

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione 3D post sismica in ambiente BIM per la ricostruzione della chiesa di San Salvatore.

Relatore:

Prof. Andrea Maria Lingua

Candidato:

Luca Reginelli

Correlatori:

Prof. Marco Zerbinatti

Arch. Francesca Matrone

Ottobre 2019

INDICE

INTRODUZIONE	1
SAN SALVATORE NEL SUO CONTESTO	3
1.1 Campi di Norcia	3
1.2 Eventi sismici	5
1.3 Chiesa di San Salvatore	7
1.3.1 Storia	8
1.3.2 Esterno.....	9
1.3.3 Interno	12
1.3.4 Iconostasi.....	12
1.3.5 Affreschi.....	15
1.3.6 Il sisma del 2016	18
1.3.7 Dopo il sisma.....	19
1.4 La Soprintendenza dell’Umbria	22
1.4.1 Un modello tridimensionale per San Salvatore.....	22
I DATI METRICI E LA LORO GESTIONE.....	25
2.1 Tecniche di rilievo per i beni architettonici e culturali	25
2.1.1 La tecnica LiDAR	27
2.1.2 La tecnica fotogrammetrica.....	28
2.1.3 Applicazioni nel caso di studio	30
2.2 Dati forniti da rilievi.....	30
2.2.1 Il team DIRECT	30
2.2.2 Strumentazione.....	31
2.2.3 Precisione di scala e GSD	33
2.2.4 Trattamento preliminare dati.....	34
2.2.5 Suddivisione dei dati per strumento di acquisizione.....	35
L’ELABORAZIONE DEI DATI.....	41
3.1 Creazione delle nuvole di punti.....	41
3.2 Il <i>software</i> Agisoft PhotoScan.....	42

3.2.2	Geolocalizzazione e collimazione dei marker.....	46
3.2.3	Errori	51
3.2.4	Riallineamenti e correzioni	52
3.2.5	Creazione della nuvola densa.....	54
3.3	Il <i>software</i> Faro Scene	57
3.3.1	Collocazione delle scansioni	57
3.3.2	Errori	63
3.3.3	Tabelle con valori di tensione di Scene.....	65
3.3.4	Colorazione ed esportazione della nuvola.....	66
L'ELABORAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI		69
4.1	Problemi delle nuvole di punti	69
4.1.1	Le nuvole esportate da PhotoScan	69
4.1.2	Le nuvole esportate da Scene	70
4.2	Pulizia delle nuvole di punti.....	71
4.2.1	Il <i>software</i> CloudCompare	71
4.2.2	La pulizia delle nuvole di punti.....	71
4.3	Computo distanza e densità su CloudCompare.....	74
4.3.1	Distanza.....	74
4.3.2	Densità.....	78
4.3.3	Risultati	82
4.4	Utilizzo di ReCap 360	82
4.4.1	Il <i>software</i> ReCap 360.....	82
4.4.2	Filtraggio e segmentazione della nuvola.....	83
GENERAZIONE DEL MODELLO		
TRIDIMENSIONALE		87
5.1	Scopo del progetto	87
5.2	La metodologia BIM	87
5.2.1	L'HBIM.....	89
5.3	Modellazione con Autodesk Revit	90
5.3.1	Il <i>software</i>	90

5.3.2	Workset e famiglie	91
5.3.3	Importazione delle nuvole	92
5.3.4	Modellazione muri	96
5.3.5	Modellazione volta a crociera	99
5.3.6	Modellazione centina	103
5.3.7	Modellazione dettagli.....	105
5.3.8	Creazione DTM.....	106
5.4	Confronto tra modello BIM e nuvola di punti	109
5.4.1	Parete esterna sud.....	112
5.4.2	Parete esterna est	113
5.4.3	Pareti e volta a crociera del fondo navata di destra.....	113
5.4.4	Iconostasi e la sua centina lignea	115
CREAZIONE DEL <i>DATABASE</i>		117
6.1	Introduzione ai <i>database</i>	117
6.1.1	Progettazione di un database	117
6.1.2	Il modello Entità – Relazioni	119
6.2	Il <i>database</i> di Revit e la sua estensione.....	120
6.3	Creazione di un <i>database</i> relazionale.....	121
6.3.1	Parametri condivisi.....	122
6.4	Esportazione con Revit DB link.....	123
6.5	Elaborazione <i>database</i> su Access	126
6.6	Compilazione del <i>database</i>	128
6.6.1	Importazione del database in Revit	128
6.6.2	Compilazione del database.....	129
CONCLUSIONI.....		131
TESI.....		133
ARTICOLI SCIENTIFICI.....		133
SITI WEB.....		134
ALLEGATI.....		136
RINGRAZIAMENTI.....		

INTRODUZIONE

L'Italia è un paese con un patrimonio storico e artistico di inestimabile valore, preservare e tutelare questo patrimonio è di estrema importanza.

La penisola italiana è anche un'area che presenta un'elevata attività sismica, che minaccia costantemente questo patrimonio.

Il nostro studio si concentra in particolare sulla salvaguardia e il recupero dei manufatti che sono stati colpiti dal sisma del centro Italia del 2016, terremoto che ha causato numerosissime vittime e riportato danni di livello catastrofico a tantissime città e paesi delle regioni Marche, Umbria e Abruzzo.

Borghi ricchi di storia sono stati completamente rasi al suolo, e con loro anche lo spirito di quelle località. È dunque un dovere morale, e una missione, continuare a far vivere questi luoghi, tenere viva la loro cultura, oltre le calamità naturali.

In particolare lo studio si concentra su una chiesa situata nel paese di Campi, presso il comune di Norcia, la chiesa di San Salvatore.

Questo edificio è crollato quasi completamente in seguito alle forti scosse sismiche dell'ottobre 2016, distruggendo in pochi secondi quello che millenni di storia avevano costruito: architetture, affreschi e sculture.

Grazie al pronto intervento di messa in sicurezza e rimozione delle macerie, avvenuto subito dopo il sisma, molti elementi della chiesa sono stati portati in salvo. San Salvatore è ancora presente ed è ora sulla via della rinascita.

Tramite il team DIRECT del Politecnico di Torino, sono stati condotti diversi rilievi metrici post sismici sulla chiesa, che hanno consentito di acquisire un elevato numero di dati tramite le più avanzate tecniche di scansione laser e fotogrammetriche.

I dati raccolti sono stati analizzati ed elaborati al fine di ricostruire un modello tridimensionale a cui è stato associato un *database* strutturato in modo che possa contenere tutte le informazioni relative alle caratteristiche della chiesa. Un modello siffatto sarà utile per il percorso di ripristino della chiesa nel futuro più prossimo. Infatti proprio a tal proposito, la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio dell'Umbria ha mostrato un notevole interesse su questo progetto, trovandolo di rilevante importanza per la progettazione futura, e la ricollocazione di alcuni elementi.

La tesi tratta questo procedimento in sei capitoli che possono essere divisi in tre macro-fasi.

La prima fase è quella che riguarda direttamente la chiesa, se ne sono studiati gli aspetti, la storia e si sono analizzati i dati dei rilievi condotti su di essa. In seguito, nei capitoli tre e quattro, si è passati all'elaborazione dei dati tramite diversi *software* quali PhotoScan, Scene, CloudCompare e ReCap 360. Questi hanno consentito di elaborare i dati acquisiti creando una nuvola di punti della chiesa utilizzabile come base per la successiva fase di modellazione. Nella terza e ultima fase, descritta nei capitoli cinque e sei, i dati sono stati impiegati per la realizzazione del modello tridimensionale tramite l'utilizzo della tecnologia BIM e del *software* Revit. A questo modello è stato in seguito associato un *database*, che ha consentito di inserire a posteriori tutte le informazioni riguardanti l'edificio e creare un modello informativo completo, mediante l'impiego del *software* Access.

CAPITOLO 1

SAN SALVATORE NEL SUO CONTESTO

1.1 Campi di Norcia

L'oggetto di studio su cui si articola la tesi è la chiesa di San Salvatore, situata in Umbria presso Campi [Fig. 1], una frazione del comune di Norcia (PG) che secondo l'ultimo censimento ISTAT del 2001 contava appena 172 abitanti.



Fig. 1 – Vista di Campi.

Si tratta di un piccolo borgo medievale posto a 711 m sul livello del mare e distante circa 11 km da Norcia [Fig. 2], il paese si sviluppa sul pendio appenninico e scende in una valle adiacente alla catena del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, la valle Castoriana. L'intera area è immersa in uno dei luoghi più belli di tutto il centro Italia e offre numerose attrazioni turistiche sia a livello naturalistico, che gastronomico e culturale.

Sono infatti innumerevoli cittadine medievali come quella di Campi che testimoniano l'antico passato italiano. L'area infatti vanta un patrimonio culturale di rilievo, ricco di beni architettonici, monumentali e artistici.



Fig. 2 – Localizzazione di Campi su Google Maps.

Questa zona è purtroppo stata enormemente danneggiata dai tragici eventi sismici del 2016 che hanno portato a gravi perdite per il patrimonio culturale, come delineato in un drammatico quadro di crolli e distruzioni. Secondo il Ministero per i Beni e le Attività Culturali ed il Turismo (MiBACT), sono stati quantificati 293 beni di interesse culturale distrutti o gravemente danneggiati, in gran parte rappresentati da chiese, monasteri ed eremi, ma anche da monumenti ed edifici di architettura civile e fortificata, come palazzi, mura e torri medievali.

Tuttavia, nonostante le immense difficoltà, e grazie alle numerosissime iniziative atte a supportare queste aree, il centro Italia sta tentando di rinascere passo dopo passo, soprattutto provando a rivalorizzare la zona affidandosi ad azioni che puntano e mantenere vivi i legami e le profonde relazioni con il territorio, difendendo l'identità di questi luoghi.

1.2 Eventi sismici

Le zone del centro Italia, in particolare quelle appenniniche sulle quali stiamo focalizzando l'attenzione, sono tra le più esposte a rischio sismico dell'intera penisola. Essendo l'Italia un paese fortemente caratterizzato da questi eventi, vi sono documentazioni risalenti al passato anche di millenni. Nonostante ciò, gli studi sulla pericolosità sismica all'interno del nostro paese iniziarono solamente nei primi anni del '900, in seguito ai catastrofici eventi sismici del 1908 e 1915, rispettivamente di Messina e della Marsica. Questa prima classificazione fu tuttavia molto generica per via dell'impiego di strumentazioni non adeguate e una scarsa rigorosità nella documentazione. La metodologia di classificazione andò migliorando negli anni a seguire ma raggiunse un adeguato livello di dettaglio solo all'inizio del nuovo millennio quando nel 2003 venne redatta la classificazione sismica di ogni singolo comune italiano. Venne dunque istituita una scala di misurazione che definisce quattro tipologie di zone di pericolosità sismica:

- Zona 1: sismicità alta
- Zona 2: sismicità medio-alta
- Zona 3: sismicità medio-bassa
- Zona 4: sismicità bassa

Oltre queste 4 zone vi sono anche delle sottozone, specifiche di alcuni territori in quanto la trasmissione delle onde sismiche varia di intensità per via delle diverse conformazioni del terreno.

La zona di Campi è proprio classificata come Zona 1, ovvero quella con pericolosità più elevata, dove è possibile il verificarsi di eventi molto forti, anche di tipo catastrofico.

Per ognuna delle quattro zone ci sono specifici criteri di progettazione che tengono conto dei dati statistici e probabilistici dell'area di interesse, che sono stati introdotti per la prima volta nelle norme tecniche di costruzione (NTC08) dopo il terremoto di L'Aquila nel 2009. In seguito [Fig. 3] si riporta la mappa della classificazione sismica italiana del 2015.

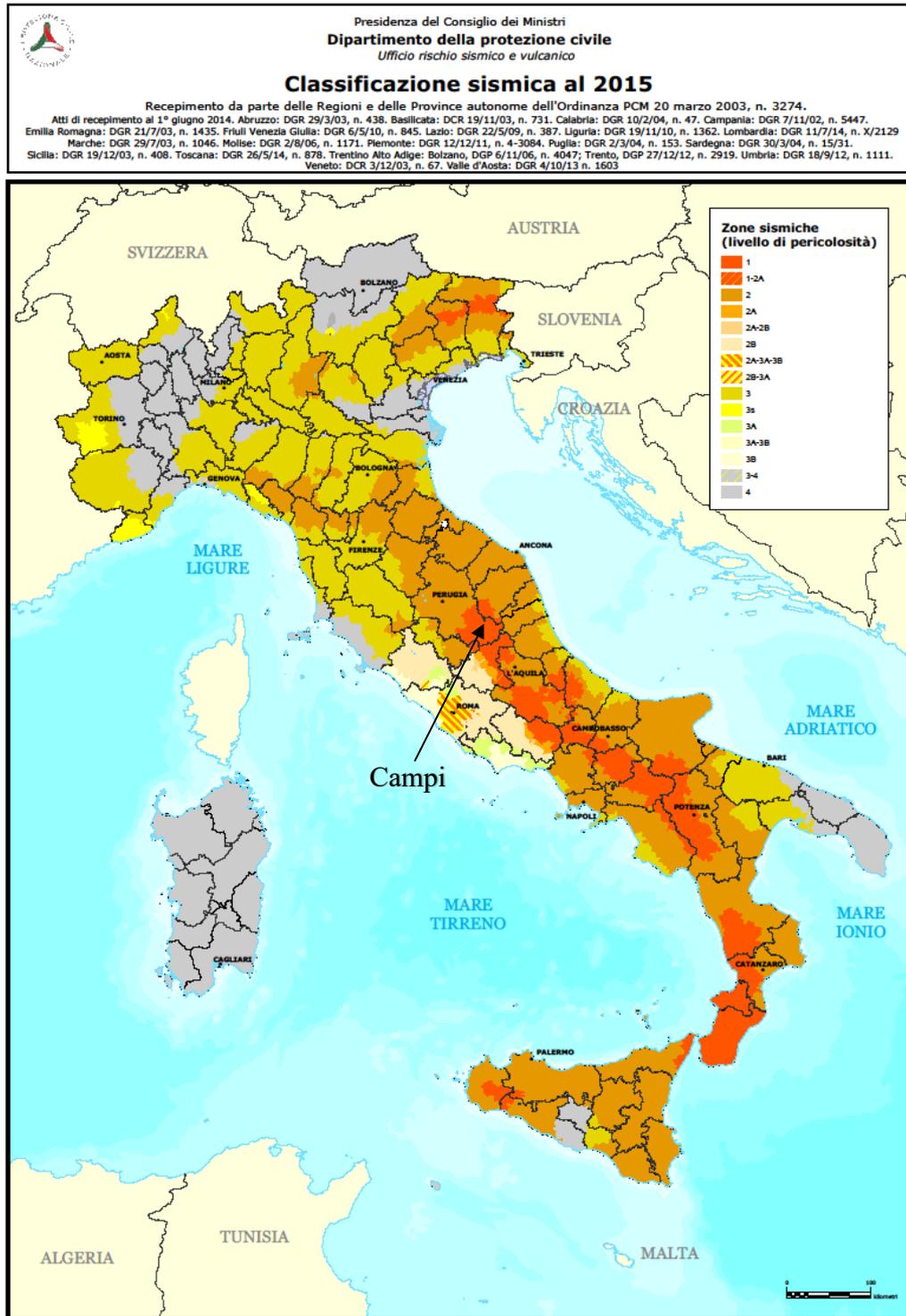


Fig. 3 – Mappa zone e sottozone sismiche, classificazione sismica 2015.

L'area di Campi è dunque da sempre fortemente interessata da eventi sismici, basti pensare che solamente nell'ultimo millennio vi sono stati numerosissimi terremoti che in più occasioni hanno raso al suolo interi paesi e città. Nella nostra ricerca ci

concentriamo esclusivamente sui sismi che hanno interessato l’area della chiesa di San Salvatore, in particolare sulle scosse che rientrano negli eventi sismici comunemente noti come “Terremoto del centro Italia del 2016 e 2017”.

Questi drammatici eventi si identificano principalmente con la prima scossa avvenuta il 24 agosto 2016, di magnitudo di 6.0, ed epicentro situato lungo la Valle del Tronto, interessando in primis i comuni di Accumoli (RI) e Arquata del Tronto (AP). In questa occasione enormi danni vennero riportati nei due paesi appena citati assieme anche alla città di Amatrice (RI). Altre due forti repliche sono avvenute il 26 ottobre 2016 con epicentri al confine umbro-marchigiano, tra i comuni di Visso (MC), Ussita (MC) e Castelsantangelo sul Nera (MC), con scosse di magnitudo 5.4 e 5.9 della scala Richter. A seguire il 30 ottobre 2016 è stata registrata la scossa più intensa, di magnitudo 6.5, con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci (PG). Questi eventi, con l’aggiunta di un’ulteriore scossa di magnitudo 5.5 il 18 gennaio 2017, portarono ad un drastico bilancio di 11.000 sfollati, 388 feriti e 303 morti.

1.3 Chiesa di San Salvatore



Fig. 4 – Chiesa di San Salvatore.

La chiesa di San Salvatore [Fig. 4], anticamente detta Pieve di Santa Maria, è una chiesa cristiana cattolica di rito romano, con addossato al suo fianco il cimitero

del paese. Iniziata e costruita nel XIV secolo e completata nel XVI, è ora crollata quasi completamente durante i terremoti del 26 e 30 ottobre 2016. Attualmente i suoi resti sono stati messi in sicurezza puntellando le porzioni di muro perimetrale rimaste e raccogliendo le macerie. In aggiunta, per protezione dagli agenti atmosferici, è stata realizzata una struttura metallica che copre l'intera area della chiesa a protezione degli antichissimi affreschi presenti al suo interno, che tuttavia sono in gran parte andati perduti. Le opere d'arte che custodiva questa chiesa sono testimonianza di quasi un millennio di fede e di storia.

1.3.1 Storia

Numerose testimonianze storiche parlano della Valle Castoriana, ricordata anche da Gregorio Magno come una civiltà prima sabina, poi romana e infine altomedievale, che fu distrutta dai barbari. Situata su un importante asse viario, la via Nursina, che da Spoleto arrivava a Norcia e poi scendeva verso la costa adriatica. Lungo questa importante via di comunicazione, poco distante dal borgo, venne eretta una pieve romanica, grande solamente un quarto della pianta della chiesa che si può osservare oggi. Venne costruita al posto di un edificio romano preesistente, un piccolo tempio pagano che fu dedicato a Santa Maria con l'avvento del cristianesimo. Le testimonianze dell'epoca romana segnalano che questa pieve era costituita da mura in blocchi interi di pietra, ancora presenti su tutta la parete esterna sinistra, da sarcofagi e da piccoli frontoni ed epigrafi di spoglio ritrovati dinanzi alla chiesa in occasione del restauro del 1969. Fino al 1493 fu amministrata dai monaci benedettini che già nel 1115 ne documentarono l'esistenza citandola tra le dipendenze della vicina abbazia di Sant'Eutizio di Preci, con il nome di pieve Santa Maria di Campi. Da questa abbazia dipendevano anche le vicine chiese di Santa Lucia, di San Leonardo e di Sant'Andrea di Campi. I monaci ne curarono la completa decorazione, ciò fu possibile grazie al denaro raccolto dalle elemosine dei fedeli che si erano tassati per rendere più bella la loro pieve.

