processare e sin da subito provvista di tutte le informazioni cromatiche.

Di seguito vengono riportate alcune delle informazioni raccolte nel report generato da Photoscan ma si rimanda agli allegati per una più approfondita visualizzazione.

Point	X error [m]	Y error [m]	Z error [m]	XY error [m]	Total error [m]	Projections	Image [pix]
11	0,004	-0,002	-0,005	0,004	0,006	18	0,789
14	-0,007	-0,015	0,007	0,017	0,018	19	1,781
2	-0,002	0,008	0,001	0,008	0,008	4	0,753
20	-0,002	-0,01	-0,003	0,009	0,010	20	0,746
23	-0,001	-0,008	0,002	0,008	0,008	23	1,049
32	-0,001	0,005	-0,003	0,005	0,006	15	0,619
36	-0,003	0,006	-0,006	0,007	0,009	11	0,619

Tabella 8: Estratto degli errori dovuti al posizionamento dei *Control Point*.

Point	X error [m]	Y error [m]	Z error [m]	XY error [m]	Total error [m]	Projections	Image [pix]
17	-0,013	-0,014	0,006	0,020	0,021	18	1,493
28	0,0018	0,010	-0,005	0,011	0,012	21	0,609
45	-0,012	0,008	0,029	0,014	0,033	6	0,981

Tabella 9: Estratto degli errori dovuti al posizionamento dei *Check Point*.

Count	X error [m]	Y error [m]	Z error [m]	XY error [m]	Total error [m]	Image [pix]
24	0,006	0,0067858	0,0066807	0,009	0,012	1,432

Tabella 10: RMSE<sup>85</sup> riferita ai *Control Point*.

Count	X error [m]	Y error [m]	Z error [m]	XY error [m]	Total error [m]	Image [pix]
6	0,014	0,009	0,015	0,016	0,021	1,093

Tabella 11: RMSE riferita ai *Check Point*.

<sup>85</sup> RSME (*Root Mean Square Error*) indica la distanza tra la posizione iniziale e quella stimata dei GCPs (*Ground Control Points*).

## 5. Elaborazione delle nuvole di punti

Una volta realizzate le due nuvole di punti, rispettivamente frutto dell'elaborazione dei dati acquisiti attraverso il *laser scanner* terrestre e mediante fotogrammetria aerea, sarà necessario trattarle prima singolarmente e poi procedere alla loro unione, al fine di ottenere un unico modello tridimensionale che possa essere utilizzato per le elaborazioni successive. Suddette procedure possono essere effettuate nello stesso programma che ha prodotto la nuvola di punti o, in altri casi, si può procedere all'esportazione dei modelli e alla loro importazione in altri programmi.

Nel caso in esame sono stati utilizzati tre *software* differenti che hanno permesso la pulizia, il taglio e, successivamente, insieme al confronto, anche l'unione delle nuvole di punti in un modello che è stato infine importato all'interno di un programma di rappresentazione parametrica.

Lo scopo ultimo è stato quello di poter interrogare ed analizzare il modello sulle sue caratteristiche intrinseche, testando da una parte l'interoperabilità tra *software* e dall'altra, cercando di ottenere una sua ulteriore rappresentazione grafica da confrontare con altri strumenti di lettura.

### 5.1. Pulitura delle nuvole di punti

I *file* precedentemente ottenuti, soprattutto quello da scansioni *laser*, risultano molto pesanti e quindi, per poter ridurre i tempi delle elaborazioni successive, si è proceduto alla loro pulizia e al loro taglio, delimitando l'area di interesse al solo edificio oggetto di studio. Le nuvole verranno quindi ripulite di alcune impurità presenti e nel dettaglio la pulizia che si vuole effettuare è quella che riguarda lo spazio che circonda la Chiesa di Santo Stefano rimuovendo dunque piante, alberi e autoveicoli che sono stati rilevati.

#### 5.1.1. Il *software 3DReshaper*

Il *software 3DReshaper* è un programma che nasce per la modellazione tridimensionale di nuvole di punti provenienti da qualsiasi tipo di elaborazione e quindi, come nel nostro caso, originate da *laser scanner* terrestre e fotogrammetria tramite UAV.

Le nuvole di punti ottenute dall'elaborazione delle scansioni attraverso il *software FARO SCENE* sono state esportate singolarmente per un totale di 14 *file* in formato .E57

mentre, quella ottenuta mediante il programma *Agisoft Photoscan* è stata esportata in formato .las.

Entrambi questi file possono essere gestiti facilmente attraverso *3DReshaper*, infatti, il programma permette l'importazione di *file* senza limiti di formati e dimensioni e tra le sue numerose funzioni c'è appunto la possibilità di pulire, ridurre dal rumore, separare/unire le nuvole importate.

L'interfaccia è molto semplice e intuitiva: il risultato finale può essere ottimizzato in funzione della qualità, delle caratteristiche geometriche e degli obiettivi dell'utente ed è esportabile in svariati formati come il .las e il .dxf.

L'uso di questo *software*, ai fini del lavoro di tesi, ha sicuramente garantito una miglioria in termini di pulizia del lavoro fino a questo punto prodotto, in tempi più che ragionevoli.

### 5.1.2. La pulizia e l'esportazione delle nuvole di punti

Le operazioni di pulizia ed esportazione dei risultati in questa fase di elaborazione sono state svolte sulle due nuvole di punti trattando i medesimi passaggi; si procederà alla loro descrizione rispettando lo stesso ordine seguito nell'espore la fase di elaborazione dei dati acquisiti.

Per quanto concerne le nuvole di punti esportate da *FARO SCENE*, come già indicato in precedenza, queste sono state importate in *3DReshaper* in un formato .E57. Ci si è subito accorti di un problema che riguardava le proprietà dei *file* importati: infatti questi, una volta caricati nello spazio modello, mantenevano le coordinate dei punti ma risultavano sprovviste delle informazioni riguardanti l'RGB.

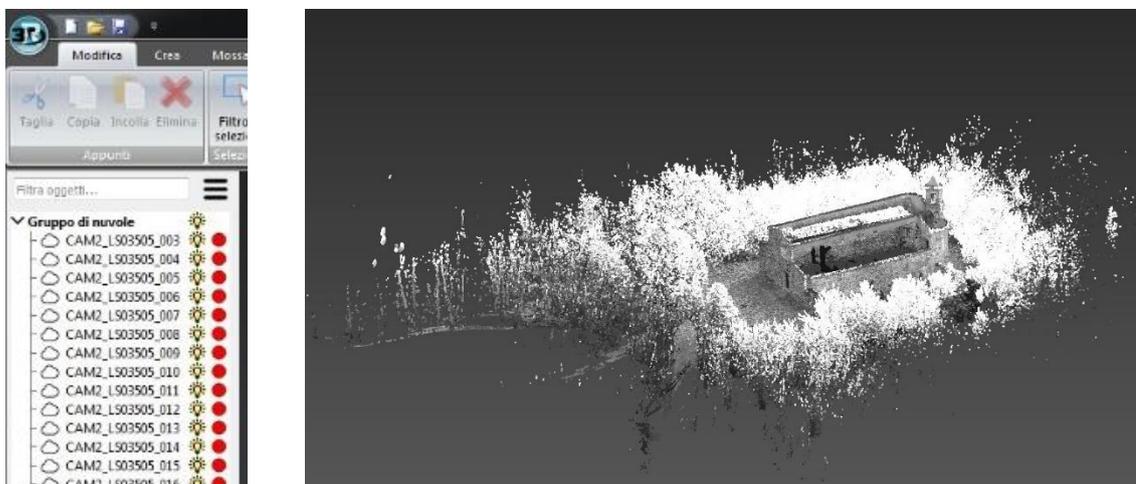
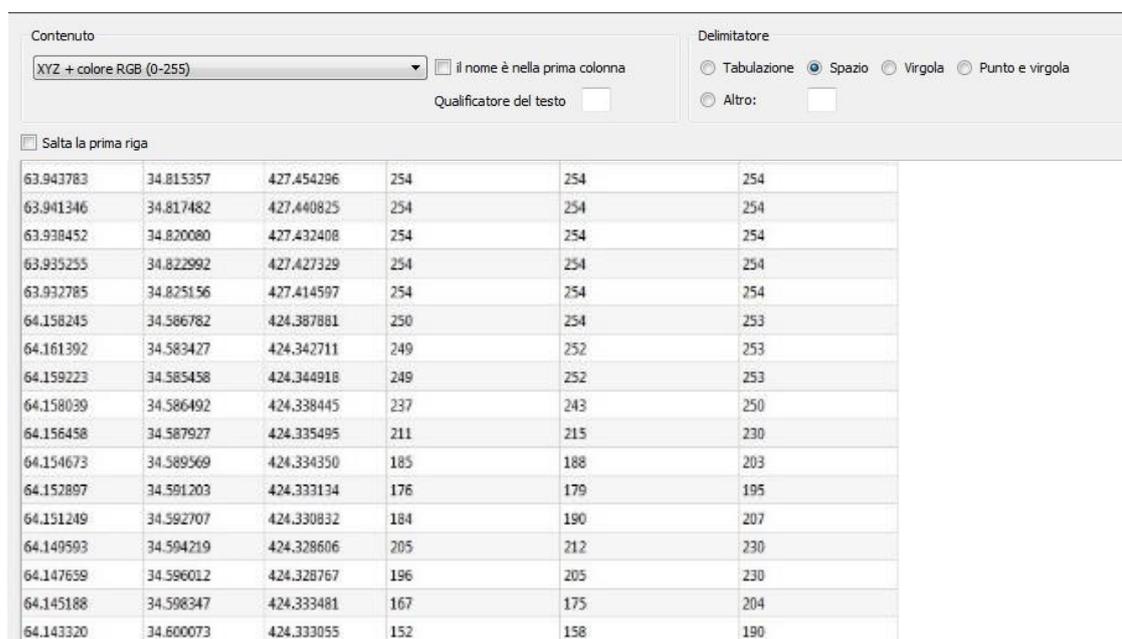


Figura 65: Problema riscontrato durante l'importazione di *file* formato .E57 in *3DReshaper*.

Per questo motivo, al fine di ovviare all'inconveniente riscontrato, la prima operazione effettuata è stata quella di riesportare i 14 *file* in un altro formato, in modo da poter mantenere integre tutte le informazioni fondamentali per i processi e le lavorazioni successive.

Il formato che ha fornito tutte le caratteristiche attese è stato l'.ACS: ciò è stato constatato sia da un punto di vista puramente grafico, infatti le nuvole così importate mantenevano il colore originario, sia dal fatto che, per ogni singola importazione, il *software* forniva un'anteprima delle caratteristiche intrinseche sotto forma di scheda.



63.943783	34.815357	427.454296	254	254	254
63.941346	34.817482	427.440825	254	254	254
63.938452	34.820080	427.432408	254	254	254
63.935255	34.822992	427.427329	254	254	254
63.932785	34.825156	427.414597	254	254	254
64.158245	34.586782	424.387881	250	254	253
64.161392	34.583427	424.342711	249	252	253
64.159223	34.585458	424.344918	249	252	253
64.158039	34.586492	424.338445	237	243	250
64.156458	34.587927	424.335495	211	215	230
64.154673	34.589569	424.334350	185	188	203
64.152897	34.591203	424.333134	176	179	195
64.151249	34.592707	424.330832	184	190	207
64.149593	34.594219	424.328606	205	212	230
64.147659	34.596012	424.328767	196	205	230
64.145188	34.598347	424.333481	167	175	204
64.143320	34.600073	424.333055	152	158	190

Figura 66: Stralcio dell'anteprima delle caratteristiche spaziale e di colore dei *file* .ACS.

Una volta caricati tutti i 14 *file* che, poiché georeferenziate collimano automaticamente, si è proceduto ad una prima pulizia grossolana. Per fare ciò, previa selezione della nuvola, basta selezionare il comando "pulisci/separa Nuvola" presente nella barra degli strumenti.

Attraverso il selettore poligonale o rettangolare, si potranno selezionare le zone di rumore che, nel nostro caso, sono sostanzialmente dovute alla presenza di vegetazione (alberi di castagno) che circonda la chiesa; a questo punto bisognerà cliccare "cancella", specificare se i punti che si vogliono eliminare sono all'interno o all'esterno della area selezionata e infine, cliccando su "OK" verrà avviata la procedura di eliminazione.

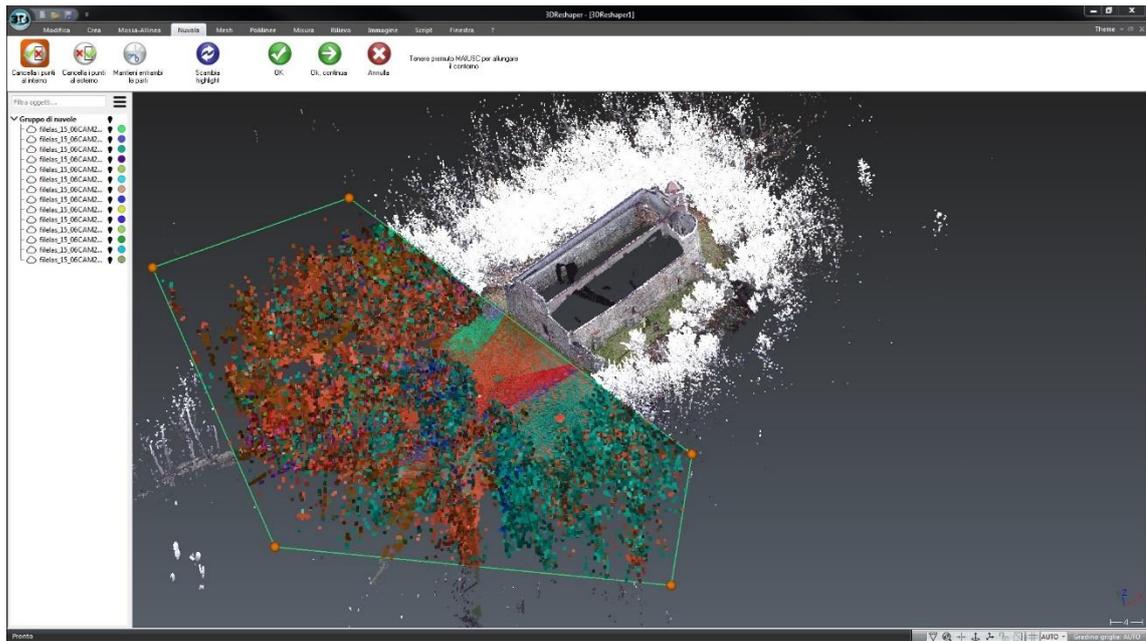


Figura 67: Procedura di pulizia grossolana della nuvola di punti.

Eseguita una prima pulitura grossolana delle nuvole si è proceduto con una pulitura più precisa e dettagliata; per questo motivo si è scelto di selezionare ogni nuvola singolarmente, usufruire delle viste disponibili e, attraverso il comando precedente, eliminare i punti indesiderati in modo da ottenere un risultato ben definito.

Conclusa questa procedura sono state selezionate tutte le nuvole ed esportate in un file in formato .las mediante il comando "Esportazione->Esporta nuvola/e" presente nel menu a tendina.

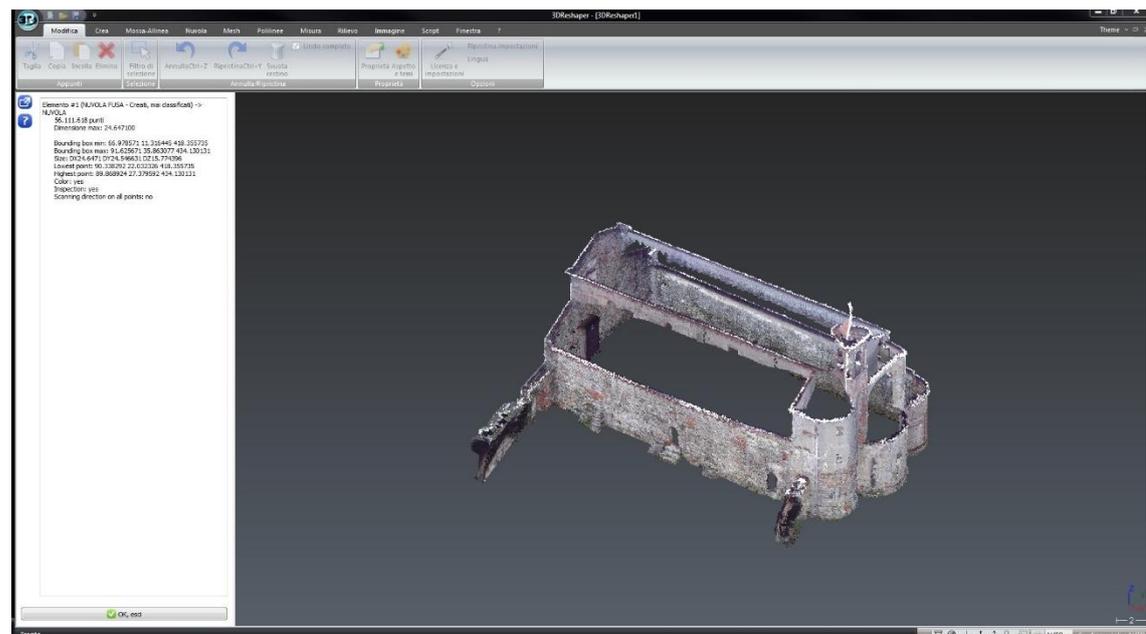


Figura 68: Risultato finale della nuvola ottenuta da laser scanner.

La nuvola di punti ottenuta dalla elaborazione mediante FARO SCENE aveva una dimensione pari quasi al doppio di quella trattata con quest'ultimo programma che nello specifico risulta essere costituita da un totale di 56.111.618 punti.

Come è stato detto in precedenza le procedure finora esposte, che hanno permesso di processare la nuvola di punti *laser scanner*, sono state applicate anche alla nuvola di punti fotogrammetrica.

La differenza, come si può notare dall'immagine che segue, sta nel fatto che il *file* importato su *3DReshaper* risulta essere un unico *file* .las di dimensioni significativamente ridotte, ciò è dovuto alla minor presenza di zone di rumore ma soprattutto ad una minor quantità di punti, nello specifico 9.360.119 punti, che determinano un'inferiore densità della nuvola.

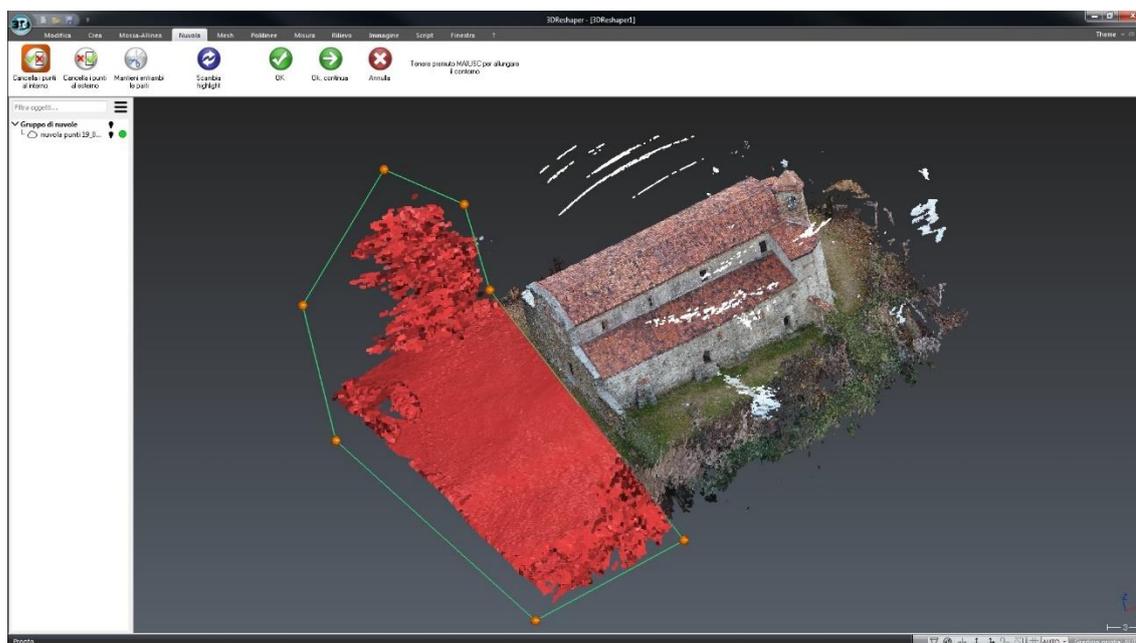


Figura 69: Nuvola di punti fotogrammetrica.

