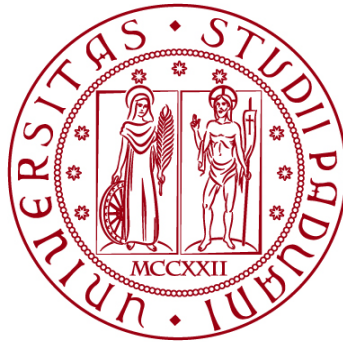


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Tecnologie Digitali per l'Edilizia e il Territorio



TESI DI LAUREA

RILIEVO TRIDIMENSIONALE AD ALTA
DEFINIZIONE CON METODOLOGIE GEOMATICHE
INTEGRATE.

CASO DI STUDIO: LA SCUOLA GRANDE DI SAN
ROCCO A VENEZIA.

HIGH-RESOLUTION TRIDIMENSIONAL SURVEY USING INTEGRATED GEOMATIC
METHODOLOGIES. CASE STUDY: THE SCUOLA GRANDE DI SAN ROCCO IN
VENICE.

Relatore: Prof. Ing. Andrea Menin

Laureando: Marco Muraro

Matricola: 2074876

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Indice

1.0	Introduzione.....	4
2.0	Caso di studio: La Scuola Grande di S. Rocco	7
2.1	Le Scuole Veneziane.....	7
2.2	L'edificio caso studio.....	9
2.3	Caratteristiche stilistiche e costruttive	11
3.0	Strumentazione e metodologie di rilievo.....	14
3.1	Stazione integrata	14
3.2	Ricevitori GNSS.....	18
3.3	Laser scanner.....	21
3.4	Fotogrammetria	23
4.0	Rilievo ed elaborazione dati	26
4.1	Scopo del rilievo	26
4.2	Rilievo piano-altimetrico	26
4.2.1	Fase di pianificazione e materializzazione della rete.....	26
4.2.2	Misure satellitari GNSS	28
4.2.3	Rilievo della rete topografica con stazione integrata.....	30
4.2.4	Elaborazione e compensazione dei dati	30
4.3	Rilievo tridimensionale	35
4.3.1	Acquisizione dei dati tridimensionali	35
4.3.2	Elaborazione dei dati tridimensionali da laser scanner.....	37
4.3.3	Elaborazione dei dati tridimensionali fotogrammetrici	48
5.0	Conclusioni	51
6.0	Bibliografia e Sitografia	55

1.0 Introduzione

Negli ultimi decenni, lo sviluppo tecnologico nei settori dell'elettronica e dell'informatica ha avuto un impatto significativo anche nel campo della topografia e delle metodologie di rilievo, le strumentazioni classiche ottico-meccaniche sono state progressivamente sostituite o integrate da nuove tecnologie digitali e da sistemi avanzati di acquisizione dati.

Il presente lavoro di tesi si propone di analizzare e approfondire le moderne tecniche di rilievo mediante metodologie geomatiche integrate, finalizzate alla realizzazione di elaborati tridimensionali ad alta definizione e precisione.

Come caso studio è stato considerato il rilievo della Sala Terrena della Scuola Grande di San Rocco a Venezia, condotto dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica (LRG) dell'Università di Padova in collaborazione con il Centro per i Beni Culturali (CIBA).

L'obiettivo del rilievo volge alla produzione di una documentazione geometrica tridimensionale accurata della parete sud e degli elementi architettonici presenti, al fine di estrarre informazioni metriche utili alla valutazione degli spessori murari, al calcolo volumetrico e di massa degli elementi marmorei comprendenti l'altare.

Tali dati costituiranno la base per la progettazione dell'intervento ingegneristico di consolidamento e risanamento della muratura, reso necessario dal progressivo degrado e dai fenomeni di cedimento strutturale localizzato.

L'elaborato include un'introduzione storico-architettonica del fabbricato e una descrizione delle strumentazioni topografiche impiegate, dalla stazione integrata, ai ricevitori satellitari GNSS, fino alle tecnologie di laser scanning e fotogrammetria, analizzando nel dettaglio le metodologie di acquisizione ed elaborazione dei dati.

La ricerca ha permesso di:

- Fornire una documentazione accurata del caso studio, descrivendo e presentando in modo tecnico l'impiego di metodologie geomatiche integrate per il rilievo tridimensionale ad alta risoluzione;
- Effettuare un'analisi comparativa di diverse metodologie e tecnologie, confrontando la precisione, i benefici e le limitazioni del laser scanning e della fotogrammetria, applicati al caso di studio per l'elaborazione di modelli 3D;
- Valutare il potenziale delle strumentazioni per la documentazione metrica ad alta risoluzione del patrimonio culturale, mediante l'utilizzo integrato di tecnologie di rilievo

tridimensionale non invasive, capaci di restituire modelli geometrici accurati, funzionali alla pianificazione di interventi conservativi e di restauro.

2.0 Caso di studio: La Scuola Grande di S. Rocco

2.1 Le Scuole Veneziane

Nell'Italia centro-settentrionale del XIII secolo, gruppi di laici si riunivano in confraternite in nome di Cristo, la Madonna Vergine o il santo patrono del loro luogo d'origine, con la finalità di culto e mutuo soccorso.

Il governo veneziano dell'epoca era composto da un'oligarchia repubblicana, riservata esclusivamente alle famiglie patrizie. I ricchi borghesi attivi nelle maestrie e professioni, dotati di grandi disponibilità economiche, per ricoprire ed acquisire un ruolo di prestigio all'interno della società veneziana, si riunivano in confraternite laiche, le quali a Venezia prendevano il nome di "Scuole".

Le Scuole a loro volta si dividevano in varie categorie: associazioni di arti e mestieri per le tutele e le regolamentazioni dei lavoratori, confraternite che raggruppavano i membri delle nazionalità straniere presenti sul territorio e, infine, le Scuole con specifiche connotazioni religiose, denominate dei "Battuti" per la pratica dell'autoflagellazione che attuavano in pubblico come segno di penitenza.

Queste ultime assunsero un ruolo di spiccato prestigio all'interno della società come enti benefici e caritatevoli, venendo definite Scuole Grandi, alle quali la Repubblica della Serenissima concesse particolari onorificenze e concessioni.

Alla fine del Cinquecento, le Scuole Grandi presenti sul territorio veneziano erano sei: Carmini, San Giovanni, San Rocco, San Teodoro, Dalmata dei Santi Giorgio e Trifone. Tra queste, la confraternita di San Rocco assunse particolare importanza, e la sua sede, la Scuola Grande, sarà oggetto del presente studio e approfondimento.

L'Europa cinquecentesca viveva in un periodo buio, dove pestilenze di peste nera flagellavano le popolazioni, in questo contesto la devozione a San Rocco cresceva tra i fedeli, Santo protettore dei malati e degli appestati.

Il crescente culto, in particolar modo nella Repubblica Veneziana, portò all'aggregazione ed istituzione il 27 maggio 1478 della confraternita di San Rocco. L'istituzione aveva scopi diretti ai membri, ma in casi di emergenza anche ai cittadini, di assistenza infermieristica dei malati durante periodi di pestilenza, la distribuzione di viveri (pane e farina), contributi mensili di denaro, alloggi gratuiti, doti per fanciulle da marito e sovvenzioni per il riscatto di veneziani caduti in mano degli infedeli.

Il prestigio ed importanza dell'associazione crebbe notevolmente nel 1484, quando, in seguito ad una funesta epidemia che colpì la città lagunare, la confraternita, rappresentata dal patriarca Maffeo Girardi, riuscì a trasferire le reliquie di san Rocco in città, certificandone l'autenticità.

Non si seppe mai come gli ignoti autori della traslazione fossero entrati in possesso delle spoglie. Una delle molte ipotesi ne riconduce la provenienza alla chiesa di Sant'Enrico a Voghera, suggerendo che la confraternita le abbia acquistate segretamente con l'appoggio di personaggi influenti di entrambe le città.

L'importanza dell'avvenimento fu di tale rilevanza che il Consiglio di Governo autorizzò i confratelli a edificare un nuovo edificio sacro nel quale fosse possibile la venerazione delle reliquie, stipulando patti e convenzioni con i Frari (convento di frati francescani minori).

Il terreno destinato era ubicato nella zona di Santa Maria Gloriosa dei Frari, nel sestiere di S. Polo, facente parte dell'allora camposanto del convento.

Nel campo, che in seguito prese il nome di S. Rocco, i confratelli eressero i loro edifici. Il primo tra questi fu la chiesa, nella quale vennero solennemente deposti i resti del santo.

L'edificio religioso venne realizzato per permettere la venerazione delle reliquie ai devoti e per l'organizzazione dell'attività associativa ai locali.

A seguire fu costruita l'esistente Scoletta, caratterizzata da sobrietà e semplicità, e successivamente la più fastosa e monumentale Scuola Grande, locata dall'altro lato del campo (*fig. 1*).

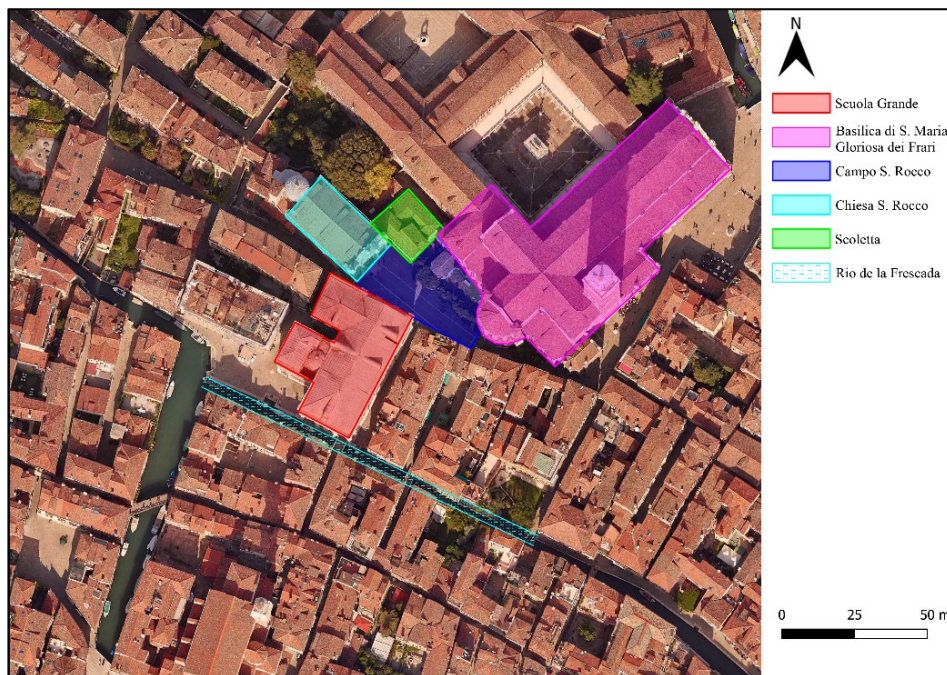


Figura 1 – Distribuzione spaziale dei fabbricati

Queste differenze stilistiche tra la Scuola e la Scoletta testimoniano come la confraternita stesse assumendo un ruolo di maggior prestigio nella vita cittadina nel susseguirsi del tempo, seguita pari passo dall'accrescersi della fama e venerazione di S. Rocco, attirando un numero sempre maggiore di devoti verso la città e di conseguenza di sostegni finanziari da parte dei credenti.

2.2 L'edificio caso studio

Dei corpi di fabbrica presenti nel Campo S. Rocco, è oggetto di studio l'edificio più rappresentativo della confraternita, la Scuola Grande, centro dell'attività associativa.

La costruzione dell'edificio si susseguì negli anni e sotto la direzione di diversi architetti, primo tra questi fu nominato nel 1517 proto Pietro Bon, già progettista della chiesa.

Il suo progetto aveva lo scopo di rappresentare l'accresciuta ricchezza e importanza che la confraternita stava acquisendo nella società veneziana, attraverso la realizzazione di un edificio destinato a diventarne il simbolo, formato da due grandi sale rettangolari sovrapposte, affiancate da un corpo di fabbrica minore, destinato a ospitare l'Albergo.

La sala posizionata al pian terreno, Sala Terrena, fu concepita come un'aula semplice e modesta, destinata alla attività quotidiane della Scuola. Tuttavia, in seguito, il confratello Francesco di Giovanni ne propose e attuò un radicale cambiamento rispetto all'idea di progetto, innalzando il solaio superiore, arricchendo gli elementi costruttivi con particolari di pregio e decorando il prospetto principale con un ulteriore zoccolo.

Il piano superiore, noto come Sala Capitolare, era destinato ad ospitare le riunioni del Capitolo e le importanti cerimonie religiose, concepito come l'ambiente più sfarzoso e monumentale.

Infine, l'Albergo, il corpo di fabbrica adiacente a quello principale, rappresentava il luogo in cui gli alti vertici della confraternita tenevano le riunioni governative e gestivano l'amministrazione delle finanze.

Nel susseguirsi dei lavori, l'interferenza tra il progettista e la committenza, le varianti in corso d'opera a modificare il progetto iniziale e l'alternanza di dissensi, portò l'allentamento di Pietro Bon, lasciando la sua opera incompleta al primo impalcato.

Venne incaricato come suo successore l'architetto Sante Lombardo, un proto alle prime esperienze, costretto da contratto ad essere supervisionato costantemente dal padre Tullio, anch'esso proto e dotato di esperienza nel mestiere.

Lombardo progettò la facciata sud, rivolta dal lato opposto del campo, che un tempo rivestiva maggiore importanza rispetto alla contemporaneità, in quanto costituiva l'accesso acquatico sul Rio de la Frascada, luogo di partenza delle solenni cerimonie pubbliche e processioni.

Il contratto di lavoro con la confraternita durò poco, dato il costo ingente di pagamento salariale dei due protti, e si susseguì con l'incarico nel 1527 di Antonio Abboni, detto lo Scarpagnino.

Quest'ultimo, appoggiato dai vertici della Scuola, ampliò e modificò l'edificio in modo imponente e sfarzoso, modificando il progetto iniziale inserendo sulla facciata principale otto colonne libere. Inoltre, progettò la realizzazione dello scalone "imperiale", che avrebbe collegato i due piani dell'edificio, demolendo la preesistente scala in legno e laterizio per una costruzione più solenne. Lo scalone si articolava in due rampe iniziali coperte da una volta a botte interamente affrescata, un pianerottolo comune e una rampa singola centrale che conduceva alla Sala Capitolare.

La realizzazione fu concessa dato l'acquisto del terreno adiacente, sul quale venne edificato un fabbricato destinato sia alle attività di assistenza infermieristica e sia, come già accennato, per la realizzazione del sistema di scale.

Il cantiere venne ultimato dopo la morte di Scarpagnino, sotto la direzione di Giangiacomo de' Grigi circa nel 1560.

2.3 Caratteristiche stilistiche e costruttive

Prospetto frontale:

La facciata principale dell'edificio è un'evidente dimostrazione della ricchezza ed importanza che la Scuola aveva nella città lagunare. Il prospetto sul campo è il risultato della sovrapposizione dei progetti di Pietro Bon e lo Scarpagnino, evidente nella differenza costruttiva e decorativa tra il pian terreno e il piano superiore.

La facciata, rivestita in pregiata pietra d'Istria, ne viene accreditata la progettazione di Bon per quanto riguarda il registro inferiore, dove il progetto ripartisce i corpi di fabbrica tra la

Scuola e l'Albergo attraverso due portali. Chiaramente riconoscibili ed attribuibili, sono le tre bifore di tipo codussiano, inquadrata da lesene in una cornice di pietra e marmi policromatici.