In seguito al terremoto del 1328, la chiesa fu distrutta e vi fu una prima ricostruzione, era costituita da una unica navata con tetto a capanna, fu allungata e fu costruito il presbiterio in fondo alla navata, inoltre venne arricchita la facciata con un arco ogivale

ornato con l'agnello crucigero dell'ordine di San Benedetto. Nel 1491 si avviarono i lavori un ulteriore ingrandimento necessario per via dell'incremento della popolazione, dunque l'antica chiesetta venne ulteriormente ampliata con l'aggiunta di un'altra navata eretta sulla destra della preesistente pieve, in posizione simmetrica. Inoltre sempre a fine del XV secolo iniziarono anche i lavori di costruzione del campanile che si protrassero nel tempo e furono terminati solo nel 1538. Proprio in concomitanza di queste modifiche vi fu la dedica del manufatto a San Salvatore e la trasformazione in chiesa "extra moenia" del Castello di Campi, dopo che questa fu ceduta dai benedettini, nel 1493, alla Comunità di "Campi". Da allora più volte venne danneggiata da altri terremoti e più volte ristrutturata o rabberciata.

Di conseguenza all'ampliamento appena citato, la chiesa si trovò dunque munita di due navate con altrettanti altari, uno per ciascuna navata. Questo è un caso architettonico molto raro e degno di nota, in Italia esistono pochissimi altri esemplari paragonabili a San Salvatore, alcuni esempi possiamo ritrovarli nella Chiesa di Santa Maria in Doblazio presso Pont Canavese o nella Chiesa di Santa Maria Incoronata a Milano, entrambe con doppia navata e due altari.

1.3.2 Esterno



Fig. 5 – Vista esterna della chiesa di San Salvatore pre sisma.

Dall'esterno, a primo impatto, è immediatamente possibile notare la forte disomogeneità della tessitura muraria dovuta dall'ampliamento con la navata di destra del XV secolo [Fig. 5], la porzione più vecchia, a sinistra, vantava una maggiore accuratezza e omogeneità nella disposizione dei conci, mentre quella di destra presenta conci molto più irregolari. Le due navate presenti sono intuibili per via dei due portali di accesso con archi a sesto acuto ricchi di intagli, entrambi sovrastati da due rosoni a trafori. Tuttavia queste navate condividono un'unica facciata ed un'unica copertura a due falde spioventi sorretta internamente da cinque massicci pilastri centrali quadrangolari che furono ricavati dall'antico muro perimetrale destro e, in seguito, divennero elementi divisori tra due navate. Sul portale destro è visibile l'incisione 1491, probabilmente l'anno di completamento dei lavori. Il prospetto presenta uno stretto portico medievale sorretto da un'unica tozza colonna centrale a sezione circolare con un largo capitello, questa piccola copertura correva lungo l'intera facciata. Il portale di destra [Fig. 7] è molto più ricco di dettagli rispetto quelli di sinistra, infatti questo presenta due rincassi con colonnina a spirale, uguali sono invece i rosoni, anche se non sono disposti entrambi alla medesima altezza [Fig. 6].

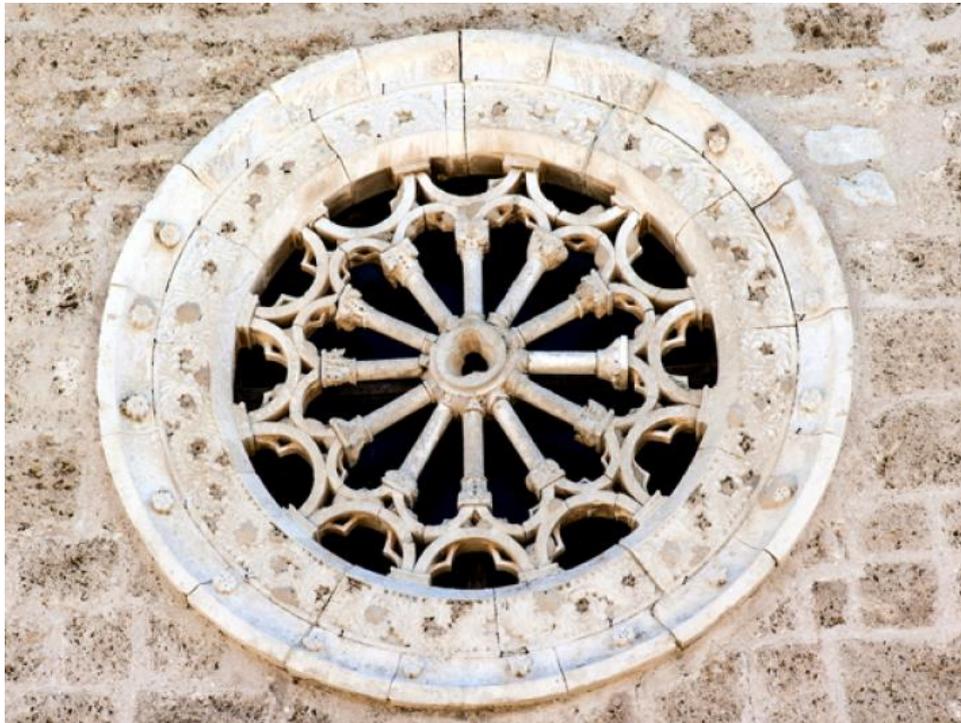


Fig. 6 – Rosone di sinistra.



Fig. 7 – Portale di destra.

Il muro perimetrale di destra, scandito da quattro monofore a sguancio, presenta un andamento a scarpa che termina sul fondo dell'edificio con un'alta torre campanaria costituita interamente da pietre conce ben levigate. La torre, come già accennato, fu iniziata da maestri locali a fine del XV secolo, ma portata a termine da maestri lombardi intorno al 1538; è composta da tre ordini che si innalzavano da un basamento

modanato, con cinque piccole finestre a strombo, è priva di cuspidi, andata distrutta durante il terremoto del 1859.

Da quest'ultima data in poi la chiesa rimase pressoché immutata per più di centocinquanta anni fino al tragico epilogo del 2016, quando in seguito a un forte sisma rimasero in piedi solamente porzioni delle mura perimetrali, alcuni pilastri e il basamento della torre campanaria. Anche il piccolo cimitero adiacente è stato pesantemente danneggiato.

1.3.3 Interno

All'interno, il pavimento più recente ovvero quello della campata di destra, è datato 1528 ed è lastricato a schiazze, cioè con pietre locali rettangolari di varia misura e di diverse tonalità di colore. La parte interna della copertura è caratterizzata da un tetto in coppi solamente in una parte della navata di sinistra, più precisamente dal portale di accesso fino all'iconostasi che divide la medesima navata in due parti pressoché uguali. Il resto della navata assieme a quella di destra è caratterizzato da volte a crociera e costoloni. È presente un fonte battesimale a immersione che poi è stato ricollocato nella casa parrocchiale nei primi anni settanta per proteggerlo dai numerosi furti. Le navate sono due, divise da cinque pilastri, quella di destra è spoglia di qualsiasi decorazione se non per un affresco situato in una nicchia nella parete perimetrale. La navata di sinistra invece è quasi interamente affrescata, dall'iconostasi, costruita nel 1463, fin dietro l'altare. Inciso sul pavimento di questa navata si conserva l'originario progetto della cella campanaria e della cuspidi, questo progetto è in scala reale e sarebbe servito come guida per l'opera degli scalpellini, non fu mai eseguito.

1.3.4 Iconostasi

È situata a metà della navata di sinistra ed è composta da un arco trionfale a tre fornici poggiate su due colonnine tortili ottagonali con capitelli a foglia d'acanto, il prospetto comprende 18 archetti ciechi a tutto sesto, trilobati [Fig. 8]. I benedettini la fecero costruire nell'anno 1463, come riporta un'iscrizione su di essa, e l'anno seguente la fecero decorare dagli stessi artisti che lavorarono a Visso e Norcia: Giovanni e Antonio Sparapane, padre e figlio pittori di origini nursine, come ricorda un'altra iscrizione in cima all'arco centrale. Sull'iconostasi è dipinta l'Annunciazione, la Pietà,

le donne al sepolcro e la Resurrezione, mentre all'interno degli archetti si trovano gli Apostoli e la Madonna con Bambino. La decorazione della parte inferiore dell'iconostasi venne realizzata da Nicola da Siena e Domenico di Jacopo da Leonessa nel 1466, quest'ultimo realizzò anche gli affreschi della volticina di destra che riporta degli angeli recanti i simboli della Passione e Cristo della Messa di S. Gregorio, che con il tempo subì un distacco dalla parete a cui era ancorato, circa una decina di anni fa. Sul lato corto vi sono i Santi Gerolamo, Gregorio Papa e Agostino furono dipinti nel 1493 dopo l'aggiunta della seconda navata.

Tra l'iconostasi e la parete perimetrale sinistra vi è una stretta scala in pietra che consente l'accesso all'attico superiore [Fig. 9] dove era conservato un grande Crocifisso ligneo appeso alla parete e ritenuto miracoloso. Dietro al crocifisso un vasto affresco datato 1446, riemerso dopo il terremoto del 1979, fungeva da sfondo, vi sono rappresentati la Madonna e San Giovanni evangelista con Angeli che raccolgono il sangue di Gesù nei calici e si squarciano le vesti dal dolore.



Fig. 8 – Facciata anteriore dell'iconostasi della chiesa di San Salvatore.



Fig. 9 – Facciata posteriore dell'iconostasi, con la scala in pietra sulla destra.

L'intera struttura dell'iconostasi è stata protetta con una centinatura in legno, realizzata dopo il terremoto del 1979, che non è bastata però a salvarla dall'ultimo sisma del 2016.

Inoltre, nell'altare della navata di destra, negli anni '30 era ubicata una scultura lignea di 1,40 m di altezza rappresentante Sant'Andrea seduto, con la mano destra alzata per benedire, e nell'altra il modello di Campi. Questa scultura venne anch'essa spostata, in data tuttora ignota, nella casa parrocchiale, ritenuta un luogo più sicuro per via dei

numerosi furti che avvenivano in zona in quei periodi, fu poi spostata nuovamente al Museo diocesano di Spoleto, dove si trova tuttora.

1.3.5 Affreschi

Tra gli affreschi è presente la Crocifissione e Maria in Trono tra i Santi Pietro e Paolo [Fig. 10], si tratta di dipinti di fine '300 realizzati da un pittore umbro di scuola spoletina. Sono nella parete di fondo del presbiterio sinistro e nella lunetta che vi confina. La Crocifissione in stile giottesco prende tutta la parete, la scena raffigura a sinistra un piccolo gruppo composto da committenti e trombettieri, alcune pie donne con Maria Addolorata a cui segue un gruppo di soldati, Longino aureolato a cavallo e altri cavalli irrequieti, al centro in basso la Maria Maddalena abbracciata alla Croce, lasciata sola nel suo dolore. Sono invece diversi i due crocifissi laterali, da quello di destra esce un'anima dannata in forma di bambino afferrato da un diavolo, mentre in quello di sinistra l'anima è accolta dagli angeli. Al centro in alto si può ammirare il volto pallido del Cristo morto. Infine ai lati i Benedettini fecero dipingere i loro fondatori e patroni di Norcia, Benedetto e Scolastica, e nella cornice dell'arco, i quattro Evangelisti e i quattro Profeti maggiori con gli episodi della passione.



Fig. 10 – Affresco della crocifissione nella parete in fondo al presbiterio sinistro.

Nel fornice della parete della terza crociera, sopra all'Apparizione di Gesù a Limbo, è rappresentata una semplice Ultima Cena dipinta da Giovanni Sparapane [Fig. 11]; sulla tavola imbandita con focacce ripiene, zuppe e pane, si possono riconoscere una tovaglia perugina, e in piedi sulla destra un servitore in costume medievale.

Vi è inoltre un nicchione [Fig. 12] situato sulla parete perimetrale destra, presenta al suo interno affreschi di anonimo umbro del XVI secolo, una Madonna con Bambino in gloria tra san Giovanni Evangelista, san Pietro e angeli reggicorona, Adorazione del Bambino, Annunciazione, Incoronazione di Maria Vergine. La Madonna in trono col Bambino è dei primi del '400. Anche questo affresco, insolito per colorito e disegno, era stato riportato alla luce dopo il terremoto del 1979. Il bambino ha in mano un uccellino e al collo un corallo.

Sono presenti i quattro dottori della Chiesa: Girolamo, Ambrogio, Agostino e Gregorio dipinti sulle volte della crociera da Antonio Sparapane. Vi è un frammento di Presepio risalente al XV secolo sulla parete absidale di destra, su questo tratto di muro, completamente affrescato, è stata aperta la porta del campanile.

Tutto ciò, una vera e propria antologia pittorica del territorio, rappresentativa del quattrocento nursino, è andato quasi completamente distrutto o gravemente danneggiato durante l'ultimo terremoto del 2016, fa eccezione del primo affresco citato, quello della crocifissione, ed il nicchione, che sono rimasti quasi completamente intatti nonostante l'estrema intensità del sisma.

Tra le decorazioni interne si è salvato anche un grande polittico, questo fu messo al riparo presso la casa parrocchiale per proteggerlo dai furti, fu poi trasferito al Museo Diocesano di Spoleto dove si trova tutt'ora. Originariamente era situato sopra l'altare di sinistra e vi rimase fino ai primi anni settanta, si tratta di un'opera esclusiva di Antonio Sparapane che raffigura Vergine in trono con il Bambino nudo tra S. Andrea e il Battista, S. Caterina d'Alessandria e la Maddalena.



Fig. 11 – Panoramica affreschi navata sinistra.



Fig. 12 – Affresco nel nicchione.

1.3.6 Il sisma del 2016

La chiesa, come già citato, era già stata danneggiata più volte da vari sismi nel corso della sua esistenza, con conseguenti ricostruzioni o rabberciamenti. Attualmente la chiesa è stata completamente distrutta dagli eventi sismici del 2016, lasciandone integri solo pochi elementi quali le pareti perimetrali, alcuni pilastri che dividevano le due navate e il basamento del campanile.

La chiesa venne già danneggiata e dichiarata inagibile dopo il primo forte sisma del 24 agosto che ebbe epicentro ad Accumoli e una magnitudo di 6.0 della scala Richter, nonostante la potenza e la devastazione che produsse la scossa, la distanza di circa 20 chilometri dall'epicentro consentì di limitare i danni alla struttura della chiesa. Tuttavia pochi mesi dopo vi furono altre due intense scosse il giorno 26 ottobre, scosse di magnitudo 5.4 e 5.9 della scala Richter con epicentri rispettivamente a Castelsantangelo sul Nera e Ussita. Fortunatamente non vi furono vittime, ma l'estrema vicinanza della chiesa dagli epicentri determinò il crollo di gran parte della struttura, collassò completamente il tetto e la facciata di ingresso ricoprendo interamente le due navate di detriti e macerie [Fig. 13].



Fig. 13 – Chiesa di San Salvatore dopo le scosse del 26 ottobre 2016.

Infine con l'ultima forte scossa del 30 ottobre, di magnitudo 6.5 ed epicentro a Norcia, crollarono anche gran parte delle mura perimetrali rimaste in piedi e la torre campanaria [Fig. 14].



Fig. 14 – Chiesa di San Salvatore dopo la scossa del 30 ottobre 2016.

1.3.7 Dopo il sisma

Vista l'entità del patrimonio storico artistico che la chiesa di San Salvatore porta con sé, sono immediatamente state attuate delle misure di protezione dei resti e delle macerie della chiesa stessa. Dapprima le rovine sono state protette con mezzi di fortuna, sono stati impiegati dei teli impermeabili per impedire che gli agenti atmosferici danneggiassero ulteriormente la chiesa [Fig. 15], ed in seguito è stata realizzata una imponente struttura metallica che funge tutt'ora da copertura permanente a protezione dell'area [Fig. 16]. La struttura poggia su plinti e cordoli in calcestruzzo armato, realizzati nelle immediate vicinanze dei resti dell'edificio, a questi sono ancorate le colonne che sorreggono la copertura in travi reticolari e lamiera. L'altezza della copertura ha permesso di lavorare agevolmente sul sito, poterlo ripulire dalle macerie e mettere in sicurezza le porzioni di pareti perimetrali sopravvissute. Queste mura sono state principalmente consolidate attraverso opere di carpenteria metallica e lignea, e si è provveduto a mettere in sicurezza le importanti porzioni di affreschi rimaste in modo da poterne prevedere un futuro recupero o reintegro.



Fig. 15 – Chiesa protetta da teli impermeabili immediatamente dopo il sisma.



Fig. 16 – Chiesa protetta dalla copertura metallica.

Sin da subito dopo le prime scosse di agosto era stato avviato lo studio delle opere necessarie alla messa in sicurezza della chiesa, ma non è stato concluso e attuato in tempo. Nei mesi successivi sono stati rinvenuti numerosi elementi di valore tra le macerie, come per esempio il crocifisso ligneo e vasti frammenti di affreschi, che sono stati trasportati nel deposito allestito a Spoleto.

Anche il cimitero adiacente alla chiesa ha riportato notevoli danni [Fig. 17], tuttavia per quest'ultimo non sono stati previsti particolari interventi di salvaguardia e recupero ma è solo stato recintato e ne è stato interdetto l'accesso. Una prima riapertura è stata concessa solo più di un anno dopo il sisma, in occasione della commemorazione dei morti del primo di novembre 2017, tuttavia è stata riaperta solo per la parte più nuova del cimitero, ovvero quella più lontana dalla chiesa.



Fig. 17 – Situazione post terremoto del cimitero.

1.4 La Soprintendenza dell'Umbria

Informazioni più dettagliate sulla situazione di San Salvatore dopo il terremoto sono state reperite tramite contatti diretti con la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio dell'Umbria (SABAP - Umbria). Sono entrato in contatto con chi di dovere della Soprintendenza per valutare l'effettiva situazione del manufatto allo stato attuale e per sondare quali fossero i possibili progetti per il futuro della chiesa stessa.

Non essendo stati forniti contatti precisi come primo riferimento mi sono rivolto alla SABAP - Umbria, da qui sono stato messo in contatto con i diversi membri che hanno collaborato per coordinare gli interventi su San Salvatore sin dai giorni immediatamente seguenti ai sismi. Sono stato messo in contatto particolarmente con architetti e restauratori che hanno seguito le operazioni di rimozione, catalogazione, conservazione delle macerie e messa in sicurezza del sito. Grazie a questi numerosi contatti, in particolare tramite l'Arch. Stefania Argenti dell'Istituto Superiore di Conservazione e Restauro, si è riuscito a delineare un preciso quadro della situazione della chiesa.

È stato rimosso il 95% delle macerie rinvenute sul sito ad esclusione di un restante 5% situato nell'area sottostante all'iconostasi, area difficile da raggiungere per via della presenza delle massicce centine lignee realizzate a fine anni '70 che tutt'ora non sono state rimosse. Tutto il materiale è stato catalogato, sono stati rinvenuti numerosissimi frammenti degli affreschi della chiesa (alcuni anche grandi porzioni), sono stati portati in salvo anche diversi elementi lapidei scolpiti, catalogati tutti i conci della torre campanaria ed infine il materiale incongruo è stato portato in discarica. Tutti gli altri elementi sono stati conservati nel deposito Santo Chiodo di Spoleto, dove tra l'altro sono anche conservate altre porzioni di affreschi che erano state staccate e trasportate su tela in occasione di restauri dei primi anni Cinquanta del secolo scorso.

1.4.1 Un modello tridimensionale per San Salvatore

Inoltre l'Arch. Argenti ha chiaramente espresso che si sta lavorando per un progetto di ricollocazione dell'iconostasi nella sua posizione originale, per via dei

numerosi affreschi ed elementi lapidei rinvenuti dopo il crollo. I lavori per questo progetto saranno presi in considerazione nel periodo successivo all'estate 2019.