Già in questa fase è stato possibile fare un primo confronto tra le due nuvole: la nuvola di punti ottenuta mediante l'elaborazione dei fotogrammi, risulta costituita da un numero di punti pari ad 1/6 della quantità che costituisce la nuvola laser scanner.

Inoltre, durante questa prima fase di elaborazione delle nuvole di punti, sono emerse delle criticità legate alle condizioni al contorno.

Durante la fase di rilievo infatti, a causa dalla posizione in cui si trova la Chiesa di Santo Stefano (collina), non è stato possibile posizionare il *laser scanner* ad una distanza ido-

nea tale da consentire l'acquisizione di tutte le parti che la compongono; ciò è stato possibile solo per il prospetto ovest grazie alla presenza di un piazzale antistante l'ingresso principale.



Figura 70: Criticità del modello *laser scanner* riscontrate per le parti non rilevabili dell'abside, del campanile e del prospetto sud.

Per quanto riguarda la nuvola di punti fotogrammetrica sono state riscontrate delle criticità, in questo caso legate alla presenza di piante. Nella prima immagine infatti, eliminando i punti ricoperti di vegetazione infestante, risultano assenti quelli costituenti l'estremità superiore del muro perimetrale mentre, nella seconda immagine, la presenza di alberi di castagno non hanno permesso alla camera montata sul drone di acquisire un numero sufficiente di fotogrammi per l'elaborazione della parte inferiore dei prospetti.



Figura 71: Criticità del modello fotogrammetrico riscontrate per la parte inferiore dei prospetti.

Per suddetti motivi si è scelto di mantenere, per la parte superiore dell'edificio (copertura, campanile, abside, prospetto nord e sud), la sezione di nuvola di punti ottenuta da fotogrammetria aerea e per quanto riguarda le restanti parti (intero prospetto ovest e porzioni inferiori dei prospetti nord, sud ed est) di considerare il risultato ottenuto dall'elaborazione laser scanner.

## 5.2. La nuvola laser scanner e la nuvola fotogrammetrica a confronto

Una volta eliminate le zone di rumore e i punti indesiderati presenti nelle due nuvole di punti, si procederà con l'eliminazione di tutte le superfici di sovrapposizione, in modo tale da ottenere una continuità tra le *mesh* dei due modelli.



Figura 72: creazione del modello tridimensionale finale dal confronto e dall'unione delle due nuvole di punti.

L'integrazione dei risultati fino ad ora ottenuti porterà quindi alla realizzazione di un modello tridimensionale unico e completo che potrà essere utilizzato per le trattazioni successive.

### 5.1.1. Il software CloudCompare

Il software *CloudCompare* è un programma *opensource* che, attraverso un'ampia scelta di comandi, permette di processare, gestire e modificare nuvole di punti di elevate dimensioni.

Inizialmente nato come strumento per eseguire dei confronti tra nuvole di punti e mesh, successivamente è stato dotato di molteplici algoritmi che permettono di estrarre informazioni sulla distanza reciproca tra nuvole dense di punti, di valutarne le caratteristiche geometriche e di effettuare numerosi calcoli di tipo statistico.

Il programma, che permette inoltre di gestire il colore delle nuvole importate e di generare ortofoto, si basa su una struttura denominata "octree" ovvero una struttura di tipo "ad albero" che consente la trattazione dei dati. Una delle particolarità di questo software è la presenza di "Scalar fields" (campi scalari); in poche parole il programma genera una scala di colori RGB che viene direttamente associata alla distanza tra i punti delle due nubi messe a confronto.

Terminate le procedure di interrogazione e modifica delle nuvole di punti il programma consente di perfezionare e isolare la parte di nuvola di effettivo interesse e di salvarla ed esportarla in diversi formati tra cui .ASCII, .las, .E57.

Nel caso in esame, il *software* ha consentito un'ulteriore pulizia delle due nuvole di punti, ha permesso di effettuare dei confronti e infine l'unione delle stesse in un unico modello tridimensionale.

### 5.1.2. Importazione e pulizia delle nuvole di punti

La nuvola di punti *laser scanner* e la nuvola di punti fotogrammetrica, entrambe in formato .las, sono state importate in *CloudCompare* attraverso il metodo "drag and drop".

Il programma, una volta trascinate le nuvole di punti nello spazio modello, permette di selezionare le informazioni che si intendono importare e, nel caso in cui si stia importando un'entità con coordinate molto grandi, di spostarla in un sistema di coordinate interne ridotte che il programma chiama locali<sup>86</sup>.

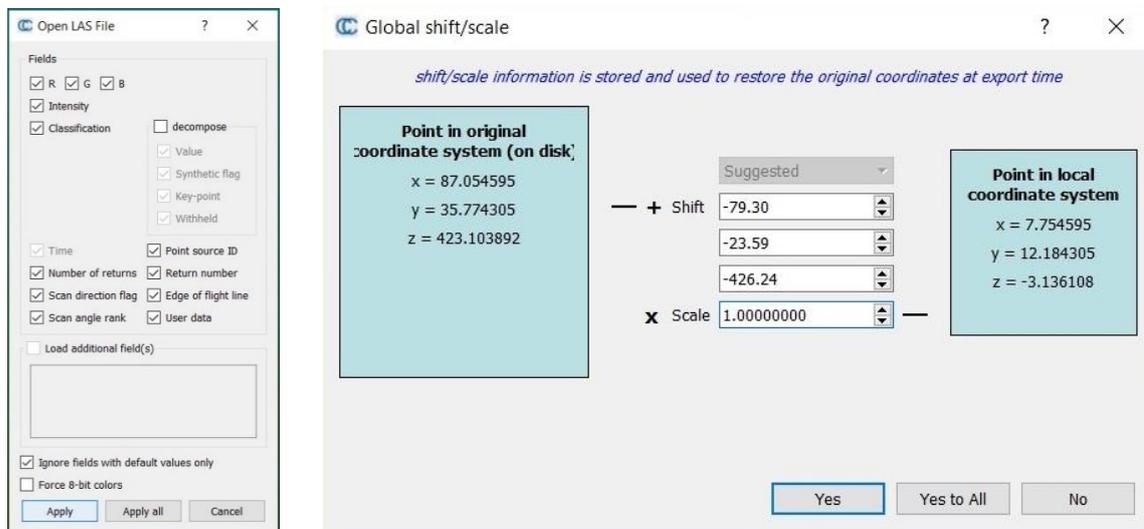


Figura 73: Caratteristiche delle nuvole di punti importate e richiesta di passaggio nel sistema di coordinate locali.

A questo punto le due nuvole, all'interno del programma, si sono sovrapposte automaticamente testimoniando dunque la corretta georeferenziazione dei dati.

<sup>86</sup> Per il caso di studio si è deciso di cliccare su "No" mantenendo così il sistema di coordinate originario.

Nella sovrapposizione è stata mantenuta la georeferenziazione per tanto si è proceduto alla scelta delle parti da mantenere di una e dell'altra nuvola di punti.

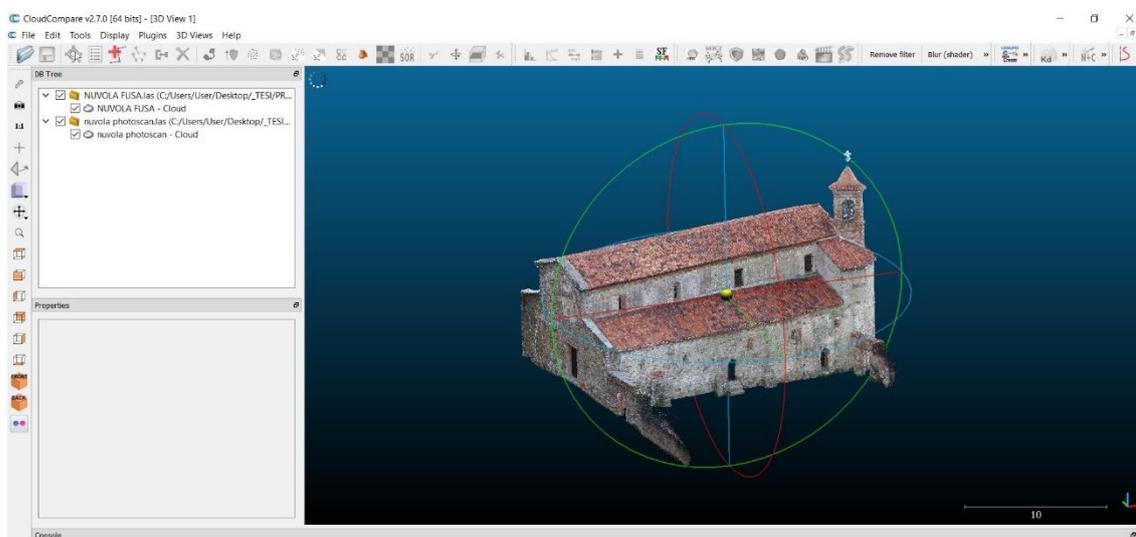


Figura 74: Risultato della sovrapposizione automatica delle due nuvole di punti su *CloudCompare*.

Come già detto in precedenza le nuvole sono state trattate con il *software 3DReshaper* ma, per ottenere una più elevata pulizia prima di procedere al confronto dei risultati fin qui ottenuti, si è scelto di avvalersi di un ulteriore comando presente in *CloudCompare*. Nello specifico si tratta del comando "*Label Connected Components*", posizionato nella barra degli strumenti, che permette una pulizia automatica della porzione di nuvola desiderata.

Una volta selezionata la nuvola di punti che si intende pulire basterà cliccare sul suddetto comando e si aprirà una finestra di dialogo nel quale verrà richiesto di settare due parametri:

- "*Octree Level*" attraverso il quale viene definita quanto deve essere piccola la distanza tra due componenti successivi;
- "*Min. point per component*" che, in funzione nel numero minimo di punti che costituiscono un componente, permette di scegliere quale considerare e quale invece ignorare.

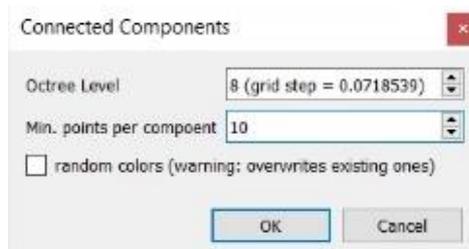


Figura 75: Settaggio parametri del comando *Label Connected Components*.

Questa procedura è stata svolta su entrambe le nuvole di punti e di seguito vengono riportati e descritti i risultati ottenuti.

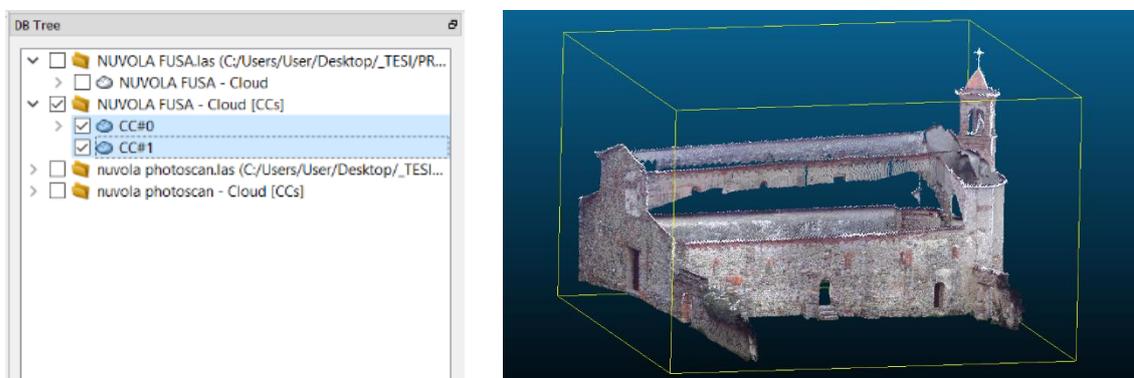


Figura 76: Scomposizione della nuvola *laser scanner* in gruppi di punti.

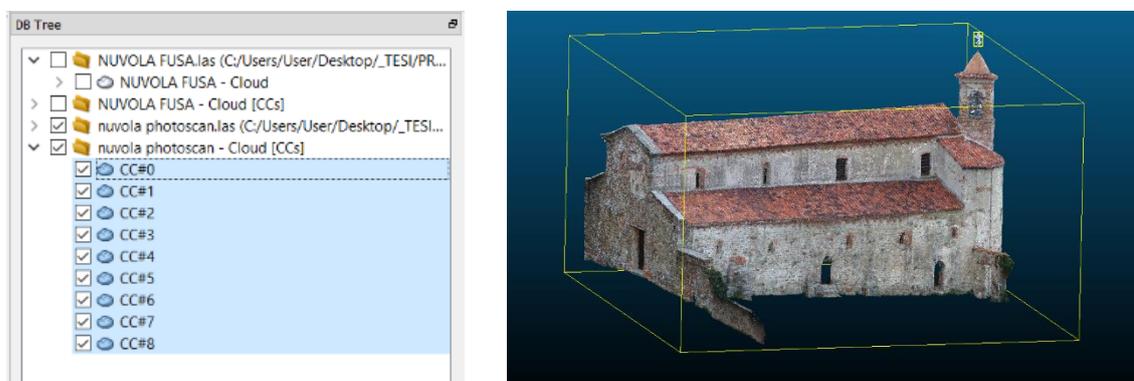


Figura 77: Scomposizione della nuvola fotogrammetrica in gruppi di punti.

Come è possibile notare dalle immagini precedenti la nuvola ottenuta dalla elaborazione delle scansioni è stata scomposta in due componenti mentre quella fotogrammetrica in otto componenti; per entrambe la prima componente "CC#0" rappresenta l'entità principale ovvero quella più estesa, mentre le altre sono dei sottogruppi che si è proceduto a esaminare e in alcuni casi eliminare.

### 5.1.3. Confronto e unione tra le nuvole di punti

Risulta ovvio che nella creazione della nuvola finale da utilizzare in seguito su *Autodesk Revit* si sia scelto di mantenere il più possibile le superfici costituenti la nuvola *laser scanner*, caratterizzata da una precisione più elevata, e di utilizzare la nuvola di punti fotogrammetrica per le zone risultate difficili da raggiungere con lo *scanner* e che per lo più riguardano le parti alte dei prospetti e le coperture.

Un primo confronto tra le due nuvole è stato effettuato in riferimento alla loro distanza reciproca. Per fare ciò lo strumento più adatto, presente nella barra dei comandi, è "Cloud/Cloud dist." Attraverso questo comando è possibile, previa selezione delle due nuvole o parti di nuvole che si vogliono confrontare, computare la distanza effettiva tra i punti che le costituiscono.

Nello specifico il confronto è stato effettuato sia per una porzione di prospetto della parete nord sia per una porzione del prospetto ovest; il primo passaggio, valido per entrambe le superfici, è stato quello di isolare la porzione sulla quale andare ad effettuare il confronto attraverso l'apposito comando<sup>87</sup> e solo successivamente avviando la procedura di "C2C"<sup>88</sup> si andrà a selezionare la nuvola di riferimento (nel nostro caso la nuvola *laser scanner*) da cui computare la distanza.

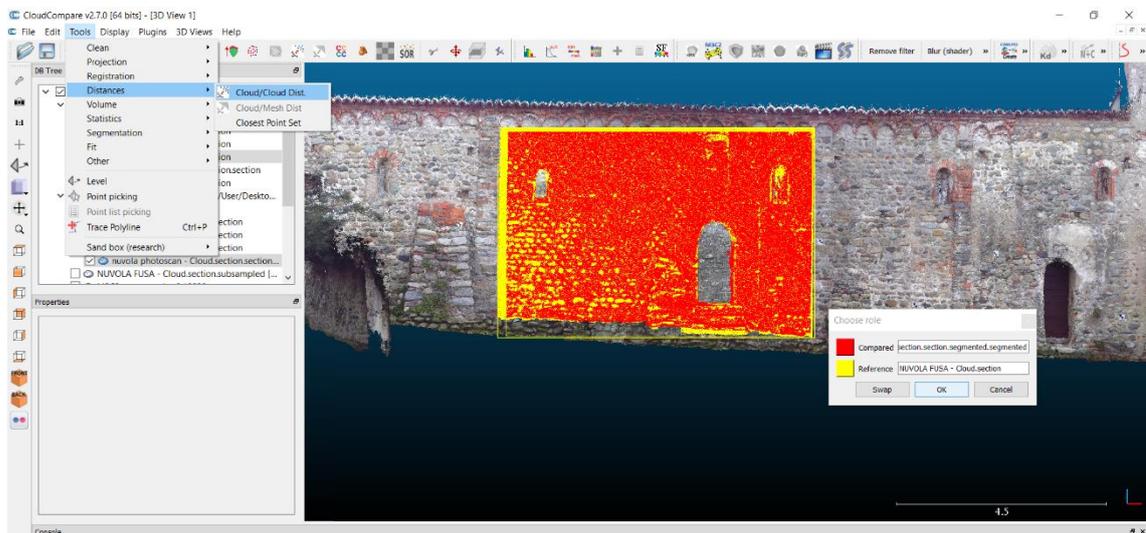


Figura 78: Procedura C2C e scelta della nuvola di riferimento.

Inizialmente, il programma, calcolerà delle distanze approssimate che permetteranno successivamente il settaggio dei parametri per la computazione effettiva della distanza tra le nuvole; a seguito di questa procedura automatica verrà visualizzata una finestra di dialogo nella quale sarà possibile modificare suddetti parametri.

<sup>87</sup> Per ritagliare e isolare porzioni di nuvola di punti è possibile procedere mediante due comandi differenti: "Segment" e "Cross Section" entrambi presenti nella barra degli strumenti.

<sup>88</sup> C2C sta per *Cloud to Cloud*.

Per il caso in esame l'unico valore modificato è stato quello che riguarda la distanza massima oltre la quale il *software* non dovrà andare per il calcolo richiesto, le altre voci invece sono state lasciate come di *default*.

A questo punto il programma avvierà la fase di computazione e il risultato finale sarà rappresentato su una scala di colori RGB che va dal blu al rosso, passando per il verde, in funzione dello scostamento che c'è tra i punti delle due nuvole computate.

Di seguito vengono riportati e descritti i risultati ottenuti per la porzione di prospetto nord e per la porzioni di prospetto ovest.