Nel registro superiore si nota l'inserimento progettuale di Scarpagnino, che introduce aperture differenti rispetto a quelle sottostanti, modificandone lo stile inserendole in una cornice di colonne snelle, decorate a bassorilievo e sormontate da un timpano. Inoltre, Scarpagnino inserisce nella facciata le otto colonne libere, quali modificano profondamente il prospetto, rendendolo maggiormente solenne e fastoso, arricchito da particolari intarsi e sculture sulla pietra, ritraenti figurazioni allegoriche e fasce fitomorfe.

Prospetto meridionale:

Il prospetto meridionale, come sopracitato, fu progettato da Sante e Tullio Lombardo e successivamente terminato, secondo lo stile lombardesco, da Scarpagnino. Esso presenta un'ulteriore tipologia stilistica.

La facciata, rivestita in pietra istriana, presenta al piano superiore due bifore laterali, che riprendono lo stile del secondo registro della facciata principale, e al centro un'edicola, il tutto incorniciato da lesene e particolari scultorei.



Figura 2 – Veduta frontale Scuola Grande di San Rocco

Al piano terreno è stato realizzato un portico voltato a crociera, quest'ultimo intitolato come "Sotoportego de la Scuola", eretto secondo lo stile utilizzato nel registro superiore e destinato a svolgere la funzione di riparo dalle intemperie in prossimità dell'accesso sull'acqua.

Di particolare pregio è la trabeazione del prospetto, ideata dai Lombardo, sinonimo di magnificenza e cura nei dettagli. Il particolare costruttivo presenta svariati bassorilievi e sculture in asse con le aperture e l'edicola, raffiguranti scene animali e oggetti simbolici, quali: coppie di cornucopie, simbolo di fertilità e prosperità; delfini, rappresentazione di saggezza e prudenza; aquile, segno di sovranità e regalità.

Sala Terrena:

La sala Terrena è un'ampia aula rettangolare, progettata sulla falsa linea della Scuola Grande di S. Marco, composta da tre navate suddivise da due file di sei colonne ciascuna.

Quest'ultime presentano un basamento ottagonale arricchito d'intarsi di porfido e serpentino, un fusto in pietra d'Istria e il capitello in stile composito.

La pavimentazione della sala segue le tipicità dell'epoca, composta da uno scacchiere diagonale alternando pietra d'Istria e marmo rosso di Verona, inoltre il marmo viene ripreso su tutto il perimetro dell'aula per la realizzazione delle panche.

A ridosso della parete meridionale della stanza troviamo l'ubicazione di un altare, dove all'interno di una nicchia, è presente la statua di S. Rocco, opera di Girolamo Campagna (1607-1611) e completata nel 1742 con l'aggiunta del cane, scolpito da Giovanni Marchiori.

Un'importante menzione va fatta agli otto grandi teleri di Jacopo Tintoretto, che posati sui lati lunghi del pian terreno, raffigurano storie della vita della Vergine e dell'infanzia di Cristo.



Figura 3 –Interno della Sala Terrena - Carlo Naya, 1890 ca. Negativo, gelatina/vetro

Sala Capitolare:

La sala Capitolare rappresenta il piano nobile e l'ambiente architettonico di maggior rilievo dell'intero edificio, concepita per assolvere una duplice funzione, sia sociale che religiosa, venendo adibita alle riunioni della confraternita e alle celebrazioni liturgiche.

È la sala che meglio esprime la fastosità e la ricchezza della Scuola, curata nei minimi dettagli, con la presenza di marmi policromatici sulle pavimentazioni e negli elementi decorativi, e caratterizzata da una notevole luminosità, dettata dalla pianta libera del locale.

La grandiosa sala rettangolare è impreziosita dai celebri telari del maestro Tintoretto, che con trentatré dipinti ad olio ricoprono le pareti ed il soffitto, illustrando scene bibliche del Nuovo Testamento e di iconografia cristiana.

L'arredo ligneo, anch'esso di grande pregio, è costituito dai dossali intagliati da Francesco Pianta, arricchiti da cariatidi e figure allegoriche.

La sala Capitolare è caratterizzata dalla presenza di un presbiterio che ricopre circa un quarto della superficie. Su entrambi i lati della balaustra si ergono le due imponenti statue raffiguranti i profeti San Giovanni Battista e San Sebastiano, progettate dal proto Tommaso Contin in collaborazione con Girolamo Campagna.



Figura 4 – Interno Sala Capitolare

3.0 Strumentazione e metodologie di rilievo

Nel caso studio il rilievo è stato realizzato mediante metodologie geomatiche integrate, con l'obiettivo di ottenere un prodotto ad alta definizione e precisione.

La strumentazione adottata comprende tecnologie classiche, satellitari e di rilievo tridimensionale, definendo un parco strumenti differente secondo basi teoriche e metodologie di rilievo.

Di seguito si presentano i fondamenti teorici degli strumenti utilizzati, con riferimento sia al loro principio di funzionamento sia al loro impiego concreto nel rilievo della Scuola Grande di San Rocco.

3.1 Stazione integrata

Lo sviluppo tecnologico degli anni Ottanta nei settori elettronici ed informatici ha stravolto e influenzato anche il mondo della topografia e del rilievo, mutando le tecniche costruttive degli apparati di misura di angoli e delle distanze, determinando un'impennata nell'automazione e della produttività.

Il rilievo classico, basato sull'utilizzo di teodoliti e distanziometri, si sviluppò fondendo le due tecnologie nella realizzazione di un unico strumento, da cui il nome di stazione integrata o totale.

Le stazioni totali elettroniche conservano invariata la struttura originaria dei teodoliti ottici, mantenendo il basamento, l'alidada, il cannocchiale, le livelle e gli assi, integrandosi però nella sensoristica ed elettronica, e come accennato precedentemente consente la misurazione di distanze, dislivelli ed angoli sia azimutali che zenitali. Più nello specifico seguirà una descrizione della componentistica.



Figura 5 – Stazione totale

Il basamento costituisce la parte inferiore dello strumento ed è composto da tre elementi principali:

- La placca di base, che viene fissata al piatto d'appoggio del treppiede topografico tramite vite di serraggio;
- La basetta, che corrisponde alla placca superiore, dotata di tre fori per l'aggancio del corpo superiore tramite dei perni, con il fine di essere variata per raggiungere l'orizzontalità;
- Le tre viti calanti, interposte tra le due placche, con lo scopo di regolarne la posizione relativa tramite traslazioni verticali indipendenti.

Inoltre, il basamento è dotato di una livella sferica, la quale permette di ottenere una prima orizzontalità agendo sulle aste telescopiche del treppiede, e di un piombino ottico, un piccolo cannocchiale utilizzato per centrare l'asse primario della stazione sul punto a terra materializzato.

L'alidada equivale al corpo superiore della stazione integrata, ha una forma a forcella, non visibile poiché racchiusa in un involucro scatolare protettivo, chiamato scocca.

All'interno di questa struttura, ruotabile di 360°, si trova sui montanti della forcella e nella parte inferiore i cerchi per le letture angolari, quest'ultimi consentono l'automatica misurazione degli angoli grazie ad appositi sensori ottico-elettronici, eliminando i grossolani errori di lettura dettati dall'operatore.

Ulteriormente, nella parte sottostante, si trovano i vari cablaggi necessari alla gestione dell'elettronica, il display e la tastiera per la visualizzazione dei dati codificati in output e, se presenti nello strumento, dei piccoli motori elettrici che ne consentono la rotazione automatica del corpo superiore e del cannocchiale.

Da evidenziare che, all'interno della scocca, è contenuto un sensore biassiale (*tilt sensor*), che sostituisce ed integra la tradizionale livella torica con una livella elettronica gestita sul display.

Il sensore annulla la necessità di ruotare di 90° lo strumento per la messa in stazione e svolge, oltre alla rilevazione complessiva della verticalità dell'asse primario, la funzione di correzione degli effetti dell'errore di verticalità da apportare alle letture zenitali ed azimutali.

L'alidada funge inoltre da sostegno meccanico del cannocchiale, il quale, oltre ad avere funzione ottica, è integrato con un distanziometro per la misurazione elettronica delle distanze. Quest'ultimo è assemblato in modo che l'asse di collimazione coincida con quello del cannocchiale in modo coassiale.

Il distanziometro EDM (*Electro Distance Measurement*) si basa sull'emissione di luce infrarossa modulata, utilizzando la differenza di fase tra il fascio infrarosso in andata e quello in ritorno per determinare la distanza percorsa.

L'emissione modulata avviene grazie a tre dei suoi componenti elettronici:

un generatore di corrente continua (ossia una batteria), un quarzo piezoelettrico per la generazione della frequenza e un diodo che, percorso da una corrente, emette luce infrarossa proporzionale all'intensità di corrente che lo attraversa.

La frequenza fondamentale, ovvero quella generata dal quarzo piezoelettrico, è in genere di 15 Mhz e ne consegue una lunghezza d'onda pari al rapporto della velocità della luce e la frequenza fondamentale, corrispondente a 20m.

L'altra componentistica necessaria al funzionamento dell'EDM comprende: un divisore elettronico di frequenza, il quale divide per cento volte il valore originario, generando una frequenza secondaria di 150 kHz e una lunghezza d'onda pari a 2000m;

Un apparato ricevente fotosensibile in grado di captare le onde riflesse tra lo strumento e il prisma riflettente; e un misuratore di fase, con precisione di 10^{-3} , finalizzato a misurare lo sfasamento corrispondente ai due diversi valori di intensità dell'onda e di risalire alla distanza di propagazione corrispondente a tale valore.

La misura della distanza si basa sull'emissione di due raggi infrarossi eseguiti automaticamente dallo strumento, dove nel caso del primo sarà modulato secondo la frequenza secondaria, al fine di aumentare la portata del dispositivo, essendo quest'ultima minore della metà della lunghezza d'onda. Il risultato ottenuto non sarebbe sufficiente in termini di precisione, in quanto il modulatore di fase possiede una precisione di 10^{-3} , e ciò comporterebbe un errore di ± 2 m su misurazioni di 2km di distanza in andata e ritorno.

Sia data la distanza D tra due punti A e B, dove $\Delta\varphi$ corrisponde allo sfasamento e λ'' alla frequenza secondaria, D sarà data da:

$$D = \frac{1}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda''$$

Non essendo sufficiente in termini di precisione, si ricorrerà al secondo raggio infrarosso, modulato secondo la frequenza fondamentale. Quest'ultimo consentirà di integrare la precedente misurazione fino ai centesimi, lavorando con una lunghezza d'onda pari a 20m, ottenendo una precisione di 2cm in andata e ritorno. Segue la formula:

$$D = \frac{1}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda' + k\lambda'$$

Il parametro k rappresenta il numero indeterminato di lunghezze d'onda, che in questo caso può essere trascurato, poiché una prima approssimazione di D è stata ottenuta dalla misurazione iniziale e sarà oggetto di interesse esclusivamente la prima lunghezza d'onda fondamentale.

In sintesi, l'integrazione delle due tecniche di misurazione consente di determinare elettronicamente la distanza tra due punti con un grado di precisione adeguato.

Ulteriormente, si accenna all'esistenza di distanziometri applicati ai rilievi topografici di precisione, i quali possono raggiungere precisioni fino a 10^{-6} .

Della stazione integrata è opportuno specificare il mantenimento dei tre assi principali come nel teodolite. Questi sono tre: l'asse verticale, sul quale attorno ad esso ruota l'alidada; l'asse secondario orizzontale dove avviene la rotazione del cannocchiale; e l'asse di collimazione, che corrisponde alla linea di mira del cannocchiale.

La comunione degli assi comporta la medesima forma di errore intrinseco, sia sulla stazione integrata che nel teodolite. Questi errori vengono definiti intrinseci in quanto non possono essere rettificabili e dipendono dalle modalità in cui è avvenuta la loro costruzione.

Questi sono:

- Errore di ortogonalità, dato dalla non perfetta ortogonalità dell'asse primario con l'asse secondario, producendo effetti di errore sulla misurazione degli angoli zenitali, ma soprattutto sugli azimutali;
- Errore di collimazione, dovuto dalla non ortogonalità dell'asse secondario e l'asse di collimazione, provocando un'errata misura degli angoli azimutali;
- Errore di eccentricità, causato dalla non appartenenza dell'asse primario con l'intersezione dell'asse di collimazione con l'asse secondario, causando l'insorgersi d'errore sulla collimazione di un punto e sulla lettura angolare.

Analogamente a quanto avviene con il teodolite, si andranno ad eliminare gli errori utilizzando la regola di Bayer-Bessel, applicata nelle letture eseguite nel caso studio.

Questa tecnica consiste nella collimazione di un punto nelle due letture coniugate, ovvero mantenendo il cerchio verticale alla sinistra dell'operatore nella prima posizione e successivamente la lettura con il cerchio verticale alla destra dell'operatore. La media di queste due letture porterà all'ottenimento di una lettura appurata dagli errori intrinseci sopradescritti.

Nello specifico del caso studio è stata utilizzata la stazione integrata di alta fascia Leica TS10, necessaria per la realizzazione della rete plano-altimetrica. Quest'ultima rappresenta la struttura principale del rilievo, utile al fine della georeferenziazione del rilievo tridimensionale, in particolare per l'unione geometricamente attendibile delle singole parti restituite, permetterne la scalatura e controllo.

3.2 Ricevitori GNSS

I sistemi satellitari GNSS (Global Navigation Satellite System) sono infrastrutture complesse che impiegano costellazioni di satelliti artificiali, concepite per ottenere il posizionamento tridimensionale di un qualunque punto della superficie terrestre, utilizzando i segnali radio emessi dai satelliti stessi.

I segnali radio codificati contengono informazioni che permettono di ricavare indicazioni relative al tempo e alla distanza tra satellite e punto a terra.

Tracciando ed elaborando questi segnali, mediante dei ricevitori, è possibile determinare la posizione spaziale dei punti oggetti di interesse.

Con il termine GNSS si indicano i vari sistemi satellitari attualmente orbitanti, ovvero NAVSTAR GPS, il primo ad essere concepito negli anni 70' dal Dipartimento di Difesa degli Stati Uniti, il sistema russo GLONASS, quello europeo GALILEO ed i relativi sistemi finalizzati ad aree specifiche come quello cinese Beidou ed il giapponese QZSS.

Il GNSS si compone di tre segmenti:

-Il segmento spaziale: è costituito da 32 satelliti disposti su sei piani orbitanti data un'inclinazione di 55° all'equatore, posti ad intervalli di longitudine di 60°. Le caratteristiche orbitali fanno sì che un ricevitore posto in un punto di osservazione in qualsiasi ora e luogo terrestre, abbia la visibilità di un minimo di quattro satelliti, tale che la stessa configurazione dei satelliti si ripeta sulla sfera celeste locale a intervalli di 23h 56m.

I satelliti hanno la funzione di trasmettere il segnale radio ai ricevitori, mantenere un segnale di tempo molto accurato dati i quattro oscillatori atomici presenti a bordo, ricevere e memorizzare informazioni, nonché di eseguire manovre di correzione orbitale date dalle stazioni di controllo.

Il segnale radio trasmesso dal veicolo spaziale è basato sulla frequenza fondamentale f_0 di 10.23MHz, generata dal set di orologi atomici a bordo, la cui lunghezza d'onda viene calcolata dal rapporto della velocità della luce con la frequenza fondamentale.

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{30 \cdot 10^7 m/s}{1.023 \cdot 10^7 Hz} \cong 30m$$



Figura 6 – Ricevitore GNSS GS16

Dalla frequenza fondamentale si formano tre parti del segnale:

- Componente delle portanti: due onde sinusoidali modulate in fase chiamate L1 ed L2, generate dal prodotto della frequenza fondamentale per 154 (portante L1) e 120 (portante L2), aventi rispettivamente una lunghezza d'onda pari a 19.05cm e 24.45cm. La loro utilità si manifesta per l'eliminazione di diverse cause d'errore, una tra queste il ritardo di segnale nell'attraversamento della ionosfera.
- Componente dei codici: due codici pseudocasuali denominati *C/A* e *P*, aventi la funzione di identificazione del satellite e la misura del tempo di volo tra satellite ed osservatore.
- Componente messaggio: un segnale modulato a bassa frequenza, chiamato *messaggio di navigazione D*, il quale contiene le informazioni aggiornate sull'orbita, l'almanacco dell'intera costellazione (disposizione spaziale nella volta celeste) e l'identificativo del satellite.