L'architetto ha dunque mostrato un estremo interesse verso il progetto di tesi che preveda l'elaborazione di un modello tridimensionale per la chiesa di San Salvatore, ritenendo che possa essere di grande utilità come *incipit* per la futura progettazione.

In seguito si è proceduto richiedendo ulteriore documentazione e materiale su San Salvatore, da aggiungere a quello già in possesso. Si è inoltre cercato di comprendere quali fossero i dati e gli aspetti che più desiderasse reperire l'Architetto per gli sviluppi del progetto, in modo da creare un modello più coerente possibile in base alle effettive necessità.

Ottenuto ulteriore materiale dalla Soprintendenza, si è potuto appurare che questo non costituisse nulla di più di quanto fossimo già in possesso, ovvero documentazioni fotografiche. Non è stato possibile reperire alcun rilievo della chiesa nel periodo precedente al terremoto in quanto dopo gli eventi sismici la magistratura ha predisposto il sequestro di tutta la documentazione sulla chiesa, e la guardia di Finanza ha requisito tutto ciò che era in possesso della Soprintendenza.

CAPITOLO 2

I DATI METRICI E LA LORO GESTIONE

2.1 Tecniche di rilievo per i beni architettonici e culturali

Quando si parla di tecniche di rilievo per i beni architettonici e culturali si entra in un campo in continua evoluzione, ogni anno si portano innovazioni tecnologiche che consentono di migliorare e implementare le precedenti tecniche.

Tali metodologie sono al giorno d'oggi indispensabili nelle azioni di intervento su beni esistenti, prima di intervenire su un manufatto, quale che sia, è fondamentale conoscere, comprendere e interpretare correttamente l'elemento oggetto di studio. Queste tecniche risultano di grande importanza nelle fasi preliminari di progettazione per l'acquisizione di dati accurati, affidabili, e facilmente utilizzabili da tutte le tipologie di utenze.

Da questa esigenza progettistica si è giunti al rilievo metrico, che consiste in un processo in grado di rappresentare un manufatto esistente, riportando le caratteristiche fondamentali dell'oggetto in un sistema di rappresentazioni. Rappresentazioni che in questo caso sono principalmente riguardanti le dimensioni, forme e posizione dell'oggetto.

Il rilievo metrico si suddivide sostanzialmente in due grandi categorie, il rilievo diretto e quello indiretto. I due si distinguono per via della strumentazione e della metodologia impiegata:

- rilievo diretto: consiste nell'acquisire le misure direttamente sull'oggetto di studio, richiede strumenti molto semplici e fornisce risultati immediati ed

accurati, tuttavia non è adatto per aree di grandi dimensioni date le lunghe tempistiche richieste per l'acquisizione, né per oggetti degradati;

- il rilievo indiretto: si caratterizza con misurazioni che vengono effettuate attraverso l'ausilio strumenti ottici o meccanici che non sono a contatto diretto con l'oggetto, ma ne ricavano le misure indirettamente tramite delle serie di calcoli più o meno complessi in base al tipo di strumentazione impiegato. A fine del processo si ottiene una traduzione grafica degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali.

Quest'ultima tecnica si è evoluta enormemente seguendo l'innovazione tecnologica e garantisce un'estrema accuratezza nelle misurazioni e tempi di acquisizione estremamente rapidi, oltre a fornire la possibilità di coprire facilmente vaste aree e di poter raggiungere luoghi non accessibili per poter condurre un rilievo diretto.

L'utilizzo di una di queste tecniche di rilievo è strettamente correlato alla tipologia di oggetto che deve essere analizzato, è fondamentale stabilire una scala di lavoro in modo da utilizzare gli strumenti di acquisizione più adeguati a tale scopo.

In genere le scale di lavoro sono suddivise in tre classi: scala regionale, scala locale e scala oggetto [Fig. 18].

Scala del rilievo	Oggetti da rilevare	Tecnologia di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree Radar LiDAR
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar LiDAR Laser scanner Immagini terrestri Stazione totale
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione Immagini a luce strutturata Scanner 3D manuali

Fig. 18 – Tabella scale di rilievo.

Con queste tecniche è possibile generare modelli con posizioni spaziali dei punti rilevati, contenenti anche le caratteristiche qualitative dei punti, come per esempio il tono radiometrico di ogni punto, che va a descrivere i colori dell'oggetto in esame tramite l'informazione RGB.

2.1.1 La tecnica LiDAR

L'acronimo LiDAR (Light Detection And Ranging) indica una tecnica di rilevamento che permette di determinare la distanza di un determinato oggetto tramite l'impiego un impulso laser, dunque l'impiego di onde elettromagnetiche. Attraverso il calcolo del tempo impiegato dall'onda emessa e il suo ritorno, chiamato tempo di volo, è possibile di determinare la distanza esatta del punto. Questi strumenti di emissione laser prendono nome di laser scanner e presentano al loro interno sensori ottici attivi dotati di un emettitore e un ricevitore capace di captare la luce laser. Vi sono sostanzialmente due tipologie di laser scanner:

- Laser scanner a triangolazione: prevedono l'utilizzo di un singolo *spot* di luce laser e consentono di ottenere un'elevata precisione nelle operazioni di misura entro distanze limitate [Fig. 19].

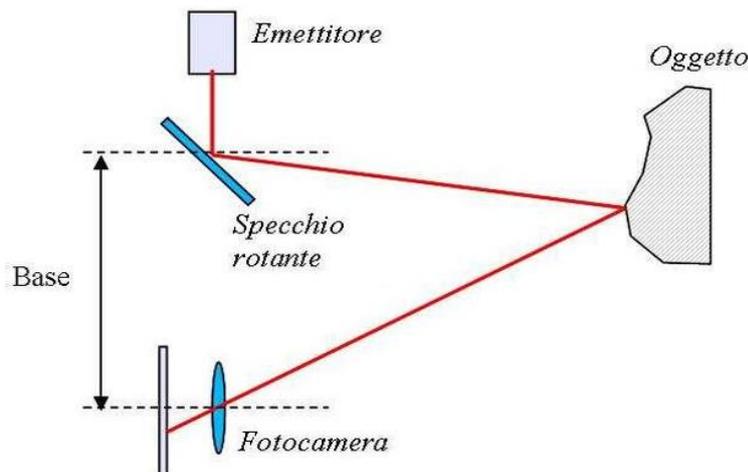


Fig. 19 – Schema di funzionamento del laser scanner a triangolazione.

- Laser scanner distanziometrico: consentono di effettuare il rilievo di manufatti a scala architettonica, la loro incertezza di misura dipende dalla distanza di acquisizione. In questi strumenti viene misurata con estrema accuratezza la direzione di puntamento, relazionata alla distanza del punto. Tale distanza è

valutata tramite il tempo di volo tra lo strumento e la superficie analizzata, ciò permette di definire le coordinate tridimensionali dell'oggetto scansionato dal laser [Fig. 20].

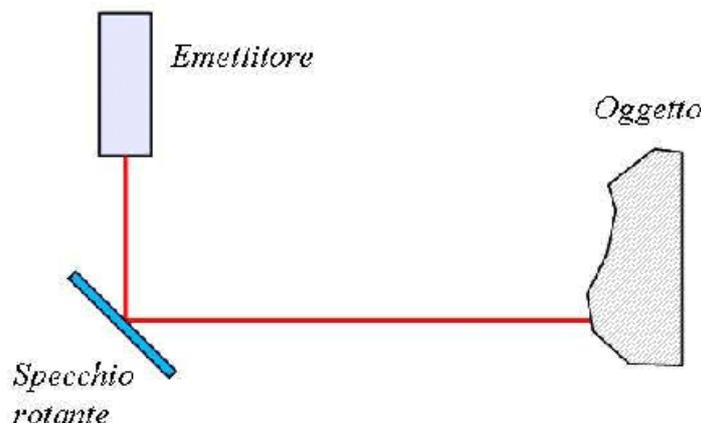


Fig. 20 – Schema di funzionamento del laser a tempo di volo.

Il prodotto di entrambe le operazioni, indipendentemente dalle due tipologie di laser scanner, è il medesimo. Il dato di output generato consiste in una nuvola di punti caratterizzata da *file* composti da stringhe con valori che descrivono le tre coordinate spaziali x , y e z di ciascun ogni punto. In più si possono trovare altri valori che descrivono ulteriori informazioni, dipende alla tipologia di laser scanner e dell'utilizzo previsto per tali acquisizioni.

2.1.2 La tecnica fotogrammetrica

La fotogrammetria è un procedimento che consente di ricavare le dimensioni e la posizione di un oggetto nello spazio tramite le immagini acquisite dello stesso. È una metodologia che presenta modalità di acquisizione estremamente rapide, in grado di acquisire una notevole mole di dati e fornire informazioni spaziali tridimensionali complete di geometrie anche molto complesse. Al contempo questi vantaggi in fase di acquisizione sono compensati da lunghi tempi di elaborazione dei dati, necessari per la realizzazione e pulizia delle nuvole di punti.

Questo procedimento è possibile tramite l'utilizzo di più fotogrammi in cui sono presenti i medesimi punti che si ripetono, detti punti omologhi.

Se un singolo punto di un oggetto è presente all'interno di almeno due immagini con due punti di presa diversi, tramite le equazioni di collinearità è possibile ricavare la posizione del punto nello spazio. Per fare ciò è necessario conoscere in partenza i parametri di orientamento e di calibrazione della camera che acquisisce l'immagine. Di seguito si riporta uno schema di come due fotogrammi che ritraggono il medesimo soggetto con due punti di presa diversi (O' e O'') possano descrivere l'oggetto nella sua tridimensionalità [Fig. 21].

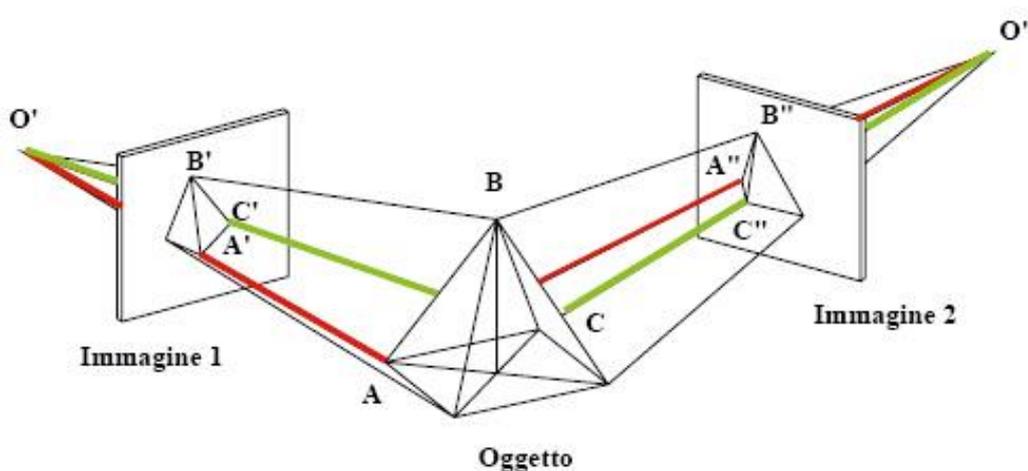


Fig. 21 – Schema di ricostruzione di un oggetto tridimensionale.

La tecnica fotogrammetrica nasce come fotogrammetria terrestre, utilizzata in principio per rilevamenti topografici accurati, e realizzata con acquisizione tramite camere che possono essere montate su treppiedi o anche utilizzate a mano libera da un utente.

In generale questa tecnica è stata in gran parte soppiantata dalla più moderna fotogrammetria aerea. Questa consiste nell'installare le camere di presa su velivoli o, più comunemente negli ultimi anni, a bordo di aeromobili a pilotaggio remoto, comunemente noti come droni ma identificati nel gergo tecnico come UAV (Unmanned aerial vehicle). Gli UAV possono presentare principalmente due tipi di velivoli, a da ala fissa, più pratici per essere impiegati su aree molto estese e ad altitudini più elevate, oppure dotati di una serie di rotori a elica che consentono una maggiore maneggevolezza e una grande capacità di muoversi in spazi ristretti.

2.1.3 Applicazioni nel caso di studio

Nel caso della chiesa di San Salvatore, sono stati impiegate due metodologie di rilievo diverse, affinché si integrassero per fornire una documentazione completa del manufatto. È infatti stata impiegata sia la tecnica LiDAR tramite l'utilizzo di un laser scanner, sia la tecnica fotogrammetrica tramite l'impiego di droni e camere terrestri. Infatti, nonostante l'adeguatezza delle strumentazioni impiegate, spesso si manifestano zone di ombra nelle quali lo strumento non riesce ad acquisire dati, nel nostro caso il laser scanner non era in grado di rilevare aree come le coperture ed il cimitero adiacente alla chiesa. La tecnica fotogrammetrica è venuta in aiuto, acquisendo queste aree mancanti, garantendo così una copertura completa dell'area di studio della chiesa.

2.2 Dati forniti da rilievi

I rilievi condotti il 5 settembre 2018 sono stati realizzati da un *team* studentesco del Politecnico di Torino che ha effettuato le acquisizioni attraverso l'impiego di diverse tecnologie e strumentazioni.

2.2.1 Il team DIRECT

Il team DIRECT (*Disaster Recovery Team*) è un team che prende vita grazie a studenti delle aree di architettura e quelle di ingegneria edile del Politecnico di Torino. Nasce con l'obiettivo di creare una formazione studentesca continua nel tempo atta ad operare nel campo delle tecnologie avanzate del rilievo metrico tridimensionale e del telerilevamento con tecniche innovative.

Il lavoro di questo Team viene messo a disposizione in occasione di emergenze ambientali, come nel nostro caso a causa degli eventi sismici del centro Italia, ma anche per intervenire su beni soggetti a emergenze ordinarie e continue.

Le attività svolte dal gruppo comprendono sia una parte di formazione in ateneo con lezioni tenute da tutor, sia una di stage formativo che avviene direttamente sui luoghi dove vengono realizzati i rilievi.

Questo team specializzato ha condotto assieme al professor Andrea Lingua tutti i rilievi della chiesa di San Salvatore, in un sopralluogo effettuato il 5 settembre 2018.

Tutti i dati trattati nelle seguenti pagine di tesi sono stati raccolti dagli studenti che sono intervenuti sul posto, attraverso l'impiego della strumentazione professionale in possesso del dipartimento DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture) del Politecnico di Torino.

2.2.2 Strumentazione

I dati forniti dal team DIRECT, in seguito ai rilievi della chiesa di San Salvatore, sono di due tipi: dati fotogrammetrici e nuvole di punti.

Dati ottenuti tramite diverse strumentazioni, per quanto riguarda la fotogrammetria sono stati impiegati ben quattro strumenti di acquisizione diversi:

Fotocamera reflex Canon EOS 5DS R:



Canon EOS 5DS R	
Sensore	CMOS Fullframe
Distanza focale	20 mm
Pixel effettivi	50,6 megapixel
Risoluzione	8688 x 5792 pixel

Fig. 22 – Specifiche Canon EOS 5DS R.

Fotocamera mirrorless Panasonic Lumix DMC-GF3:



Panasonic Lumix DMC-GF3	
Sensore	4/3 MOS
Distanza focale	14 mm
Pixel effettivi	12 megapixel
Risoluzione	4000 x 3000 pixel

Fig. 23 – Specifiche Panasonic Lumix DMC-GF3.

Drone DJI Spark con fotocamera FC1102:



DJI Spark	
Sensore	CMOS 1/2.3"
Distanza focale	4 mm
Pixel effettivi	12 megapixel
Risoluzione	3968×2976 pixel

Fig. 24 – Specifiche DJI Spark.

Drone DJI Phantom 4 Pro con fotocamera FC6310:



DJI Phantom 4 Pro	
Sensore	CMOS 1"
Distanza focale	8,8 mm
Pixel effettivi	20 megapixel
Risoluzione	5472×3648 pixel

Fig. 25 – Specifiche Phantom 4 Pro.

Per quanto riguarda la acquisizione tramite tecnologia LiDAR è stato invece impiegato un unico laser scanner, Laser scanner FARO Focus 3D CAM 2:



FARO Focus3D CAM 2	
Range operativo	0,6 - 130 m
Distanza focale	± 2 mm
Velocità acquisizione	976'000 pt/sec
Risoluzione immagini	70 megapixel

Fig. 26 – Specifiche FARO Focus 3D CAM 2.

2.2.3 Precisione di scala e GSD

Innanzitutto è stata valutata la precisione che l'elaborato deve presentare. Questa è stata calcolata in base alla scala di rappresentazione finale scelta, nel nostro caso si è scelta una scala di restituzione di 1:100, congrua per descrivere un oggetto di tali dimensioni. Dunque si valuta la precisione σ :

$$\sigma = 0.2 \text{ mm} * n = 0,2 \text{ mm} * 100 = 20 \text{ mm}$$

dove n è il valore della scala di restituzione.

La GSD di progetto corrisponde a $\frac{\sigma}{2} = \frac{20 \text{ mm}}{2} = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$.

E la tolleranza ρ :

$$\rho = \sigma * 2 = 20 \text{ mm} * 2 = 40 \text{ mm}$$

I due valori di precisione (20 mm) e tolleranza (40 mm) sono stati presi come riferimento per la realizzazione del rilievo.

In secondo luogo è stata valutata la GSD, acronimo di *Ground Sample Distance*, che indica qual è la dimensione del terreno rappresentato all'interno di un pixel. la GSD corrisponde all'elemento più piccolo identificabile e misurabile in un'immagine digitale, ovvero il singolo pixel.

La GSD è un parametro strettamente correlato all'altezza di volo in quanto in base a questa altezza variano le dimensioni rappresentata in un pixel e di conseguenza la precisione che si può assumere. La formula per il calcolo del GSD è la seguente:

$$GSD = \frac{H \cdot d_{ptx}}{d}$$

dove:

- H è l'altezza di volo;
- d_{ptx} è la dimensione del pixel;
- d è la distanza focale.

Per l'acquisizione fotogrammetrica aerea sono stati utilizzati i droni Phantom 4 Pro e Spark, con cui sono state realizzate sia foto nadirali che inclinate di 45°.

I voli eseguiti con il Phantom presentano un'altezza di volo pari a 30 m. Il sensore della fotocamera è da 1 pollice che equivale a 13,2 mm x 8,8 mm. Dunque sul lato lungo del sensore, di dimensioni 5472 x 3648 pixel, avrò pixel di una dimensione data da: $13,2 \text{ mm} / 5472 = 0,00241 \text{ mm} = 2,4 \text{ }\mu\text{m}$. Assieme alla distanza focale pari a 8,8 mm si ottiene una GSD pari a 0,87 cm.

Per il drone Spark invece si ha un'altezza di volo di 20 m. In questo caso il sensore da 1/2,3" ha dimensioni di 6,17 mm x 4,55 mm e con risoluzione 5472 x 3648 ho la dimensione di un pixel uguale a: $6,17/3968 = 0,0016 = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$.

Con una focale di 4 mm ho una GSD pari a 0,8 cm.

Visto che i valori delle GSD calcolate risultano inferiori alla GSD di progetto, pari alla metà della precisione, tali valori sono considerati accettabili.

2.2.4 Trattamento preliminare dati

In primo luogo tutte le immagini fornite sono state visionate e analizzate, è stato necessario eliminare manualmente i fotogrammi non consoni all'utilizzo quali:

- fotogrammi sfocati;
- fotogrammi in movimento;
- fotogrammi che non inquadrano l'oggetto caso di studio;
- fotogrammi doppi.