### Prospetto Nord

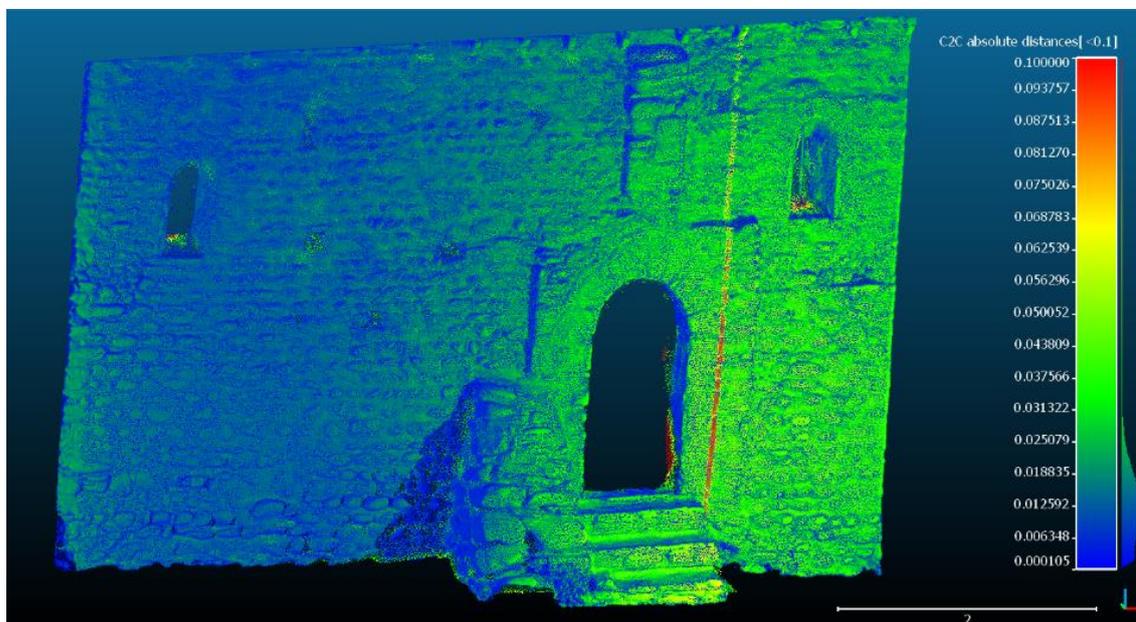


Figura 79: C2C per la porzione di prospetto nord con risultato rappresentato in scala di colori RGB.

Da una prima analisi dell'immagini riportata possiamo notare come risultano più frequenti gli errori grossolani (in rosso) in prossimità delle aperture, mentre sulla porzione a sinistra della parete processata risulta ovunque un errore inferiore a 1,5 cm; per quanto riguarda invece la porzione di superficie a destra si verifica un errore più elevato ma comunque ritenuto accettabile poiché inferiore ai 4 cm.

Questo fatto è probabilmente attribuibile alla posizione reciproca tra la superficie fotografata e la direzione dello scatto.

Il *software CloudCompare* permette anche di esportare gli istogrammi e le gaussiane dei risultati ottenuto.

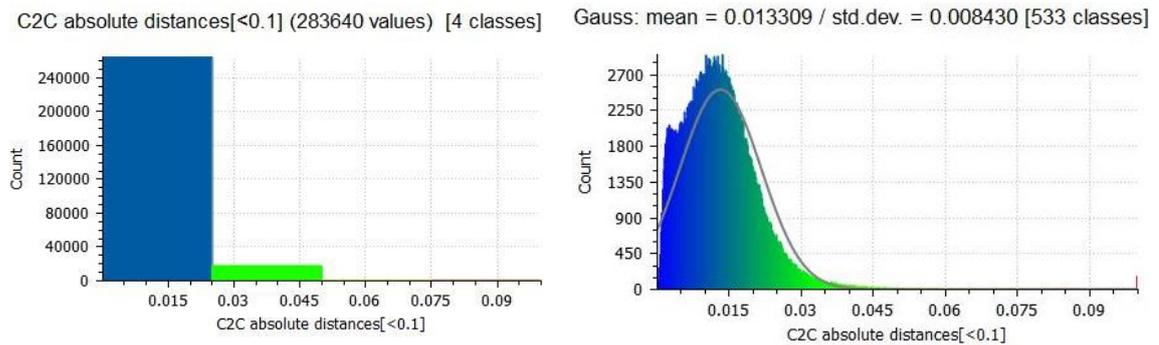


Figura 80: Istogramma(a sin) e Gaussiana(a dex) per il calcolo della distanza dei punti della porzione di prospetto.

Per entrambi i grafici troviamo indicato nell'asse delle ordinate la frequenza con cui il dato si presenta e nell'asse delle ascisse la distanza che intercorre tra le due porzioni di nuvole di punti.

Quello che si evince dalla valutazione dell'istogramma è che la maggior parte nel numero di punti che sono stati analizzati ricade nel *range* di errore compreso tra 0 e 2,5 cm mentre errori più grossolani risultano via via meno frequenti considerando intervalli più rilevanti.

### Prospetto Ovest

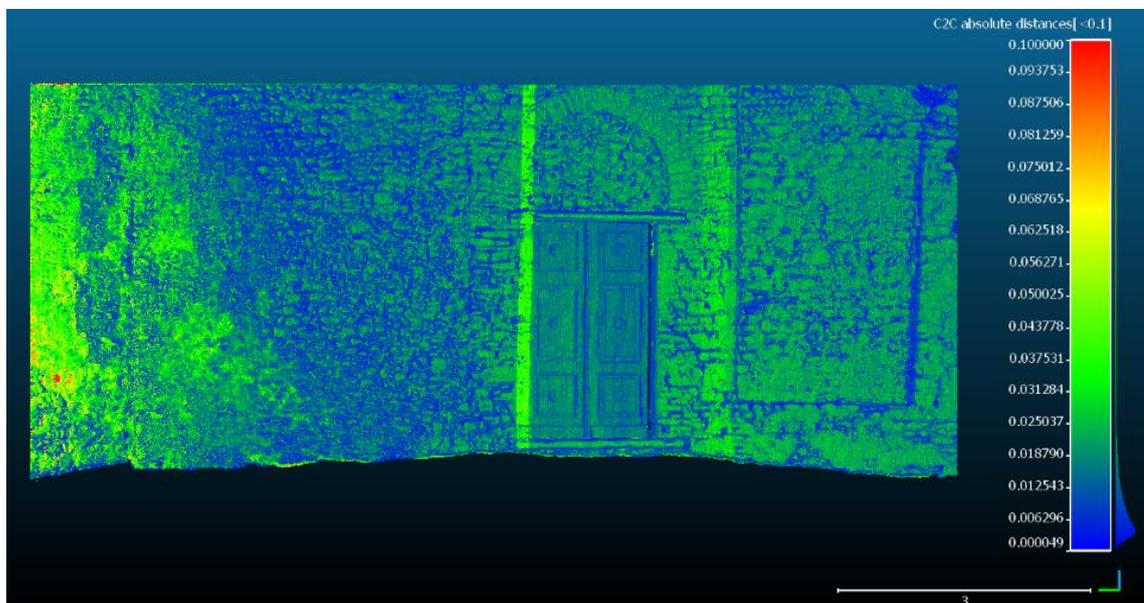


Figura 81: C2C per la porzione di prospetto ovest con risultato rappresentato in scala di colori RGB.

Anche per la porzione di prospetto ovest analizzata è possibile fare le medesime considerazioni fatte per la porzione del prospetto nord.

Dall'immagine si può notare che sulla superficie considerata ci sia più o meno ovunque un errore il cui valore è al di sotto del centimetro; per la parti più esterne della parete e per quelle in prossimità di sporgenze l'errore aumenta ma comunque è da ritenere accettabile. Come per il prospetto nord anche per quello ovest sono stati esportati i grafici.

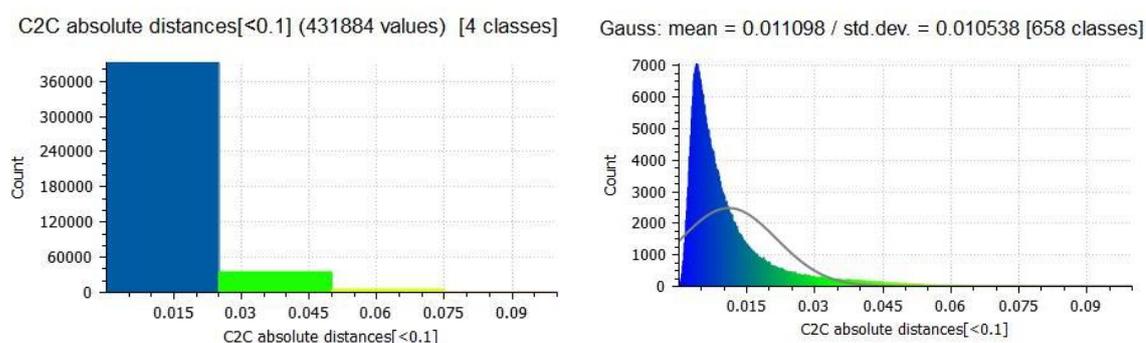


Figura 82:Istogramma(a sin) e Gaussiana(a dex) per il calcolo della distanza dei punti della porzione di prospetto.

Un'ulteriore analisi che è stata condotta sulle medesime porzioni di superfici ha riguardato il confronto della densità dei punti tra la nuvola laser scanner e la nuvola fotogrammetrica.

Attraverso il comando "Density", che può essere selezionato cliccando da "Tools" nella barra dei comandi, è possibile avviare la procedura di calcolo della densità della porzione di nuvola desiderata. Una volta cliccato sul comando sarà prima necessario impostare il metodo di calcolo, che per il caso in esame è stato settato su "Precise"<sup>89</sup> con un raggio di 0,01 m e il risultato che si vuole ottenere ovvero l'output per il quale è stato selezionato la densità superficiale.

Di seguito vengono riportati e confrontati i risultati ottenuti sia per la porzione di parete nord che per la porzione di parete ovest della nuvola laser scanner e della nuvola fotogrammetrica già prese in esame nel confronto Cloud to Cloud.

I risultati di questa analisi non hanno fatto altro che confermare il fatto che la nuvola fotogrammetrica sia risultata essere meno densa di quella ottenuta dall'elaborazione

---

<sup>89</sup> Attraverso questo metodo la densità viene stimata contando per ogni singolo punto il numero di "neighbors" presenti all'interno di una sfera il cui raggio può essere selezionato.

della scansioni ma fondamentale per la realizzazione di un modello completo in tutte le sue parti.

### Prospetto Nord

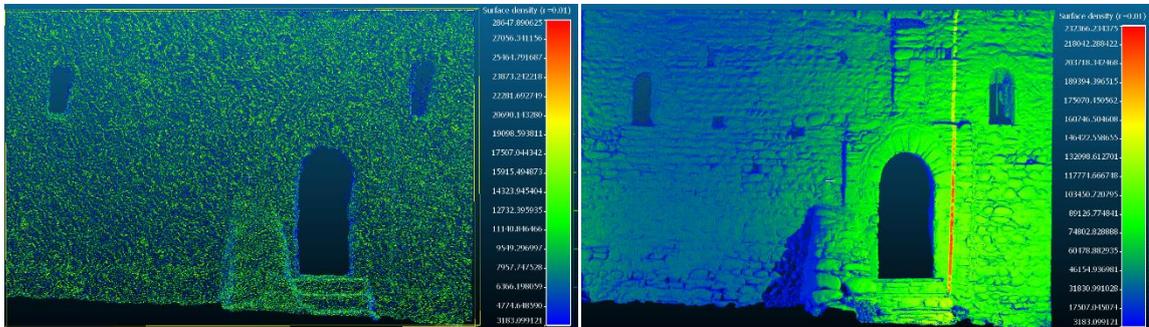


Figura 83: Surface Density della nuvola fotogrammetrica (a sin) e della nuvola laser scanner (a dex).

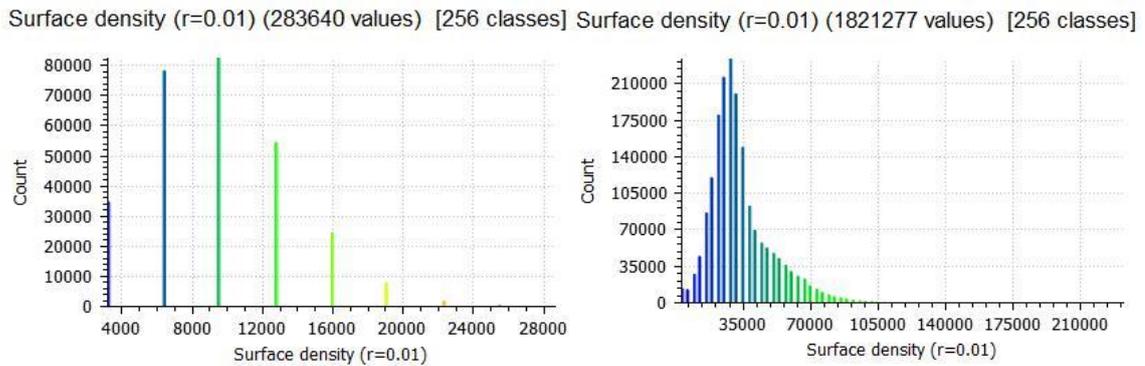


Figura 84: Istogrammi della densità superficiale della nuvola fotogrammetrica (sin) e della nuvola laser scanner (dex).

Come si può notare dalle immagini i punti della nuvola fotogrammetrica risultano omogeneamente distribuiti a differenza di quelli della nuvola laser scanner la cui disposizione spaziale varia in funzione della distanza tra laser scanner e oggetto scansionato; analizzando i diagrammi riportati si può dichiarare che la densità della nuvola laser scanner risulta essere circa 6,5 volte superiore a quella fotogrammetrica.

### Prospetto Ovest

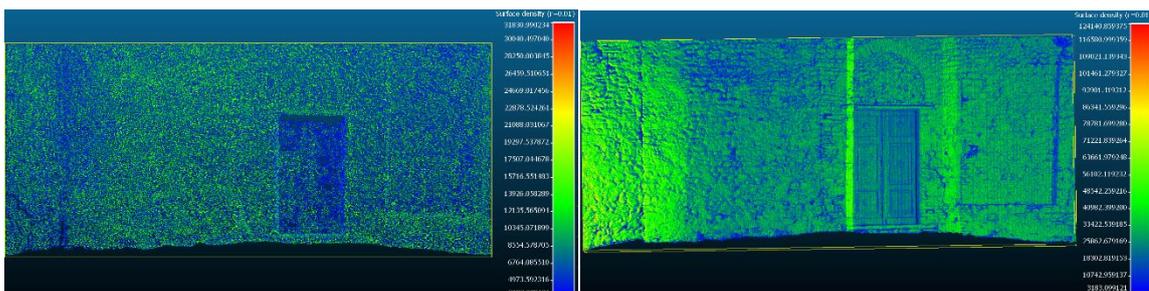


Figura 85: Surface Density della nuvola fotogrammetrica (a sin) e della nuvola laser scanner (a dex).

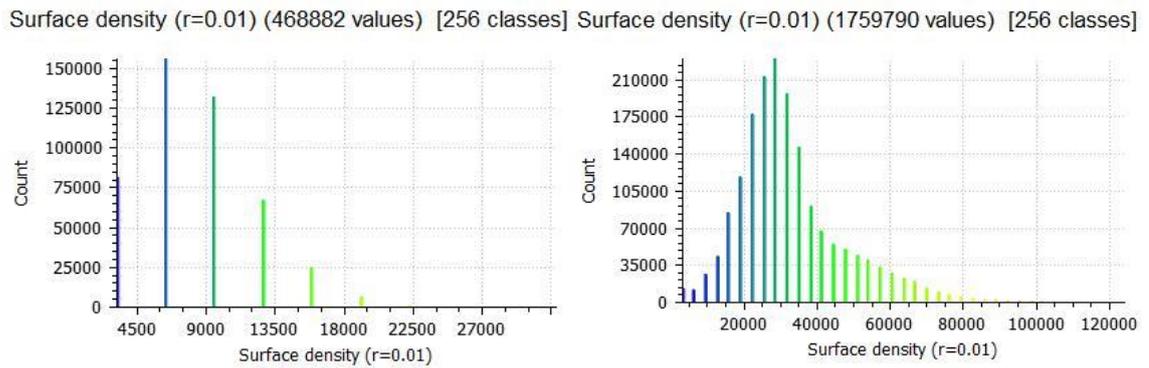


Figura 86: Istogrammi della densità superficiale della nuvola fotogrammetrica (sin) e della nuvola *laser scanner* (dex).

I risultati ottenuti per il prospetto ovest sono del tutto analoghi a quelli del prospetto nord; dagli istogrammi emerge che la densità superficiale della nuvola laser scanner è circa 4 volte maggiore rispetto a quella ottenuta da elaborazione fotogrammetrica.

A questo punto, confrontate le due nuvole, si è proceduto al loro taglio. Si è scelto, per la realizzazione del modello finale, di mantenere le coperture e la parte superiore dei prospetti nord, sud ed est appartenenti alla nuvola fotogrammetrica; questi sono stati integrati all'intero prospetto ovest e alla parte inferiore dei restanti prospetti della nuvola *laser scanner*.



Figura 87: visualizzazione del modello finale ottenuto dalla sovrapposizione delle due nuvole di punti.

### 5.3. Preparazione della nuvola di punti

Il modello finale ottenuto dall'integrazione delle due tecniche di rilievo metrico 3D è stato esportato in formato .las.

Questo formato però non risulta compatibile con il software Autodesk Revit e per questo motivo sarà necessario l'utilizzo di un ulteriore programma che permetta la prepa-

razione e l'esportazione della nuvola di punti in un formato idoneo all'elaborazione successiva.

### 5.3.1. Il software ReCap360

Per la preparazione della nuvola di punti da importare in *Autodesk Revit* si è scelto di utilizzare il software *ReCap360*. Esso nasce appositamente per la gestione di nuvole di punti provenienti da differenti elaborazioni ed inoltre i plug-in che si andranno ad utilizzare successivamente sono tutti concepiti per l'uso in ambiente BIM quindi si suppone una migliore interoperabilità escludendo problemi relativi a formati e alla trattazione dei dati.

### 5.3.2. Esportazione della nuvola di punti

La nuvola di punti è stata quindi esportata dal software *ReCap360* in formato *.rcp*, formato leggibile in *Revit* e che inoltre ha permesso di mantenere le informazioni intrinseche relative alle coordinate spaziale e alle coordinate RGB. Per le elaborazioni successive non è stato necessario suddividere il modello nelle sue componenti architettoniche poiché l'obiettivo del presente lavoro di tesi non è quello di ottenere un modello parametrico dalla nuvola di punti ma bensì analizzarla attraverso una programmazione logico-grafica che consenta una gestione dei dati nell'ambito del restauro.

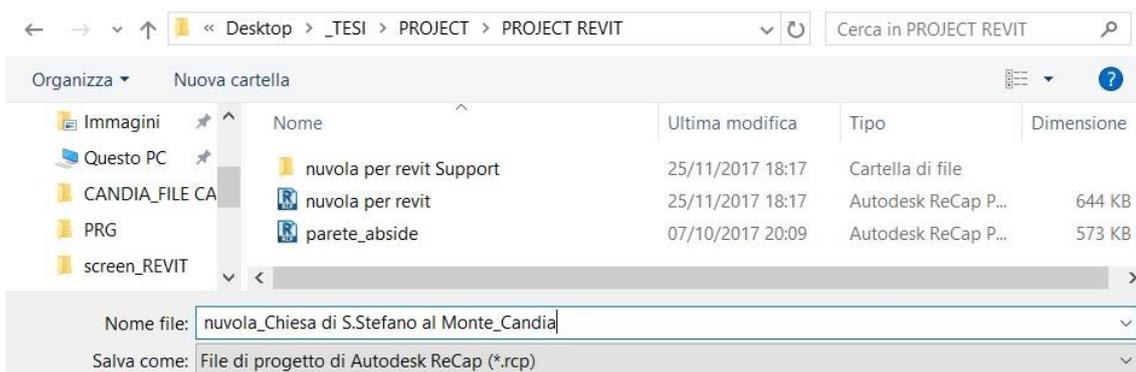


Figura 88: Salvataggio della nuvola di punti in formato *.rcp*.