-Il segmento di controllo: è costituito da stazioni disposte lungo la linea equatoriale terrestre, con la funzione di ricevere ed elaborare i dati satellitari permanentemente.

Le stazioni di controllo hanno la finalità di verificare e correggere le coordinate dell'orbita che il satellite percorre, denominate con il nome di effemeridi. Inoltre, controllano e correggono gli orologi atomici a bordo dei satelliti e valutano l'effetto troposferico sulla ricezione dei segnali, questo grazie alla dotazione di strumenti meteorologici.

Le effemeridi si dividono in *trasmesse*, calcolate tramite metodi statistici di previsione, e *precise*, ottenute utilizzando i dati raccolti in otto giorni da stazioni di controllo distribuite globalmente, fornendo orbite calcolate e non estrapolate. Queste svolgono un ruolo fondamentale, permettendo di ottenere stime di posizione più accurate e affidabili, affinando la qualità di posizionamento GNSS.

-Il segmento utente: è composto dai ricevitori, costituiti da un'antenna e l'elettronica necessaria alla ricezione e registrazione del segnale. Per determinare la loro posizione a terra necessitano di almeno quattro satelliti, tre per la determinazione geometrica e uno per la correzione degli errori.

Per la determinazione geometrica vengono calcolate le distanze tra satellite e ricevitore, suddividendosi in due metodologie differenti.

La prima è la tecnica della pseudodistanza, basata sulla differenza tra i tempi di emissione e ricezione dei codici del segnale trasmesso dal satellite.

La seconda è l'osservabile fase, ovvero la differenza tra la fase del segnale proveniente dal satellite e quella della replica generata dal ricevitore.

Quest'ultima tecnica viene utilizzata per funzioni di precisione, in quanto utilizza segnale di lunghezza d'onda nell'intorno dei 20cm a discapito dei 30m nella pseudodistanza,

Nel caso studio sono state realizzate osservazioni ad alta precisione, eseguite tramite posizionamento RTK (*Real Time Kinematic*) con correzioni dalla rete di stazioni permanenti Hexagon.

Possiamo definire il metodo RTK come un processo di determinazione della posizione di un ricevitore GNSS tramite correzioni differenziali in tempo reale, ricevute dalla perpetua comunicazione con una rete di stazioni fisse di posizione nota.

Queste ultime trasmettono correzioni relative alla misurazione della fase della portante, riducendo significativamente errori dovuti agli effetti ionosferici, troposferici, errori orbitali e di non sincronizzazione degli orologi satellitari e del ricevitore. Tramite questo approccio è possibile il posizionamento a terra con precisioni centimetriche o sub-centimetriche.

In questo caso studio oggetto di tesi sono stati utilizzati due ricevitori GNSS geodetici *Leica GSI5* e *Leica GSI6* multi-costellazione, montati su appositi treppiedi topografici, al fine di inquadrare la rete topografica nel sistema internazionale. Vengono definiti geodetici in quanto in grado di acquisire osservazioni di codice e di fase.

3.3 Laser scanner

I laser scanner rientrano nella categoria delle metodologie di rilievo topografico tridimensionale e si definiscono come dispositivi in grado di acquisire milioni di punti avvalendosi dell'emissione di raggi laser, per la restituzione di una nuvola di punti densa.

Più nello specifico i laser scanner si basano sull'analisi del segnale riflesso proveniente dalla superficie dell'oggetto campionato. Il segnale laser viene propagato e indirizzato da un sistema di specchi oscillanti, il cui movimento è controllato dalla rotazione orizzontale dello strumento e dalla variazione dell'asse secondario dello specchio.

Questa metodologia permette la deviazione del fascio di emanazione in modo da coprire progressivamente l'intera area da scansionare.

Il metodo di acquisizione avanza per punti contigui disposti su una matrice di scansione, ottenendo da ogni punto dell'oggetto rilevato informazioni sulla distanza e misurazioni angolari zenitali e azimutali.

Questo consente la determinazione della posizione spaziale dei punti rispetto allo strumento secondo coordinate sferiche, facilmente convertibili in cartesiane.

Nel caso di laser scanner di precisione, o chiamati anche LIDAR (*Light Detection And Ranging*), vengono determinate le informazioni puntuali secondo misurazioni per differenza di fase, seguendo le tecniche precedentemente introdotte al *capitolo 3.1*, sul principio di funzionamento degli EDM.

Un aspetto fondamentale nell'unione di più scansioni, rilevate con la seguente strumentazione, è il congruo collegamento reciproco in un unico elaborato tridimensionale, geometricamente coerente e scalato.

Per rispettare queste prerogative, le scansioni dovranno presentare parti sovrapposte comuni e, per consentirne il reciproco collegamento, si utilizzeranno dei riferimenti d'unione noti come target.

I target sono elementi artificiali che fungono da punti di allineamento delle scansioni, facilmente individuabili dagli algoritmi dei software d'elaborazione data la loro geometria e struttura.



Figura 7 – Laser scanner Faro Focus Premium

Le parti rilevate dovranno includere almeno tre target comuni per consentire la rototraslazione dei modelli e la loro georeferenziazione rispetto a un sistema esterno.

I punti artificiali possono essere di varie forme e tipologie, a seconda della necessità e delle superfici su cui andranno collocati, ad esempio possono essere: sferici in materiale plastico con ottime caratteristiche riflettenti con basetta magnetica; piani a scacchiera con basette magnetiche; piani a scacchiera applicabili sulle superfici murarie tramite adesivi, posti su treppiedi e altre soluzioni specifiche, adattabili alle differenti condizioni dei rilievi.

Nel caso studio analizzato, per la scansione del corpo di fabbrica, sia negli ambienti interni che nelle superfici esterne, è stato impiegato il laser scanner Faro Focus Premium.

L'acquisizione è finalizzata all'ottenimento di una conoscenza tridimensionale e geometrica approfondita della struttura, funzionale a successive analisi di carattere tecnico e documentativo. Più nello specifico, il laser scanner impiegato è uno strumento di alta fascia presente sul mercato attuale, caratterizzato da tecnologie di misura a differenza di fase ad alta velocità di acquisizione (≈ 2000000 punti/sec).

La portata di acquisizione può variare a seconda del modello e alle condizioni operative, con valori 70m/150m/350m.

Altre caratteristiche tecniche dello strumento si apprestano su un errore lineare di ± 1 mm, una precisione angolare di 19 arco secondi, una fotocamera integrata per l'acquisizione dei colori fino a 256 RGB e una precisione tridimensionale di 2mm a 10m di distanza o 3.5mm a 25m.

3.4 Fotogrammetria

Come citato nell'introduzione al punto 3.0, nel caso studio la strumentazione e le metodologie di acquisizione sono state diverse, tra cui si integra la fotogrammetria.

La fotogrammetria, e in particolare la sua più recente evoluzione, la SfM, (*Structure from motion*), è la tecnica che consente la generazione di modelli tridimensionali altamente dettagliati di oggetti o ambienti. Questo avviene utilizzando immagini sovrapposte acquisite da diverse prospettive tramite delle fotocamere digitali e successivamente elaborate secondo algoritmi specifici.

Per definire più precisamente il processo, definiamo un'immagine come una prospettiva centrale, in cui il centro di presa coincide con il centro dell'obiettivo. Questa proiezione collega due spazi distinti: lo spazio immagine che rappresenta il piano della fotografia bidimensionale; e lo spazio oggetto, che corrisponde all'ambiente reale tridimensionale.

Da ciò si definiscono, come rappresentato graficamente in *figura 8*: Il piano positivo, su cui si forma l'immagine; il piano negativo, che corrisponde al piano del sensore fotografico; il centro di presa O , punto in cui convergono i raggi all'interno dell'obiettivo; il punto principale PP , che coincide con la proiezione perpendicolare di O sul piano del fotogramma; l'asse ottico, ovvero la linea che collega O - PP ; i raggi omologhi, ovvero le proiezioni del punto oggetto con il corrispettivo punto omologo nell'immagine; e la distanza principale p , denominata anche focale, che corrisponde alla distanza tra O e il sensore fotografico.

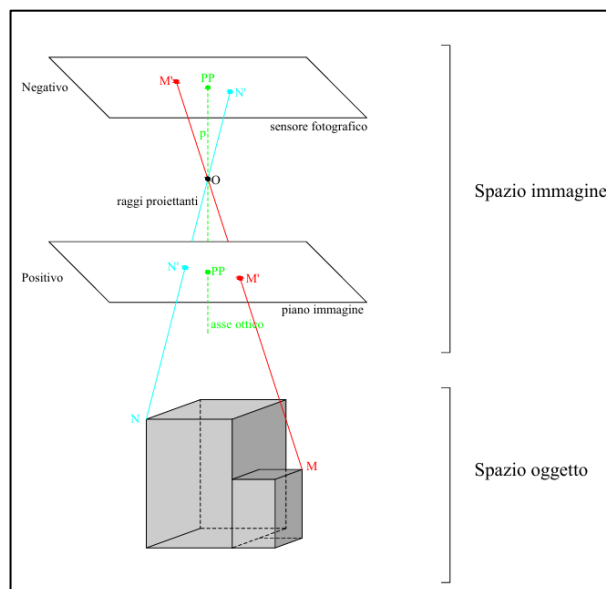


Figura 8 – Schema di formazione dell'immagine fotografica

Come citato precedentemente, per determinare un punto in un sistema tridimensionale occorrono più immagini sovrapposte, in particolare due fotogrammi scattati in prese diverse. Questo perché, come mostrato nella *figura 9*, il fascio proiettante AA' tra oggetto e spazio immagine, può essere omologo di infiniti punti lungo la retta.

Con l'utilizzo di un secondo fotogramma è possibile ricavare, dall'intersezione dei due raggi proiettanti, il punto A corrispondente allo spazio oggetto.

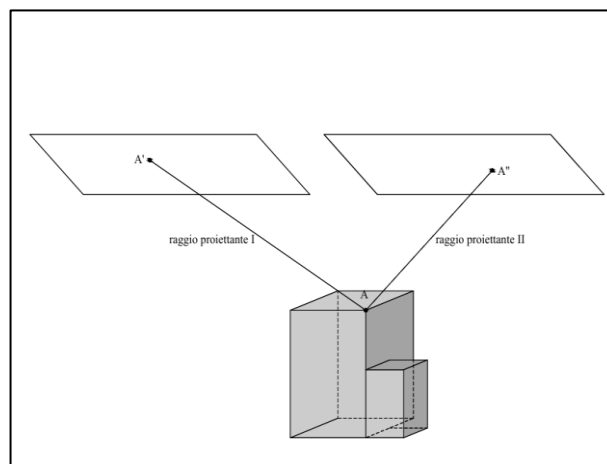


Figura 9 – Ricostruzione tridimensionale tramite fotogrammi multipli

Note le coordinate dei due centri di presa, dei due punti omologhi e l'orientamento spaziale del sensore fotografico, si possono determinare le coordinate tridimensionali del punto attraverso le equazioni di collinearità. Queste equazioni esprimono come O , il punto oggetto e il relativo punto omologo sono allineati sullo stesso raggio proiettivo.

Le fasi del processo fotogrammetrico possono essere riassunte con: la presa, ovvero l'acquisizione delle immagini tramite fotocamere; l'orientamento, che consiste nella determinazione dei parametri che permettono la trasformazione da sistema immagine a sistema oggetto. Questi si dividono in interni, che sono la distanza principale e le sue coordinate, ed esterni che corrispondono ai parametri di assetto angolare del fotogramma e alle coordinate del centro di presa O ; e infine la restituzione, ossia l'estrapolazione delle coordinate dei punti per la determinazione tridimensionale della scena.

Nel dettaglio della SfM viene utilizzato l'algoritmo bundle adjustment, il quale ha il compito di calcolare l'orientamento di ciascuna fotocamera di presa al momento dell'acquisizione delle immagini, quantificare i parametri di calibrazione delle camere e determinare le coordinate spaziali dei punti omologhi, compensando gli errori ai minimi quadri. Questo processo consente

la stima geometrica dell'oggetto, necessario a definirne la nuvola di punti e il suo successivo modello tridimensionale.

Nel caso specifico della Scuola Grande di S. Rocco, le acquisizioni fotogrammetriche ad alta definizione, finalizzate alla stima volumetrica degli elementi architettonici dell'altare attraverso la ricostruzione di modelli tridimensionali con software di SfM, sono state effettuate mediante l'impiego di camere digitali.

Inoltre, per integrare le scansioni effettuate con laser scanner, raggiungere le parti più anguste della struttura e dettagliare il modello 3D dell'altare al pian terreno, è stato utilizzato lo Stonex XVS.

Questo strumento, più maneggevole e portatile, è stato utilizzato per rilevare le parti nascoste e non accessibili con il laser scanner, lavorando tramite tecniche fotogrammetriche.

Il dispositivo utilizza una serie di tecnologie che permettono la generazione di modelli tridimensionali accurati. Tali tecniche si basano sull'integrazione di immagini ad alta risoluzione, sulla rilevazione automatica di target e sull'impiego di un sistema inerziale, che contribuiscono all'ottenimento di modelli correttamente scalati e livellati.

A supporto di tali operazioni, intervengono inoltre specifici algoritmi proprietari sviluppati dalla casa produttrice, che ottimizzano l'elaborazione e la resa finale dei dati acquisiti.

Il XVS utilizza la tecnologia Visual-SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), che consente di localizzare e mappare simultaneamente le viste di presa, determinando la posizione e l'orientamento della telecamera rispetto l'ambiente circostante rilevato.

Questa metodologia permette di stimare e valutare in loco i punti rilevati, garantendo che i fotogrammi acquisiti ammettano la giusta sovrapposizione per costruire la nuvola di punti nella fase di elaborazione successiva.

Nel dettaglio, lo strumento ha una portata complessiva tra 0.4m e 40m, un'accuratezza di traiettoria in post processing di 4mm e una precisione relativa di 3mm sulla distanza di 1m dall'oggetto rilevato. Le precisioni sono determinate da condizioni ambientali favorevoli, dove le pareti sono ben illuminate e scarsamente omogenee.



Figura 10 – XVS V-Slam Scanner

4.0 Rilievo ed elaborazione dati

4.1 Scopo del rilievo

Il processo di rilevamento è stato sviluppato con l'obiettivo di produrre un'accurata documentazione geometrica tridimensionale della parete sud e degli elementi architettonici situati nella Sala Terrena della Scuola Grande di S. Rocco.

Il rilievo è finalizzato all'estrazione di informazioni metriche utili alla valutazione degli spessori murari della parete meridionale, al calcolo volumetrico degli elementi marmorei aggettanti e delle parti costitutive dell'altare, al fine di determinarne i pesi per il dimensionamento dell'opera ingegneristica di sottofondazione della parete, resa necessaria dal progressivo deterioramento e dal cedimento localizzato della struttura.

Per conseguire l'obiettivo è stato sviluppato un rilievo con metodologie geomatiche integrate, avvalendosi della strumentazione descritta precedentemente al *capitolo 3.0*, suddividendo l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in due procedure topografiche differenti, una plano-altimetrica e la successiva tridimensionale, ciascuna di queste complementari tra loro.