La norma prevede che, per ottenere un valido rilievo fotogrammetrico, l'acquisizione delle immagini avvenga attraverso delle strisciate continue che ricoprano per intero l'oggetto del rilievo con una sovrapposizione tra queste di almeno il 60% del fotogramma affinché sia possibile avere il numero necessario di punti da prendere in considerazione per collimare tra di loro tutti i fotogrammi sovrapponendo queste zone. In generale, nei dati ricevuti dal rilievo, questo procedimento è stato seguito in maniera rigorosa durante l'acquisizione di quasi tutti gli elementi dell'edificio, l'unica eccezione è stata fatta per le acquisizioni della pavimentazione interna della chiesa. Queste prese, essendo state realizzate attraverso il drone Spark con un angolo di presa nadirale, non presentano il ricoprimento minimo del 60%, ciò è stato impedito dalla ridotta altezza di volo del drone che è stato costretto a muoversi al di sotto della

copertura metallica eretta a protezione dei resti della chiesa, in questo caso fortunatamente si è riusciti ugualmente a collimare quasi tutte le immagini necessarie come sarà meglio illustrato nei passaggi successivi.

2.2.5 Suddivisione dei dati per strumento di acquisizione

Tutti i fotogrammi sono stati divisi in cartelle distinguendoli in base al mezzo di acquisizione impiegato, in seguito alcune cartelle sono state ulteriormente suddivise in sottocartelle in modo da separare specifiche parti della chiesa quali: Pareti Esterne, Pareti Interne, Pavimentazione. Schematicamente le cartelle sono così suddivise:

- Drone Phantom:
 - viste di inquadramento area;
- Fotocamera Canon:
 - pareti interne;
 - pareti esterne;
- Drone Spark:
 - pareti interne;
 - pareti esterne;
 - pavimentazione;
- Fotocamera Lumix:
 - affresco parete interna.

Si può notare che la prima cartella contiene le acquisizioni effettuate con la tecnica della fotogrammetria aerea tramite il drone Phantom. Il drone è stato utilizzato per realizzare delle strisciate di fotogrammi in grado di ricoprire l'intera area circostante alla chiesa di San Salvatore per circa cinque ettari. Oltre la chiesa, sono state acquisite immagini riguardanti il cimitero accanto San Salvatore, il piazzale di accesso, la strada provinciale 476 che passa accanto al complesso ed infine anche i campi agricoli che la circondano. Le strisciate sono state effettuate sia con angolo di presa nadirale, dunque a 90° rispetto alla verticale [Fig. 27], sia con un angolo di presa di 45° [Fig. 28]. Il primo ci consente di avere immagini chiare e poco distorte degli elementi orizzontali, mentre il secondo ci consente di scorgere le fattezze degli elementi verticali non visibile con la presa perpendicolare al terreno. Sono di seguito riportati due esempi delle due tipologie di fotogrammi catturati.



Fig. 27 – Esempio fotogramma drone Phantom – presa 90°.



Fig. 28 – Esempio fotogramma drone Phantom – presa 45°.

Nella seconda cartella troviamo le immagini fornite dalla fotocamera Canon, sono state suddivise in due sottocartelle che distinguono le prese delle pareti esterne della chiesa da quelle delle pareti interne.

Anche in questo caso sono state effettuate delle strisciate di fotogrammi, realizzate tramite la fotogrammetria terrestre. Le strisciate non sono lineari come quelle acquisite tramite il drone Phantom, per via dell'utilizzo a mano libera della camera da parte dell'utente, che è stato vincolato dagli ostacoli presenti sul suolo circostante la chiesa durante lo scatto. Nonostante ciò le immagini non presentano problemi e si prestano perfettamente per essere utilizzate nelle successive fasi di allineamento. Riportiamo anche in questo caso due esempi di fotogrammi acquisiti rispettivamente dall'esterno [Fig. 29] e dall'interno della chiesa [Fig. 30].



Fig. 29 – Esempio di presa esterna con Canon.



Fig. 30 – Esempio di presa interna con Canon.

Nella terza cartella troviamo le foto realizzate attraverso il drone Spark, questo drone, più piccolo e agile del drone Phantom, ha permesso di effettuare delle prese esterne [Fig. 32] dell'oggetto a distanze più ravvicinate di quelle viste nella prima cartella. Infatti in queste prese ci si è concentrati solo sui resti della chiesa tralasciando il cimitero e gli altri spazi adiacenti.

Il vantaggio delle piccole dimensioni del drone Spark ha consentito di volare all'interno della chiesa al di sotto della copertura metallica. Questi voli ci hanno permesso di estrarre strisciate di immagini che raffigurano le pareti interne [Fig. 31] e la pavimentazione con prese a 90° rispetto al suolo [Fig. 33]. Si riportano tre esempi delle tre tipologie di prese: esterne, interne e della pavimentazione.



Fig. 31 – Esempio di presa Esterna con Spark.



Fig. 32 – Esempio di presa interna con Spark.



Fig. 33 – Esempio di presa dei Pavimenti con Spark.

L'ultima cartella infine contiene i fotogrammi realizzati con la fotocamera Lumix. Tramite questa fotocamera ci si è concentrati su un affresco presente nel nicchione ricavato nella parete perimetrale destra della chiesa [Fig. 34]. Le prese sono state effettuate manualmente da terra con estrema facilità, l'area antistante l'affresco è sgombera e priva di ostacoli. Anche in questo caso riportiamo un esempio di fotogramma acquisito.



Fig. 34 – Esempio di presa dell'affresco con Lumix.

I fotogrammi appena illustrati, ripuliti da eventuali elementi non congrui, e divisi in cartelle, sono pronti per passare alla fase di elaborazione.

CAPITOLO 3

L'ELABORAZIONE DEI DATI

3.1 Creazione delle nuvole di punti

In questo capitolo si tratterà dell'elaborazione delle nuvole di punti partendo dai dati acquisiti durante il rilievo di San Salvatore. Verranno presi in considerazione sia i dati fotogrammetrici che sono stati illustrati nel capitolo precedente, sia i dati acquisiti tramite laser scanner. Si produrranno nuvole di punti dense georeferenziate, che serviranno come base per la realizzazione del modello tridimensionale della chiesa. Per questi processi sono stati utilizzati due *software*, uno per ciascuna tipologia di dato:

- Agisoft PhotoScan: impiegato per la realizzazione delle nuvole di punti ricavata dai dati del rilievo fotogrammetrico;
- Faro Scene: impiegato per la realizzazione delle nuvole di punti partendo dai dati delle acquisizioni tramite laser scanner.

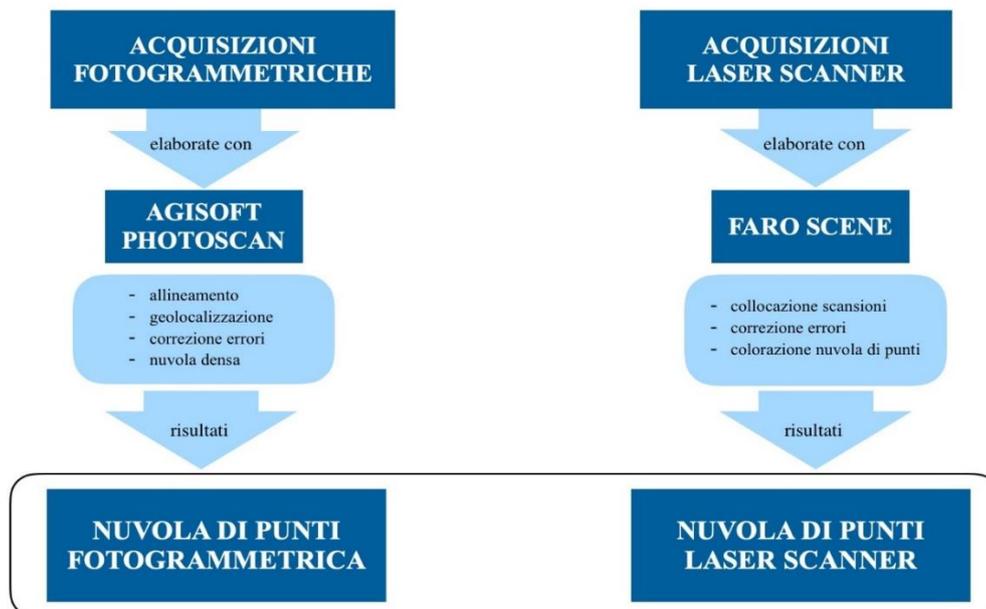


Fig. 35 – Flow chart del capitolo di elaborazione.

3.2 Il software Agisoft PhotoScan

Il *software* PhotoScan, sviluppato da Agisoft, ed è uno strumento impiegato per l'elaborazione di dati fotogrammetrici nel campo ingegneristico e architettonico. Il programma permette di elaborare, partendo da fotogrammi, nuvole dense di punti, *mesh* e *texturizzazioni*.

Infatti il *software* consente l'individuazione, in maniera del tutto automatica, di punti omologhi all'interno delle immagini e li correla tra loro, ricavando i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa nello spazio tridimensionale per ciascun fotogramma. Grazie a questo procedimento il *software* elabora e restituisce una prima nuvola di punti, attraverso la quale è possibile verificare che l'allineamento sia stato eseguito correttamente e se necessario correggere le eventuali incongruenze. È possibile georeferenziare le nuvole facendo riferimento alle coordinate di punti contrassegnati da *marker* in fase di rilievo, di cui sono rilevate le coordinate. Fatto questo il programma consente di creare una nuvola densa di punti, e se necessario *mesh* e *texturizzazioni*.

Il programma è inoltre in grado di processare elevati numeri di fotogrammi, mantenendo tempistiche di elaborazione proporzionali al carico di lavoro assegnatogli. I risultati garantiscono una elevata accuratezza e flessibilità di formato di esportazione. Nel nostro caso si è seguito il seguente procedimento:

- allineamento fotogrammi;
- geolocalizzazione *marker*;
- collimazione dei *marker*;
- valutazione errori;
- riallineamenti e correzioni;
- creazione della nuvola densa.

3.2.1 Allineamento fotogrammi

Le immagini vengono importate suddivise in varie sottocartelle descritte nel paragrafo 2.2.4, per fare ciò basta trascinare le cartelle nell'area dedicata della schermata. In figura 36 si possono notare tutte le sette cartelle descritte, queste

all'interno del programma vengono chiamate *chunk*, d'ora in poi utilizzeremo questo termine per definirle.

Il primo passaggio è quello di realizzare un primo allineamento di questi fotogrammi, selezionando il *chunk* di interesse e scegliendo la voce *Workflow - Align Photos*. Qui sarà possibile scegliere i vari settaggi per ottenere il tipo di allineamento desiderato. Il parametro più importante è quello della Accuracy, che indica l'accuratezza nella stima della posizione delle camere e ricostruzione.

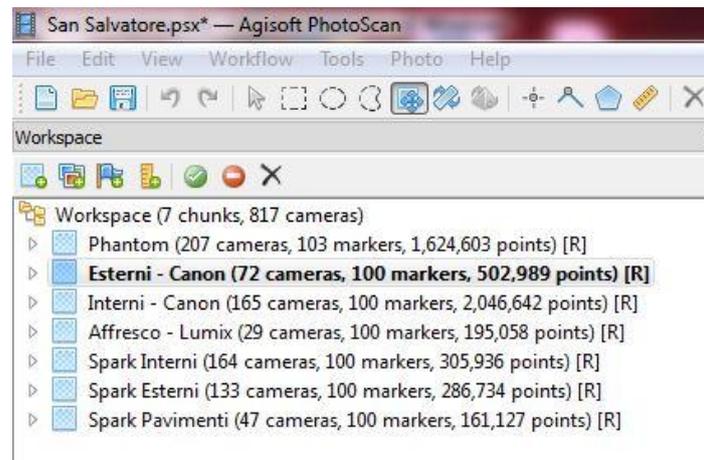


Fig. 36 – Chunk con fotogrammi importati su PhotoScan.

Selezionando da *lowest* ad *highest* la risoluzione delle immagini analizzate e di conseguenza aumentano i tempi richiesti dal processing. Inoltre si possono selezionare diverse impostazioni tra cui:

- *Pair selection*: è la voce che riguarda il *matching* delle immagini dove si danno indicazioni sulle coppie di immagini tra cui ricercare le due tipologie di corrispondenze;
- *Generic*: si confrontano prima le immagini a bassa risoluzione per capire quali si sovrappongono e poi si passa alla risoluzione originale;
- *Reference*: si usa la posizione delle immagini, se nota da *exif file*.

Le impostazioni avanzate presentano le seguenti scelte:

- *Keypoint limit* e *Tie point limit*: sono i valori che definiscono i limiti nella numerosità di punti notevoli da identificare nelle immagini, e sui punti di

legame da usare nell'allineamento. Il valore 0 indica che tutti i punti identificabili ed identificati sono utilizzati allo scopo. Se ho impostato un limite sui punti di legame pari a 4.000, anche se per ogni immagine il *software* identifica 10.000 possibili punti di legame con le altre immagini, solo i 4.000 migliori, quelli con la maggior probabilità di dare un matching corretto, sono effettivamente utilizzati.

- *Constrain feature by mask*: selezionare eventuali maschere create per escludere aree dalla procedura di allineamento.
- *Adaptive camera model*: opzione che permette di settare automaticamente i parametri interni della fotocamera da inserire nell'*adjustment* in base alla loro affidabilità. Se il *dataset* ha una geometria forte, questa opzione ottimizza più parametri, se la geometria è debole, aiuta a prevenire divergenze di alcuni parametri (per esempio *radial distortion* se l'oggetto rilevato è piccolo e al centro delle immagini, posizione del punto principale se le prese sono state effettuate su linee parallele).

Nel nostro caso non sono state utilizzate le impostazioni avanzate ma è stata solo scelta la risoluzione *high* e il *Pair Selection: Generic*.

L'allineamento serve a posizionare correttamente le immagini le une rispetto alle altre ciò avviene tramite i principi base della fotogrammetria.

Un'immagine acquisita è una matrice da righe e colonne e delimitano i pixels, su ciascun fotogramma opera un algoritmo di *features detection* che permette di identificare punti notevoli e caratteristici, chiamati descrittori. Sono punti che rimangono identificabili e distinguibili indipendentemente dal variare della scala di acquisizione, dalla direzione di presa e dalle condizioni di illuminazione.

Questi algoritmi di *features detection* permettono di identificare in modo automatico migliaia di descrittori per ogni immagine, svincolandosi dal rigore delle geometrie di presa. Ogni descrittore è univoco poiché caratterizzato dal comportamento radiometrico dell'immagine nel suo intorno, questi punti costituiscono per l'appunto i punti di legame (o punti omologhi) che permettono il posizionamento reciproco dei fotogrammi.

Una volta determinati i punti di legame si impostano e risolvono le equazioni di collinearità, che fanno da ponte tra lo spazio immagine bidimensionale e lo spazio reale tridimensionale, mettendo in relazione:

- posizione nello spazio immagine del punto di legame;
- parametri di calibrazione della fotocamera;
- parametri esterni della fotocamera (posa e orientamento);
- coordinate nello spazio reale del punto di legame.

I principi base della fotogrammetria tradizionale ricordano che un generico punto P deve essere ritratto in almeno 2 immagini per poter essere ricostruito in 3D (quindi coordinate immagine note in due fotogrammi, 4 equazioni e le 3 coordinate incognite). In questo caso uno stesso punto di legame P è visto in tante immagini (per l'elevata ridondanza di dato in fase di rilievo), in ogni immagine sono identificati migliaia di punti di legame, tutti i parametri interni ed esterni della fotocamera sono incogniti e sono individuati dal *software* che come *output* ci fornisce:

- posizione e posa delle fotocamere;
- parametri di calibrazione e distorsione della fotocamera;
- nuvola sparsa, ossia le coordinate 3D dei punti di legame;
- stima della precisione.

Gli *output* sono restituiti nel sistema di riferimento delle immagini importate, nel nostro caso le immagini non fanno riferimento a uno specifico sistema di riferimento, dunque viene utilizzato un sistema di riferimento arbitrario scelto dal *software*. Modificheremo in seguito questo sistema nel prossimo paragrafo.

Al termine del processo di allineamento viene quindi mostrata la nuvola sparsa, nella sua visualizzazione tridimensionale. Si notano anche le posizioni dei punti di presa dei fotogrammi con i rispettivi piani di inclinazione, indicati da rettangoli blu [Fig. 37].

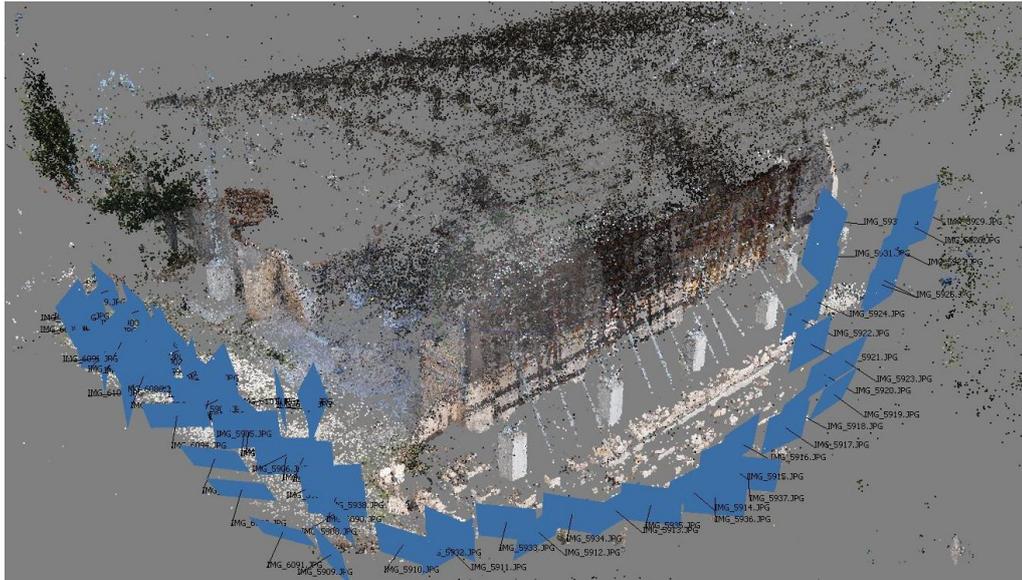


Fig. 37 – Nuvola di punti sparsa con prese fotografiche – Canon Esterni.

In questa fase è possibile che alcuni fotogrammi di un *chunk* non vengano allineati automaticamente, in quanto il programma può trovare nelle incongruenze tra i fotogrammi e non gli consente di procedere con l'allineamento. Questo problema si è presentato più volte quando si ha fine di una strisciata di immagini e l'inizio di un'altra, problemi possono essere risolti, anche questo verrà visto nel paragrafo 3.1.3.

Tutti i *chunk* presenti sono stati allineati con risoluzione di livello *High*, allineamenti con risoluzioni inferiori sono stati utilizzati esclusivamente in fase di prova, si sono rivelati utili nel valutare la coerenza di alcuni modelli riducendo sensibilmente le tempistiche di elaborazione.

3.2.2 Geolocalizzazione e collimazione dei marker

Le nuvole sparse ottenute, come accennato nel paragrafo precedente, sono orientate nello spazio tridimensionale secondo un sistema di riferimento scelto automaticamente e in modo arbitrario da PhotoScan. Ora è quindi necessario procedere georeferenziando l'intero modello nello spazio reale.