Solo successivamente, a causa di problematiche riscontrate in merito alle tempistiche di elaborazione del programma di progettazione visuale, si è scelto di focalizzare il lavoro di indagine su una porzione del prospetto sud della Chiesa di Santo Stefano; per tanto si è resa necessaria una suddivisione della nuvola di punti in tal senso.



## 6. La condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni

L'avvento delle tecnologie BIM e la graduale diffusione nell'industria delle costruzioni sta producendo un cambio nell'approccio alla progettazione, in un'ottica di condivisione dei dati utili alla progettazione edilizia.

Questo nuovo approccio consente infatti di intervenire già in fase di progettazione preliminare e quindi operando delle scelte a monte, basate ad esempio sull'identificazione dei possibili interventi correttivi da attuare in un arco temporale che risulta meno gravoso sotto il profilo economico; ciò sicuramente difficilmente ottenibile operando attraverso un approccio tradizionale incentrato sulle metodologie CAD.

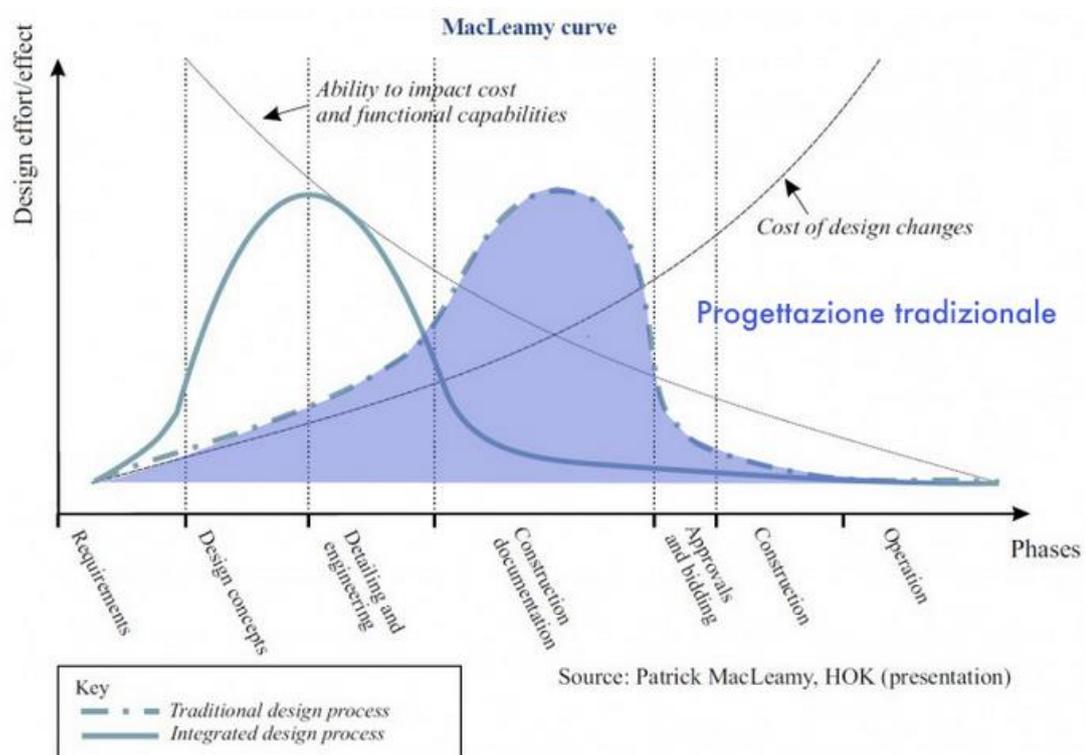


Figura 89: Confronto tra i flussi di lavoro: l'approccio tradizionale CAD.  
Fonte: ergodomus.it (Patrick MacLeamy, HOK).

Dall'immagine risulta evidente come la scelta di operare attraverso un approccio basato sulla progettazione tradizionale porti ad una traslazione del quantità di lavoro in una fase avanzata del processo edilizio e ciò comporta un inevitabile aumento dei costi.

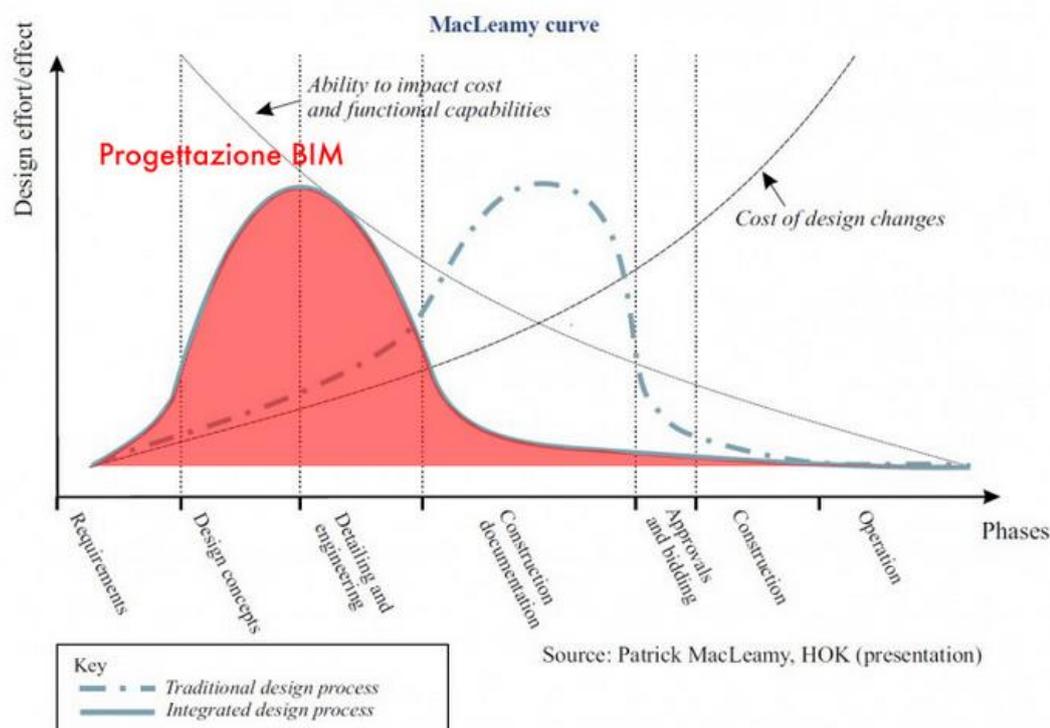


Figura 90: Confronto tra i flussi di lavoro; l'approccio integrato BIM.  
Fonte: ergodomus.it (Patrick MacLeamy, HOK).

Dalla figura si evince come attuando un nuovo approccio alla progettazione basato sulle metodologie BIM, consenta di affrontare anticipatamente tutta una serie di problematiche, e relativi interventi correttivi, in fase precedente a quella esecutiva permettendo quanti di velocizzare le procedure di cantiere e riducendo al minimo i costi.

Secondo quanto detto, la condivisione delle informazioni implica un cambio di approccio alla pianificazione del progetto, incentrato sul ciclo di vita dell'informazione, nonché alle modalità organizzative e al coinvolgimento delle adeguate figure professionali chiamate, sin dalle fasi iniziali, ad esprimere il relativo fabbisogno informativo per alimentare opportunamente la base di dati del modello BIM.

La condivisione di informazioni modifica anche il sistema di controllo del processo di costituzione delle basi dei dati, sviluppandosi in parallelo a quella che è la fase costruttiva e andando ad integrare gli aspetti strettamente legati alla fase gestionale<sup>90</sup>.

<sup>90</sup> OSELLO A., "BIM GIS AR FM", Dario Flaccovio Editore, Palermo 2015, p. 30-33.



Figura 91: Processo innovativo per la costituzione di una base dati conoscitiva per la gestione del bene immobiliare.  
 Fonte: A. Osello, "BIM GIS AR FM", op.cit., p. 32.

Il modello integrato, abilitato dalle moderne ed innovative metodologie, consente sostanzialmente un'ottimizzazione dei processi mantenendo integra la conoscenza del bene; cosa non sempre possibile con l'uso di un modello tradizionale che in definitiva frammenta i vari processi con la conseguente perdita del valore della conoscenza, la determinazione di documentazioni e informazioni spesso ridondanti.

In questo ambito risulta inoltre rilevante il concetto di interoperabilità non solo sotto un profilo tecnico-informatico, di tipo infrastrutturale intesa come implementazione di una base dati relazionale integrata o di tipo applicativo ovvero *import-export* dei dati tra i differenti applicativi con limitata perdita di informazioni, ma soprattutto sotto un profilo strategico-organizzativo quale capacità di integrare differenti *view* nell'ambito della modellazione BIM, che siano adeguatamente profilate e fruibili per e dai diversi utilizzatori coinvolti (architetti, ingegneri, assicuratore, facility manager, etc.).

*"La gestione dell'aggregazione dei dati richiede pertanto una fase iniziale di pianificazione di come tenere sotto controllo l'individuazione, ricerca, pubblicazione e acquisi-*

zione delle informazioni condivise riguardanti edifici e manufatti in genere durante il loro ciclo di vita. Questo controllo garantisce che la qualità dell'informazione sia protetta dalla creazione attraverso condivisione ed utilizzo, in modo che solo le persone opportunamente autorizzate possano accedere, solo ai sottoinsiemi di informazioni alle quali esse sono abilitate"<sup>91</sup>.

Altro fattore abilitante dell'interoperabilità è sicuramente l'utilizzo di procedure e convenzioni che consentano di beneficiare delle sinergie derivanti dalla standardizzazione. Ad esempio, nel nominare un *file* di progetto, risulta conveniente utilizzare una codifica ben precisa e regolata al fine di evitare incomprensioni tra i vari utenti che si troveranno a lavorare sul medesimo *file*. Questi piccoli accorgimenti sono utili per consentire la sincronizzazione corretta del *file* centrale condiviso.

Focalizzando l'attenzione sul concetto di interoperabilità in relazione agli applicativi, sono stati fatti numerosi passi avanti anche se si registrano tuttora delle criticità per quanto concerne le fasi di importazione ed esportazione dei dati, ciò è dovuta all'eterogeneità dei formati impiegati (.las, .e57, .dxf, .txt, etc) e dell'assenza di alcune interfacce tra gli applicativi delle varie *software House*.

Ne conseguono una serie di problematiche tra cui la necessità di applicare varie conversioni di formato e il *data cleaning* dei dati nell'applicativo di destinazione a causa della perdita di informazioni in fase di conversione.

Queste problematiche potrebbero essere mitigate attraverso la razionalizzazione, omologazione e diffusione di formati sempre più standardizzati da parte di organismi normativi e di *Software House Leader* del settore, come pure dalle potenzialità espresse nei *Market* digitali da programmatori e aziende che aggiornano le applicazioni attraverso lo sviluppo di *Plug-in* con lo scopo di migliorarne l'estensione e la funzionalità.

---

<sup>91</sup> OSELLO A., "Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti", Dario Flaccovio Editore, Palermo 2012, p. 51.

## 6.1. La metodologia H-BIM

Attraverso l'applicazione della metodologia *Building Information Modelling* è possibile ottenere un modello tridimensionale che, in definitiva, non può essere considerata semplicemente una rappresentazione grafica tridimensionale ma bensì deve essere intesa e trattata come un modello 3D completo in quanto riportante di tutte le caratteristiche fisiche e funzionali degli elementi che lo costituiscono.

Lo sviluppo di innovative tecniche per il rilievo tridimensionale del patrimonio costruito, come la tecnica laser scanner e la fotogrammetria digitale, unitamente agli ultimi applicativi nell'ambito del BIM ha aperto nuove porte per quanto riguarda gli aspetti inerenti documentazioni riguardanti il patrimonio edilizio esistente nell'ambito della condivisione tra professionisti e si auspica ad una sempre più omogeneità delle informazioni contenute nel modello in relazione al caso reale.

L'attenzione e l'importanza rivolta al patrimonio storico esistente, per quanto concerne la conoscenza dello stato di conservazione con l'obiettivo di avviare programmi di manutenzione volti alla salvaguardia dei beni censiti, ha portato allo sviluppo di nuovi approcci con lo scopo di attribuire sempre più contenuti semantici ai modelli tridimensionali elaborati per la documentazione del patrimonio architettonico esistente.

In questa ottica si inseriscono nuovi percorsi intrapresi, a livello mondiale, volti a constatare e valutare le potenzialità della modellazione BIM applicata agli edifici storici definendo quindi un nuovo acronimo che è quello di H-BIM.

H-BIM è l'acronimo di *Historic Building Information Modelling* o anche *Heritage Building Information Modelling*; la differenza sostanziale sta non fatto che il modello tridimensionale parametrico viene arricchito di informazioni riguardanti gli aspetti materici e costruttivi, lo stato di conservazione e gli eventuali interventi manutentivi anche attraverso la creazione di *database*.

Queste informazioni vanno ad integrare quelli che sono gli aspetti geometrici, dimensionali, topografici ottenibili da modellazione tridimensionale non BIM e da cui il modello parametrico discende con l'obiettivo ultimo di generare un modello finale da considerare come report tridimensionale dello stato di fatto del bene utile alla pianificazione e alla programmazione di interventi manutentivi futuri.

Va in tal senso chiarito che, nonostante numerosi siano stati i passi fatti per perseguire suddetto obiettivo, ancora tanti sono gli aspetti da perfezionare.

La gestione del patrimonio storico esistente attraverso la metodologia HBIM, necessita infatti di una serie di accorgimenti che sono sostanzialmente legati alla morfologia e all'irregolarità che connota la globalità degli edifici storici e che al contempo li caratterizza rendendoli unici.

Uno dei concetti principali su cui si fonda la modellazione BIM è sicuramente il concetto di replicabilità; vale a dire la possibilità di generare un oggetto, con determinate caratteristiche e proprietà, che possa essere inserito all'interno di una libreria informatica di oggetti architettonici e replicato e copiato.

Ne consegue che, nell'applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico, sarà richiesta la creazione di elementi *ad hoc* per la generazione degli oggetti che costituiscono il modello parametrico tenendo conto poi che il loro grado di replicabilità potrà essere ostacolato da diversi fattori come ad esempio l'effetto delle patologie di degrado che possono causare una variazione della forma e del colore originale.

La modellazione BIM di un edificio storico esistente, a differenza di uno *ex novo*, richiede inoltre la preventiva acquisizione, elaborazione e valutazione di dati derivati dall'impiego di tecnologie di rilevamento differenti che permettono di ottenere un modello tridimensionale integrato.

Risulta fin da subito fondamentale definire, in fase di rilievo, il livello di dettaglio che si vuole raggiungere in relazione alle finalità dell'intervento.

*"L'obiettivo è sfruttare le tecnologie informatiche in maniera avanzata e, partendo dal concetto di interoperabilità dei software, definire una nuova filosofia di lavoro basata sul BIM anche in fase di monitoraggio, gestione e manutenzione"*<sup>92</sup>.

Si può affermare che sicuramente il BIM è uno strumento che offre notevoli vantaggi per gli interventi di progettazione legati alla geometria dell'edificio storico nel suo complesso ma allo stato attuale, per via della sua standardizzazione e regolarità nella modellazione, risulta svantaggio sotto il profilo della conoscenza dell'edificio.

---

<sup>92</sup> OSELLO A., "BIM GIS AR FM", Dario Flaccovio Editore, Palermo 2015, p.79.

In conclusione *“un buon modello BIM deve parametrizzare l’oggetto reale con un livello di informazioni tale da far emergere gli aspetti rilevanti ai fini del recupero e della gestione dell’edificio”*<sup>93</sup>.

Nei paragrafi che seguono verranno descritte le procedure messe in atto per lo specifico caso studio che sono da intendersi come punto di partenza per possibili sviluppi futuri con lo scopo di realizzare un archivio unico dal quale poter attingere e al contempo da arricchire di dati e informazioni relativa alla Chiesa di Santo Stefano al Monte.

### 6.1.1. Importazione della nuvola di punti in Autodesk Revit

La nuvola di punti da importare su *Autodesk Revit* è stata preventivamente trattata attraverso il *software ReCap 360*.

Il *software* permette, attraverso i *tools* di cui è dotato, di suddividere la nuvola in aree andando a distinguere le diverse parti che compongono l’oggetto di studio e, allo stesso tempo, di eliminare o in alternativa di oscurare quelle non utili all’elaborazione successiva.

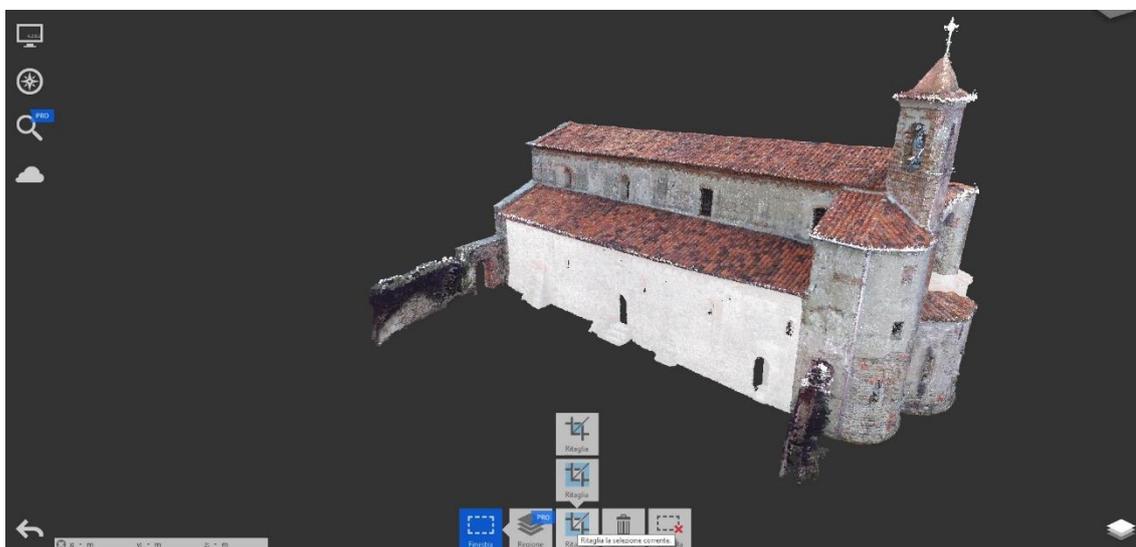


Figura 92: Procedura di suddivisione per parti della nuvola di punti.

---

<sup>93</sup> OSELLO A., *“BIM GIS AR FM”*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2015, p. 193.

Ma cosa più importante, ai fini del presente lavoro di tesi, è la possibilità di passare dal formato.las, formato in cui è stata salvata la nuvola di punti a seguito dell'elaborazione finale, in un nuovo formato compatibile con *Revit*.