4.2 Rilievo plano-altimetrico

Il rilievo plano-altimetrico è stato svolto al fine di produrre una rete topografica, la quale permettesse di georeferenziare i dati tridimensionali successivamente acquisiti e di definire le coordinate di un numero sufficiente di punti per la referenziazione delle varie parti del progetto di rilevamento. La rete costituisce l'ossatura del lavoro, definendo il sistema di riferimento topografico.

4.2.1 Fase di pianificazione e materializzazione della rete

Il primo passo dell'iter operativo è stato il sopralluogo dell'area di interesse e l'analisi della materializzazione dei vertici in campo, con la prerogativa che questi fossero reciprocamente visibili.

L'indagine in loco ha definito la concretizzazione della rete composta da 12 vertici, suddivisi in 8 punti esterni (1000, 2000, 2100, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000) che compongono una poligonale chiusa di appoggio nel perimetro circostante alla Scuola Grande, e 4 punti interni (4100, 4200,

5100, 5200) collegati ai punti esterni e situati all'interno del fabbricato, finalizzati al rilevamento interno di dettaglio.

La materializzazione e identificazione dei vertici è così composta:



Figura 11 – Materializzazione dei vertici

-Punto 1000: centrino topografico in acciaio, posto sul ponte collegante il “*Sotoportego de la Scuola*” e “*Calle Fianco de la Scuola*”;

-Punto 2000: centrino topografico in acciaio, posto su una fuga della pavimentazione nel piazzale meridionale del fabbricato, prospiciente Rio de la Frascada;

-Punto 2100: bulinatura su piastra metallica in prossimità del ciglio della pavimentazione nel piazzale meridionale, in corrispondenza del Rio de la Frascada;

-Punto 3000: estremità dell’ala destra raffigurante l’iconografia del Leone di S. Marco, incisa sulla striscia di pavimentazione in pietra bianca d’Istria in prossimità dell’entrata laterale su Campo S. Rocco della Chiesa di S. Rocco;

Punti 4000 e 5000: centrini in acciaio posti nell’intersezione di due fughe della pavimentazione del basamento d’entrata della Scuola Grande;

Punto 6000: centrino topografico in acciaio, posto in prossimità dello spigolo nord-est della Scuola Grande, nel Campo di S. Rocco.

Punto 7000: centrino topografico in acciaio, posto in prossimità dello spigolo nord-est della Scuola Grande, nel “*Sotoportego de la Scuola*”;

Punti 4100, 4200, 5100, 5200: intersezioni di fughe della pavimentazione della Sala Terrena.

4.2.2 Misure satellitari GNSS

Definiti i vertici, sono state effettuate alcune misurazioni satellitari, utilizzate per georiferire la rete topografica nel sistema nazionale.

Le misurazioni sono state eseguite impiegando due ricevitori geodetici GNSS, il Leica GS15 e il Leica GS16, posizionati sui vertici 1000, 2000, e 2100.

Questi punti sono stati scelti per garantire un’adeguata ricezione del segnale satellitare, evitando la presenza di edifici che potessero ostacolare la visuale della volta celeste e interferire con le misurazioni. Inoltre, la loro collocazione è stata selezionata in quanto lontana dai flussi turistici presenti nella città di Venezia, al fine di ridurre eventuali interferenze.

I ricevitori, montati su appositi treppiedi topografici, hanno misurato i vertici in modalità RTK, ricevendo le correzioni di posizionamento dalle stazioni Hexagon per il tempo necessario a ottenere dati di posizionamento sufficientemente accurati per gli scopi del rilievo.

L’elaborazione delle acquisizioni ha permesso di determinare il posizionamento dei vertici suddetti nel sistema di riferimento geodetico ETRF2000. Per integrare tali dati con le misurazioni plano-altimetriche eseguite con la stazione integrata, le coordinate sono state trasformate nel sistema di riferimento piano cartografico Gauss-Boaga fuso Ovest.

Le trasformazioni sono state calcolate mediante il software ConVe, avvalendosi dei parametri di trasformazione tra i due Datum forniti dall’IGM (Istituto Geografico Militare).

Tali parametri si basano su grigliati, ovvero griglie regolari di punti che coprono l’area geografica di interesse, nelle quali sono memorizzati gli scarti di latitudine e longitudine tra due sistemi geodetici differenti, considerando anche le deformazioni locali.

Con il medesimo software, utilizzando sempre i grigliati, le quote ellissoidiche sono state convertite in quote ortometriche. Per questa conversione su ConVe viene implementato il modello geoidico nazionale ITALGEO.

ELABORAZIONE DATI in COORDINATE GEOGRAFICHE ETRF2000					
VERTICE	LAT	LON	Q.ELISSOIDICA (m)	PRECISIONE 2D (m)	PRECISIONE 3D (m)
1000	45 26 10,59615 N	12 19 30,89203 E	46,0459	0,0108	0,0099
2000	45 26 11,26961 N	12 19 29,60721 E	44,6665	0,0039	0,0051
2100	45 26 11,44164 N	12 19 28,92428 E	44,5745	0,0059	0,0101
ELABORAZIONE DATI in COORDINATE PIANE GAUSS-BOAGA FUSO OVEST					
VERTICE	EST (m)	NORD (m)	H. Ortometrica (m)		
1000	1760113,159	5036818,696	2,541		
2000	1760084,384	5036838,323	1,161		
2100	1760069,327	5036843,017	1,068		

Figura 12 – Risultati dell'elaborazione dati GNSS

Come osservato in Figura 12, il report fornito dal software Infinity della Leica Geosystems ha definito le precisioni di posizionamento ottenute durante le rilevazioni. La precisione planimetrica raggiunta sui punti 2000 e 2100 risulta sub-centimetrica, mentre la precisione tridimensionale è nell'ordine del centimetro.

Si osserva, tuttavia, che il vertice 1000 presenta una precisione planimetrica di circa 1 cm, leggermente inferiore rispetto agli altri punti. Tale differenza è imputabile al fatto che il vertice è stato posizionato sul punto retrostante la Scuola nel ponte su Rio de la Frascada e, durante le misurazioni, è stato rilevato che in un intervallo temporale la copertura satellitare fosse inferiore rispetto alle precedenti, influenzando pertanto la precisione del dato acquisito.

Nonostante ciò, la qualità del dato risulta comunque ottimale e adeguata agli scopi dello studio.

4.2.3 Rilievo della rete topografica con stazione integrata

Eseguita la misurazione dei vertici della rete topografica tramite ricevitori satellitari per la georeferenziazione nel sistema nazionale, si è proceduto con il rilievo planoaltimetrico della rete mediante la stazione integrata Leica TS10 e accessori.

Il rilievo si è sviluppato con la messa in stazione dello strumento sui vertici della rete topografica e la collimazione dei punti visibili, eseguendo misurazioni angolari e di distanze in numero sovrabbondante, al fine di consentire una successiva compensazione delle osservazioni.

Per limitare l'effetto degli errori strumentali intrinseci, sono state eseguite le letture coniugate, come descritto al *capitolo 3.1*, nelle collimazioni dei vertici della rete. Tali misurazioni sono state successivamente corrette applicando la regola di Bayer-Bessel nella fase di elaborazione.

Una volta rilevata la rete topografica, si è proceduto con la collimazione dei punti di appoggio, necessari nella fase tridimensionale successivamente svolta. I punti sono stati posizionati sia all'interno sia lungo il perimetro dell'edificio, con una maggiore densità in prossimità dell'area di studio.

Complessivamente, sono stati rilevati 26 target piani a scacchiera, 13 sfere e 8 marker fotogrammetrici, questi ultimi posti sulla statua di San Rocco, presente nell'altare della Sala Terrena, per il calcolo di precisione del volume mediante SfM.

4.2.4 Elaborazione e compensazione dei dati

Eseguito il rilievo plano-altimetrico, si è proceduto all'elaborazione dei dati rilevati e alla loro compensazione per migliorare l'accuratezza delle misurazioni effettuate e definire l'errore statistico associato ai vertici della rete topografica.

La compensazione matematica è stata trattata separatamente per la componente planimetrica e per quella altimetrica.

Per quanto riguarda la compensazione planimetrica, la rete topografica è stata compensata ai minimi vincoli, imponendo vincolo sul vertice 2000 e sulla direzione azimutale tra i vertici 2000 e 2100, misurati con la metodologia satellitare.

I dati di collimazione grezzi sono stati processati tramite algoritmi implementati in linguaggi di programmazione in quattro cicli iterativi, applicando il principio dei minimi quadri, ovvero dove la somma dei quadrati di tutte le differenze fra i valori osservati tra le singole grandezze misurate ed i valori finali compensati, deve risultare minima.

Il risultato di questa operazione di elaborazione sono stati i valori compensati delle coordinate di tutti i vertici nel sistema di riferimento nazionale, gli scarti quadratici medi delle coordinate stesse (*figura 13*) e i parametri delle ellissi di errore standard di ogni vertice (*figura 14*). Questi ultimi rappresentano graficamente la distribuzione dell'errore nelle due dimensioni Nord-Est.

TABELLA DELLE COORDINATE DEFINITIVE					
(Coordinate depurate dai termini costanti 1760000.000 m E e di 5036000.000 m N)					
NOME	TIPO PUNTO	N		E	
		COMPENSATE	S.Q.M.	COMPENSATE	S.Q.M.
1000		818.1271	+ - .0017	112.6058	+ - .0024
1100		818.6449	+ - .0046	113.1382	+ - .0066
2100		843.0109	+ - .0013	69.3466	+ - .0043
3000		877.9318	+ - .0038	112.2304	+ - .0028
4000		866.1262	+ - .0046	130.7476	+ - .0044
4100		851.6387	+ - .0062	127.9546	+ - .0046
4200		837.1927	+ - .0081	113.4233	+ - .0068
5000		865.5252	+ - .0046	132.4741	+ - .0044
5100		854.7562	+ - .0058	122.0912	+ - .0052
5200		834.6506	+ - .0089	117.4275	+ - .0055
6000		859.7908	+ - .0045	141.3560	+ - .0037
7000		818.9007	+ - .0017	122.6930	+ - .0030
2000	FISSO	838.3230		84.3840	

LA SOLUZIONE IN TABELLA E' IL RISULTATO DI N. 4 ITERAZIONI

Figura 13 – Coordinate planimetriche compensate e relativi scarti quadratici medi

PUNTO	ELEMENTI CARATTERISTICI DELLE ELLISSI DI ERRORE		
	INCLINAZIONE ASSE MAGGIORE (IN GC) (ORAR. DA ASSE N=Y)	S E M I A S S I	
		MAGGIORE (IN UNITA` DI N ED E)	MINORE
1000	137.9582	.0028	.0007
2100	119.2387	.0045	.0000
3000	39.2589	.0046	.0010
4000	34.0383	.0046	.0043
4100	23.3005	.0065	.0043
4200	40.6222	.0095	.0046
5000	26.0937	.0046	.0044
5100	40.0536	.0065	.0043
5200	24.9353	.0095	.0045
6000	26.6011	.0047	.0035
7000	129.8541	.0034	.0009

Figura 14 – Parametri delle ellissi di errore standard dei vertici della rete topografica

Successivamente, è stata effettuata l'elaborazione dei dati altimetrici, anch'essi trattati da algoritmi implementati in linguaggi di programmazione per la compensazione ai minimi quadrati delle misure di dislivello eseguite tra i vertici della rete. Questi ultimi sono stati calcolati mediante algoritmi di livellazione trigonometrica da un estremo e pesati in funzione della loro varianza,

imponendo come quota ortometrica di riferimento quella del vertice 2000, rilevata tramite il ricevitore GNSS.

Il risultato del procedimento di calcolo sono state le quote ortometriche compensate e i relativi scarti quadratici medi (*figura 15*).

TABELLA DELLE QUOTE ORTOMETRICHE COMPENSATE			
N	NOME - PUNTO	QUOTA (m)	S.Q.M. (m)
	2000	1.1610	
1	4000	1.5839	.0035
2	5000	1.5971	.0035
3	6000	.9934	.0035
4	4100	1.5151	.0037
5	3000	1.3355	.0033
6	5100	1.5209	.0037
7	7000	.7156	.0027
8	1100	2.5024	.0046
9	1000	2.4970	.0030
10	2100	1.1116	.0023
11	5200	1.5206	.0040
12	4200	1.5431	.0040

Figura 15 – Quote ortometriche compensate dei vertici della rete topografica

ID	X(m)	Y(m)	h(m)
1000	1760112.6058	5036818.1271	2.4970
1100	1760113.1382	5036818.6449	2.5024
2000	1760084.3840	5036838.3230	1.1610
2100	1760069.3466	5036843.0109	1.1116
3000	1760112.2304	5036877.9318	1.3355
4000	1760130.7476	5036866.1262	1.5839
4100	1760127.9546	5036851.6387	1.5151
4200	1760113.4233	5036837.1927	1.5431
5000	1760132.4741	5036865.5252	1.5971
5100	1760122.0912	5036854.7562	1.5209
5200	1760117.4275	5036834.6506	1.5206
6000	1760141.3560	5036859.7908	0.9934
7000	1760122.6930	5036818.9007	0.7156

Figura 16 – Coordinate finali compensate della rete topografica

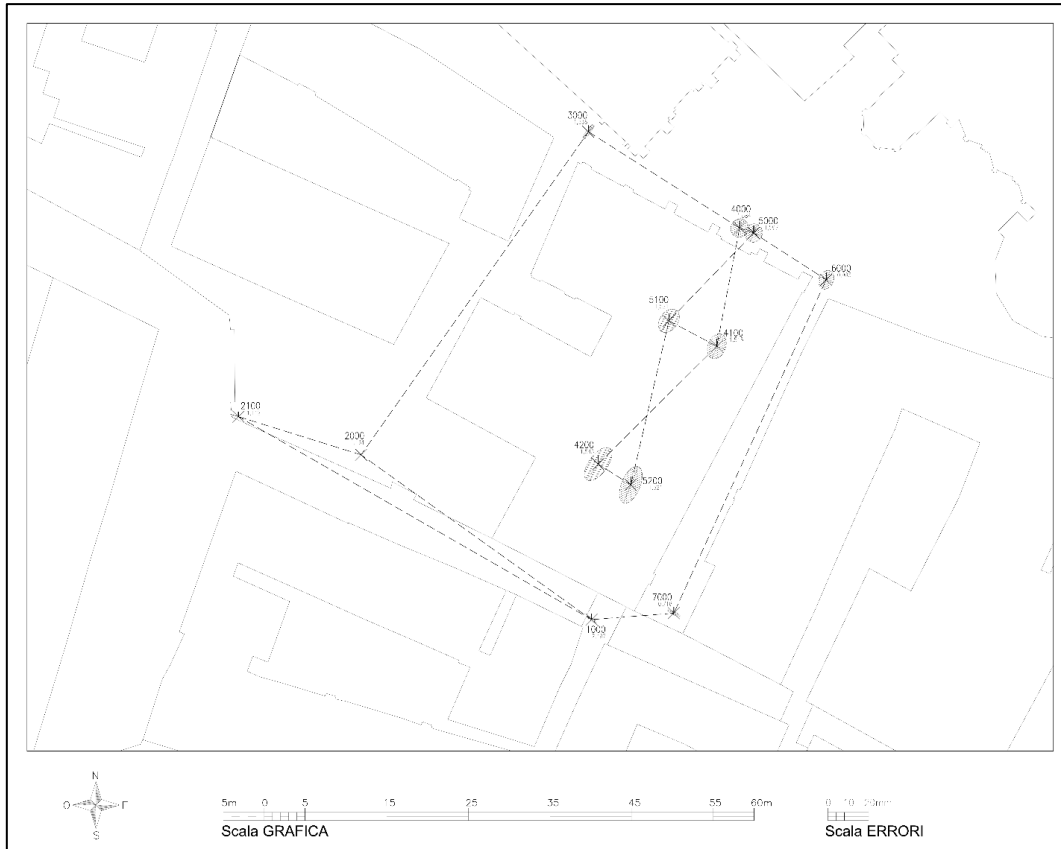


Figura 17 – Schema della rete di inquadramento riportato su CTR

Definita la rete topografica con le coordinate compensate dei vertici, sono state calcolate le coordinate dei punti di appoggio rilevati con metodo celerimetrico dalle diverse stazioni.