Per fare ciò è necessario utilizzare punti di appoggio contrassegnati da *marker* [Fig. 38], per i quali sono note le coordinate reali in quanto acquisite in fase di rilievo tramite GPS/GMSS. Tali coordinate sono elaborate mediante la tecnica fotogrammetrica assieme a tutti i dati fotogrammetrici, e sono visualizzabili nell'ALLEGATO n° 1.

Per avere risultati robusti i punti contrassegnati dovrebbero essere distribuiti uniformemente sullo spazio tridimensionale dell'intero oggetto del rilievo. Quando ciò non è possibile, per problemi di accessibilità o per via della morfologia dell'oggetto, si cercano elementi ben visibili e distinguibili su cui fare riferimento. Nel nostro caso è stato necessario prendere come riferimento diversi spigoli di gronde o colmi di coperture dei quali sono state misurate le coordinate mediante stazione totale.

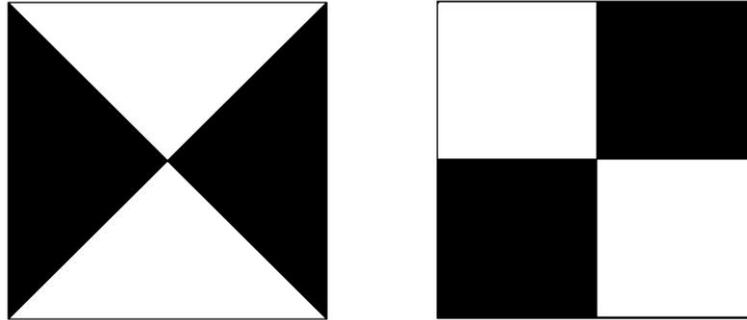


Fig. 38 – Esempi di marker impiegati durante il rilievo.

Per procedere con la georeferenziazione si importano le coordinate reali fornite in formato *.txt* tramite il comando *Import*, nella finestra *Reference*, e si indica inoltre la tipologia di coordinate inserite che nel nostro caso sono WGS 84/UTM in riferimento al fuso 33 [Fig. 39].

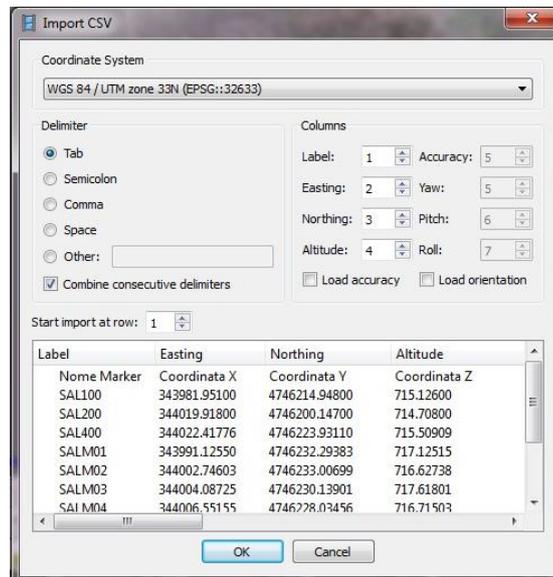


Fig. 39 – Esempi di marker impiegati durante il rilievo.

Una volta impostato il sistema di coordinate si iniziano a correlare i punti di coordinate reali ad i rispettivi *marker* visibili sulle immagini, il processo è molto semplice ed intuitivo, per di più, dopo aver posizionato i primi tre punti, PhotosScan riconosce in automatico l'orientamento della nuvola e colloca tutti gli altri punti nelle corrette posizioni. Le coordinate di ogni *marker* sono contrassegnate da un nome e per capire a quale *marker* questo nome si riferisca è necessario utilizzare eidotipi e monografie che contrassegnano nomi e posizioni di tutti i target, anche questa documentazione è stata fornita insieme ai dati del rilievo e sono riportati a fondo tesi nell'ALLEGATO n° 2.

A seguire riportiamo un esempio del procedimento eseguito.

Il *marker* SALM03 è individuato attraverso le monografie su uno dei resti della parete di facciata alla chiesa. Per collocarlo si clicca sopra con il tasto destro del mouse e si seleziona l'opzione *Place marker*, facendo ciò viene elencata l'intera lista dei *marker* presenti nel foglio delle coordinate precedentemente caricato e si seleziona nel nostro caso la voce SALM03 [Fig. 40-41].

Fatto questo si prende un'altra immagine in cui viene ritratto il medesimo *marker* e si ripete l'operazione, essendoci stato un primo allineamento delle immagini, il programma fornirà automaticamente una retta guida in rosso che indica su quale asse dovrebbe essere collocato il punto [Fig. 42]. Posizionando anche questo secondo punto il programma è in grado di determinare la corretta posizione tridimensionale del punto e lo suggerirà in automatico su tutti gli altri fotogrammi dove questo è presente [Fig. 43].

Ripetendo la stessa operazione con altri due punti, il *software* è in grado di posizionare automaticamente tutti i restanti punti dei *marker* caricati, collocandoli sulla nuvola nelle corrette posizioni. Il processo descritto è di seguito illustrato nei suoi passaggi.

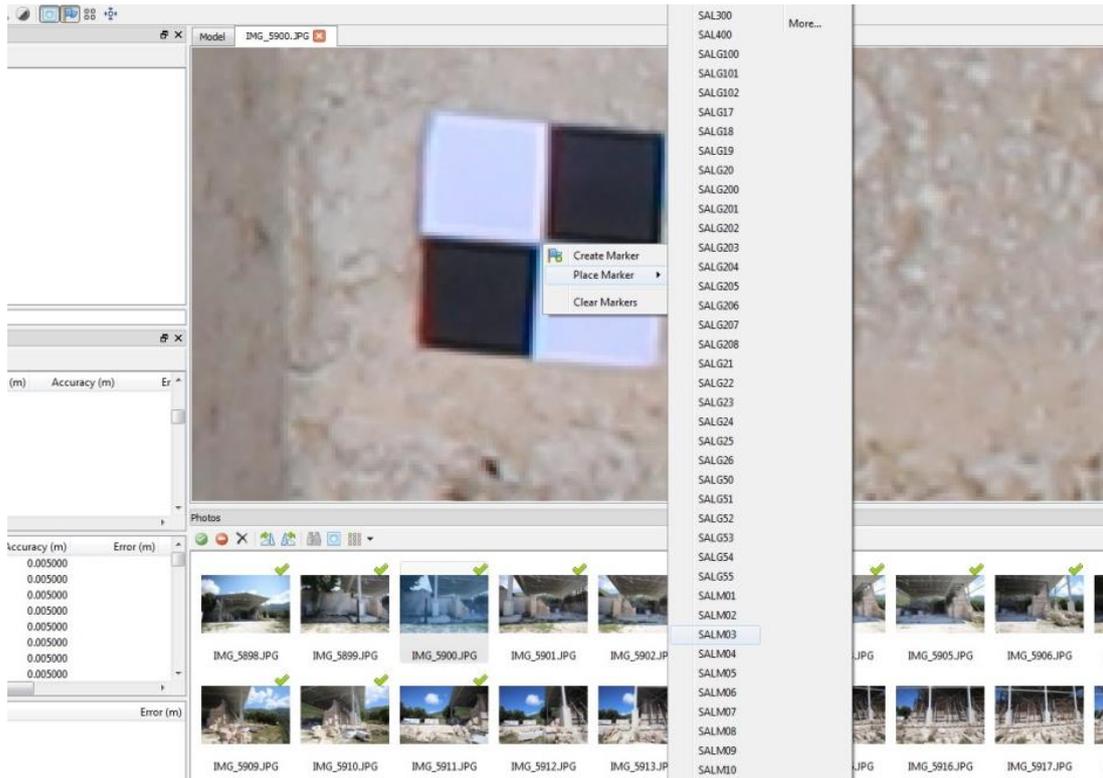


Fig. 40 – Posizionamento marker SALM03.

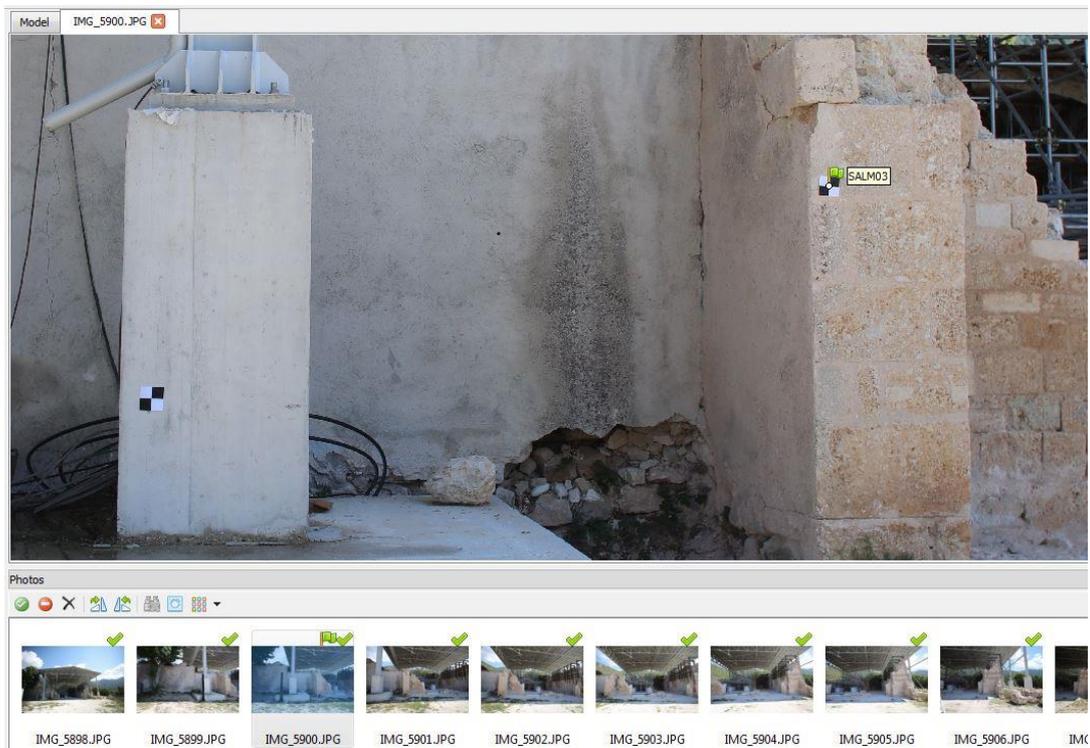


Fig. 41 – Marker SALM03 posizionato.

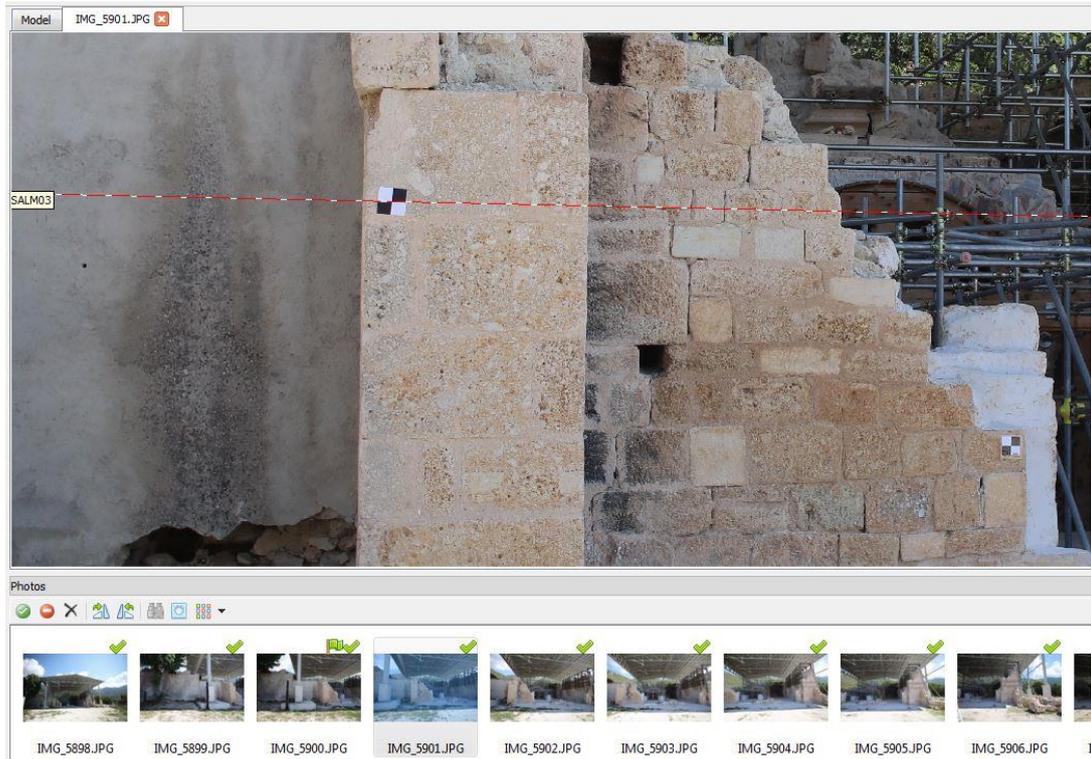


Fig. 42 – Individuazione del marker SALM03 su un'altra immagine tramite la retta.

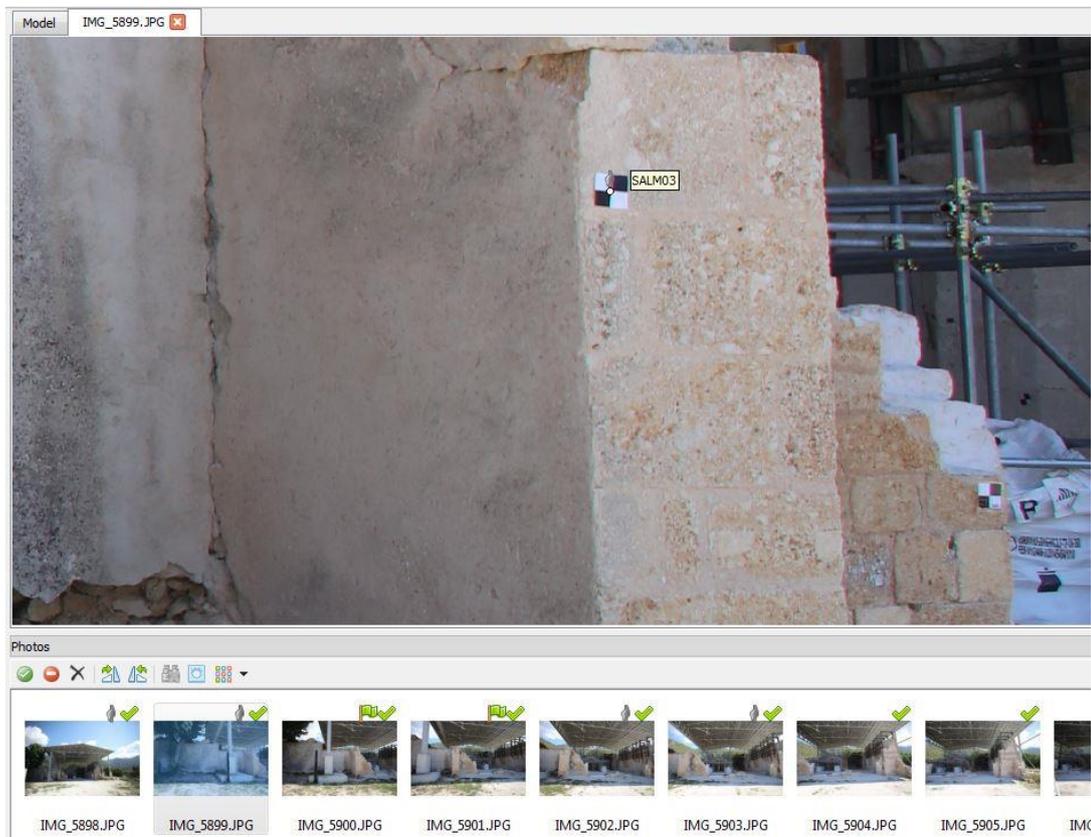


Fig. 43 – PhotoScan individua automaticamente SALM03 su altri fotogrammi.

Affinché si possa garantire un risultato robusto è necessario visionare manualmente tutti i fotogrammi dove sono visibili i *marker*, in modo da verificare che questi siano collocati nella corretta posizione, e in caso non lo fossero correggerli riposizionandoli in maniera più precisa con un semplice drag e drop (prendere, spostare e rilasciare) del mouse.

3.2.3 Errori

Nella finestra dove sono elencati tutti i *marker* e le rispettive coordinate, sono mostrati anche gli errori di allineamento sotto la colonna *Error (m)*, espressa per in metri. Individuando i *marker* con i valori maggiori di errore è possibile andare a riposizionare i *marker* in maniera sempre più precisa allo scopo di ridurre questi valori e rientrare nei limiti prestabiliti. In caso di valore totalmente discordanti o poco affidabili è possibile escludere questi *marker* deselezionandoli.

Quando si opera sul riposizionamento dei *marker* immediatamente si può veder variare i valori di errore del *marker* interessato nella colonna *Error (m)*, in seguito utilizzando il pulsante *Update*, vengono aggiornati gli errori di tutti *marker* in seguito al riposizionamento di uno o più di essi. Come ultimo passaggio è necessario usare il comando *Optimize Cameras* con il quale vengono ricalcolate tutte le posizioni di presa dei fotogrammi (elaborate durante l'allineamento) correggendole in base agli aggiustamenti di posizione dei *marker* [Fig. 44].

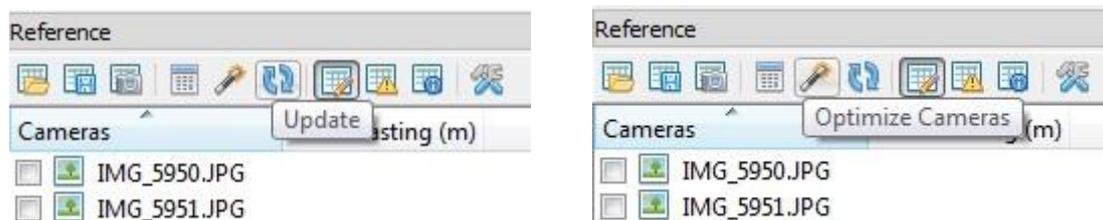


Fig. 44 – Screenshot dei tasti *Optimize Cameras* e *Update*.

Come già descritto nel paragrafo 2.2.3, si sono mantenuti gli errori al di sotto di 5 cm per le prese esterne realizzate con il drone Phantom e Spark, e invece di 2 cm per tutte le altre acquisizioni. Durante l'elaborazione tutti i punti rientrano in questi limiti prefissati. Riportiamo di seguito degli estratti dei report degli allineamenti di un *chunk*

(Spark - Interni 3) [Fig. 45], i report esportati da Photoscan sono visualizzabili nell'ALLEGATO n°3.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALG24	-5.28923	-3.05103	1.08147	6.20115	0.661 (8)
SALG25	-4.8919	-2.23988	-3.86246	6.62316	0.778 (7)
SALM209	3.34754	0.387107	-0.55361	3.41502	0.538 (7)
SALM210	1.06114	5.12059	0.246897	5.23521	0.762 (14)
SALM211	4.08382	-2.10771	-2.08234	5.04541	0.662 (10)
SALM212	-1.14468	0.140748	-0.43229	1.23165	0.757 (15)
SALM213	-1.94078	-0.479848	2.44605	3.15912	0.617 (6)
SALM214	4.75727	2.25565	3.17094	6.14609	0.988 (10)
Total	3.68485	2.51189	2.15106	4.95124	0.746

Fig. 45 – Estratto del report Photoscan degli errori dei marker (ALLEGATO n°3).