Nello specifico è possibile salvare la nuvola di punti in due differenti formati: il formato .rcs e il formato .rcp; quest'ultimo è quello selezionato per l'importazione della nuvola di punti in *Revit* proprio perché è quello che permette di mantenere le informazioni RGB dei punti che la compongono, informazione su cui si sono basate le elaborazioni successive.

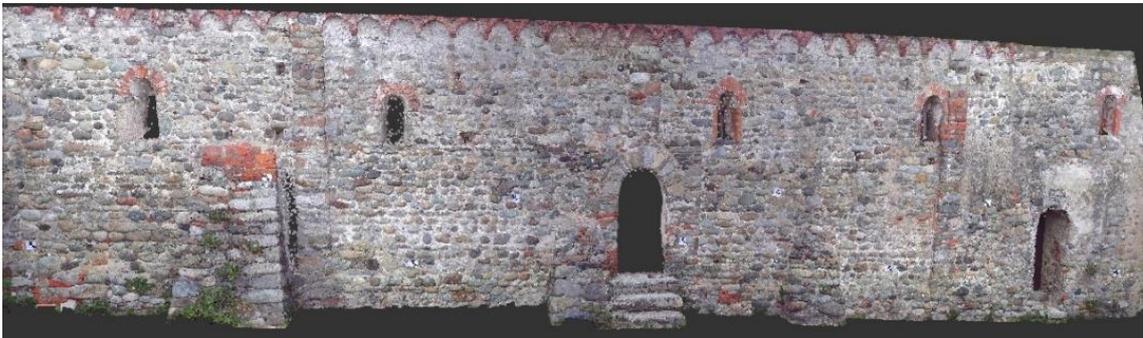


Figura 93: Visualizzazione delle informazioni RGB di una porzione del prospetto sud.

Nella barra degli strumenti, cliccando su "Inserisci" e quindi sul comando "Nuvola di punti", si aprirà una finestra dalla quale bisognerà selezionare la nuvola da importare e inoltre sarà necessario impostare il parametro "Posizionamento" su "Automatico: da origine a origine"<sup>94</sup>.



Figura 94: Inserimento della Nuvola di punti attraverso il comando "Inserisci" nella barra degli strumenti.

### 6.1.2. Il Plug-in PointSense

Il *plug-in PointSense for Revit*, inserito all'interno della *PointSense Suite*, permette di elaborare la nuvola di punti, derivante da fotogrammetria e/o *laser scanner*, accele-

<sup>94</sup> In questo modo, in caso di successive elaborazioni riguardanti il presente caso di studio, basterà impostare il parametro su "da origine a ultimo posizionamento" e, nell'inserimento di ulteriori informazioni e/o parti di nuvola, sarà garantito il mantenimento del sistema di riferimento locale.

rando tutte le procedure riguardanti il riconoscimento degli oggetti e l'estrazione delle caratteristiche all'interno dell'ambiente BIM. Questo *software*, dotato di molteplici *tools* che estendendo notevolmente le funzionalità di *Revit*, consente un flusso di lavoro veloce ed intuitivo sia per l'estrazione di informazioni che per la creazione di modelli 3D direttamente dalla nuvola di punti.

Nel dettaglio del presente caso studio il *download* di questo *plug-in*<sup>95</sup> si è rivelato notevolmente utile per la creazione di ortofoto a partire dalla nuvola di punti che sono state nelle elaborazioni successive utili all'estrazione delle informazioni RGB.

Una volta scelto il prospetto della nuvola di cui si desidera creare l'ortofoto<sup>96</sup> basterà cliccare sul comando "*Ortho Image*", presente nella barra dei comandi in corrispondenza della sezione "*Object Tools*".

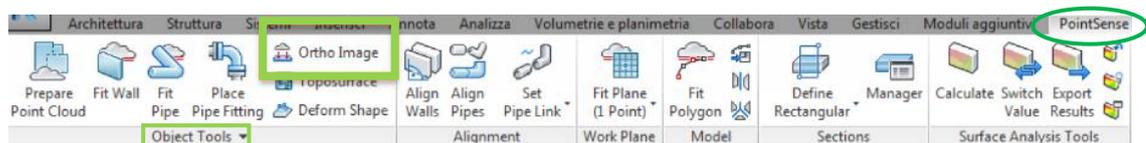


Figura 95: Utilizzo del *plug-in PointSense* per la creazione delle ortofoto della nuvola di punti.

A questo punto si aprirà una finestra nella quale sarà richiesto di impostare il parametro di partenza per l'avvio del processo di creazione dell'ortofoto; si tratta nello specifico dell'impostazione della dimensione del pixel.

In una prima elaborazione si è deciso di non modificare il parametro "Pixel Size" lasciandolo dunque ad un valore di 0.0010 m (valore di settaggio del programma); ci si è però accorti, a conclusione del processo, che il programma dava errore non permettendo di salvare il dato elaborato poiché troppo pesante.

Si è quindi scelto di impostare suddetto parametro su un valore pari a 0.0020 m ed è stato nuovamente avviato il processo di creazione dell'ortofoto che, in questa seconda elaborazione, è andato a buon fine.

Una volta ottenuto il dato finale, che sostanzialmente consiste in una proiezione su una superficie piana di tutti i punti costituenti la nuvola e quindi relative informazioni

<sup>95</sup> Si tratta di una licenza di prova limitata a 15 giorni che non permette di sfruttare a pieno le funzionalità del *software*.

<sup>96</sup> Nel nostro caso si è scelta una porzione del prospetto Sud della chiesa.

di colore, il programma consente di scegliere se salvarlo nella vita corrente o su una cartella esterna; nel nostro caso si è scelto di salvare il file su entrambe i percorsi e questo ha richiesto di avviare due volte la stessa procedura. Per quanto riguarda i tempi di elaborazione questi dipendono dalla dimensione della porzione di prospetto che si intende catturare.

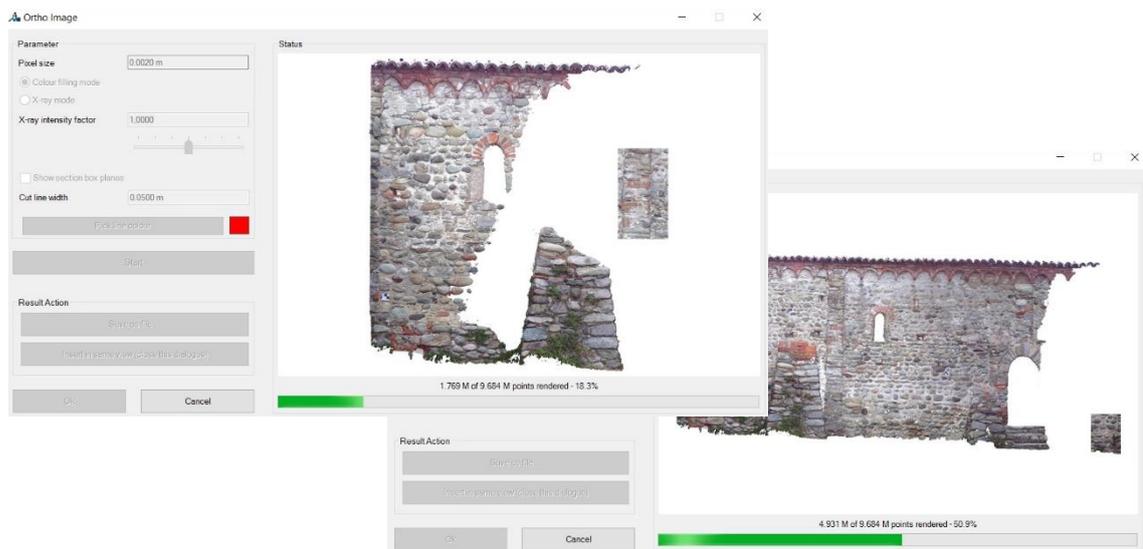


Figura 96: Stato di avanzamento del processo di acquisizione del dato.

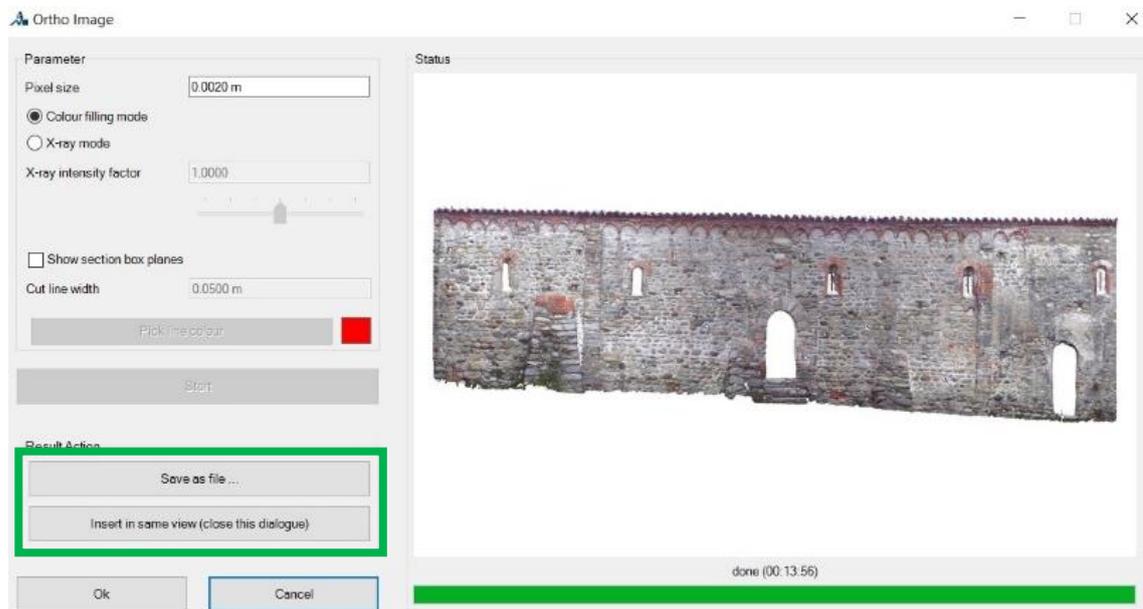


Figura 97: Opzioni di salvataggio per l'ortofoto del prospetto sud della chiesa.

Il dato così ottenuto ha una duplice funzionalità infatti, oltre ad essere utilizzato nel presente lavoro di tesi come dato per l'estrapolazione delle informazioni di colore della nuvola di punti con lo scopo di classificare i materiali che compongono la tessitura mu-

riaria, potrà essere un utile supporto in caso di una futura modellazioni BIM della chiesa di Santo Stefano al Monte poiché apporta una miglioria in termini di infittimento dei punti facilitando il riconoscimento di componenti architettonici per i quali si necessita di una miglior risoluzione.

Un ulteriore *tool*, utilizzato in questo lavoro di tesi con lo scopo di valutarne le potenzialità in caso di future modellazione BIM della chiesa di Santo Stefano al Monte, è stato quello che permette di creare i muri partendo dalla creazione di una vista in pianta della nuvola di punti.

Selezionando dunque in comando "Fit Wall", anch'esso presente nella sezione "Objet Tools" della barra dei comandi, è possibile inserire un generico muro nella vista desiderata. A questo punto sarà necessario indicare l'altezza del muro da inserire, attraverso l'impostazione del vincolo superiore, e cliccando su "Start Wall Fitting" basterà selezionare i due estremi del muro da inserire; si aprirà quindi una finestra nella quale si potrà selezionare il tipo di muro da caricare in funzione delle caratteristiche necessarie.

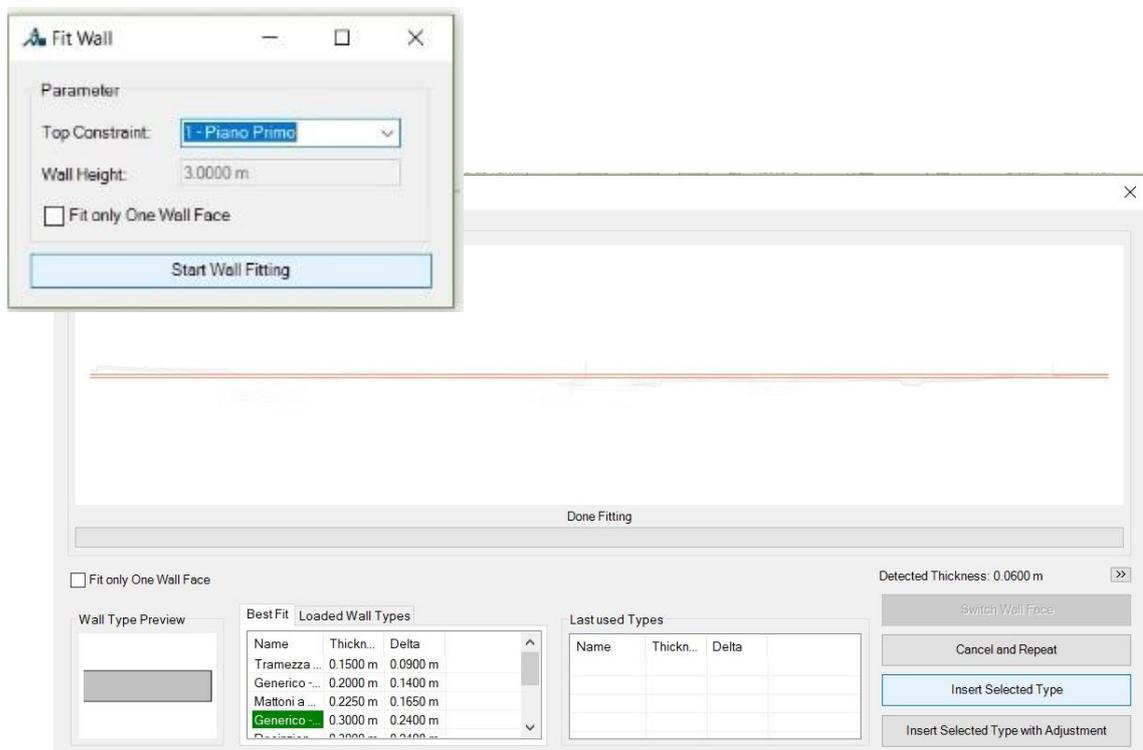


Figura 98: Procedura per la creazione di un muro attraverso il comando "Fit Wall".

## 6.2. I LOD (Level Of Development)

La condivisione dei dati non può prescindere da una corretta ed adeguata gestione delle informazioni riguardanti la natura e l'accuratezza delle diverse tipologie di dati che convergono nel progetto BIM.

In tale ottica va inserito un altro principio cardine su cui si fonda la metodologia BIM ovvero il concetto di LOD che, nelle sue due distinte accezioni, è definito come<sup>97</sup>:

- Level of Detail, che riguarda sostanzialmente il livello di dettaglio grafico a cui deve tendere un dato componente per essere inserito all'interno di un determinato modello;
- Level of Development, che è riferito al livello di sviluppo in termini di geometria e informazione ad essa associata da definire per ogni stadio del progetto.

### 6.2.1. Riferimenti normativi

Le normative che disciplinano quanto fin ora esposto hanno come intento proprio quello di guidare tutti gli operatori coinvolti nel processo sia per quanto riguarda la definizione del quadro dei risultati richiesti sia per monitorare il progressivo aggiornamento dei modelli realizzati. Nello specifico sono:

- AIA<sup>98</sup> Document G202-2013;
- BS PAS 1192-2:2013;
- UNI 11337:2017.

La prima è una norma americana intitolata "*Building Information Protocol Form*" attraverso la quale vengono suddivisi i livelli di sviluppo di un modello BIM secondo un totale di cinque step che seguono una progressione logica che va un livello di definizione di tipo indicativo (LOD 100) ad un livello di rappresentazione del modello verificabile nella realtà di cantiere e al quale possono essere associate informazioni anche non grafiche (LOD 500)<sup>99</sup>.

---

<sup>97</sup> OSELLO A., "*BIM GIS AR FM*", Dario Flaccovio Editore, Palermo 2015, p. 21.

<sup>98</sup> AIA: American Institute of Architects.

<sup>99</sup> Fonte: <http://biblus.acca.it/la-guida-di-bimforum-al-corretto-uso-dei-lod-nei-processi-bim/>.

La seconda è una normativa britannica che si intitola "*Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling*" e che disciplina l'applicazione della metodologia BIM partendo dalla fase di progettazione fino ad arrivare a quella di gestione passando per quella relativa alla costruzione del manufatto distinguendo però i livelli di dettaglio inerenti al contenuto grafico (LOD) da quelli relativi alle informazioni non grafiche associati al modello (LOI) in una scala di valori che va da 1 a 6<sup>100</sup>.

La terza è una normativa italiana, entrata in vigore il 26 gennaio 2017 ed intitolata "Edilizia e opere di ingegneria civile. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni" attraverso la quale vengono identificati gli aspetti qualitativi e quantitativi della gestione delle informazioni digitali riguardanti i manufatti edilizi con l'obiettivo di definire lo scopo di ogni fase del processo, i livelli di sviluppo informativo dei componenti del modello digitale e lo stato di lavorazione e approvazione del contenuto informativo secondo una scala progressiva che va da 0 a 7<sup>101</sup>.

Quest'ultima normativa è applicabile ad ogni tipologia di prodotto e di progetto riferibile al settore delle costruzioni (edificio, infrastruttura, etc.) ma differisce dalle prime due perché applicabile non solo ad interventi di nuova costruzione ma, cosa molto importante per ciò che riguarda i beni architettonici, per interventi di conservazione, monitoraggio e riqualifica del patrimonio storico esistente.

Nel dettaglio la parte 4 della presente normativa, ovvero quella intitolata "Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati ed oggetti", si interessa dei LOD intesi come livelli di sviluppo degli oggetti digitali e li classifica secondo un codice alfabetico che va dalla "A" alla "G".

Per quanto riguarda l'ambito del restauro i LOD che vanno dalla lettera "A" alla lettera "E" non risultano significativi mentre si può fare riferimento al:

- LOD F (as-built): rappresentazione grafica degli oggetti che esprimono la virtualizzazione rilevata in loco, le caratteristiche quantitative e qualitative sono quelle specifiche del dato elemento con l'aggiunta di eventuali astrazioni che per-

---

<sup>100</sup> Fonte: <http://biblus.acca.it/i-processi-bim-secondo-le-pas-1192-2-e-bs-1192/>.

<sup>101</sup> Fonte: <http://store.uni.com/catalogo/index.php/uni-11337-4-2017>.

mettano il raggruppamento di oggetti simili. Ad ogni componente possono essere associate informazioni sui possibili interventi di manutenzione programmata da mettere in atto durante tutta la vita utile del manufatto<sup>102</sup>;

- LOD G (as-is): rappresentazione storicizzata degli oggetti che esprimono la virtualizzazione aggiornata dello stato di fatto di ogni singola entità, le caratteristiche quantitative e qualitative vengono aggiornate in riferimento allo stato di conservazione. Ad ogni componente sono associate informazioni sugli interventi già eseguiti, programmati come anche le possibili patologie di degrado in corso<sup>103</sup>.

Per lo specifico caso studio sono stati definiti i seguenti livelli di sviluppo:

- LOD G.0: il livello di sviluppo è riconducibile alla fase di rilievo condotta attraverso l'impiego di tecniche innovative come la fotogrammetria aerea da UAV e la tecnologia laser scanner;
- LOD G.1: il livello di sviluppo riguarda la determinazione della superficie topografica e di un modello tridimensionale da nuvola di punti;
- LOD G.3: il livello di sviluppo prevede l'individuazione dell'edificio con semplici masse, mentre non interessa la geometria delle coperture.