Tali coordinate, espresse sempre nel sdr cartografico Gauss-Boaga fuso Ovest, definiscono successivi punti di referenziazione e controllo del rilievo tridimensionale.

-TARGET PIANI-							
ID	X(m)	Y(m)	h(m)	ID	X(m)	Y(m)	h(m)
1	1760102.412	5036831.523	2.552	18	1760109.137	5036841.833	3.512
2	1760102.317	5036839.454	2.575	19	1760130.432	5036845.681	4.220
3	1760118.382	5036822.550	3.313	20	1760134.518	5036853.383	3.457
4	1760104.391	5036829.939	3.665	21	1760134.067	5036860.186	4.330
5	1760109.457	5036827.292	3.554	22	1760112.041	5036845.472	1.998
6	1760116.011	5036823.900	3.895	23	1760115.279	5036853.359	4.074
7	1760117.872	5036819.565	2.540	24	1760118.371	5036859.107	2.867
8	1760120.999	5036825.921	2.381	25	1760125.643	5036864.707	3.148
9	1760116.848	5036820.184	4.948	26	1760126.651	5036838.599	2.514
10	1760131.071	5036844.892	2.496	501	1760111.723	5036827.833	5.443
12	1760114.859	5036825.539	2.911	502	1760111.805	5036828.068	4.229
13	1760107.361	5036829.401	3.479	503	1760111.240	5036828.360	4.166
14	1760104.703	5036833.534	4.118	504	1760111.681	5036828.122	4.654
15	1760121.565	5036829.010	4.198	505	1760111.799	5036828.070	3.627
16	1760112.331	5036829.039	2.671	506	1760111.090	5036828.448	3.565
17	1760124.396	5036834.265	3.137	507	1760111.413	5036828.180	5.074
				508	1760111.264	5036827.961	5.747

Figura 18 – Coordinate target piani di appoggio

Per quanto concerne le sfere fotogrammetriche, la determinazione delle coordinate dei centri geometrici dei solidi è stata effettuata misurando 5 punti distribuiti in modo simmetrico sulla superficie della sfera. Quindi, mediante algoritmi dedicati e conoscendo il diametro delle sfere viene calcolato il centro geometrico di ogni sfera e la relativa precisione.

-SFERE-			
ID	X(m)	Y(m)	h(m)
10	1760124.0566	5036831.1107	2.8107332750
11	1760128.1586	5036838.7753	2.0691316251
12	1760133.1713	5036847.8764	3.1063895452
13	1760141.0301	5036856.7728	3.0034663685
14	1760116.6646	5036831.8017	3.3727334003
15	1760113.2875	5036831.3947	1.6050849038
16	1760108.3980	5036831.6373	2.3249252987
17	1760111.5853	5036834.4457	3.3651018260
18	1760117.1396	5036826.0091	2.5137198417
19	1760123.0277	5036843.6449	3.3420673707
20	1760129.2792	5036855.5099	3.3392916378
21	1760124.2407	5036858.1924	3.3327569095
22	1760117.9486	5036846.3220	3.3365434057

Figura 19 – Coordinate sfere fotogrammetriche

4.3 Rilievo tridimensionale

Il rilievo tridimensionale costituisce il fulcro delle operazioni svolte in campagna, da cui, attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti, vengono ricavate le informazioni necessarie al conseguimento degli obiettivi prefissati.

4.3.1 Acquisizione dei dati tridimensionali

L'acquisizione tridimensionale è stata articolata in due distinte aree di rilievo, oltre alla Sala Terrena della Scuola Grande, è stata rilevata anche la geometria delle mura perimetrali e del Sotoportego adiacente alla parete sud. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di ottenere una corretta definizione geometrica 3D della struttura, funzionale alla realizzazione di piante e sezioni.

A seguito del sopralluogo dell'area esterna, sono state individuate le stazioni di presa. La loro collocazione è stata definita dall'esperienza e dalla conoscenza degli operatori topografici del Laboratorio, tenendo riferimento della presenza in ogni scansione di un numero sufficiente di punti d'appoggio e che il rilevamento non escludesse l'acquisizione di porzioni della struttura.

Il rilievo tridimensionale esterno è stato effettuato con l'utilizzo del laser scanner Faro Focus Premium, posto in stazione sull'apposito treppiede fotografico ed impostato, nelle 16 scansioni eseguite sul perimetro dell'edificio, ad una risoluzione di 6mm su 10m di distanza, necessarie alla corretta caratterizzazione dell'edificio e degli elementi architettonici.

Le scansioni esterne sono state equidistribuite lungo il perimetro del fabbricato, con maggiore densità di acquisizioni nell'area del Sotoportego e sulla relativa parete adiacente. Tale scelta è dipesa sia dalla conformazione della zona che dalla presenza di un colonnato, i quali hanno reso necessaria l'esecuzione delle acquisizioni da angolazioni multiple per ottenere una copertura completa. In particolare, si è posta attenzione sul rilievo ottimale della parete meridionale, la cui precisa caratterizzazione geometrica, in particolare lo spessore, risulta determinante per il corretto progetto strutturale.

Successivamente si è proceduto al rilevamento interno della Sala Terrena, la quale precedentemente alle operazioni è stata sgomberata dagli elementi mobili turistico-ricettivi, per non alterare la scansione complessiva con elementi di disturbo, mentre le strutture non trasferibili sono state prese in considerazione per l'eliminazione nella fase di elaborazione della nuvola di punti.

Il rilievo degli spazi interni è stato eseguito mediante laser scanner Faro Focus Premium, con un totale di 32 scansioni, impostate a una risoluzione di 3 mm su 10 m di distanza, al fine di ottenere una caratterizzazione di maggior dettaglio degli elementi architettonici.

Le scansioni si sono susseguite progressivamente dall'ingresso principale fino all'altare, utilizzando punti di presa multipli per garantire una copertura completa dell'ambiente. Tale modalità si è resa necessaria a causa della presenza di un colonnato interferente e della ricchezza di particolari architettonici e stilistici. Sono inoltre state rilevate le prime due rampe dello Scalone Imperiale.

La densità di acquisizione è stata intensificata in prossimità dell'altare e della parete meridionale interna, a causa della loro complessità architettonica e dell'importanza di una precisa caratterizzazione geometrica ai fini dell'affidabilità complessiva dell'analisi. Considerata la complessità morfologica dell'altare e della statua nella parete sud, le acquisizioni sono avvenute sia a terra che a circa 6 m di altezza mediante l'utilizzo di un apposito trabattello mobile. Quest'ultimo è stato spostato attorno all'altare per dettagliare e completare in modo adeguato la nuvola di punti, la quale con le sole scansioni a terra sarebbe risultata poco densa nelle zone sommitali presentando inevitabili zone d'ombra per mancanza di dato.



Figura 20 – Acquisizione del Faro Focus Premium posto sul trabattello

Per la caratterizzazione di dettaglio della statua di San Rocco e il cane, opera di Girolamo Campagna, collocata nella nicchia al centro dell'altare, le misurazioni effettuate mediante laser scanner sono state integrate con un ulteriore rilievo eseguito tramite sistema Visual-SLAM (Stonex XVS), al fine di ottenere un modello tridimensionale completo, comprensivo anche delle parti retrostanti non raggiungibili con altre tecniche. La completa rilevazione della statua è avvenuta grazie all'impiego di un'asta telescopica, sulla quale il sistema è stato montato.

Successivamente, sono state eseguite le acquisizioni fotogrammetriche della statua, ottenendo un totale di 1841 immagini mediante l'utilizzo di una fotocamera ad alta risoluzione, finalizzate alla successiva elaborazione per il calcolo volumetrico tramite tecniche di Structure from Motion.

Durante l'acquisizione fotogrammetrica, la scena è stata accuratamente illuminata da un operatore mediante apposite luci fotografiche, al fine di migliorare la qualità del dataset e garantire un'elevata definizione del modello tridimensionale ottenuto.

4.3.2 Elaborazione dei dati tridimensionali da laser scanner

Successivamente all'esecuzione e completamento delle acquisizioni mediante scansioni laser e immagini ad alta risoluzione, si è proceduto all'elaborazione dei dati per l'estrapolazione delle informazioni tridimensionali necessarie.

La prima fase del processo si è basata sulla trattazione delle scansioni effettuate, tramite il software SCENE, prodotto della Faro Technologies Inc., e specificatamente progettato per l'elaborazione e gestione dei dati acquisiti con il laser scanner.

Il programma nel particolare, oltre alla funzione di visualizzatore delle varie acquisizioni grezze ed elaborate, permette la possibilità di filtraggio e pulizia automatica delle nuvole di punti da fenomeni di rumore ed elementi caratterizzati da bassa accuratezza.

Inoltre, consente l'allineamento automatico delle diverse nuvole di punti tramite l'individuazione di punti omologhi nelle varie acquisizioni, ottimizzato mediante algoritmi di Bundle Adjustment, nonché l'allineamento manuale delle varie scansioni tramite la gestione di target d'appoggio georeferenziati.

Tra le funzionalità principali del programma, si elencano la capacità di creazione ed esportazione di sezioni orizzontali o verticali della nuvola di punti, la generazione di ortofoto ad alta risoluzione e la realizzazione di mesh poligonali.

Nello specifico del caso di studio, scaricati i dati dalla strumentazione, si è proceduto alla trattazione preliminare delle singole scansioni grezze eseguite, realizzando una prima fase di filtraggio automatico volto all'eliminazione di punti poco accurati e del rumore rilevato. Successivamente, si è intervenuti manualmente per rimuovere ulteriori elementi di disturbo, come

la presenza di persone accidentalmente scansionate durante la fase di acquisizione o oggetti fissi non pertinenti all'analisi e non rimovibili all'interno del fabbricato.

Una volta completato il trattamento preliminare delle scansioni, è seguito il processo di elaborazione attraverso la creazione di un nuovo progetto sul software SCENE, in cui sono state importate le 48 scansioni, precedentemente filtrate, per l'istituzione di un'unica nuvola di punti comprensiva sia degli ambienti interni che delle porzioni esterne.

Contestualmente, ad integrare la nuvola di punti complessiva, sono stati elaborati i dati ottenuti dal XVS V-Slam Scanner.

I rilevamenti, relativi alle porzioni retrostanti della statua, sono stati processati utilizzando il software specifico XVScloud. Tale elaborazione ha consentito di ricavare le geometrie architettoniche non rilevate dal laser scanner, colmando le lacune di acquisizione e dettagliando il modello.

Dalla nuvola di punti elaborata, georeferenziata e scalata secondo i marker fotogrammetrici posti sulla scultura e rilevati dalla stazione totale, sono state eliminate le parti eccedenti e duplicate tra i dati provenienti dal laser scanner Faro e quelli da XVS, mantenendo unicamente le aree non acquisite dal primo sistema.

La registrazione globale della nuvola di punti è stata effettuata mediante l'allineamento complessivo delle scansioni, basato sulle coordinate compensate dei target, precedentemente posizionati e misurati tramite la stazione totale.

Il processo di registrazione ha seguito il seguente iter:

- Individuazione automatica dei target all'interno delle singole acquisizioni, associando a ciascun elemento di riferimento il proprio identificativo e le corrispondenti coordinate in figura 18, importate mediante file .csv;
- Successivo processo automatico di georeferenziazione e allineamento delle scansioni, basato sui target individuati. In questa fase, tramite algoritmi specifici, avviene la rototraslazione dei dati dal sistema di riferimento locale dello strumento laser scanner al sistema nazionale della rete topografica istituita, ovvero Gauss-Boaga fuso ovest;
- Compensazione e ottimizzazione dell'allineamento mediante algoritmi implementati nel software, che risolvono un problema di minimizzazione ai minimi quadrati, al fine di affinare ulteriormente la registrazione e garantire un'elevata precisione complessiva.

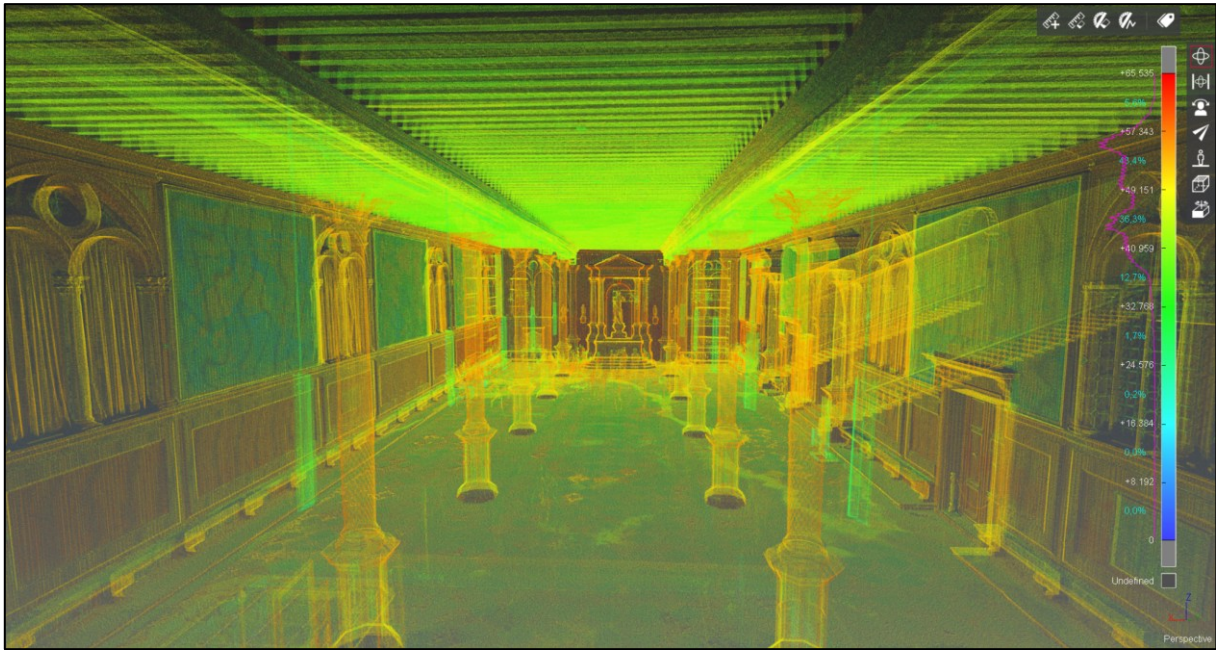


Figura 21 – Vista prospettica dell'interno della Sala Terrena con scala di colore basata sull'intensità del segnale

Dall'unione delle scansioni, il software SCENE fornisce un'analisi dei modelli generati nella registrazione. Nel caso della figura 21 sono riportati cromaticamente l'intensità del segnale di acquisizione all'interno della Sala Terrena.

Si osserva come, in prossimità della parete meridionale e dell'altare, siano presenti una maggiore sovrapposizione e densità di acquisizione da laser scanner. Al contrario, l'intradosso del solaio superiore e alcuni elementi pensili, a causa dell'altezza e della loro conformazione, presentano un'intensità di dati acquisiti sensibilmente inferiore.

Un ulteriore passaggio operativo riguarda l'esecuzione automatica da parte del programma del "texturing" della nuvola di punti, con l'obiettivo di migliorare la comprensione e l'interpretazione del modello tridimensionale, nonché di generare un prodotto che rappresenti fedelmente lo stato di fatto.

Il texturing consiste nell'associare a ciascun punto acquisito un valore cromatico RGB, ottenuto dalle immagini catturate automaticamente dalla fotocamera integrata nel dispositivo laser scanner.