3.2.4 Riallineamenti e correzioni

Può accadere che non tutte le immagini vengano allineate automaticamente da PhotoScan, il problema può essere dovuto da fotogrammi che differiscono notevolmente tra loro e non consentono al programma di individuare una correlazione tra essi, come ad esempio la fine di una strisciata di immagini e l'inizio di un'altra. Le immagini allineate sono contraddistinte da una spunta verde nell'angolo in alto a destra, mentre quelle non allineate non ce l'hanno [Fig. 46]. Questi problemi possono essere risolti procedendo con un riallineamento manuale.

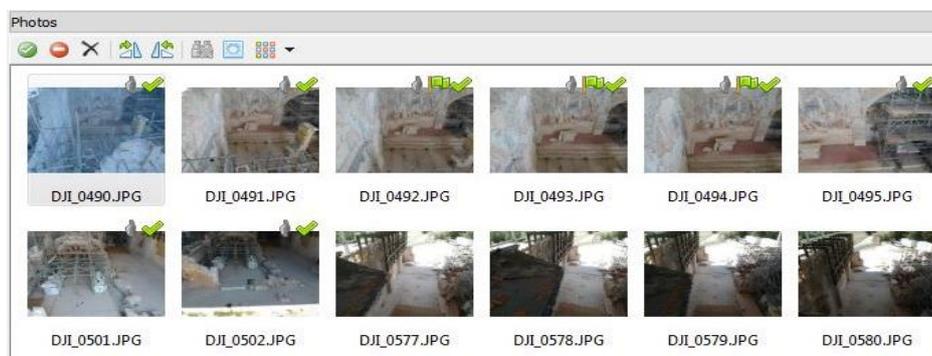


Fig. 46 – Fotogrammi allineati e non.

Un primo metodo di riallineamento è quello di inserire *marker* già georeferenziati all'interno di fotogrammi non allineati, ne sono necessari almeno quattro per immagine affinché la foto possa essere allineata, per poi lanciare nuovamente il comando *Align photos*.

Nel caso questo non funzionasse è possibile inserire dei punti immagine senza coordinate, è necessario scegliere dei punti riconoscibili presenti su più fotogrammi e fissarli creando un apposito *marker* tramite click destro e l'opzione *Create Marker*, è necessario ripetere questi punti in immagini georeferenziate e non per permettere al programma di comprenderne la correlazione. Rilanciare l'allineamento.

Infine se anche questo metodo non dovesse produrre risultati, è possibile fare un ultimo tentativo. Consiste nell'esportare le immagini non allineate in nuovi *chunk* indipendenti, in questi *chunk* inseriremo dunque solo le immagini che il *software* non riesce ad elaborare. Questo serve per ovviare ai problemi di discontinuità dovuti dai diversi oggetti rappresentati nei fotogrammi. Un'intera strisciata di immagini può non venire elaborata solo perché non si ha una continuità nei soggetti raffigurati tra l'ultima immagine di una strisciata e la prima di un'altra.

Nel nostro caso accade proprio questo, il problema si è presentato nel *chunk* Spark Interni.

In questo *chunk*, su un totale di 163 foto, PhotoScan è riuscito ad allinearne solo 84, circa la metà. In molti casi, avendo un grande ridondanza di prese fotografiche, è accettabile perdere alcuni fotogrammi, tuttavia in questo caso l'elevato numero di immagini escluse portava a creare nel modello delle vaste zone d'ombra per le quali non si aveva alcuna informazione sull'oggetto, questo non era ammissibile.

Quindi sono stati estratti due nuovi *chunk* nominati Spark Interni 2 e Spark Interni 3, per fare questo non sono state ricaricate le immagini da zero per poi allineare e georeferenziare, ma sono stati creati dei duplicati del *chunk* esistente tramite click destro sullo stesso e selezionando la voce *Duplicate chunk*. Da questi nuovi *chunk* sono stati tolti tutti i fotogrammi già allineati lasciando solo quelli desiderati, fino ad

ottenere quaranta fotogrammi in Spark Interni 2, e trentanove fotogrammi nel *chunk* Spark Interni 3 [Fig. 47].

Si sono lanciati nuovamente gli allineamenti in risoluzione *high* tramite i quali tutte le immagini sono state correttamente allineate e georeferenziate.

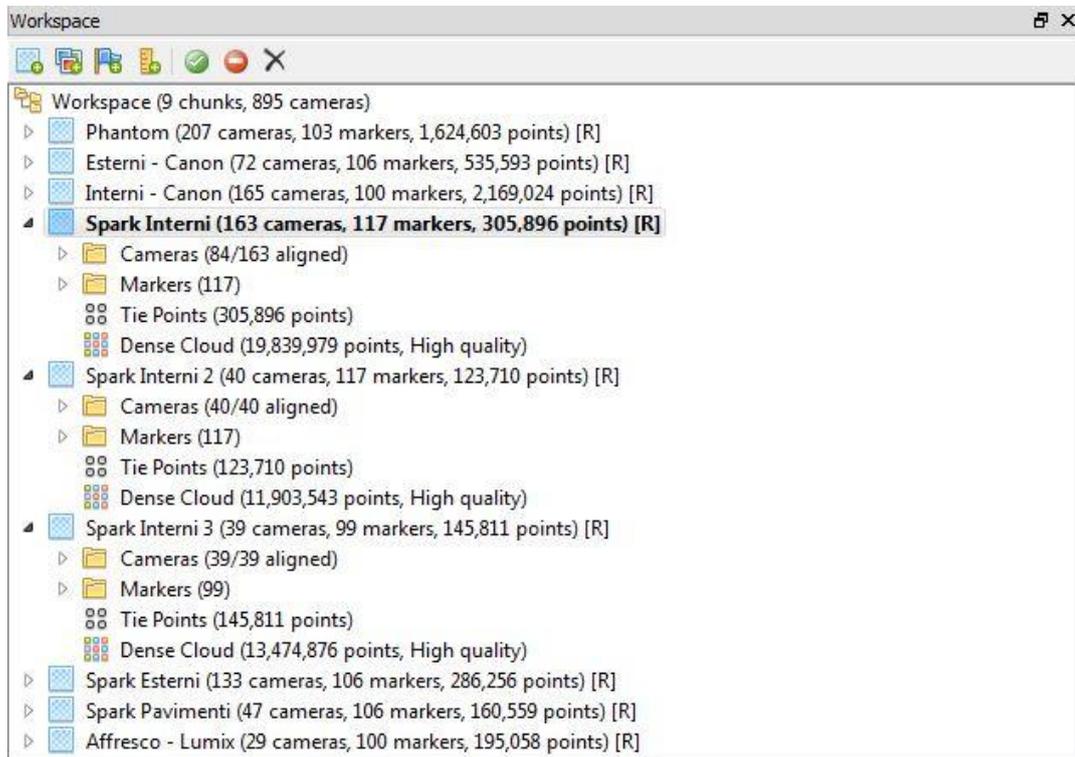


Fig. 47 – Organizzazione finale dei Chunk, con i nuovi Chunk Spark Interni 2 e 3.

3.2.5 Creazione della nuvola densa

Come ultimo passaggio tramite PhotoScan si genera una nuvola di punti densa. Una nuvola densa è analoga alle nuvole di punti sparsi, ma con un numero di punti molto più elevato. Questa tipologia di nuvola consente di avere una percezione realistica dell'oggetto rilevato, e a un primo sguardo, potrebbe addirittura sembrare un modello finito con delle superfici.

Per crearla è necessario accedere al comando *Workflow – Build dense cloud*

Questo processo è il più dispendioso in termini di tempi, e ovviamente dipende dai parametri di risoluzione che si impostano. Come per l'allineamento abbiamo le opzioni di definizione che variano da *Lowest* ad *Highest*.

Highest significa lavorare con immagini alla risoluzione originale, scendendo con *High, Medium, Low, Lowest* la qualità delle immagini viene degradata in per ogni *step*. Inoltre vi è anche la modalità di *depth filtering* permette di lavorare sugli *outliers* generati in fase di ricostruzione densa e causati da rumore, regolabile tramite le voci:

- *Aggressivo*: per aree di indagine contenenti molti dettagli di piccole dimensioni;
- *Mild*: se vi sono alcuni dettagli di piccole dimensioni che è importante riconoscere nella scena ricostruita;
- *Moderato*: genera un risultato intermedio ai due precedenti;
- *Disabilitato*: sconsigliato perché la nuvola risultante potrebbe essere troppo rumorosa.

Nel nostro caso si è scelta la voce Moderato.

Questo procedimento è molto oneroso in termini di tempi per via dell'elaborazione di un elevatissimo numero di punti. Per cercare di contenere i tempi si possono applicare alcuni accorgimenti prima di lanciare l'elaborazione nella nuvola densa.

La prima cosa da fare è quella di ridimensionare la regione di calcolo tramite il comando *Resize Region* presente nella barra degli strumenti. Questo comando consente di ridefinire le dimensioni dello spazio tridimensionale di intervento e se necessario consente di ruotare questo volume di qualsiasi angolo a seconda delle necessità dell'utente.

Compiendo questa azione si permette di escludere dal calcolo tutti i punti che non sono ritenuti utili per l'elaborazione del modello, riducendo sensibilmente il numero di processi necessari alla creazione della nuvola densa.

Un esempio di ridimensionamento è quello attuato sul *Chunk* Canon esterni. In queste acquisizioni, oltre a catturare le fattezze della chiesa di San Salvatore, sono stati acquisiti numerosi punti dello sfondo che descrivono l'andamento delle montagne alle spalle della chiesa, ovviamente questi punti non hanno alcuna utilità nella realizzazione del nostro modello e vengono quindi esclusi. Nell'immagine

seguinte si può notare l'area della regione che comprende solo la chiesa escludendo tutti i punti che descrivono i rilievi [Fig. 48].



Fig. 48 – Ridimensionamento della regione per il chunk Esterni – Canon.

Un altro esempio è preso dal Chunk delle acquisizioni esterne realizzate con il drone Spark, dove sono presenti molti punti che descrivono il cimitero adiacente alla chiesa e sono stati esclusi dell'elaborazione della nuvola densa disegnando un volume a forma di parallelepipedo che comprende solo la chiesa [Fig. 49].

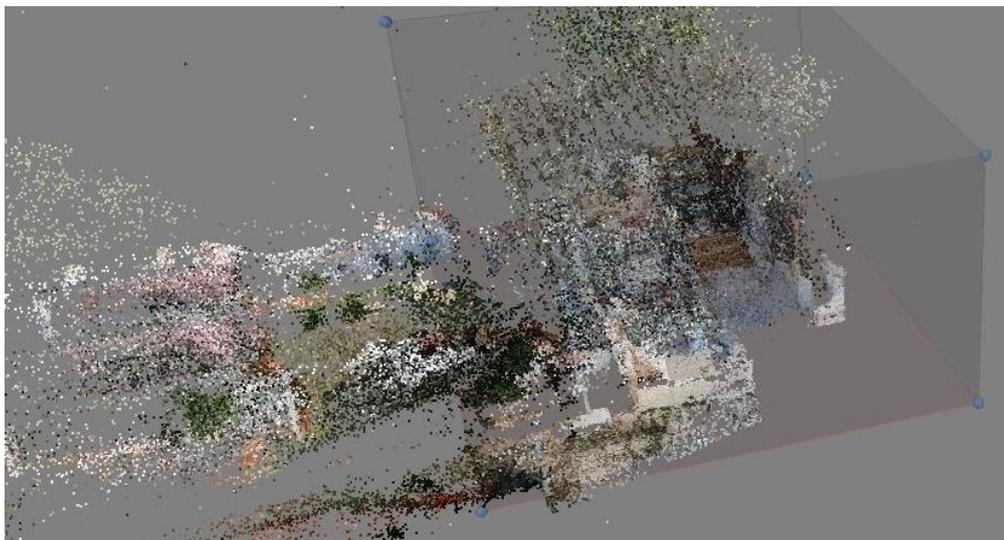


Fig. 49 – Ridimensionamento della regione per il chunk Spark- Esterni.

Una volta generate le nuvole di punti dense, sono state esportate in formato *.las* per renderle utilizzabili per la loro elaborazione al di fuori di PhotoScan. Infine sono stati generati i report riportanti tutte le informazioni specifiche per ciascun *Chunk* creato, questi documenti si possono reperire a fondo della tesi sotto la voce ALLEGATO 3.

3.3 Il software Faro Scene

Faro Scene è un *software* in grado di elaborare e georeferenziare le scansioni acquisite tramite il laser scanner FARO CAM 2, realizzando nuvole di punti esportabili in vari formati.

Il programma Faro Scene fornisce strumenti di elaborazione simili a quelli visti su PhotoScan. Prevede una serie di operazioni che consentono di caricare le singole scansioni all'interno programma e collocarle in modo da allinearle tra loro a ricostruire una unica nuvola di punti. È possibile assegnare un sistema di riferimento alla nuvola e georeferenziarla importando le coordinate dei punti contrassegnati dai *marker*. Inoltre il *software* consente l'utilizzo di alcune funzionalità automatiche che sono in grado di effettuare operazioni di riconoscimento degli oggetti, per esempio per il posizionamento dei *marker*.

Una volta georeferenziata la nuvola è possibile controllare l'entità degli errori e correggerli se necessario, colorare le scansioni con le tonalità RGB rendendo la nuvola realistica, ed infine esportarla in vari formati.

3.3.1 Collocazione delle scansioni

Sono state fornite diverse scansioni acquisite attraverso il laser scanner FARO CAM 2 durante la fase di rilievo, queste acquisizioni hanno generato delle nuvole di punti a 360° dell'area attorno allo strumento.

In totale sono state realizzate diciotto scansioni della chiesa di San Salvatore, di cui tredici che realizzate all'esterno della chiesa e cinque al suo interno [Fig. 50].



Fig. 50 – Schema di posizionamento delle diciotto scansioni laser scanner.

I file forniti dal laser scanner sono costituiti da cartelle con file in formato .fls. Aperto il software si è creato un nuovo file di progetto, sono state importate nella finestra di lavoro tutte le diciotto cartelle tramite *drag and drop*. Il programma permette di visualizzare immediatamente sia le nuvole di punti che le fotografie realizzate, questo ha permesso di notare subito che le prime due acquisizioni erano pressoché identiche. Dunque si è supposto che la prima scansione fosse stata ripetuta per via di un possibile malfunzionamento o di un errore di calibrazione dello strumento, a tal proposito si è deciso di scartare la prima acquisizione mantenendo dunque un totale di 17 scansioni.

Le nuvole così importate non sono allineate tra loro e vanno collocate nelle corrette posizioni rispetto ai punti omologhi tra di esse, Scene permette di realizzare in automatico questo procedimento. Cliccando con il tasto destro sulla cartella *Scans* che contiene tutte le scansioni si seleziona *Operazioni - Registrazione - Colloca scansioni* [Fig. 51]. Si apre una finestra dove andiamo a selezionare il parametro *Da nuvola a nuvola* sotto la voce *Modalità di collocazione* [Fig. 52], questo metodo permette al programma di collocare nelle corrette posizioni spaziali tutte le nuvole trovando i punti in comune tra loro e creando una unica nuvola dell'oggetto scansionato.

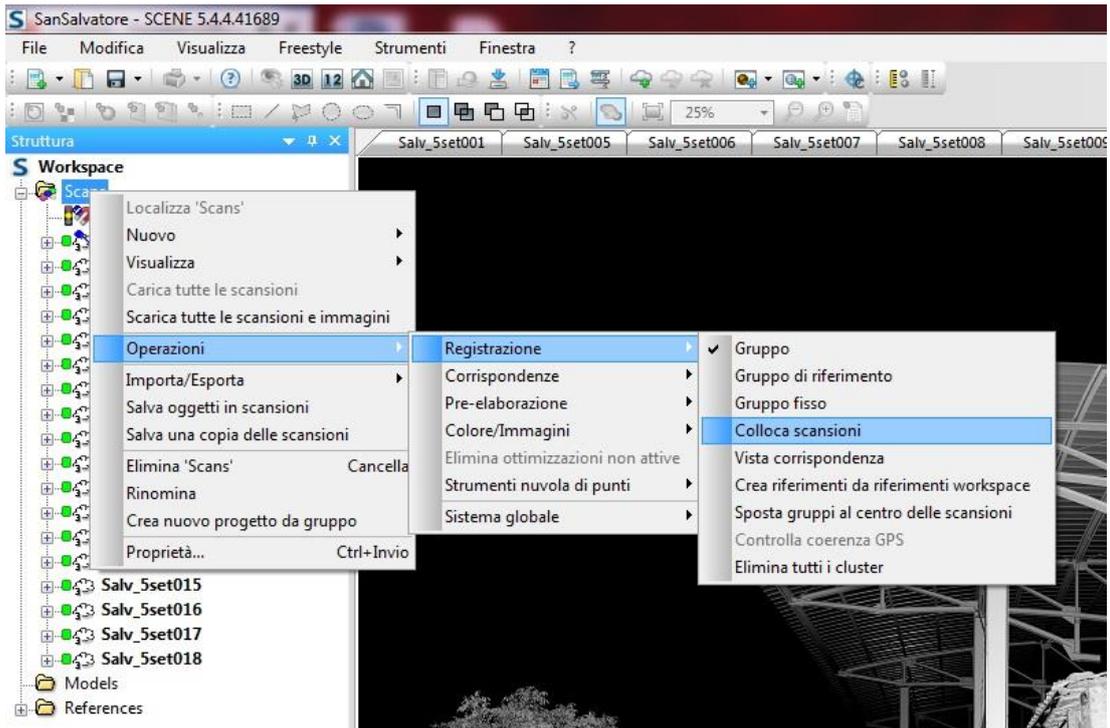


Fig. 51 – Percorso per la collocazione delle scansioni su Scene.

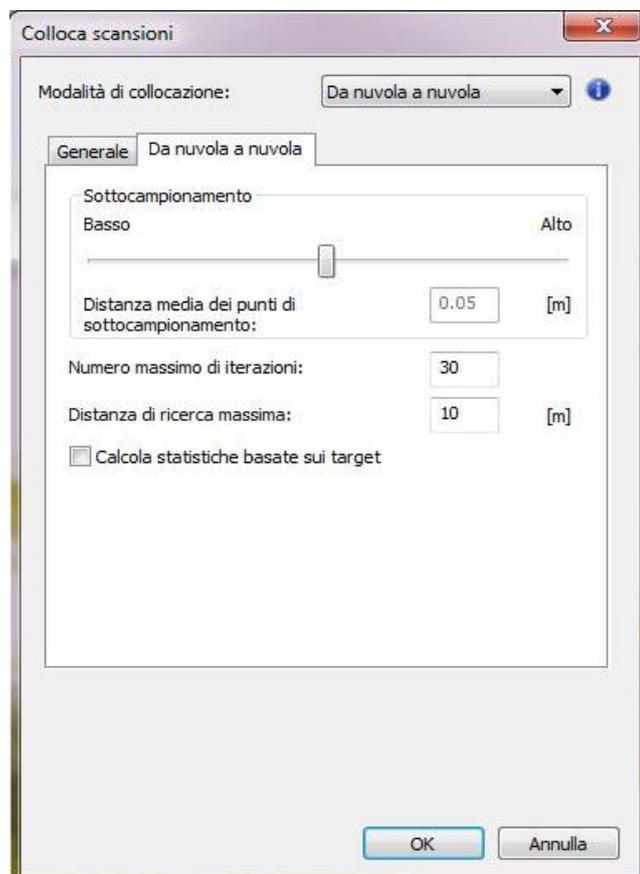


Fig. 52 – Selezione parametro “Da nuvola a nuvola”.