Figura 99: LOD G.0

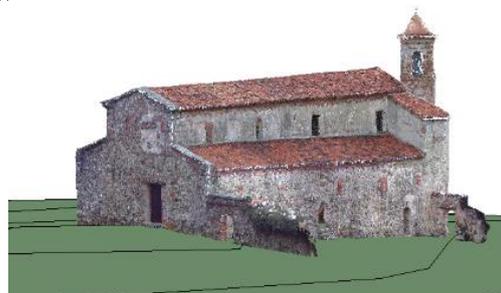


Figura 100: LOD G.1

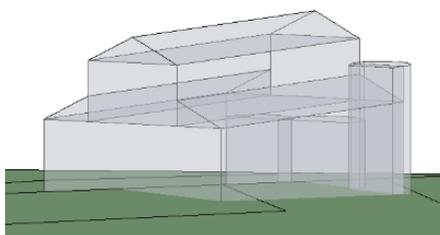


Figura 101: LOD G.2

---

<sup>102</sup> e <sup>103</sup> A. Pavan, "Digitalizzazione del settore costruzioni: UNI 11337:2017"  
(<http://www.assoacmi.it/wp-content/uploads/2017/07/UNI11337-Pavan.pdf>) p. 45.

## 7. Il linguaggio di programmazione visuale per la gestione dei dati del restauro

Il linguaggio di programmazione visuale permette, attraverso la creazione di sequenze di azioni messe in relazione logica tra loro, di trattare e manipolare i contenuti grafici di un dato componente.

Negli ultimi anni, nell'ambito della modellazione BIM, si sta diffondendo velocemente l'uso di *software* integrativi per la programmazione logico-grafica con lo scopo di ottimizzare il lavoro di progettazione sia in termini di tempo che di condivisione dei dati. Questi programmi infatti, oltre a consentire una più veloce ed automatica modellazione parametrica, sono in grado di interagire con i *database* collegati al modello BIM.

Per quello che concerne la gestione del patrimonio storico esistente l'uso di questi applicativi è in fase sperimentale.

### 7.1. Il software di programmazione logico-grafica *Dynamo*

*Dynamo* è un applicazione *open-source* per il "*visual programming*" sviluppata come *software* indipendente ma comunque fruibile come componente aggiuntiva della *Suite Autodesk Revit*.

L'approccio *open-source* consente di avere un'ampia *community* che aggiorna ed integra la libreria *software* con nuove funzionalità accessibili a tutti gli utenti.

*Dynamo* abilita una più rapida modellazione parametrica all'interno dello spazio *Revit* e al contempo, consente di sperimentare nuovi ambiti di ricerca, mediante la gestione, la trattazione e la manipolazione degli elementi presenti su *Revit* attraverso i *tools* del programma.

Il programma consente la creazione di algoritmi, anche a chi non possiede competenze di programmazione informatica, attraverso l'uso di nodi pre-compilati messi in relazione tra loro secondo delle regole definite.

Uno dei pregi di questo *software* sta nel fatto di poter utilizzare come dato di *input* anche *file* derivanti da altri formati, come ad esempio *file excel* e *jpeg*, e allo stesso tempo di esportare i risultati ottenuti dalla programmazione visiva in formati differenti ed utilizzabili per trattazioni successive.

Nello specifico caso studio si è deciso di utilizzare *Dynamo* in abbinamento ad *Autodesk Revit*, con lo scopo di automatizzare il processo di visualizzazione della nuvola di punti.

Dopo aver effettuato il *download* del programma basta avviare *Autodesk Revit* e cliccando su "Gestisci", nella sezione "Programmazione visiva", è possibile cliccare sull'icona di *Dynamo*.



Figura 102: Procedura di avvio del software *Dynamo*.

A questo punto il programma consente di avviare un nuovo *file* di lavoro, di generare un nuovo nodo personalizzato oppure di aprire un *file* di definizione di *Dynamo* esistente. L'interfaccia utente è organizzata secondo quattro sezioni principali:

- area di lavoro nella quale è possibile gestire il codice e visualizzare i risultati;
- *menu* riservato alla gestione, selezione e modifica dei file;
- libreria contenente tutti i nodi caricabili (predefiniti e personalizzati);
- barra di esecuzione che può essere impostata su "Automatico" o "Manuale"<sup>104</sup>.

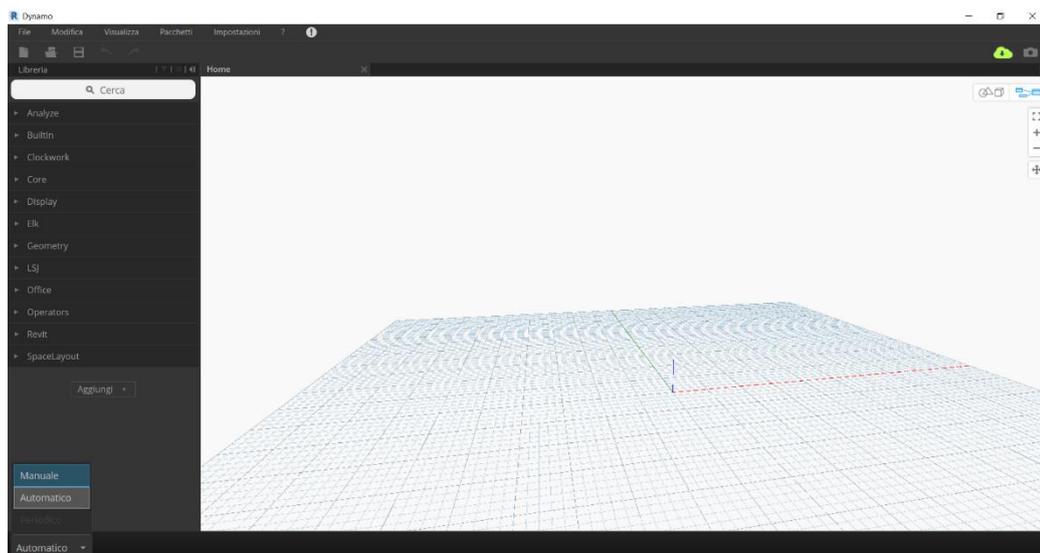


Figura 103: Le quattro sezioni principali dell'interfaccia utente di *Dynamo*.

<sup>104</sup> Si consiglia di impostare la modalità "Manuale" per gestire al meglio il flusso di lavoro.

Attraverso la creazione di uno *script* sono state estrapolati i pixel corrispondenti ad una porzione di punti della nuvola. Per ciascun pixel è stato estratto l'informazione RGB a esso associata. Questa è stata filtrata attraverso dei nodi condizionali (ad esempio "IF pixel = alfa RGB, THEN pixel = "laterizio"), marcando i pixel rilevanti con delle stringhe testuali. L'intera mappatura è stata poi esportata su un foglio Excel, dove si sono evidenziate le celle rilevanti mediante la formattazione condizionale.

L'*output* ottenuto è stato infine utilizzato per la descrizione della tessitura muraria, visualizzata attraverso lo strumento della realtà aumentata.

Uno sviluppo di questo approccio potrebbe portare a una completa mappatura della tessitura muraria, per esempio associando a ogni cella la corrispettiva quantità in m<sup>2</sup>.

## **7.2. La descrizione della tessitura muraria mediante RGB e sviluppi futuri**

Per realizzare l'algoritmo su *Dynamo* è stato prima necessario comprendere il funzionamento del *software*, attraverso lo studio delle guide disponibili sul sito e la consultazione di vari *tutorial* presenti in rete. Va infatti detto che il programma non è di facile utilizzo in quanto non risulta subito chiaro come richiamare gli elementi presenti nello spazio *Revit* e quali relazioni logiche utilizzare.

Il programma segue la seguente logica di funzionamento: una volta richiamato un elemento e le caratteristiche ad esse associate è possibile applicare allo stesso una funzione, visualizzabile sia in ambiente *Revit* che in *Dynamo*, consentendo di variare i soli parametri degli elementi desiderati<sup>105</sup>.

*Dynamo* si presta in modo ottimale ad un utilizzo in modalità "scrittura" verso il programma abbinato consentendo una riduzione dei tempi di progettazione e di aggiornamento del modello parametrico grazie all'automazione dei processi di modellazione. In tal senso si è proceduto sfruttando questa potenzialità per la generazione del contesto in cui la Chiesa di Santo Stefano al Monte è inserita, dato che sicuramente può arricchire la banca dati BIM.

---

<sup>105</sup> NISI G., "Il progetto di recupero e la tecnica del Construction Management: il caso studio dell'Ospedale San Luigi Gonzaga a Orbassano", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2016.

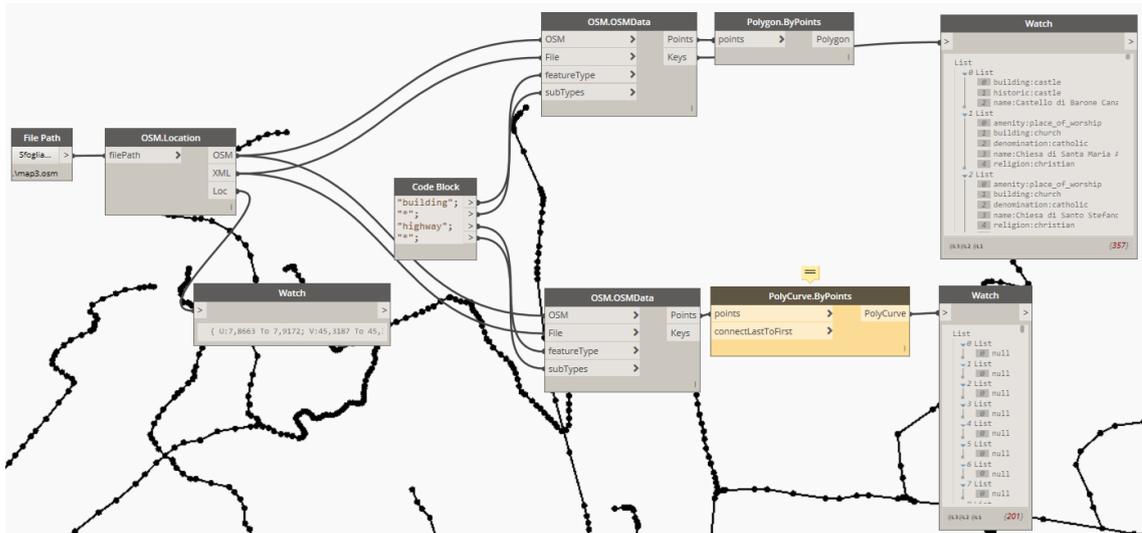


Figura 104: Script creato con *Dynamo* per la generazione del contesto partendo da un file in formato .OSM.

Passando però in rassegna tutte le funzionalità di *Dynamo* si rileva una minore presenza di funzioni in modalità "lettura" dallo spazio lavoro di *Revit*.

Dall'analisi delle relazioni della nuvola dei punti importata su *Revit*, interrogata su *Dynamo*, sono emerse sin da subito delle importanti criticità.

L'impossibilità di interrogare la nuvola dei punti come insieme di punti, ma bensì come unico indistinto elemento, ha comportato la necessità di individuare una modalità alternativa per procedere nell'analisi.

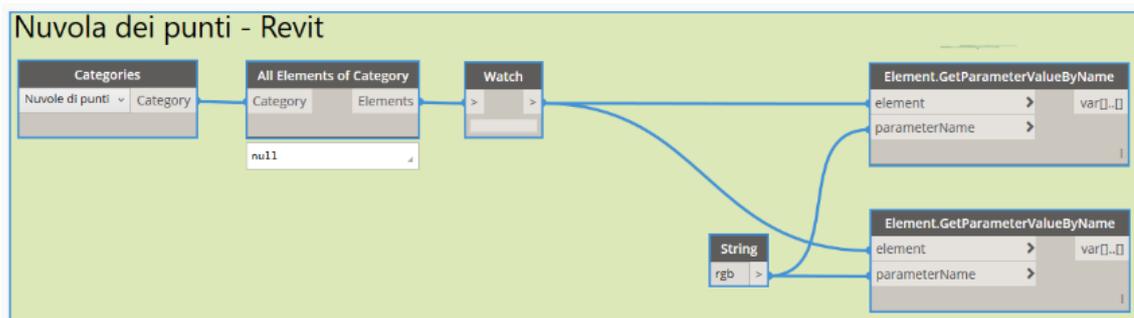


Figura 105: Script creato in *Dynamo* per la lettura delle informazioni contenute nella nuvola di punti.

Come si può notare dall'immagine su riportata, attraverso lo sviluppo di questo *script*, è stato possibile richiamare la nuvola di punti presente nello spazio di lavoro di *Revit*

ma partendo da essa non è stato possibile estrarre informazioni sugli elementi e le relative caratteristiche.

L'alternativa identificata è stata quella di utilizzare le ortofoto della nuvola di punti generate attraverso uno specifico tool del *plug-in PointSense*<sup>106</sup>.

A tal proposito è emersa una ulteriore criticità perché il programma non riusciva a processare l'intera ortofoto per limiti *hardware*; per ovviare a questo problema si è suddivisa in parti l'ortofoto consentendo a *Dynamo* di processarla senza particolari rallentamenti.

Per la scrittura del codice di lettura delle informazioni RGB della nuvola di punti sono stati utilizzati in totale 28 nodi che hanno permesso di richiamare, interrogare, visualizzare i dati in entrata e attraverso la loro gestione è stato possibile estrarre l'*output* finale in un foglio *Excel*.

Di seguito vengono riportati gli screen del suddetto codice e descritti i passaggi fondamentali per l'estrazione dei parametri di interesse in riferimento ad una porzione di ortofoto del prospetto sud della Chiesa di Santo Stefano; lo stesso codice è stato poi applicato ad altre porzioni della medesima ortofoto e il risultato ottenuto è stato ritenuto soddisfacente.

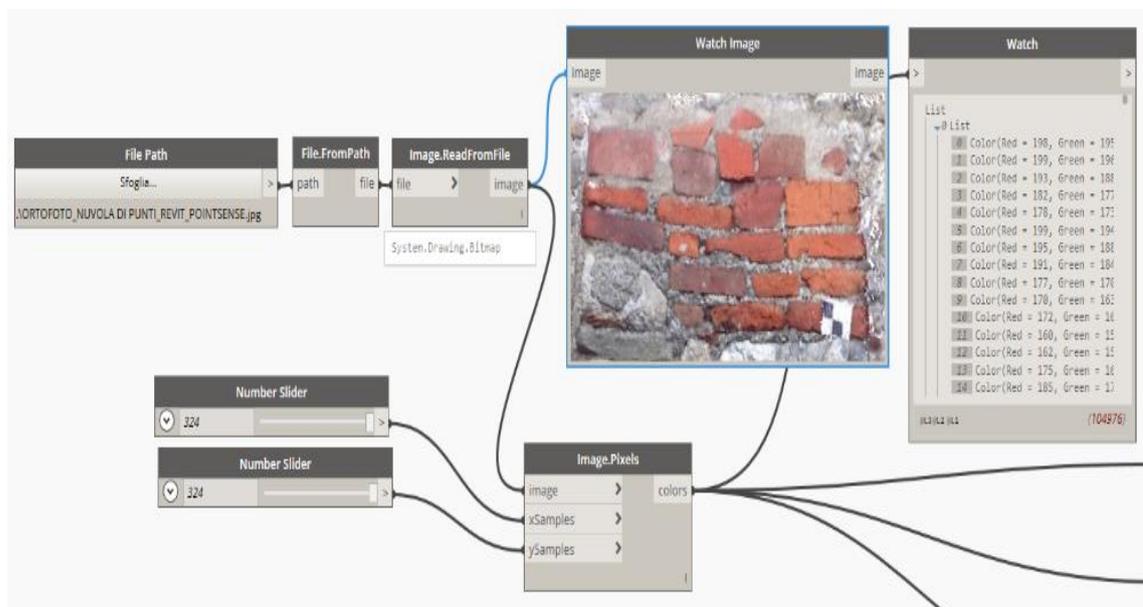


Figura 106: Screen 1 dello script di Dynamo.

<sup>106</sup> La procedura per la generazione delle ortofoto è stata trattata nel paragrafo 6.1.2.

Nella figura 106 vengono visualizzate le funzioni che hanno permesso di richiamare la porzione di ortofoto da analizzare ("File Path") e di estrapolare da essa le coordinate RGB corrispondenti ad ogni pixel ("Image ReadFromFile" -> "Image.Pixels"); nel nodo "Watch"<sup>107</sup> sono visualizzabili tutte le coordinate organizzate per liste.



Figura 107: Screen 2 dello script di Dynamo.

Nella figura 107 vengono riportati i nodi che hanno permesso di impostare il range di colore desiderato e quindi di filtrare la totalità delle coordinate mantenendo solo quelli corrispondenti a specifici valori di RGB che nel specifico riguardano la presenza di rosso associato al mattone laterizio.

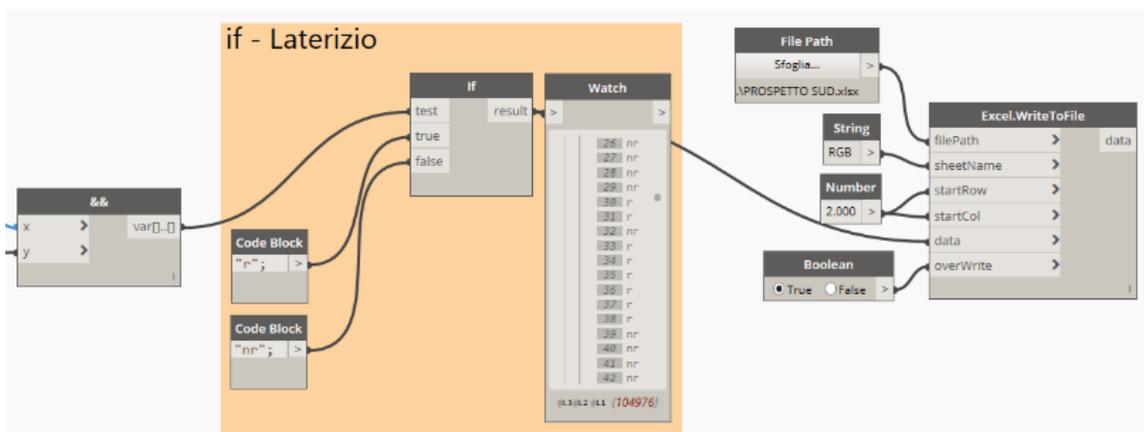


Figura 108: Screen 3 dello script di Dynamo.

<sup>107</sup> Il nodo "Watch" permette di visualizzare i risultati ottenuti consentendo un continuo controllo del flusso di lavoro.

Infine, nella figura 108, sono individuabili le funzioni matematiche che, associate ai valori filtrati, hanno permesso di esportare il dato di *output* in formato .xls.