La procedura operativa si conclude con la valutazione e l'approvazione del report fornito dal programma, nel quale viene definito come l'errore medio di allineamento, verificato sui target, è pari a 2,1mm, mentre l'errore medio di allineamento verificato sui punti di scansione è pari a 1.6mm. Tali valori sono stati considerati complessivamente ottimali ai fini dell'elaborazione geometrica e volumetrica del modello.



Figura 22 – Nuvola di punti globale registrata in un unico sistema di riferimento

Ai fini operativi, per facilitare la condivisione e gestione della nuvola di punti, considerata la mole dei dati, le varie scansioni sono state sottocampionate secondo un fattore 3, ovvero riducendo il numero di punti rilevati. In questo modo si è ottenuto una dimensione media di circa 440 Mb per ciascuna nuvola di punti.

Inoltre, è stata prodotta una nuvola di punti globale alleggerita, ottimizzata e compressa nel formato .laz per un totale di 190 milioni di punti per 2,3 Gb.

Seguono delle viste prospettiche del modello tridimensionale per nuvola di punti rilevato, registrato e texturizzato:

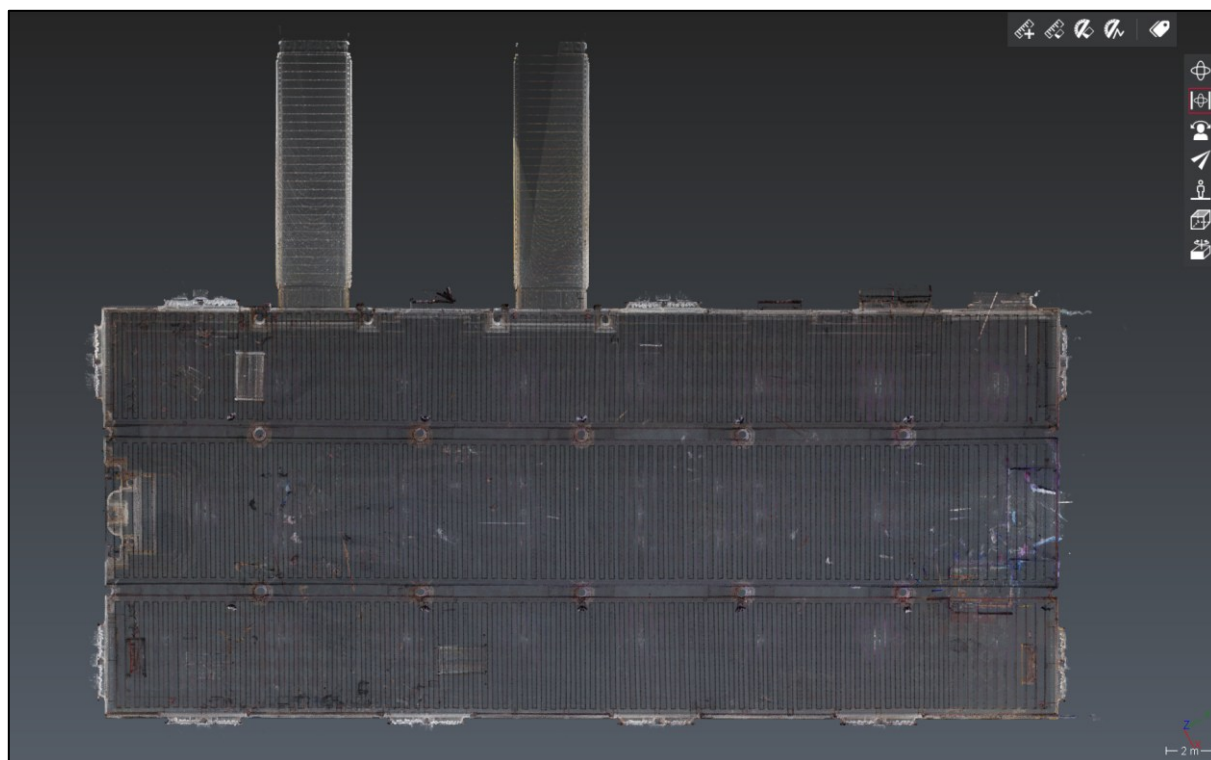


Figura 23 – Vista planimetrica della nuvola di punti della Sala Terrena



Figura 24 – Vista prospettica del Sotoportego della Scuola



Figura 25 – Vista prospettica dell'altare nella Sala Terrena



Figura 26 – Vista prospettica della Sala Terrena

Ricavato il modello complessivo per nuvola di punti ad alta definizione, si è proceduto all'estrapolazione dei dati geometrici.

Tramite l'applicativo SCENE sono state esportate, in corrispondenza delle aree di interesse, le sezioni verticali e orizzontali del modello.

Creati i piani di taglio sono state generate le sezioni e le orto-proiezioni texturizzate del modello, utili per la caratterizzazione del fabbricato e per l'ottenimento delle informazioni enunciate nello scopo del rilievo.

In particolare, le sezioni prodotte comprendono:

- Una sezione orizzontale complessiva della sala e del portico retrostante, a quota 2,70 m s.l.m.;
- Una serie di sezioni orizzontali dettagliate della parete sud, a differenti quote, in prossimità dell'altare;
- Sezioni verticali trasversali e longitudinali del fabbricato.

I file vettoriali grezzi in formato .dxf, relativi alle sezioni del modello, sono stati esportati e successivamente elaborati in ambiente CAD per affinare i contorni sezionati e restituire una geometria unificata. Tali elaborazioni hanno inoltre consentito il ricalco delle viste prospettiche, basandosi sulle orto-proiezioni generate.

Dalle restituzioni grafiche è stato possibile ricavare, oltre allo stato di fatto planimetrico del fabbricato e del sottoportego, le dimensioni della parete meridionale, in particolare in adiacenza all'altare e nelle sue prossimità. Tali dati hanno fornito informazioni grafiche e metriche fondamentali per le successive operazioni di manutenzione e consolidamento.

Gli elaborati finali combinano la base vettoriale (sezioni architettoniche e viste prospettiche) con la sovrapposizione raster delle orto-proiezioni, al fine di ottenere una rappresentazione più accurata e una migliore leggibilità delle sezioni, agevolando l'interpretazione degli elementi architettonici e costruttivi.

Le principali informazioni ricavate dal materiale grafico includono:

- La conformazione della parete sud, dove, in corrispondenza delle sezioni 3.2 e 4.2 (figura 33), lo spessore murario risulta pari a 0,88 m alla quota di 2,60 m, e a 0,84 m alla quota di 5,60 m;
- La conformazione della stessa parete sud, dove, in corrispondenza della sezione 5 (figura 34), lo spessore murario alla quota di 2,60 m, comprensivo del basamento dell'altare, è pari a 2,86 m, mentre alla quota di 5,00 m risulta di 0,96 m;

- La discretizzazione vettoriale di dettaglio della vista prospettica dell'altare, sezione 1 (figura 29), dove sono state ricavate le altezze, dimensioni e spessori trasversali della Sala Terrena;
- La rappresentazione della parete sud vista dall'esterno, sezione 2 (figura 31), che ha consentito di definire geometricamente il porticato e individuare le aree strutturalmente compromesse;
- La pianta complessiva della Sala Terrena e la pianta di dettaglio della parete sud (figura 27).

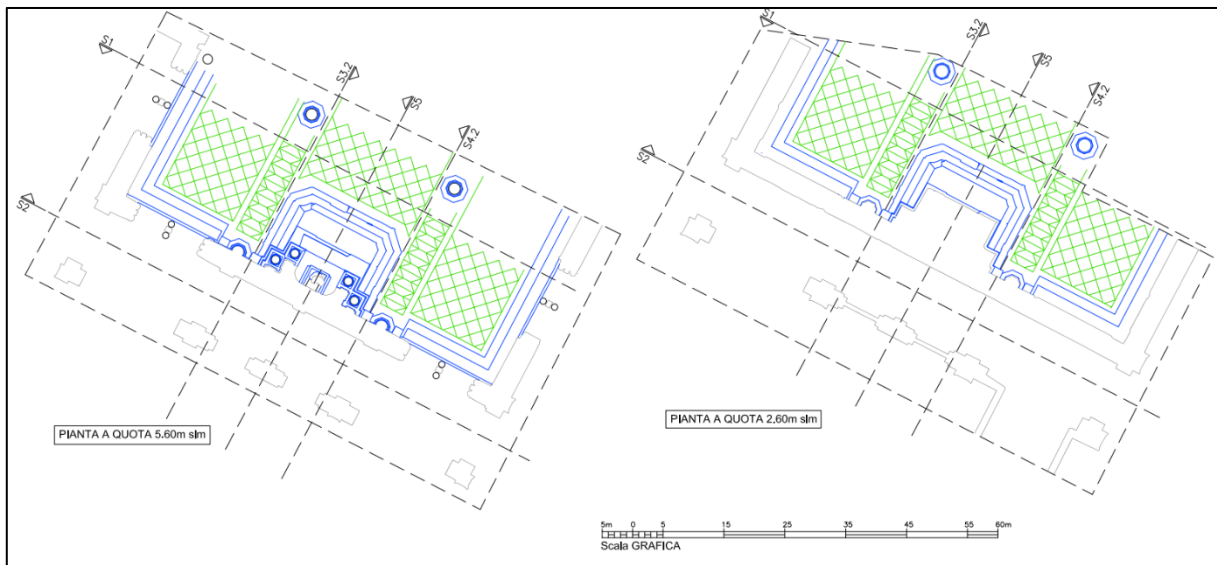


Figura 27 – Pianta parete sud – Sezioni orizzontali, vista

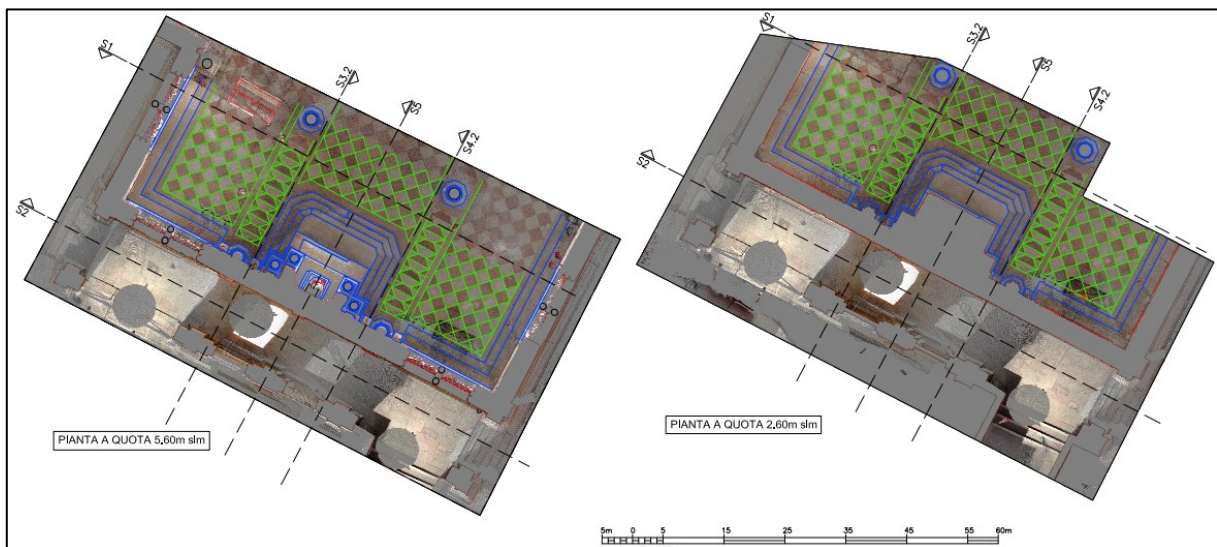


Figura 28 – Pianta parete sud – Sezioni orizzontali con sovrapposizione delle orto-proiezioni del modello tridimensionale

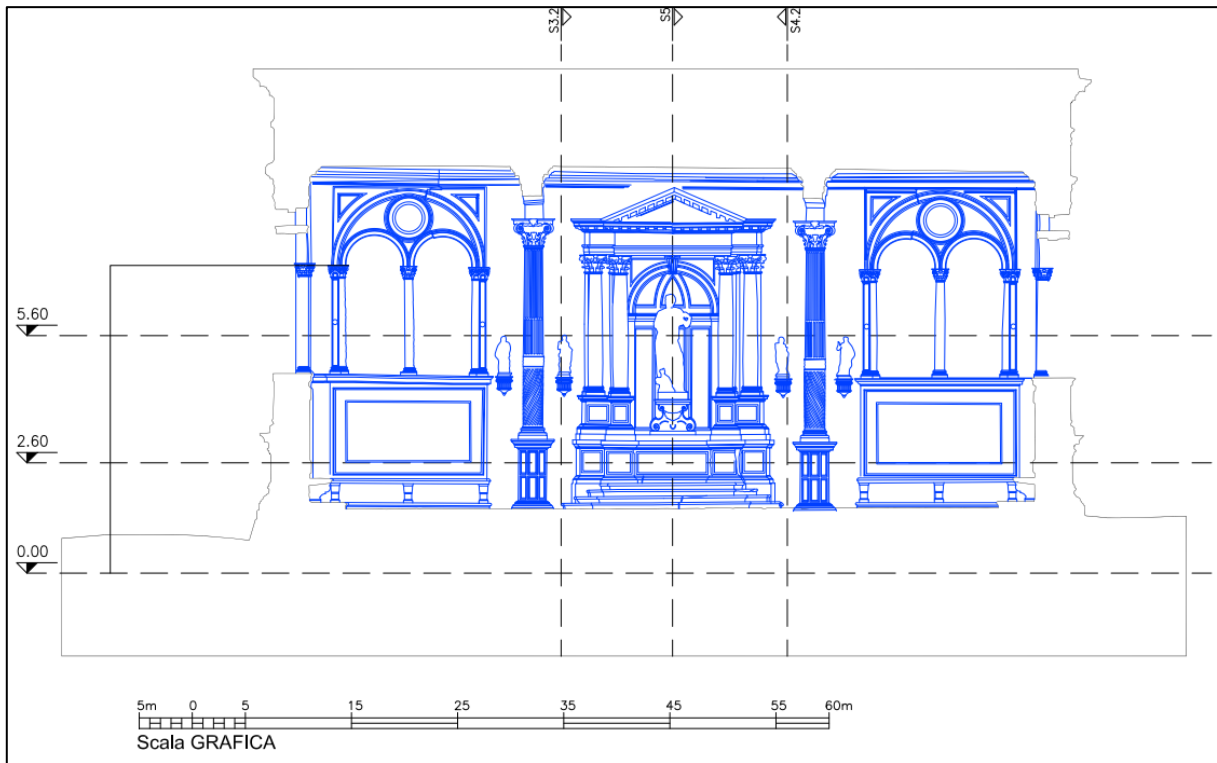


Figura 29 – Sezione 1 – sezione verticale e vista prospettica

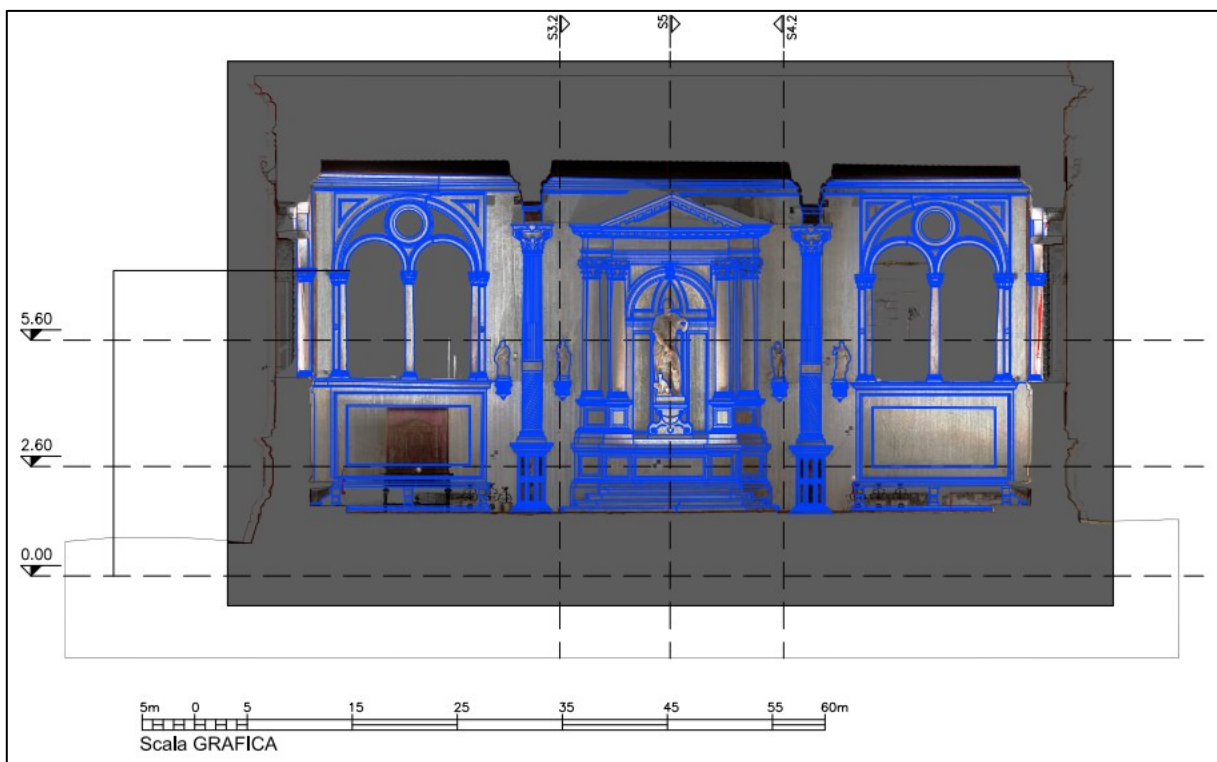


Figura 30 – Sezione 1 – Sezione verticale con sovrapposizione dell'orto-proiezione del modello tridimensionale