Nel nostro caso la collocazione in automatico delle nuvole non ha prodotto risultati soddisfacenti. Per ogni scansione posizionata, accanto al suo nome, viene mostrato un semaforo che può presentare luce rossa, gialla o verde in base alla precisione del posizionamento dei punti e ai margini di errore riscontrati. È necessario che questi siano tutti verdi al fine di ottenere un risultato accettabile, nel nostro caso diverse scansioni sono riuscite ad ottenere il semaforo verde al primo tentativo ma vi sono anche numerosi semafori gialli, sei per la precisione. Queste scansioni con dei margini di errore più elevato non garantiscono un corretto allineamento delle nuvole tra di loro, l'errato allineamento è ben intuibile tramite la modalità di visualizzazione tridimensionale di Scene, dove il quadro risulta confuso ed è difficile persino individuare la chiesa [Fig. 53].

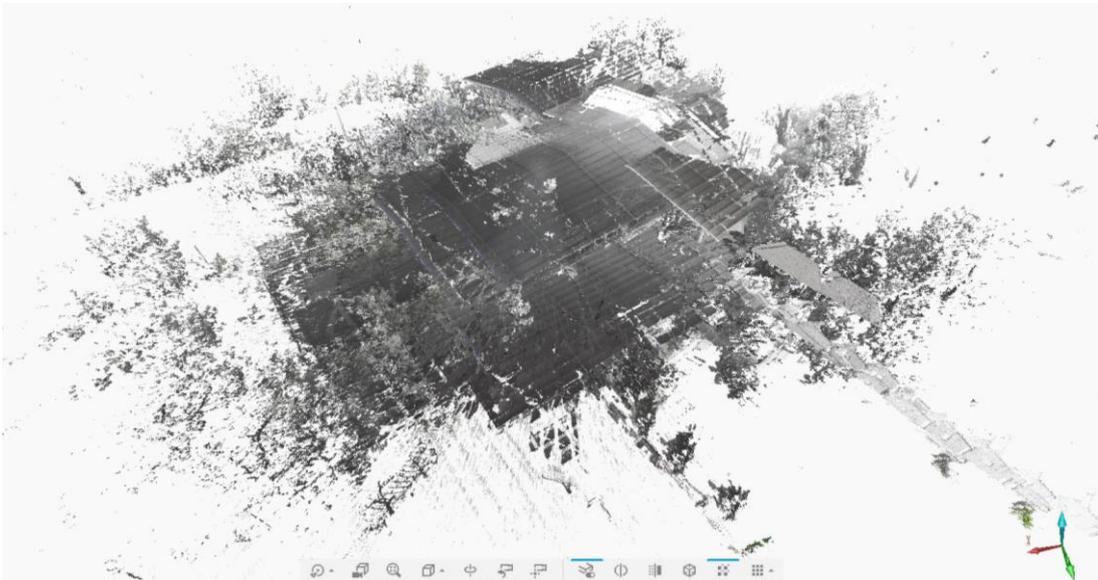


Fig. 53 – Vista 3D di scene con il risultato confuso della collocazione delle nuvole.

Per ovviare al problema è stato necessario procedere con metodi di allineamento manuali, come primo passaggio sono state importate le coordinate dei *marker* esattamente come è stato fatto in precedenza su PhotoScan. Tuttavia, Scene non è in grado di leggere il formato *.txt* in cui erano fornite le coordinate, ed è stato necessario convertirle in un *file .csv* attraverso un *software* di conversione online. Importate le coordinate si è proceduto ad assegnare i punti ai corrispettivi *marker* visibili nelle immagini delle scansioni. Per fare ciò è stato utilizzato il comando di selezione

rettangolare dalla barra degli strumenti, si è selezionata l'area occupata graficamente dal *marker* e, tramite tasto dx, si è selezionata la voce *Crea oggetti - Punto medio di contrasto* che permette di individuare il punto centrale in base al contrasto generato dalle parti bianche e nere del *marker*. Una volta creati sono stati rinominati con il nome del rispettivo punto di coordinate a cui corrispondono, il nome apparirà nella finestra di lavoro all'interno della cartella *Pictures*. La procedura è riportata nelle seguenti immagini [Fig. 54 e 55].

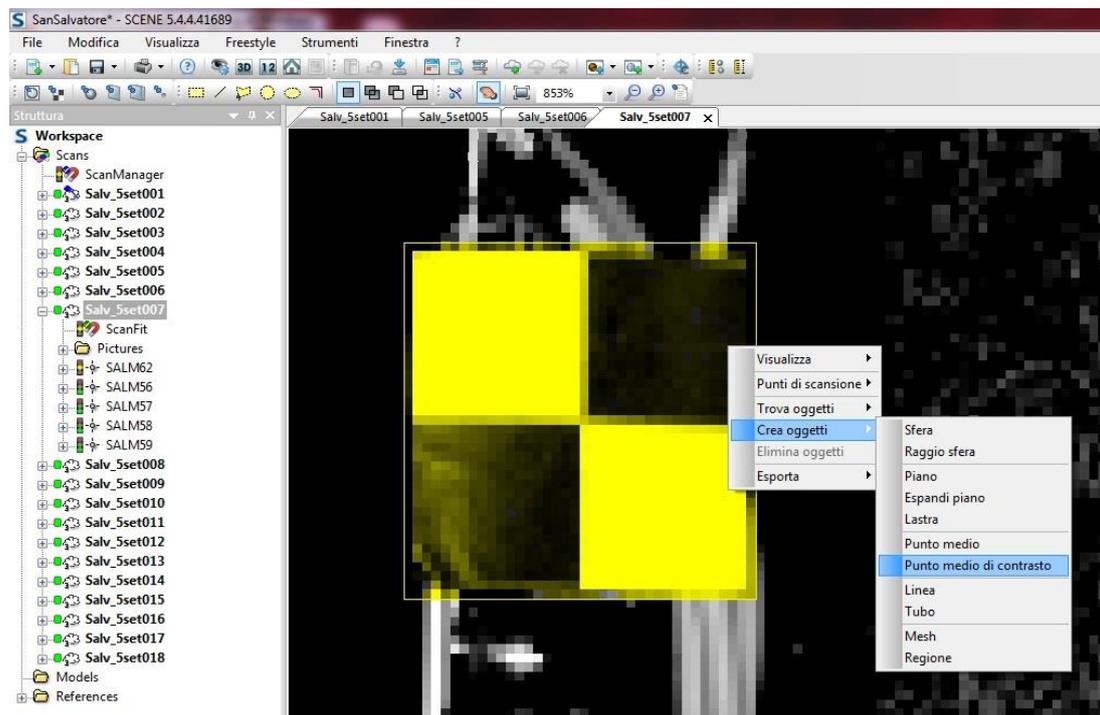


Fig. 54 – Procedimento per individuazione dei punti dei marker.

È fondamentale accertarsi che a ogni nuovo punto creato manualmente corrisponda il simbolo del semaforo verde, esso garantisce la necessaria accuratezza del punto stesso. La luce verde del semaforo implica che il numero di punti impiegati per il calcolo del contrasto (numero punti di scansione) è abbastanza elevato per avere valori attendibili. L'operazione è stata eseguita per ogni *marker* visibile in ciascuna dei 17 fotogrammi realizzati, sono stati presi in considerazione tutti i bersagli con una definizione sufficiente rendere possibile individuare correttamente il centro del *marker*. È necessario che si individuino almeno tre punti per ogni scansione, nel nostro caso è

stato sempre possibile individuare più di tre punti, ad eccezione di una scansione, la scansione *Salv_5set013* per la quale sono stati individuati solo due punti.

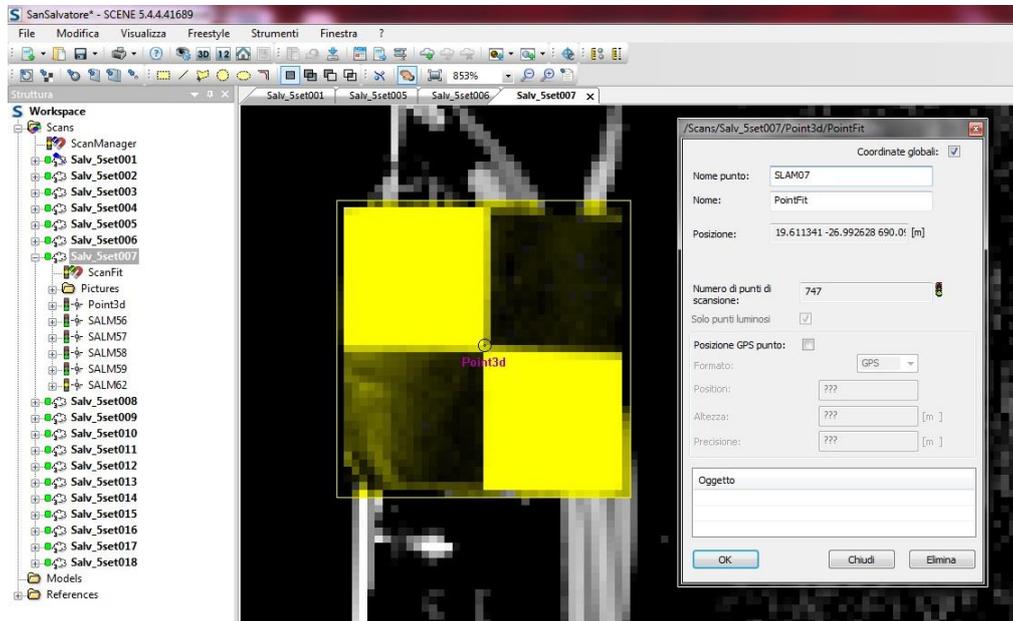


Fig. 55 – Rinomina marker come punto SALM07.

Si ricollocano nuovamente tutte le scansioni, questa volta si giunge ad un corretto allineamento, tutti i semafori appaiono di luce verde e anche visualizzando il modello tridimensionale rappresenta chiaramente la struttura della chiesa [Fig. 56].

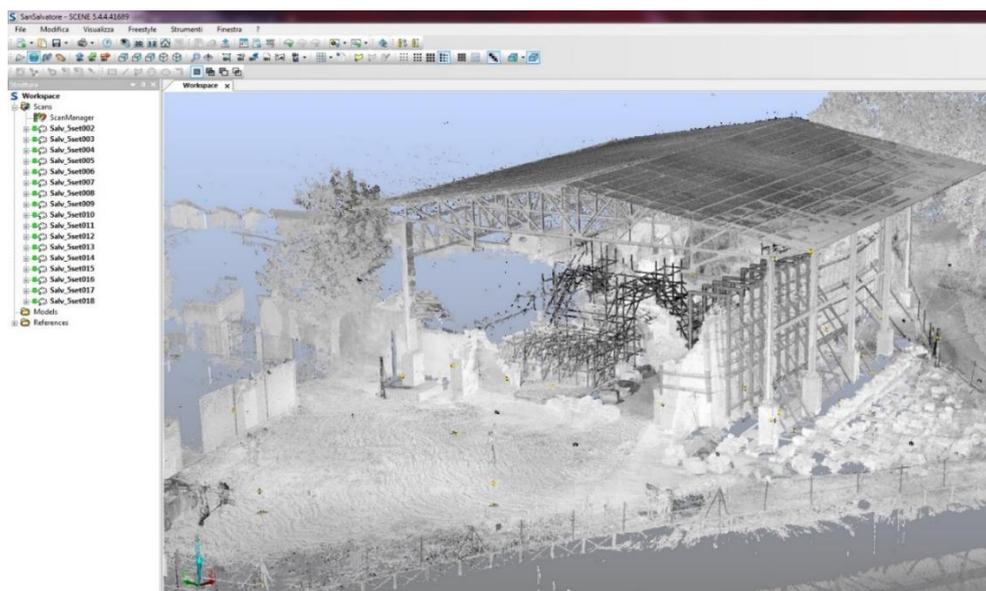


Fig. 56 – Vista 3D delle nuvole correttamente collocate.

Inoltre tramite la modalità di visualizzazione *Vista per corrispondenza* [Fig. 57], è possibile dare una colorazione diversa a ciascuna scansione in modo da cogliere in maniera estremamente intuitiva il posizionamento delle stesse.

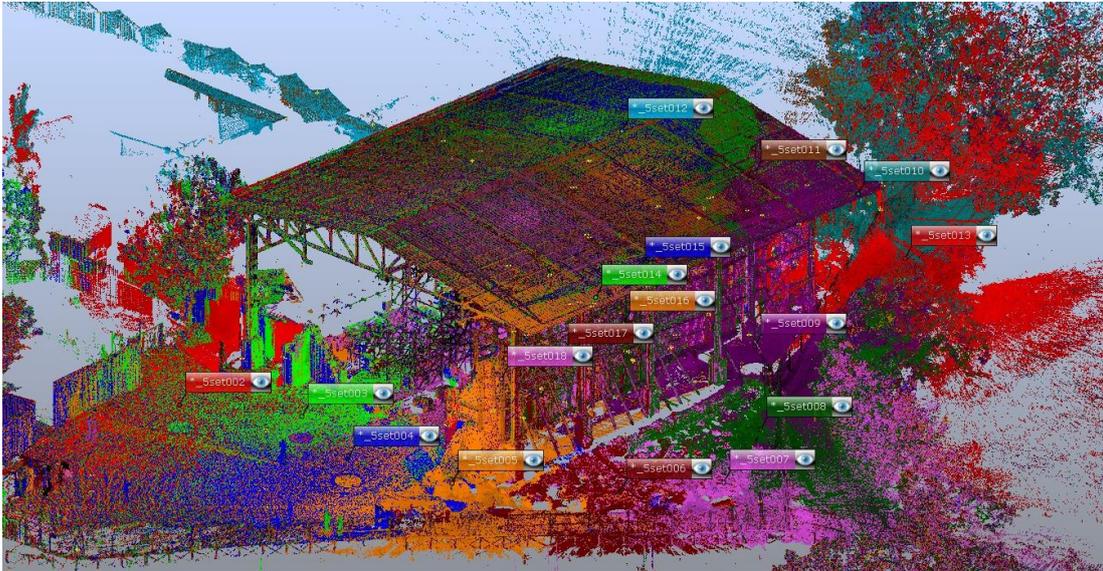


Fig. 57 – *Vista per corrispondenza delle nuvole correttamente collocate.*

3.3.2 Errori

Nonostante tutte le scansioni presentino il semaforo verde, i vari *marker* aggiunti manualmente all'interno di queste non presentano tutti un semaforo verde, alcuni presentano ancora la luce gialla. Visualizzando i dettagli tramite click destro del mouse sulla voce *ScanFit - Proprietà* si accede ai valori di errore di ogni singola scansione [fig. 58]. Analizzando tutte le scansioni si è notato che in genere non si hanno errori di notevole entità ma che talvolta superano il valore di 10 mm, soglia di tolleranza impostata automaticamente da *software*, mentre la tolleranza accettata nel nostro caso è di 2 cm ovvero 20 mm, quindi tali discrepanze rientrano nei criteri di accettabilità. Tutti i valori degli errori di ogni singolo *marker* di ogni scansione, riportati sotto la voce di errore *Tensioni normalizzate*, sono stati controllati, al fine di assicurarsi che tutti rientrassero al di sotto della soglia dei 20 mm.

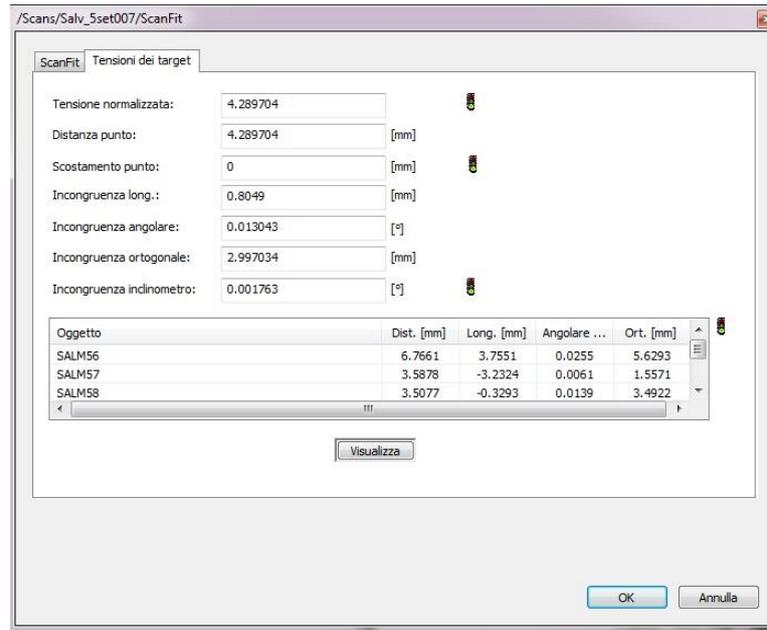


Fig. 58 – Finestra proprietà con valori degli errori.

Tutti semafori segnalati in giallo presentano valori accettabili. Nella pagina seguente sono riportate le tabelle che illustrano tali valori, con evidenziati in beige i valori che superano il centimetro e che fanno scattare la luce gialla nei semafori.

3.3.3 Tabelle con valori di tensione di Scene

Scansione	Marker	Dist. [mm]	Long. [mm]	Angolare [°]	Ort. [mm]	Tens. normalizz = Dist. punto
Salv_5set002	SALG18	11,37	1,12	0,116	11,32	6,01
	SALM02	6,02	-4,64	0,026	3,83	
	SALM03	5,28	0,85	0,035	5,21	
	SALM04	1,35	-0,27	0,007	1,32	
Salv_5set003	SALG18	15,87	11,06	0,222	11,41	9,78
	SALM01	17,78	-16,95	0,022	5,41	
	SALM02	1,95	-0,93	0,010	1,71	
	SALM03	3,48	-3,26	0,009	1,22	
	SALM04	2,29	-1,68	0,013	1,56	
	SALM05	17,27	-15,73	0,044	7,14	
Salv_5set004	SALG19	12,64	-3,65	0,107	12,10	8,76
	SALM05	6,15	-4,76	0,028	3,89	
	SALM06	7,50	-1,74	0,040	7,29	
Salv_5set005	SALM04	8,72	1,44	0,141	8,16	6,34
	SALM05	5,16	-3,56	0,025	3,74	
	SALM06	5,16	-0,46	0,063	5,14	
Salv_5set006	SALM56	3,77	2,37	0,024	2,94	5,17
	SALM57	5,89	-2,83	0,027	5,17	
	SALM59	5,85	3,77	0,020	4,48	
Salv_5set007	SALM56	6,77	3,76	0,026	5,63	4,29
	SALM57	3,59	-3,23	0,006	1,56	
	SALM58	3,51	-0,33	0,014	3,49	
	SALM59	3,30	3,03	0,007	1,31	
Salv_5set008	SALM58	3,71	-1,02	0,016	3,56	6,24
	SALM59	3,29	1,39	0,024	2,98	
	SALM60	12,10	-11,47	0,019	3,83	
	SALM61	7,78	3,86	0,031	6,76	
Salv_5set009	SALG54	8,13	6,00	0,168	5,49	6,74
	SALM60	3,29	-2,88	0,018	1,58	
	SALM63	8,81	-6,31	0,038	6,15	
Salv_5set010	SALM104	1,67	-1,01	0,007	1,34	4,06
	SALM105	4,43	-1,75	0,017	4,08	
	SALM106	4,03	1,52	0,030	3,73	
	SALM107	3,16	1,59	0,011	2,74	
Salv_5set011	SALM108	7,03	-4,27	0,033	5,82	9,08
	SALG101	20,65	8,08	0,351	19,04	
	SALM103	8,71	-2,78	0,046	9,25	
	SALM105	5,65	-2,84	0,020	4,88	
	SALM106	7,15	3,90	0,040	5,99	
Salv_5set012	SALM107	3,24	2,71	0,008	1,78	1,86
	SALG102	2,34	0,15	0,013	2,02	
	SALG109	1,62	-0,17	0,008	1,61	
	SALM107	1,62	0,27	0,005	1,60	

Fig. 59 – Tabelle errori di collimazione dei marker di Scene.