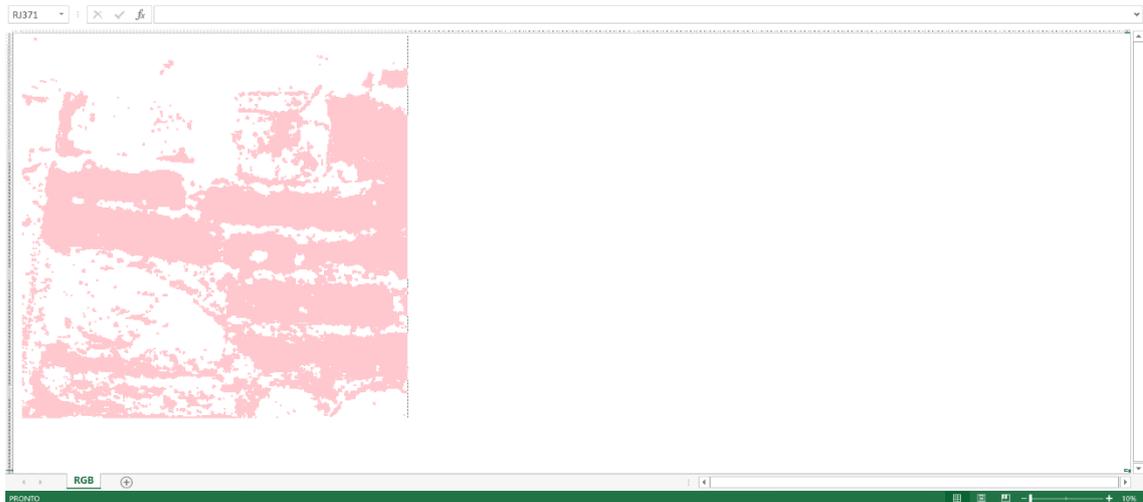


Figura 109: Risultato dell'esecuzione del codice di *Dynamo*.

Come si può notare ad ogni cella, corrispondente ad un punto della nuvola, è associato il colore rosso.

Questo codice è stato applicato ad altre porzioni di ortofoto del prospetto sud e di seguito vengono riportati gli output ottenuti.



Figura 110: Archivolto in laterizio della monofora strombata (a sinistra) e risultato ottenuto attraverso il codice di *Dynamo* (a destra).



Figura 111: Archetti pensili su peducci in laterizio (a sinistra) e risultato ottenuto attraverso l'applicazione del codice di *Dynamo*.

In conclusione, emerge chiaramente come, nonostante si sia raggiunto lo scopo prefissato, il livello di precisione del dato di output risulti influenzato dalla determinazione del corretto *range* di analisi (valori RGB), da fattori legati alle funzionalità messe a disposizione dal *software*, come anche dalla scelta dei parametri input.

Un possibile sviluppo futuro potrebbe infatti essere quello di impostare il lavoro di descrizione sulla morfologia della tessitura muraria e non sulle informazioni RGB; ovvero richiamare gli elementi in funzione della loro forma e dimensione, apportando le idonee variazioni al codice qui utilizzato, in modo da verificare se il dato di *output* così ottenuto può considerarsi attendibile per la mappatura della tessitura muraria.

### **7.3. La visualizzazione dei risultati attraverso la Realtà Aumentata**

Risulta a questo punto chiaro come portare avanti un progetto per la salvaguardia e la conservazione del patrimonio storico voglia dire seguire un ben definito iter procedurale che può essere riassunto in tre fasi.

La prima fase può essere definita di "*data acquisition*" costituita dall'insieme delle operazioni necessarie alla conoscenza del manufatto (documentazioni d'archivio, fonti bibliografiche, manuali e operazioni di rilievo in sito).

La seconda fase è quella di "*data restitution*" che consiste nella trattazione dei dati raccolti attraverso l'uso di specifici *software* in grado di generare elaborati bidimensionali e tridimensionali da utilizzare come input per la creazione di modelli parametrici. La terza fase è relativa alla "*data simulation*" nell'ambito della quale si attribuiscono informazioni descrittive e grafiche ai modelli ottenuti per consentire una migliore e intuitiva comprensione del manufatto.

Per la visualizzazione dei dati ottenuti si è utilizzato lo strumento della realtà aumentata, che permette una sovrapposizione delle informazioni ottenute, quando viene identificato il modello, su formato cartaceo oppure digitale.

Questa tecnologia infatti permette di "arricchire" la percezione che l'utente ha della realtà attraverso l'uso di oggetti virtuali che si sovrappongono in maniera dinamica a quelli reali. Si tratta di un potenziamento di tipo percettivo che avviene attraverso la

produzione di contenuti virtuali che integrano la realtà e ai quali l'utente può accedere attraverso semplici dispositivi elettronici quali *smartphone* o *tablet*.

La Realtà Aumentata può essere considerata uno strumento utile per la visualizzazione dei dati riguardanti la gestione e la manutenzione degli edifici perché, in maniera automatica e in tempo reale, consente di richiamare le informazioni integrate nei database associati ai manufatti.

Nel dettaglio del presente caso studio si è scelto di visualizzare i risultati ottenuti in realtà aumentata attraverso l'utilizzo di Aurasma Studio.

Si tratta di una piattaforma web correlata ad un'applicazione per dispositivi (*Android* o *iOS*) gratuita e di facile utilizzo.

La piattaforma, denominata "Aurasma Studio", si presenta con le modalità di accesso ed erogazione del servizio tipiche delle piattaforme *social*, in quanto prevede, una volta ultimata l'iscrizione, la creazione di un canale personale.

Una volta creato il proprio canale, la creazione di un'applicazione in realtà aumentata viene effettuata in tre passaggi:

- Passo 1: creazione dell'immagine obiettivo, denominata "Trigger".

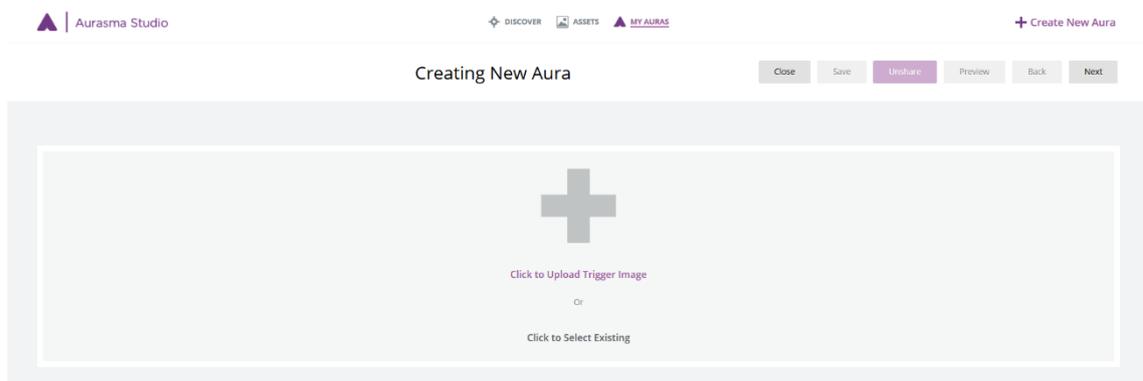


Figura 112: Caricamento dell'immagine *Trigger*.

Come mostrato in figura, la creazione dell'immagine "Trigger" avviene mediante il caricamento di un'immagine obiettivo a cui sarà poi abbinata l'animazione (contenuto aumentato).

In questo modo, l'immagine obiettivo potrà in seguito essere identificata dalla fotocamera del dispositivo utilizzato, richiamandone il contenuto ad essa associato.

- Passaggio 2: caricamento del contenuto "Overlay".

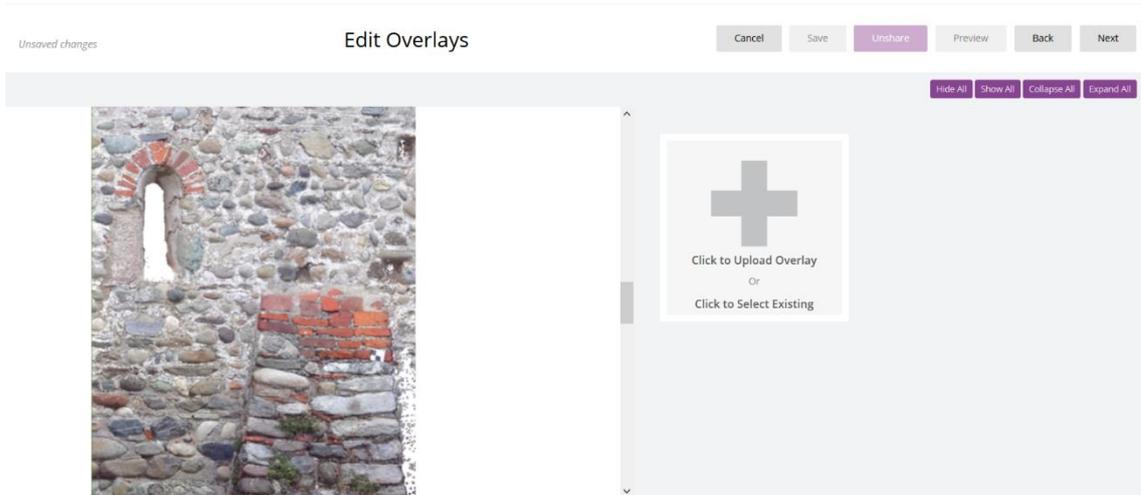


Figura 113: Caricamento del contenuto da sovrapporre all'immagine Trigger.

Attraverso il caricamento del contenuto di "Overlay" si effettua la sovrapposizione dell'oggetto virtuale (tra i possibili file utilizzabili si evidenziano i file video, modelli 3D e immagini), all'immagine obiettivo caricata in precedenza.

- Passaggio 3: manipolazione e creazione del modello "Aura".

In questo passaggio finale si integrano tutte le componenti che costituiscono il modello "Aura" editando il contenuto in sovrapposizione all'immagine obiettivo e finalizzando il modello di realtà aumentata.

Per poter procedere allo Step 2 e 3, chiaramente è stato prima necessario elaborare un contenuto video da poter caricare e manipolare su Aurasma Studio. A questo scopo si è utilizzato l'applicazione Powerpoint della Suite Office di Microsoft, per poter creare le animazioni ed integrare le informazioni del modello in modo semplice. L'applicazione Powerpoint consente l'esportazione del documento in formato video, in questo modo consentendo il caricamento su Aurasma Studio.

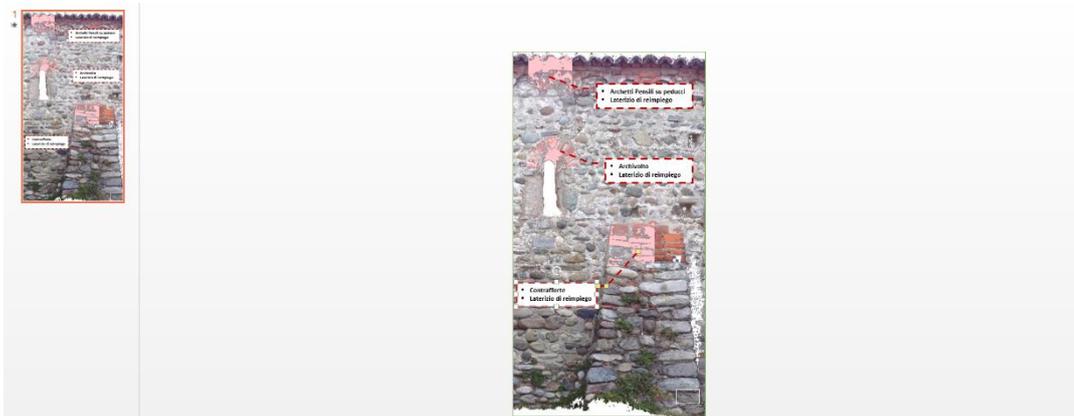


Figura 114: creazione del contenuto digitale per l'applicazione aumentata.



Figura 115: Immagine Trigger.



## Conclusioni

Lo svolgimento del presente lavoro di tesi ha previsto l'impiego di tecnologie innovative nell'ambito del rilevamento metrico e l'applicazione di metodologie H-BIM per la gestione del patrimonio architettonico.

Nel dettaglio si è potuto beneficiare di tecniche di rilievo quali la tecnica LiDAR, che si basa sulla misurazione di distanza attraverso un sistema di impulsi *laser* e che permette l'acquisizione di milioni di punti e la fotogrammetria aerea che, a partire da un dato bidimensionale (immagine) acquisito tramite UAV, permette di generare un modello finale tridimensionale.

Ai tempi relativamente contenuti impiegati per l'acquisizione dei fotogrammi e delle scansioni *laser* si sono contrapposti però tempi di elaborazione piuttosto lunghi legati sia alla difficoltà di automatizzare certi passaggi sia alla volontà di ottenere una precisione elevata in funzione della scala di rappresentazione prefissata.

Per l'elaborazione delle scansioni ottenute da *laser scanner* terrestre è stato utilizzato il *software SCENE* mentre, per quanto riguarda l'elaborazione dei fotogrammi aerei è stato utilizzato il *software Photoscan*.

La nuvola di punti ottenuta dall'elaborazione delle scansioni *laser* è risultata sicuramente più consistente rispetto a quella generata dall'elaborazione dei fotogrammi, e ciò è stato appurato anche grazie al confronto effettuato in termini di densità dei punti attraverso il *software CloudCompare*.

Va evidenziato come, il contributo della nuvola di punti fotogrammetrica sia stato rilevante ai fini della creazione della nuvola di punti finale; infatti oltre ad utilizzare i punti della nuvola fotogrammetrica corrispondenti alla copertura sono stati mantenuti anche quelli corrispondenti alla parte superiore dei prospetto Nord, Est e Sud che, a causa di fattori riguardanti la morfologia del terreno e all'ubicazione del manufatto rilevato, non sono risultati rilevabili attraverso l'uso del *laser scanner* terrestre. Nonostante in questa prima fase numerosi siano stati i software impiegati non sono state riscontrate criticità in termini di interoperabilità tra gli stessi e il risultato finale è stato quello di generare una nuvola di punti georeferenziata.

La nuvola di punti ha consentito la realizzazione di elaborati grafici CAD in scala 1:100 ed è stato il dato di input per l'applicazione di metodologie H-BIM.

Per la realizzazione degli elaborati CAD il supporto maggiore è stato sicuramente fornito dalle ortofoto generate da *Photoscan* poiché scarsa è risultata la documentazione d'archivio il tal senso.

La nuvola di punti finale è stata quindi importata all'interno della spazio di lavoro di *Autodesk Revit* dove innanzitutto è stato realizzato un modello concettuale (per masse) del manufatto e successivamente, attraverso l'uso del *plug-in PointSense*, è stata testata la possibilità di generare in maniera semi-automatica componenti architettonici come muri e finestre.

Nella fase conclusiva del lavoro si è sperimentato la possibilità di richiamare, trattare e manipolare le caratteristiche intrinseche della nuvola di punti, nel dettaglio quelle riguardanti le proprietà di colore di una porzione del prospetto Sud, attraverso la programmazione visuale.

Ciò ha richiesto l'uso del *software* di programmazione logico-grafica *Dynamo* utilizzabile come *plug-in* di *Revit*.

Qui sono emerse le maggiori criticità in termini di interoperabilità tra *software* infatti, pur riuscendo a richiamare la nuvola di punti in *Revit* su *Dynamo*, non è stato possibile estrarre le informazioni RGB della totalità dei punti; ciò è dipeso dal fatto che in *Revit* la nuvola di punti è vista come un'unica entità e non come insieme di punti.

Per ovviare al problema si è scelto di usufruire del *plug-in PointSense* attraverso il quale è stata generata l'ortofoto del prospetto Sud. Altra criticità riscontrata è stata la difficoltà del *software* di processare immagini di grande dimensione; per tale motivo è stato necessario "frammentare" l'ortofoto in più parti.

In questo modo è stato possibile esportare le informazioni RGB di ogni singolo punto su un foglio *Excel* dove ogni cella, corrispondente ad un punto della nuvola, è stato associato un colore.

In definitiva è stato possibile creare un codice attraverso il quale evidenziare i punti della nuvola, sotto forma di pixel, in funzione di un definito *range* di colore abbinato ad

una caratteristica quale risultato di una stringa testuale come output di una funzione condizionale.

I risultati di questa interrogazione sono stati esportati su Excel e poi rielaborati per essere opportunamente visualizzati attraverso un strumento di realtà aumentata.

Molte sono le possibili applicazioni pratiche per l'analisi del patrimonio storico, che le moderne tecnologie informatiche consentono di abilitare, ma ciò non toglie che le tecniche di rilievo debbano mantenere un ruolo di guida per orientare opportunamente le tecnologie H-BIM a supporto della gestione del patrimonio storico.

La metodologia H-BIM, vista come strumento e non come obiettivo, se utilizzata in modo critico costituisce un approccio valido alla gestione integrata dei dati del patrimonio architettonico. Tra i vantaggi principali si riscontrano la partecipazione condivisa alla gestione dei dati e la riduzione dei tempi garantita dai processi automatizzati.

E tuttavia la possibilità di automatizzare alcuni processi non è sempre efficace perché in molti casi non è possibile operare delle semplificazioni, in quanto il patrimonio storico presenta delle peculiarità, ovvero delle unicità che lo contraddistinguono che non possono essere trascurate.

In conclusione, la metodologia H-BIM opportunamente integrata all'interno del processo di progettazione, può fornire un valido supporto per la descrizione del patrimonio architettonico, in qualità di strumento di gestione dei dati.



## Bibliografia

- FORNERIS G., *"CANDIA CANAVESE - due passi e cento ricordi"*, Tipografia Litografia Bolognino, Ivrea, Marzo 1999.
- FORNERIS G., *"Romanico in terre d'Arduino"*, Bolognino Editore, Ivrea 1995.
- CRACCO G., PIAZZA A., FERRERI M., MOTEL C. S., *"Storia della Chiesa di Ivrea – dalle origini al XV Secolo"*, Viella libreria editrice, Roma 1998.
- CARRA P., *"Millennium – storie dall'anno 1000 nella marce d'Ivrea"*, Associazione Amici Museo del Canavese, Ivrea 1994.
- RAMELLA P., *"Yporegia – Ivrea e Canavese nel Medioevo"*, Banca di credito cooperativo di Vische e del Canavese, Ivrea 1997.
- FERRERO F. G., FORMICA E., *"Arte Medievale in Canavese – Mediaeval art in the Canavese country"*, Priuli & Verlucca Editori, Pavone Canavese 2003.
- CAVALLARI MURAT A., *"Tra Serra d'Ivrea, Orco e Po"*, Istituto bancario San Paolo di Torino 1976
- SETTIA A., *"Liber decimarum – diocesi di Ivrea (1368-1370)"*, Herder Editore 1971.
- BOBBIO C., *"Le chiese del Canavese"*, Tipografia Ditta F. Viassone, Ivrea 1910.
- GAVAZZOLI TOMEA M. L., *"Novara e la sua terra del secoli XI XII"*, Silvana Editoriale, Milano 1980.
- BERTELOTTI A., *"Passeggiate nel Canavese"*, Tipografia di F.L. Curbis, Ivrea 1868.
- BERTELOTTI A., *"Documenti di storia Canavese"*, F.lli Enrico Editori, Ivrea 1979.
- MINARDI M., FRANCHETTO E., *"Il Canavese ieri e oggi"*, ILTE editrice, Torino 1960.
- SCARZELLA P., ZERBINATTI M., *"Recupero e conservazione dell'edilizia storica"*, Alinea editrice, Firenze 2009.
- SCARZELLA P., ZERBINATTI M., *"Superfici murarie dell'edilizia storica. Conservazione e manutenzione"*, Alinea editrice, Firenze 2010.
- GASPAROLI P., TALAMO C., *"Manutenzione e recupero"*, Alinea editrice, Firenze 2002.