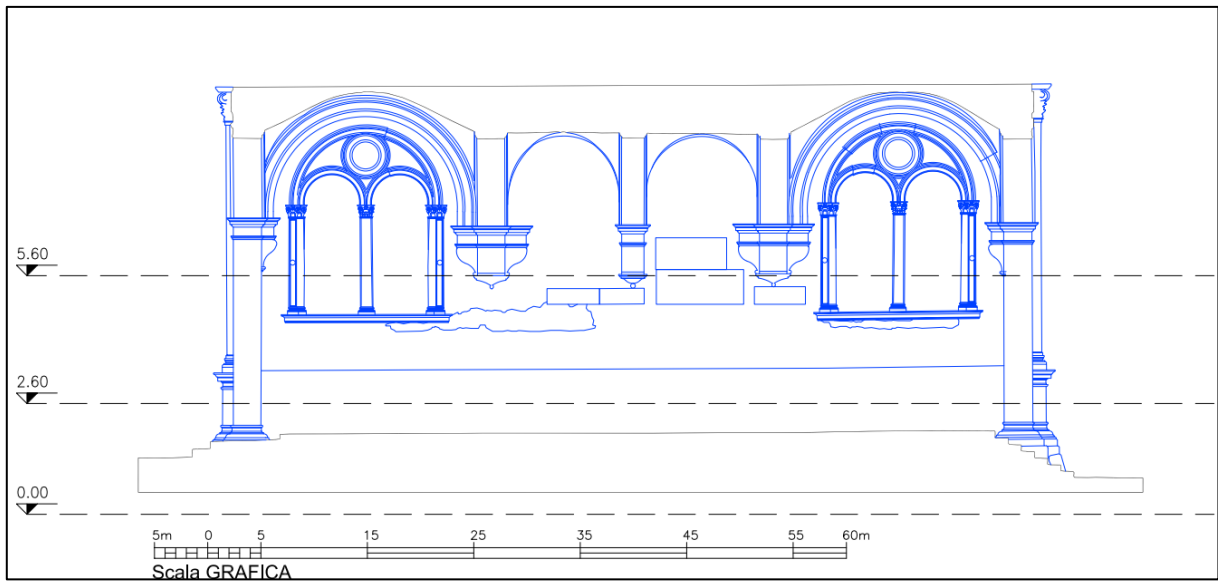


Figura 31 – Sezione 2 – sezione verticale e vista prospettica

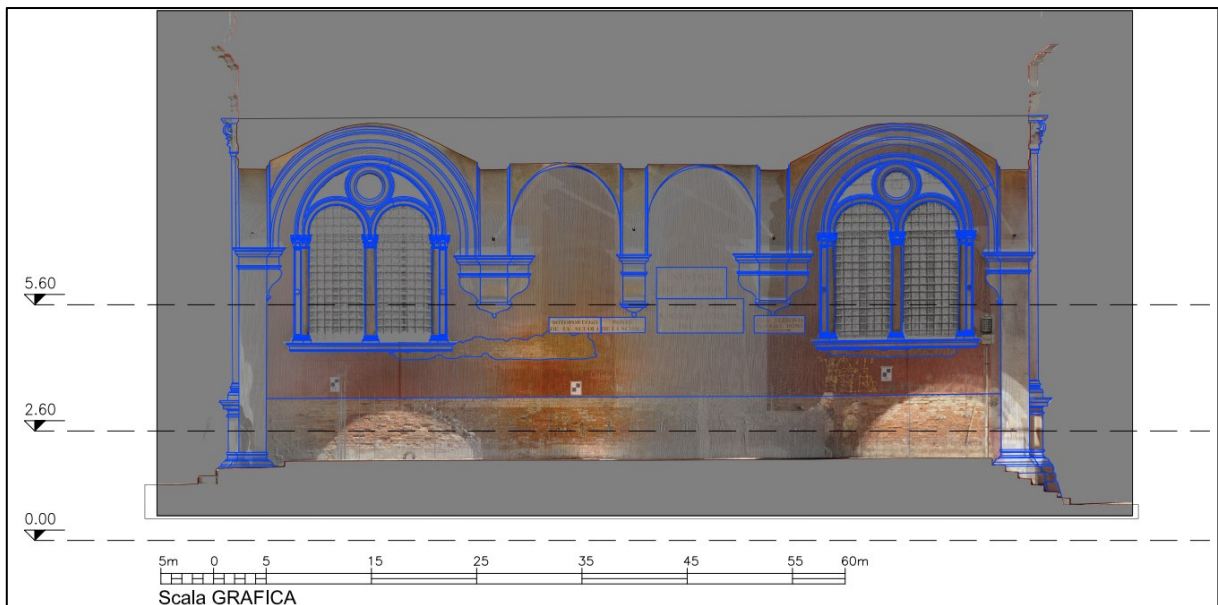


Figura 32 – Sezione 2 – Sezione verticale con sovrapposizione dell'orto-proiezione del modello tridimensionale

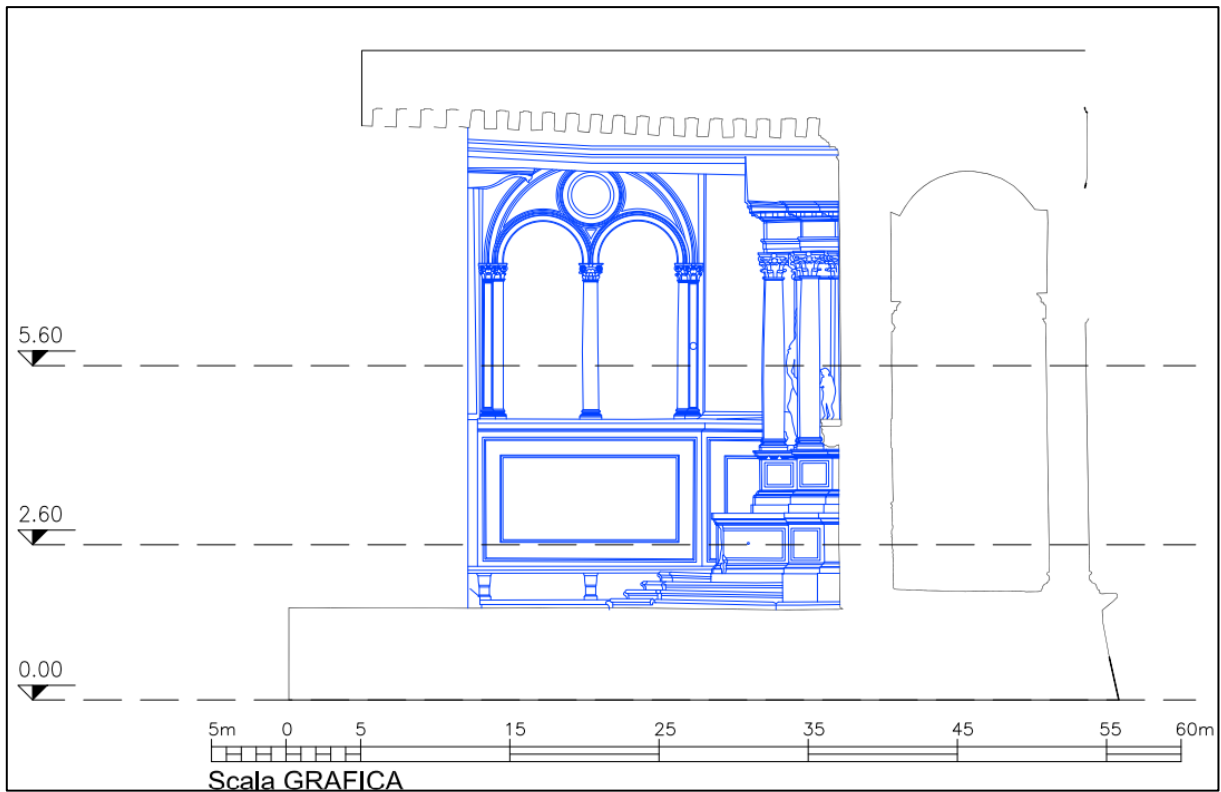


Figura 33 – Sezione 4.2 – Sezione verticale e vista prospettica

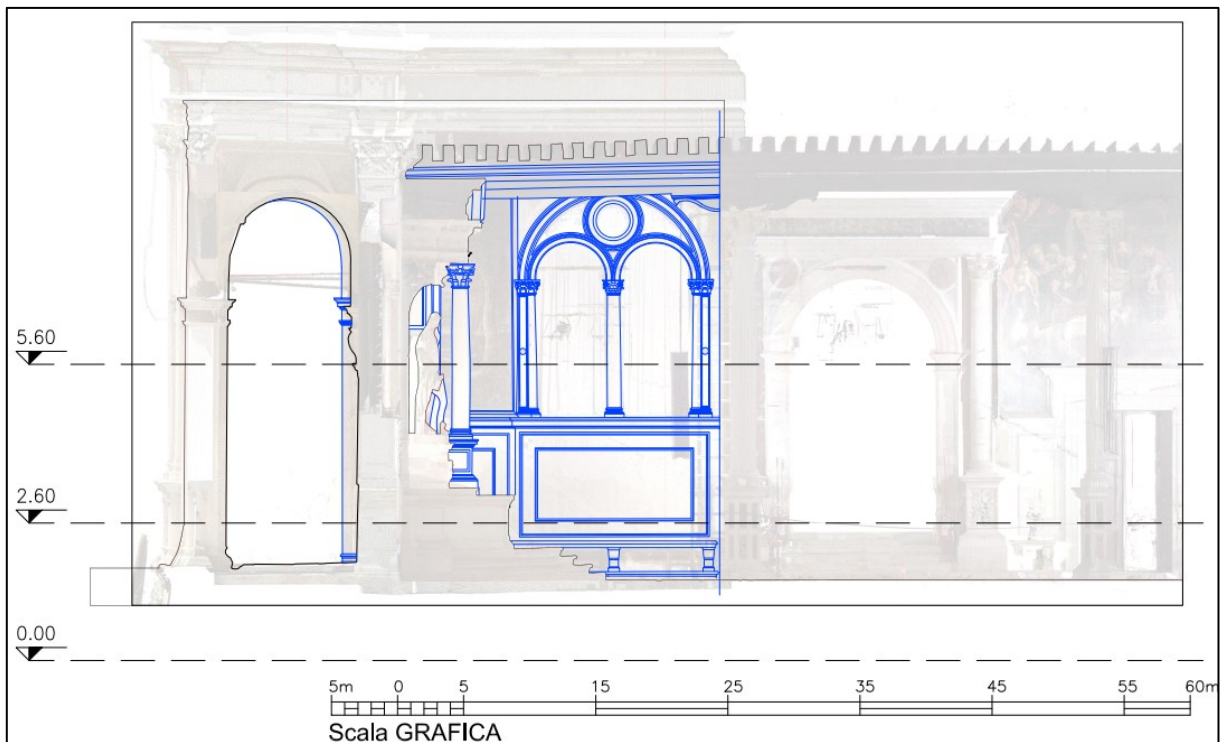


Figura 34 – Sezione 5 – Sezione verticale con sovrapposizione dell'orto-proiezione del modello tridimensionale

4.3.3 Elaborazione dei dati tridimensionali fotogrammetrici

Il processamento dei dati tridimensionali è proseguito con il calcolo volumetrico della statua di San Rocco e degli elementi aggettanti.

In questo caso specifico, è stato utilizzato il software Agisoft Metashape, un programma dedicato all'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali, finalizzato alla generazione di dati spaziali tridimensionali.

Tali dati trovano applicazione in diversi ambiti, tra cui: misurazioni indirette di oggetti di varia scala, creazione di effetti visivi, conservazione del patrimonio culturale e integrazione nei sistemi informativi geografici (GIS).

L'applicativo consente di sviluppare automaticamente le immagini digitali in informazioni spaziali tridimensionali sotto forma di nuvole di punti e modelli poligonali texturizzati, avvalendosi di algoritmi proprietari basati sulla tecnica della SfM.

Nel caso studio, sono state utilizzate le 1841 immagini acquisite con fotocamera digitale ad alta definizione. Il processo SfM è stato sviluppato secondo il seguente flusso di lavoro:

- La prima fase operativa, successiva all'importazione delle immagini in Metashape, si sviluppa nell'operazione di allineamento automatico degli scatti fotografici.

Il programma, dopo aver determinato la stima dei parametri esterni ed interni di orientamento (lunghezza della focale, coordinate del punto principale dell'immagine e i coefficienti di distorsione dell'obiettivo), elabora automaticamente una nuvola di punti sparsa dell'oggetto acquisito mediante i propri algoritmi.

Il modello puntuale generato è stato successivamente sottoposto a filtraggio e pulizia per la rimozione del rumore ambientale rilevato e dalle porzioni eccedenti non rilevanti ai fini dello studio, prodotte durante la fase di allineamento;

- La fase seguente, finalizzata a garantire la correttezza geometrica del modello 3D e la sua accurata georeferenziazione e scalatura, ha previsto l'inserimento delle coordinate degli 8 marker fotogrammetrici posizionati sulla superficie marmorea della statua e precedentemente rilevati mediante la stazione integrata.

Tale operazione ha consentito di georiferire tutti i dati all'interno di un medesimo sistema di riferimento e, suddividendo i marker in 5 Control Points, utilizzati nell'elaborazione, e 3 Check Points, per la valutazione degli errori, ha consentito di validare il modello ottenuto.