- TOSCO C., *"I muri del romanico: un esame delle fonti dell'XI secolo"* in *"Archeologia dell'Architettura, XVII, 2012"*, All'Insegna del Giglio, Firenze 2014.
- BROGIOLO G.P., GENTILINI G., *"Atti del Convegno Trento, 25-26 Ottobre 2012. Tecniche murarie e cantieri del romanico nell'Italia Settentrionale"*, in *"Archeologia dell'Archeologia dell'Architettura, XVII, 2012"*, All'Insegna del Giglio, Firenze 2014.
- BARTOLUCCI D., *"Principi di laser scanning 3D"*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2009.
- CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., *"La presa dei fotogrammi"* in *"Misure, rilievo, progetto"*, Zanichelli, Bologna 2012.
- CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., *"Principi e strumenti della fotogrammetria"* in *"Misure, rilievo, progetto"*, Zanichelli, Bologna 2012.
- CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI V., *"Il rilievo topografico"* in *"Misure, rilievo, progetto"*, Zanichelli, Bologna 2012.
- SGRENZAROLI M., VASSERA G. P. M., *"Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner" vol.1, 2007*
- BEZOARI G., MONTI C., SELVINI A., *"La fotogrammetria per l'architettura"*, Liguri Editore, Napoli 1999.
- GALETTO R., SPALLA A., *"Lezioni di topografia"*, CUSL, Pavia 1998.
- COMOGLIO G., *"Topografia e Cartografia"*, Celid librerie, Torino 2008.
- KRAUS K., *"Fotogrammetria. Vol. 1 - Teoria e applicazioni"*, Libreria Universitaria Levrotto & Bella, Torino 1994.
- DE LUCA L., *"La fotomodellazione architettonica – Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie"*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2011.
- OSELLO A., *"BIM GIS AR FM"*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2015.
- OSELLO A., *"Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti"*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2012.

- RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011.
- CHIABRANDO F., SPANÒ A T., "I sistemi laser scanning nei progetti e percorsi formativi d'Architettura" in "Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia", n. 3, SIFET, 2012.
- VISINTINI D., FICO B., SPANGHER A., "Modellazione 3D dell'ambiente urbano mediante integrazione di scansioni laser aeree e terrestri: l'esempio del castello di Gorizia", Dipartimento di Georisorse e Territorio, Udine.
- DALLAGIACOMA M., Valutazione di precisione, accuratezza e qualità di modelli tridimensionali da elaborazione fotogrammetrica.

#### **Riferimenti Normativi**

- Raccomandazioni Normal 1/88, "Alterazioni dei materiali lapidei e trattamenti conservativi. Proposte per l'unificazione dei metodi strumentali di studio e di controllo", 1988.
- UNI 11182:2006 "Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni".
- UNI 11337:2017-4 "Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati ed oggetti".

#### **Dispense**

- BOCCARDO P., CHIABRANDO F., LINGUA A., MASCHIO P., PIRAS M., SPANÓ A., Fotogrammetria da UAV, Seminario di formazione dei team studenteschi, Politecnico di Torino.
- CHIABRANDO F., LINGUA A., PIRAS M., Tecnologie di geomatica. Laser scanner 3D, la pianificazione dell'acquisizione LiDAR terrestre, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture.

### **Tesi di laurea**

- GRUOSSO C., "Candia, Caluso, Mazzè: valorizzazione di un'area del basso Canavese per uno sviluppo del turismo sostenibile", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2005.
- CINOTTO A., PAGLIA M.L., "Le aree naturaliprotette nella pianificazione urbanistica: l'area umida di Candia Canavese", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 1992/1993.
- MONTANARI G., "Il rilievo della facciata della chiesa di Santa Lucia a Bologna, mediante sistemi fotogrammetrici a basso costo e open source", Tesi di Laurea, Università di Bologna, A.A. 2014/2015.
- PINTO M., "Rilievo fotogrammetrico da drone per la generazione di modelli termici di porzioni di territorio", Tesi di Laurea, Università di Bologna, A.A. 2015/2016.
- UFFREDI V., "Metodologie innovative di rilievo e modellazione BIM applicati a beni culturali. Realizzazione di un database per la manutenzione programmata", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria Edile, A. A. 2015/2016.
- MATRONE F., "Rilevamento metrico 3D e modellazione HBIM per la manutenzione programmata del patrimonio architettonico. Il caso studio del Sacro Monte di Varallo", Tesi di Specializzazione, Politecnico di Torino, 2017.
- SANNA S., "Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria Edile, A.A. 2016/2017.
- BASSANELLO G., "La tecnica del laser a scansione del rilevamento di strutture: un caso studio", Tesi di laurea, Università di Bologna, A.A. 2006/2007.
- NISI G., "Il progetto di recupero e la tecnica del Construction Management: il caso studio dell'Ospedale San Luigi Gonzaga a Orbassano", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2016.

## **Manuali**

- Manuale Agisoft Photoscan
- Manuale d'uso SCENE
- Manuale d'uso 3DReshaper
- Manuale CloudCompare
- Manuale Dynamo

## **Sitografia**

- [www.comune.candia.to.it](http://www.comune.candia.to.it)
- [www.corsac.org](http://www.corsac.org)
- [www.verbanensia.org/metrologica](http://www.verbanensia.org/metrologica)
- [www.fondazione-isper.eu/chiese\\_piemonte/](http://www.fondazione-isper.eu/chiese_piemonte/)
- [www.liutprand.it/articoliPavia.](http://www.liutprand.it/articoliPavia)
- [www.tuttostoria.net/medio-evo.](http://www.tuttostoria.net/medio-evo)
- [www.chiesasantostefano.it/vicende\\_2.](http://www.chiesasantostefano.it/vicende_2)
- [http://archeocarta.org/candia-canavese-to-chiesa-priorato-s-stefano-monte/](http://http://archeocarta.org/candia-canavese-to-chiesa-priorato-s-stefano-monte/)
- [www.serramorena.it/intorno-ad-ivrea/chiesa-priorato-santo-stefano-del-monte-candia-canavese/](http://www.serramorena.it/intorno-ad-ivrea/chiesa-priorato-santo-stefano-del-monte-candia-canavese/)
- [www.et-on-line.it](http://www.et-on-line.it)
- [www.assoacmi.it](http://www.assoacmi.it)
- [www.rilievoarcheologico.it](http://www.rilievoarcheologico.it)
- [www.store.uni.com](http://www.store.uni.com)
- [www.assoacmi.it](http://www.assoacmi.it)
- [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [www.faro.com](http://www.faro.com)
- [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com)
- [www.dji.com/phantom](http://www.dji.com/phantom)
- [www.surveysoft.it/Starnet](http://www.surveysoft.it/Starnet)
- [www.autodesk.it](http://www.autodesk.it)
- [dynamobim.org](http://dynamobim.org)



## **Allegati**



**Elaborati grafici**















**COORDINATE COMPENSATE CON IL SOFTWARE STAR\*NET**

<b>STAZIONE</b>	<b>EST</b>	<b>NORD</b>	<b>Elev. description</b>
1	67.10114	31.75927	420.98035
2	67.28367	29.23625	422.22192
3	67.47454	28.59127	424.17881
4	67.79155	26.80049	421.56923
5	68.65082	23.44866	421.65877
6	69.08129	21.93990	422.15569
7	69.27398	21.09150	423.99756
8	70.11987	17.64913	421.60269
501	61.20222	9.44627	419.34328
502	59.84421	23.09923	420.01344
503	65.61595	34.18820	420.01833
504	67.03840	31.81537	425.02035
505	67.10951	29.08082	428.23555
506	68.52145	22.70444	428.23130
507	69.45597	19.86018	424.73959
508	70.27090	16.90372	422.76785
509	88.08461	23.63703	426.54835
510	89.85504	27.38033	434.13656
10	70.76954	17.45575	420.27154

11	73.77561	20.59800	421.72470
12	75.74864	21.25679	420.32537
13	77.29885	21.48167	421.33903
14	79.96087	21.98937	420.58608
15	81.53499	22.30658	421.35055
16	83.56788	22.81501	419.96883
17	85.29115	23.10536	421.08203
18	87.99635	23.78747	419.72384
520	84.05305	19.71336	418.80930
521	76.37304	18.98952	419.24886
522	90.00462	23.98729	426.45552
523	90.61838	26.22939	431.43918
524	78.42753	24.84773	420.16447
5000	92.24507	24.11731	418.42565
6000	90.91257	36.52750	418.67636
20	90.12480	22.13624	419.71918
21	89.55809	23.56091	421.28209
22	90.17319	24.46187	419.60115
23	91.11480	25.83762	420.35577
24	90.61752	28.14555	419.61581
25	91.41061	29.27644	420.73491

26	90.55129	28.07959	422.87082
27	91.44963	29.23666	422.81815
530	93.23871	25.40927	418.45023
531	93.30083	32.17451	418.69471
7000	61.79108	34.86799	420.15530
28	91.36642	30.30479	420.06161
29	90.98915	31.37092	420.81371
30	91.15533	31.19983	422.69583
31	89.63908	32.42945	422.56031
32	90.09888	32.07978	420.82757
33	90.44357	31.80666	419.78354
34	89.62335	34.00279	420.88676
35	89.54170	34.56248	422.70499
36	89.11864	35.05607	420.78162
37	89.17013	35.00073	419.60342
38	87.75047	35.66326	420.47163
39	87.47959	35.70308	420.53342
532	76.49249	34.81612	419.14335
40	87.26408	35.63388	420.51339
41	85.47319	35.21693	419.62391
42	82.48386	34.67323	421.07799

43	81.15106	34.41976	420.36036
44	76.72090	33.69668	421.61090
45	74.73464	33.24714	420.97164
46	72.91757	32.92033	422.20434
47	71.67187	32.73693	420.45404

**TENSIONE DEI MARKER (Software FARO SCENE)**

Marker	Errore [mm]	Scansione 1	Scansione 2
41	11,84	CAM_LS03505_016	CAM_LS03505_005
31	11,12	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
8	10,98	CAM_LS03505_012	CAM_LS03505_011
18	10,08	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
31	9,84	CAM_LS03505_007	References
14	8,33	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
41	8,13	CAM_LS03505_016	References
39	8,05	CAM_LS03505_005	References
38	8,02	CAM_LS03505_005	References
34	7,94	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_006
4	7,66	CAM_LS03505_012	CAM_LS03505_011
18	7,58	CAM_LS03505_013	References
4	7,49	CAM_LS03505_011	References
38	7,22	CAM_LS03505_006	CAM_LS03505_005
8	7,15	CAM_LS03505_011	References
14	6,78	CAM_LS03505_014	References
20	6,73	CAM_LS03505_007	References
46	6,12	CAM_LS03505_004	CAM_LS03505_003
34	6,11	CAM_LS03505_008	References
42	5,78	CAM_LS03505_016	References
6	5,59	CAM_LS03505_012	CAM_LS03505_011
1	5,5	CAM_LS03505_012	References
30	5,27	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
10	5,16	CAM_LS03505_013	CAM_LS03505_010
28	5,1	CAM_LS03505_008	References
33	5,02	CAM_LS03505_007	References
34	4,98	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_007
28	4,88	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_006
7	4,82	CAM_LS03505_012	CAM_LS03505_011
20	4,73	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_007
32	4,71	CAM_LS03505_007	References
41	4,69	CAM_LS03505_005	References
28	4,63	CAM_LS03505_006	References
10	4,6	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_010
32	4,56	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
20	4,56	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_007
6	4,51	CAM_LS03505_012	References
46	4,48	CAM_LS03505_015	CAM_LS03505_003

<b>Marker</b>	<b>Errore [mm]</b>	<b>Scansione 1</b>	<b>Scansione 2</b>
42	4,47	CAM_LS03505_004	References
42	4,44	CAM_LS03505_016	CAM_LS03505_004
8	4,44	CAM_LS03505_012	References
35	4,35	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
5	4,31	CAM_LS03505_012	References
33	4,25	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
34	4,23	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
37	4,2	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
46	4,1	CAM_LS03505_003	References
27	4	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
27	3,94	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_007
10	3,9	CAM_LS03505_013	References
21	3,66	CAM_LS03505_009	References
37	3,64	CAM_LS03505_007	References
16	3,62	CAM_LS03505_014	References
46	3,61	CAM_LS03505_004	References
7	3,6	CAM_LS03505_011	References
35	3,57	CAM_LS03505_007	References
25	3,56	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_007
30	3,55	CAM_LS03505_006	References
27	3,5	CAM_LS03505_009	References
23	3,46	CAM_LS03505_007	References
4	3,44	CAM_LS03505_012	References
15	3,35	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
7	3,34	CAM_LS03505_012	References
30	3,32	CAM_LS03505_007	References
17	3,26	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
17	3,25	CAM_LS03505_014	References
25	3,24	CAM_LS03505_009	References
20	3,22	CAM_LS03505_009	References
10	3,18	CAM_LS03505_014	References
46	3,16	CAM_LS03505_015	CAM_LS03505_004
29	3,07	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_006
48	3,01	CAM_LS03505_004	CAM_LS03505_003
27	2,98	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_007
3	2,97	CAM_LS03505_012	References
6	2,87	CAM_LS03505_011	References
12	2,85	CAM_LS03505_013	CAM_LS03505_010
25	2,82	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
25	2,8	CAM_LS03505_007	References

<b>Marker</b>	<b>Errore [mm]</b>	<b>Scansione 1</b>	<b>Scansione 2</b>
15	2,8	CAM_LS03505_014	References
12	2,77	CAM_LS03505_013	References
49	2,75	CAM_LS03505_015	CAM_LS03505_003
21	2,74	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
20	2,74	CAM_LS03505_008	References
43	2,69	CAM_LS03505_016	References
38	2,66	CAM_LS03505_006	References
44	2,66	CAM_LS03505_015	References
21	2,63	CAM_LS03505_008	References
18	2,62	CAM_LS03505_014	References
27	2,62	CAM_LS03505_008	References
40	2,6	CAM_LS03505_016	CAM_LS03505_004
23	2,57	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_007
43	2,51	CAM_LS03505_016	CAM_LS03505_004
34	2,51	CAM_LS03505_006	References
23	2,51	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_007
47	2,49	CAM_LS03505_004	References
29	2,48	CAM_LS03505_007	References
34	2,46	CAM_LS03505_006	References
2	2,44	CAM_LS03505_003	References
37	2,41	CAM_LS03505_007	CAM_LS03505_005
36	2,34	CAM_LS03505_005	References
29	2,33	CAM_LS03505_007	References
48	2,31	CAM_LS03505_015	References
37	2,3	CAM_LS03505_006	CAM_LS03505_005
37	2,26	CAM_LS03505_005	References
33	2,2	CAM_LS03505_006	References
35	2,14	CAM_LS03505_006	References
44	2,13	CAM_LS03505_004	References
23	2,03	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
49	2,02	CAM_LS03505_003	References
16	2,01	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
14	1,99	CAM_LS03505_013	References
31	1,93	CAM_LS03505_006	References
15	1,89	CAM_LS03505_013	References
23	1,88	CAM_LS03505_008	References
23	1,88	CAM_LS03505_009	References
13	1,86	CAM_LS03505_013	CAM_LS03505_010
25	1,85	CAM_LS03505_008	References
26	1,76	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008

<b>Marker</b>	<b>Errore [mm]</b>	<b>Scansione 1</b>	<b>Scansione 2</b>
40	1,76	CAM_LS03505_004	References
27	1,75	CAM_LS03505_007	References
10	1,74	CAM_LS03505_010	References
26	1,72	CAM_LS03505_009	References
24	1,71	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
16	1,68	CAM_LS03505_013	References
44	1,63	CAM_LS03505_015	CAM_LS03505_004
36	1,6	CAM_LS03505_006	References
43	1,54	CAM_LS03505_004	References
36	1,49	CAM_LS03505_006	CAM_LS03505_005
46	1,43	CAM_LS03505_015	References
13	1,42	CAM_LS03505_013	References
45	1,42	CAM_LS03505_015	References
45	1,36	CAM_LS03505_004	References
47	1,27	CAM_LS03505_003	References
24	1,16	CAM_LS03505_008	References
37	1,12	CAM_LS03505_006	References
49	1,08	CAM_LS03505_015	References
25	1,07	CAM_LS03505_008	CAM_LS03505_007
13	1,02	CAM_LS03505_010	References
32	1,01	CAM_LS03505_006	References
12	0,97	CAM_LS03505_010	References
10	0,93	CAM_LS03505_014	CAM_LS03505_013
40	0,9	CAM_LS03505_016	References
17	0,8	CAM_LS03505_013	References
26	0,77	CAM_LS03505_008	References
11	0,72	CAM_LS03505_010	References
20	0,67	CAM_LS03505_009	CAM_LS03505_008
24	0,62	CAM_LS03505_009	References
45	0,2	CAM_LS03505_015	CAM_LS03505_004

## REPORT ERRORI (*Software Agisoft Photoscan*)

### Control Points

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
11	0.00438708	-0.005161	0.00677365	18	0.789
14	0.0168087	0.00714041	0.0182625	19	1.781
2	0.00877826	0.000491737	0.00879202	4	0.753
20	0.00975324	-0.00304732	0.0102182	20	0.746
23	0.00802779	0.00189365	0.00824811	23	1.049
32	0.00496583	-0.00391291	0.00632221	15	0.619
36	0.00671356	-0.00611521	0.00908118	11	0.619
39	0.00642518	-0.0128153	0.0143357	3	0.341
4	0.00907008	-0.00411294	0.00995905	7	0.763
42	0.0216933	-0.0052453	0.0223185	4	0.636
49	0.0101139	0.00926818	0.0137183	4	0.642
5	0.00293606	-0.00141094	0.00325748	6	0.336
501	0.0129001	-0.00385175	0.0134629	9	0.610
502	0.00612685	0.00156459	0.00632347	18	0.798
503	0.0117805	0.0133285	0.0177884	31	0.786
504	0.00993621	0.00307631	0.0104015	34	0.869
505	0.00422155	-0.00428116	0.00601247	36	1.312
507	0.00372197	-0.00644698	0.00744423	44	0.920
508	0.00845782	-0.00431016	0.00949275	40	0.867
520	0.00560047	0.0153429	0.0163331	41	3.809
521	0.00725714	0.00507863	0.00885769	35	1.578
530	0.00668386	0.00676729	0.00951158	64	1.096
531	0.00722185	0.000641862	0.00725032	47	0.746
8	0.0107416	-0.00639466	0.0125009	6	0.634
<b>Total</b>	<b>0.00947389</b>	<b>0.00668068</b>	<b>0.0115925</b>		<b>1.432</b>

### Check Points

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
17	0.0200836	0.00679814	0.0212029	18	1.493
28	0.0105877	-0.00544794	0.0119071	21	0.609
45	0.0145527	0.0293759	0.032783	6	0.981
506	0.0222455	-0.0188181	0.0291373	52	1.028
522	0.00908994	-0.00773285	0.0119342	44	1.260
532	0.0187671	-0.000230838	0.0187685	26	0.897
<b>Total</b>	<b>0.0166179</b>	<b>0.0150156</b>	<b>0.0223969</b>		<b>1.093</b>

## **Ringraziamenti**

Un sincero ringraziamento va ai professori che, attraverso il presente lavoro di tesi, mi hanno permesso di approfondire argomenti di mio interesse guidandomi lungo tutto il percorso.

Ringrazio mia madre Giusy per la sua forza, per esserci sempre stata e per avermi sempre supportata e insieme a lei le mie sorelle Alessia e Giuliana che sono anche le mie migliori amiche.

Ringrazio Roberta e Dario i miei amici di sempre e per sempre.

Un pensiero va anche ai colleghi universitari con cui ho trascorso questi anni di studio e soprattutto a chi tra loro è diventato un amico anche al di fuori dell'ambiente universitari.

Un ringraziamento particolare va al mio compagno di vita Luca per il continuo sostegno e amore che mi dimostra in ogni istante.

Infine dedico questo lavoro a mio Padre che sento sempre vicino a me.