Gli errori medi determinati risultano pari a 2,4 mm sui Control Points e 3,2 mm sui Check Points, come riportato dal report di Metashape;

-Rototraslata e georiferita la nuvola di punti sparsa, è stato avviato il processo di generazione ad alta definizione della nuvola densa di punti, ovvero la fase di densificazione puntuale.

Tale procedura consente di ottenere una rappresentazione tridimensionale più dettagliata e continua della scena rispetto alla nuvola sparsa. Nel caso specifico, il modello risultante è costituito da circa 30,7 milioni di punti 3D;

-L'operazione successiva si basa nella creazione del modello poligonale (mesh), ovvero nella ricostruzione tridimensionale della superficie a partire dalla nuvola di punti densa.

Il processo avviene mediante l'impiego di algoritmi di triangolazione, che trasformano i punti 3D in poligoni triangolari interconnessi, producendo la geometria superficiale dell'oggetto rilevato. Nel caso specifico, il processo ha generato una mesh ad alta definizione da 2.3 milioni di triangoli, qualitativamente adatta per l'impiego nel calcolo volumetrico.

- L'ultima fase ha riguardato la texturizzazione del modello poligonale, finalizzata a migliorarne la leggibilità e a conferirgli un aspetto fotorealistico.

La procedura automatica consiste nella proiezione delle informazioni cromatiche contenute nei pixel delle immagini acquisite sulle superfici del modello tridimensionale.

Al termine dell'intero processo di elaborazione, è stato esportato il modello tridimensionale ad alta definizione della statua di San Rocco, escludendo le porzioni non rilevanti ai fini dell'analisi.

Il modello è stato successivamente importato nel software SCENE, il quale, tramite un apposito applicativo, consente il calcolo volumetrico di modelli poligonali chiusi.

Il processo di calcolo ha restituito un volume complessivo della statua, escluso il basamento, pari a 0,503 m³.

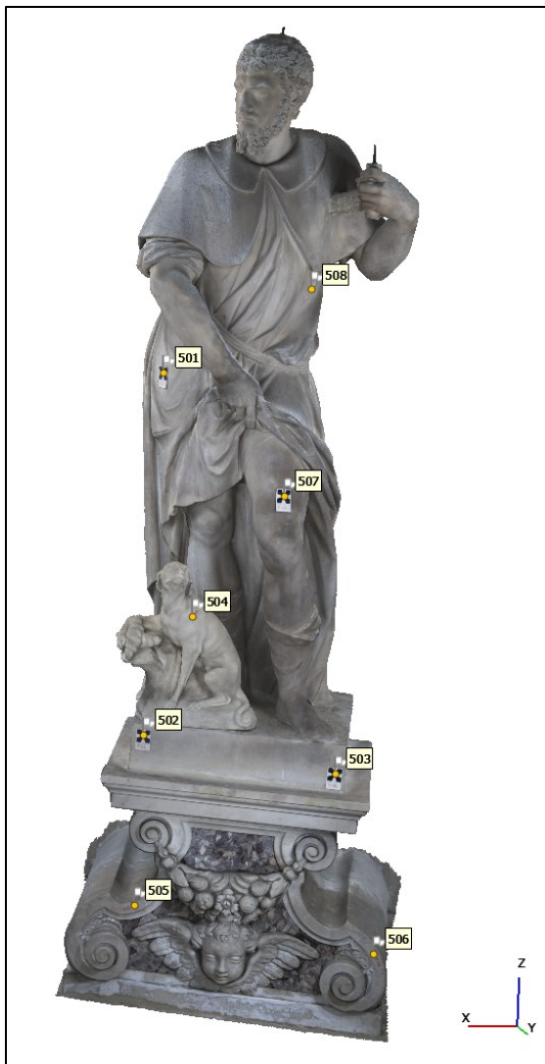


Figura 36 – Modello tridimensionale texturizzato nell'interfaccia di visualizzazione di Agisoft Metashape



Figura 35 – Modello tridimensionale nell'interfaccia di calcolo di Faro SCENE

5.0 Conclusioni

L'elaborato di tesi ha analizzato, come caso di studio, il rilevamento tridimensionale ad alta definizione della sala terrena della Scuola Grande di San Rocco, realizzato attraverso l'impiego di metodologie geomatiche integrate.

Nel seguente studio è stato trattato l'intero iter operativo, dalla fase di pianificazione e acquisizione dei dati, fino alla loro elaborazione, descrivendo in modo approfondito e tecnico le diverse metodologie adottate.

Tali aspetti sono stati affiancati da un inquadramento teorico relativo al funzionamento della strumentazione utilizzata, alle tecniche di compensazione delle osservazioni e alla gestione dei dati acquisiti.

Le attività di rilevamento hanno incluso sia metodologie tradizionali, come la stazione totale e il posizionamento GNSS, sia metodi innovativi, come il laser scanning e la fotogrammetria, dimostrando l'efficacia dell'integrazione tra approcci consolidati e tecnologie avanzate.

Il rilievo oggetto di studio è stato finalizzato all'estrazione di informazioni metriche utili alla valutazione degli spessori murari della parete meridionale, al calcolo volumetrico degli elementi marmorei aggettanti e delle parti costitutive dell'altare, al fine di determinarne i carichi per la successiva opera di risanamento e consolidamento della parete meridionale della struttura.

Gli output dell'elaborazioni tridimensionali, quali le rappresentazioni grafiche planimetriche di dettaglio del fabbricato, le sezioni e viste utili allo studio, nonché i calcoli volumetrici della statua di San Rocco, sono stati descritti tecnicamente, a partire dalla fase di sopralluogo preliminare fino alla restituzione finale.

Pur riferendosi a un caso specifico, il lavoro evidenzia come le tecniche di rilevamento tridimensionale, integrate con software dedicati alla gestione e al processamento dei dati, risultino efficaci e replicabili anche in altri contesti di rilievo di dettaglio, a condizione che siano supportate da una rete plano-altimetrica di riferimento sufficientemente accurata, che costituisce l'ossatura fondamentale dell'intero processo.

Nello specifico, secondo i report generati dal software *SCENE* per l'elaborazione delle scansioni laser, l'errore medio di allineamento rilevato sui target è risultato pari a 2,1 mm, mentre quello sui punti di scansione è stato di 1,6 mm.

Per la statua di San Rocco, invece, i dati fotogrammetrici elaborati tramite Metashape indicano un errore medio di 2,4 mm sui Control Points e di 3,2 mm sui Check Points.

Tali valori di accuratezza, ottenuti su strutture complesse e articolate, difficilmente ottenibili con strumenti tradizionali, evidenziano la validità delle tecnologie adottate.

L'utilizzo di metodi classici, in questi casi, avrebbe comportato un elevato dispendio di tempo e risorse, oltre a una maggiore probabilità di errore.

L'approccio seguito ha consentito una stima volumetrica estremamente accurata, fondamentale per le successive valutazioni ingegneristiche legate alle opere di risanamento strutturale, e ha garantito una discretizzazione geometrica di elevata qualità.

Il lavoro dimostra come i moderni processi di rilievo, pur generando una mole di dati notevolmente superiore rispetto alle tecniche tradizionali e richiedendo risorse informatiche adeguate, in termini di hardware, interfacce grafiche e capacità di archiviazione, permettano, se orientati verso obiettivi specifici, di ottenere risultati estremamente precisi.

Tali approcci superano i limiti delle metodologie classiche, rivelandosi particolarmente efficaci nella rappresentazione e trattazione di oggetti complessi ed irregolari.

Il lavoro ha inoltre confrontato e analizzato diverse strumentazioni per l'acquisizione tridimensionale, considerando sia gli aspetti operativi, con relative limitazioni e vantaggi, sia le precisioni e i livelli di discretizzazione ottenibili in differenti condizioni di rilievo.

Nel caso specifico analizzato, la tecnologia laser scanner, in particolare mediante l'utilizzo del Faro Focus Premium, ha dimostrato notevole efficienza e qualità nella restituzione 3D ad alta precisione di strutture di ampie dimensioni, grazie anche alla velocità di acquisizione pari a circa 2.000.000 punti/secondo. In un contesto lavorativo in cui l'efficienza temporale rappresenta un requisito fondamentale, la possibilità di acquisire 48 scansioni in una sessione giornaliera, costituisce un dato significativo in termini di produttività e qualità del risultato.

Va tuttavia osservato che, come evidenziato nel caso della Scuola Grande, la presenza di una morfologia architettonica complessa, con nicchie, spazi angusti, dettagli costruttivi, può generare lacune nella copertura geometrica laddove sia richiesta una modellazione completa e dettagliata.

Per ovviare a tali criticità, è stato integrato l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche, in particolare mediante lo XVS Stonex e una fotocamera digitale ad alta definizione, che si sono dimostrate più adatte alla documentazione di aree meno accessibili, grazie alla maggiore maneggevolezza e flessibilità operativa.

Inoltre, per la modellazione di elementi complessi ma di dimensioni contenute, come statue o manufatti solidi articolati, la fotogrammetria ha consentito di ottenere modelli tridimensionali

precisi e completi con maggiore rapidità, dove l'impiego esclusivo della tecnologia laser scanner avrebbe comportato tempi più lunghi e una gestione spaziale più complessa.

Infine, lo studio ha descritto e analizzato tecniche di acquisizione completamente non invasive e non distruttive.

Tali procedure risultano replicabili in contesti di studio e restauro conservativo di edifici storici o opere di particolare rilievo, come nel caso esempio della statua di San Rocco, realizzata da Girolamo Campagna tra il 1607 e il 1611.

L'integrazione delle diverse metodologie ha reso possibile l'acquisizione della geometria della struttura senza ricorrere a perforazioni o manipolazioni dirette, consentendo inoltre la determinazione volumetrica degli elementi marmorei senza necessità di asportazione.

Il risultato è una documentazione accurata, con precisione sub-centimetrica, dello stato di conservazione dell'edificio, utile per futuri studi sul degrado strutturale progressivo.

6.0 Bibliografia e Sitografia

- Achilli, V. (2023). Dispense - Principi di funzionamento del sistema GPS.
- Agisoft, M. (2025). Agisoft Metashape User Manual.
- Balin, M. (2020). Metodologie integrate avanzate per il rilievo tridimensionale in ambiente montano. Caso di Studio: la guglia dolomitica “Gusela del Vescovà”; Tesi di laurea.
- Cannarozzo, R., Cucchiarini, L., & Meschieri, W. (2019). Misure, rilievo, progetto – Rilievo del territorio con tecniche tradizionali e con nuove tecnologie.
- Chiari Moretto Wiel, M. A. (2009). La Scuola Grande di San Rocco e la sua chiesa.
- Eltner, A., & Sofia, G. (2020). Structure from motion photogrammetric technique. Developments in Earth Surface Processes.
- FARO S.p.A. (2024). Scheda tecnica - Focus Premium Max.
- Leica Geosystems. (2016). Leica GS14/GS16 User Manual.
- Menin, A. (2023). Dispense di topografia - Capitolo I -Strumenti classici.
- Menin, A. (2023). Dispense di topografia - Capitolo II -Teoria degli errori.
- Menin, A. (2023). Dispense di topografia - Capitolo IV -Cenni sulla metodologia satellitare.
- Menin, A. (2023). Dispense di topografia - Capitolo VI -Fotogrammetria.
- Piermattei, L. The use of structure from motion technologies for high-resolution terrain modelling on high altitude catchments; tesi di laurea.
- Stonex Srl. (2022). Scheda tecnica - Scanner 3D XVS.

www.faro.com

www.scuolagrandesanrocco.org

www.igmi.org

Gli elaborati tecnico-grafici sono stati forniti e resi disponibili dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica dell'Università di Padova, in collaborazione con CIBA, Centro per i Beni Culturali.

Indice delle figure

Figura 1 – Distribuzione spaziale dei fabbricati	8
Figura 2 – Veduta frontale Scuola Grande di San Rocco	11
Figura 3 – Interno della Sala Terrena - Carlo Naya, 1890 ca. Negativo, gelatina/vetro.....	12
Figura 4 – Interno Sala Capitolare	13
Figura 5 – Stazione totale.....	14
Figura 6 – Ricevitore GNSS GS16	18
Figura 7 – Laser scanner Faro Focus Premium.....	21
Figura 8 – Schema di formazione dell’immagine fotografica	23
Figura 9 – Ricostruzione tridimensionale tramite fotogrammi multipli	24
Figura 10 – XVS V-Slam Scanner	25
Figura 11 – Materializzazione dei vertici	27
Figura 12 – Risultati dell’elaborazione dati GNSS.....	29
Figura 13 – Coordinate planimetriche compensate e relativi scarti quadratici medi	31
Figura 14 – Parametri delle ellissi di errore standard dei vertici della rete topografica	31
Figura 15 – Quote ortometriche compensate dei vertici della rete topografica	32
Figura 16 – Coordinate finali compensate della rete topografica	32
Figura 17 – Schema della rete di inquadramento riportato su CTR.....	33
Figura 18 – Coordinate target piani di appoggio	33
Figura 19 – Coordinate sfere fotogrammetriche	34
Figura 20 – Acquisizione del Faro Focus Premium posto sul trabattello	36
Figura 21 – Vista prospettica dell’interno della Sala Terrena con scala di colore basata sull’intensità del segnale	39
Figura 22 – Nuvola di punti globale registrata in un unico sistema di riferimento	40
Figura 23 – Vista planimetrica della nuvola di punti della Sala Terrena.....	41
Figura 24 – Vista prospettica del Sotoportego della Scuola	41
Figura 25 – Vista prospettica dell’altare nella Sala Terrena	42
Figura 26 – Vista prospettica della Sala Terrena	42
Figura 27 – Piante parete sud – Sezioni orizzontali, vista	44
Figura 28 – Piante parete sud – Sezioni orizzontali con sovrapposizione delle orto-proiezioni	44
Figura 29 – Sezione 1 – sezione verticale e vista prospettica	45
Figura 30 – Sezione 1 – Sezione verticale con sovrapposizione dell’orto-proiezione	45

Figura 31 – Sezione 2 – sezione verticale e vista prospettica	46
Figura 32 – Sezione 2 – Sezione verticale con sovrapposizione dell'orto-proiezione	46
Figura 33 – Sezione 4.2 – Sezione verticale e vista prospettica	47
Figura 34 – Sezione 5 – Sezione verticale con sovrapposizione dell'orto-proiezione	47
Figura 35 – Modello tridimensionale nell'interfaccia di calcolo di Faro SCENE.....	50
Figura 36 – Modello tridimensionale texturizzato nell'interfaccia di visualizzazione di Agisoft Metashape	50

Acronimi

CAD: Computer-Aided Design

CIBA: Centro per I Beni Culturali

EDM: Electro Distance Measurement

GIS: Geographic Information System

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

GPS: Global Positioning System

IGM: Istituto Geografico Militare

LIDAR: Light Detection And Ranging

LRG: Laboratorio di Rilevamento e Geomatica

RGB: Red Green Blue

RTK: Real Time Kinematic

SFM: Structure From Motion

SLAM: Simultaneous Localization and Mapping

Ringraziamenti

In questo spazio colgo l'occasione per ringraziare il Prof. Andrea Menin, relatore della tesi, per la disponibilità e l'aiuto che mi ha concesso, in particolare per avermi dato l'opportunità di partecipare al rilievo della Scuola Grande di S. Rocco e ad altre significative esperienze con il Laboratorio di Rilievo e Geomatica. Un sentito ringraziamento va anche a tutte le persone coinvolte nel Laboratorio e a coloro che hanno collaborato, condividendo con me tecniche e competenze che si sono rivelate fondamentali per la mia formazione.

Grazie a Eleonora, che mi è stata vicina in questi anni e con cui ci siamo sostenuti e spronati a vicenda, condividendo fatiche, soddisfazioni e tanti momenti indimenticabili. Senza di lei, tutto questo sarebbe stato molto più difficile.