Scansione	Marker	Dist. [mm]	Long. [mm]	Angolare [°]	Ort. [mm]	Tens. normalizz = Dist. punto
Salv_5set013	SALM104	7,02	4,90	0,047	5,03	7,02
	SALM107	7,02	-6,07	0,013	3,53	
Salv_5set014	SALG205	19,09	11,85	0,284	15,00	9,99
	SALM209	12,87	-12,09	0,013	4,41	
	SALM212	6,90	-6,81	0,008	1,10	
	SALM213	3,68	-2,62	0,017	2,58	
	SALM216	7,40	-7,19	0,027	1,76	
	SALM217	3,33	-3,42	0,008	0,77	
	SALM221	17,36	-15,99	0,054	6,79	
	SALM222	10,71	-10,40	0,026	2,55	
Salv_5set015	SALM223	8,58	-7,53	0,039	4,14	7,04
	SALM212	16,00	-14,83	0,038	6,00	
	SALM217	5,10	-4,56	0,085	2,29	
	SALM221	8,23	-7,63	0,032	3,08	
	SALM222	4,98	-4,70	0,016	1,67	
Salv_5set016	SALM223	0,89	-0,69	0,004	0,57	7,93
	SALG25	8,03	7,33	0,066	3,29	
	SALM209	19,31	-17,85	0,025	7,53	
	SALM211	9,26	-9,07	0,021	1,87	
	SALM212	5,46	-4,73	0,043	2,73	
	SALM213	4,76	-4,63	0,012	1,10	
	SALM214	4,21	-4,20	0,005	0,30	
	SALM215	0,63	-0,48	0,005	0,41	
	SALM216	1,26	-0,10	0,015	1,25	
	SALM217	7,12	-3,48	0,041	6,21	
	SALM221	16,44	-14,82	0,034	7,12	
Salv_5set017	SALM223	8,85	-7,21	0,029	5,14	6,71
	SALM224	9,81	-9,36	0,029	2,96	
	SALG25	8,71	7,97	0,042	3,52	
	SALM209	4,74	-3,34	0,017	3,37	
	SALM210	11,80	-11,40	0,03	3,08	
	SALM214	4,47	0,69	0,036	4,42	
	SALM216	5,67	-5,38	0,010	1,80	
Salv_5set018	SALM220	8,3	-7,34	0,052	3,87	9,46
	SALM224	3,25	-0,26	0,067	3,24	
	SALG24	12,50	-5,41	0,290	11,29	
	SALM210	8,65	-4,90	0,116	7,13	
	SALM216	13,75	-11,73	0,027	7,18	
	SALM219	5,13	0,42	0,025	5,12	
Salv_5set018	SALM220	5,29	2,16	0,023	4,83	9,46
	SALM224	11,43	-11,14	0,024	2,54	

Fig. 60 – Tabelle errori di collimazione dei marker di Scene.

3.3.4 Colorazione ed esportazione della nuvola

Ora che è stata finalmente creata la nuvola complessiva georeferenziata si procede con la colorazione della stessa. Come è stato possibile notare dalle immagini riportate finora, il modello tridimensionale dato dalla nuvola di punti si presenta con colorazione in diverse tonalità di grigi. Ciò avviene perché non sono ancora state associate le immagini fotografiche scattate in concomitanza dell'acquisizione dei punt. Questa operazione in genere si esegue alla fine dell'elaborazione dei dati per mantenere i *file* più leggeri e velocizzare i procedimenti di allineamento. Si attua dunque la colorazione della nuvola tramite un click con il tasto destro del mouse sulla

voce *Scans - Operazioni - Colore/Immagini - Applica Immagini* [Fig. 61]. Il processo fornisce a ogni punto la propria colorazione in base ai valori RGB registrati in acquisizione, così da rendere realistico il modello visualizzato [Fig. 62].

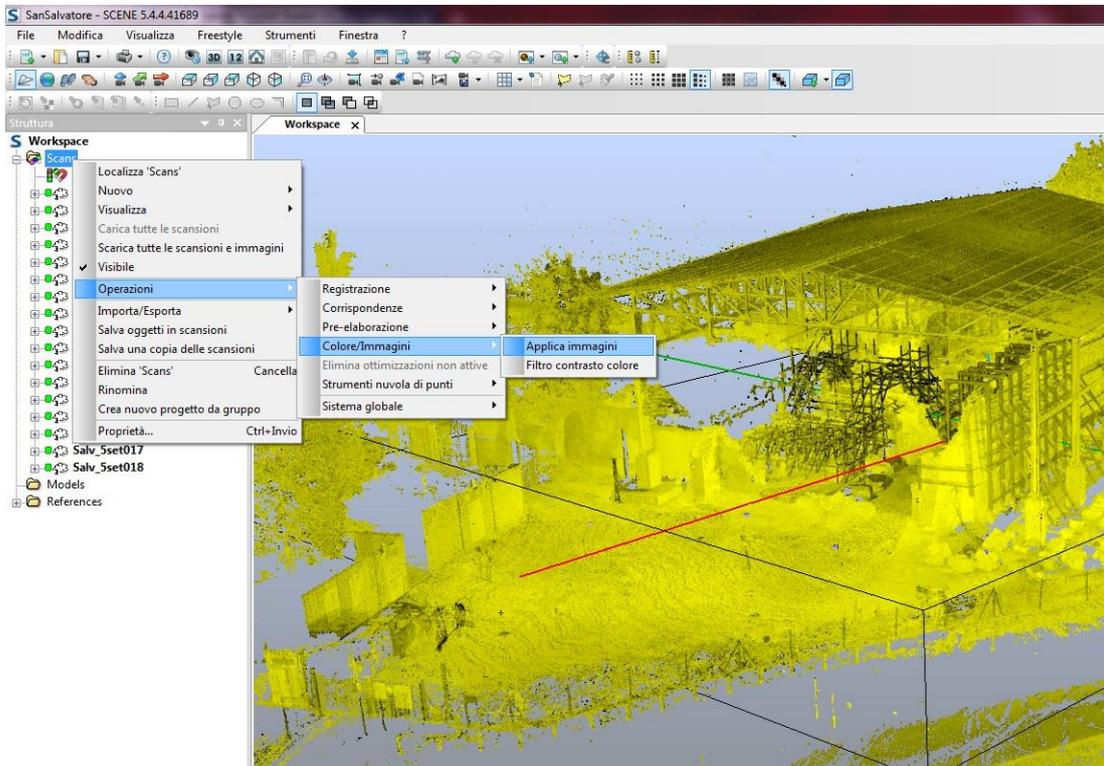


Fig. 61 – Selezione e percorso per la colorazione della nuvola di punti.



Fig. 62 – Nuvola di punti colorata.

Infine vengono esportati i *file* delle nuvole di punti. Durante questo processo si è scelto di selezionare l'opzione tramite cui Scene esporta le diciassette nuvole separatamente, ma sempre geolocalizzate, questo per non creare un unico *file* estremamente pesante. Il formato scelto per l'esportazione è quello .xyz, capace di mantenere le informazioni RGB sul colore dei punti.

CAPITOLO 4

L'ELABORAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI

4.1 Problemi delle nuvole di punti

Le nuvole di punti che vengono esportate dai *software* PhotoScan e Scene, sono correttamente georeferenziate, con livelli di errori dimensionali rientranti nei limiti prestabiliti.

In questa fase andremo a correggere tutte le imperfezioni di queste nuvole. Il procedimento è necessario per ottenere una restituzione grafica più lineare e definita. Inoltre questo passaggio ci permette di selezionare esclusivamente le aree di nostro interesse escludendo punti non utili ai fini di progetto, come già visto per esempio durante i ridimensionamenti delle regioni nel paragrafo 3.2.5.

È frequente trovare imperfezioni all'interno delle nuvole di punti dovute dalla presenza di punti non rappresentati nella corretta posizione spaziale. Vedremo nello specifico questi casi nei seguenti sottoparagrafi.

4.1.1 *Le nuvole esportate da PhotoScan*

Le nuvole esportate da Photoscan si presentano in formato *.las*.

Queste nuvole rappresentano numerosi elementi attorno alla chiesa quali, alberi, recinzioni ed altri fabbricati che non sono di interesse per la realizzazione del modello.

Inoltre vi sono delle imperfezioni all'interno di alcune nuvole che vanno corrette.

Le imperfezioni sono caratterizzate da punti non correttamente collocati nella loro posizione e dalla dispersione di punti nell'intorno di un elemento o di una superficie, chiamato rumore.

In particolare, nelle nuvole realizzate tramite le prese terrestri con la fotocamera Canon, si presentano delle particolari imperfezioni che influenzano la nuvola a livello grafico. Sono visibili delle porzioni di cielo attraverso le maglie delle travi reticolari della copertura, queste non vengono riconosciute correttamente dal programma di elaborazione. Al posto di considerarle come porzioni di uno sfondo o un elemento lontano, il *software* tende a identificare questi punti come parti della struttura metallica e li posiziona nelle sue vicinanze. Facendo ciò si vengono a creare serie di “filamenti” color azzurro e bianco, i colori del cielo e delle nubi, che si estendono dalla struttura verso l'esterno [Fig. 63].



Fig. 63 – Nuvola chunk Esterni - Canon, con “filamenti” dati da porzioni di cielo.

4.1.2 Le nuvole esportate da Scene

Le nuvole esportate da Scene invece sono in formato .xyz.

In questo caso la nuvola restituita dal laser scanner è più definita e presenta meno rumore della precedente. Ci si è dunque limitati a rimuovere le zone circostanti alla chiesa, considerate non utili per lo sviluppo del modello. L'esclusione di queste aree ha consentito di alleggerire notevolmente i *file*, riducendo sensibilmente il numero di punti della nuvola.

4.2 Pulizia delle nuvole di punti

Per pulire le nuvole, dagli elementi non desiderati e dalle imperfezioni descritte, si è proceduto utilizzando il *software* CloudCompare [Fig. 64].

4.2.1 Il software CloudCompare

CloudCompare è un *software open source* sviluppato per la gestione e l'elaborazione delle nuvole di punti tridimensionali, *mesh* triangolari e immagini calibrate. Il programma presenta diversi comandi che lo rendono semplice e intuitivo. Grazie a CloudCompare è stato possibile segmentare le nuvole eliminando i contenuti non desiderati.

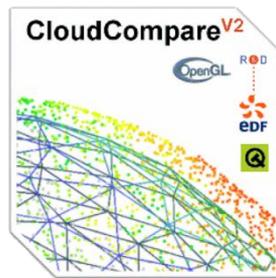


Fig. 64 – Logo di CloudCompare.

4.2.2 La pulizia delle nuvole di punti

Sono state importate le nuvole all'interno del programma tramite *drag and drop* nella finestra di lavoro oppure andando su *File - Open* e selezionando le nuvole di punti desiderate dalla loro cartella. Per ogni nuvola di punti importata il programma riferisce che il sistema di coordinate impiegato è troppo grande, ciò non ne permette la corretta visualizzazione. Così il *software* ridimensiona le coordinate di un valore tale da consentirne la corretta visualizzazione [Fig. 65].

I *file* caricati sono divisi in *chunk* per le nuvole della fotogrammetria e in singole scansioni quelle del laser scanner.

In seguito si è utilizzato il comando *Segment* per ripulire le nuvole dai punti non desiderati. Il comando permette di tracciare aree per selezionare i punti che si vogliono rimuovere.

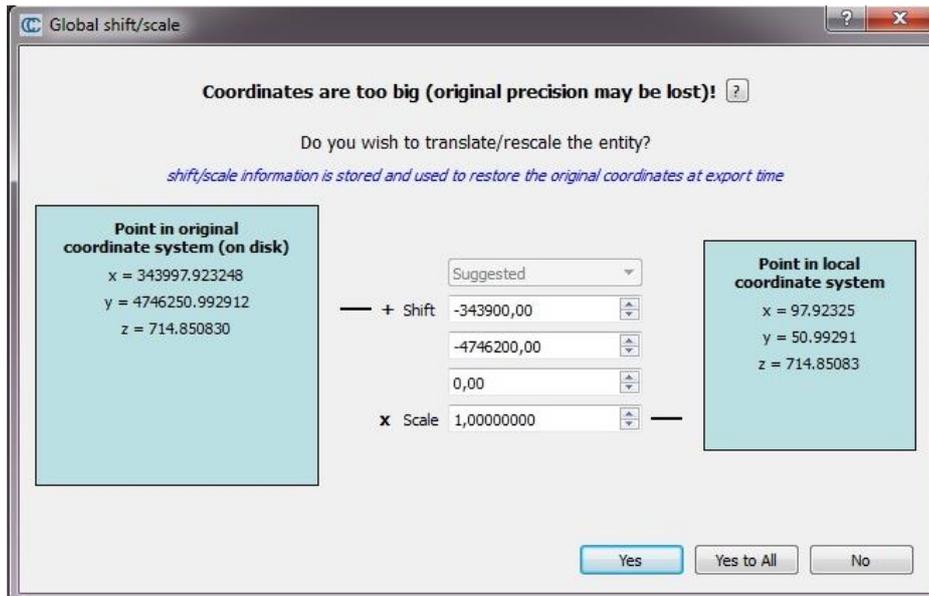


Fig. 65 – Finestra di ridimensionamento delle coordinate.

Ogni nuvola di ogni *chunk* esportato da PhotoScan è stata pulita singolarmente rimuovendo tutte le imperfezioni e le aree non desiderate. Ad esempio, le prese fotografiche del *chunk* Esterni Canon, forniscono delle viste delle zone interne della chiesa, queste si presentano in maniera poco accurata, con tonalità scure e difficilmente riconoscibili, con una conseguente scarsa risoluzione della nuvola di punti. Per questo motivo tali punti sono stati rimossi, mantenendo esclusivamente i punti che descrivono la parte esterna nella chiesa.

Nel caso delle nuvole esportate da Scene si sono divise le scansioni tra quelle effettuate all'interno e all'esterno alla chiesa di San Salvatore. Nelle scansioni esterne sono stati eliminati tutti i punti che descrivevano l'area circostante lasciando solamente quelli dell'edificio. E si è inoltre eliminato qualsiasi punto che descrivesse l'area interna della chiesa. Per le scansioni interne invece si sono eliminati pochi elementi, in quanto tutti punti rilevati risultavano utili. In queste scansioni sono state escluse delle porzioni che mostravano una sovrapposizione fotografica, caratterizzate da punti completamente bianchi. Ciò è accaduto principalmente nella scansione *Salv_5set015* quando il laser scanner era posizionato nella zona più interna e buia della chiesa, così da far risultare sovrapposte le aree in prossimità dell'ingresso della chiesa.

Pulite le nuvole, queste sono state fuse tra loro in sole due nuvole tramite il comando *Merge multiple clouds*. Si sono uniti tutti i *chunk* in una nuvola che riunisce tutte le acquisizioni fotogrammetriche e tutte le acquisizioni laser scanner in un'altra. Il risultato finale di questa operazione genera dunque due nuvole complessive derivanti dalle due diverse tipologie di acquisizione [Fig. 66-67].



Fig. 66 – Nuvola fotogrammetrica pulita.

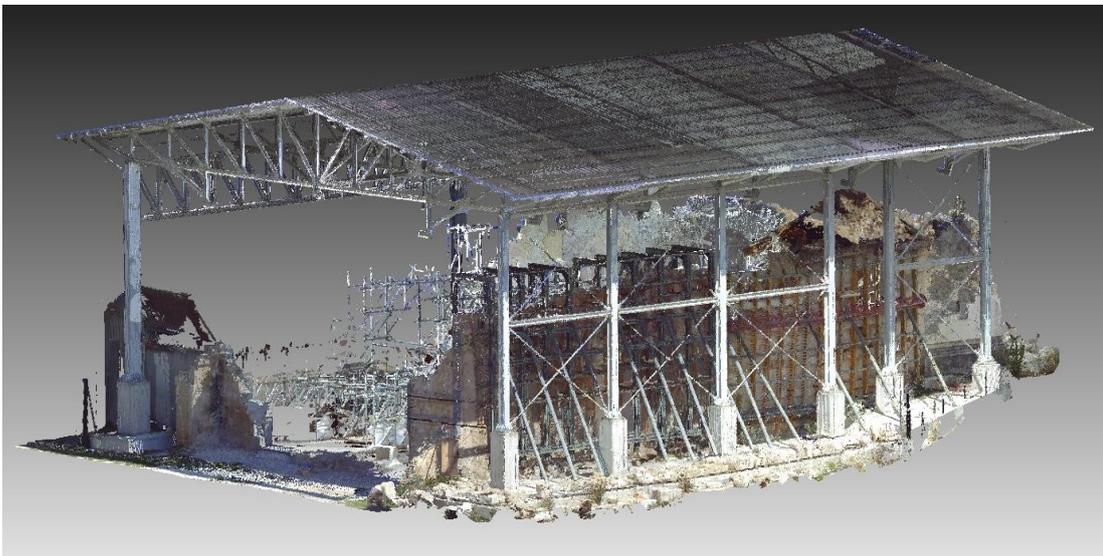


Fig. 67 – Nuvola laser scanner pulita.

4.3 Computo distanza e densità su CloudCompare

Abbiamo due diverse nuvole di punti generate con due tecniche di acquisizione estremamente diverse, la tecnica che prevede l'impiego del laser scanner da una parte e la tecnica fotogrammetrica dall'altra. È necessario verificare che queste due siano compatibili affinché possano essere entrambe utilizzate per la realizzazione di un modello tridimensionale. Questo confronto è stato eseguito tramite l'utilizzo di due funzioni del *software* CloudCompare che hanno consentito di valutare la distanza presente tra i punti delle due nuvole e la loro densità.

Nel nostro caso, per questa analisi di comparazione, non sono state selezionate le intere nuvole di punti della chiesa, in quanto queste risultano troppo grandi e pesanti. Sono state messe a confronto solamente due pareti del manufatto: la parete sud, caratterizzata dalle mura perimetrali della navata di destra, e la parete est, con il muro di fondo navata posizionato dietro gli altari. Di queste pareti sono dunque state create delle nuvole indipendenti, che presentano le seguenti dimensioni e numeri di punti [Fig. 68].

Nuvola di punti	N° di punti	Dimensione file
Parete sud – Laser Scanner	11,744,390	380 MB
Parete sud – Fotogrammetria	11,261,275	365 MB
Parete est – Laser Scanner	2,617,430	84,4 MB
Parete est – Fotogrammetria	1,352,740	43,8 MB

Fig. 68 – Nuvola laser scanner pulita.

4.3.1 Distanza

Il *software* permette di calcolare la distanza presente tra due nuvole di punti. Per fare ciò si utilizza il comando *Distances - Cloud/Cloud dist.* accessibile attraverso la voce *Tools* della barra degli strumenti, o anche attraverso l'apposito pulsante contrassegnato da due gruppi di punti uniti da una freccia.

Il comando esegue il computo delle distanze tra i punti di due nuvole selezionate,

Tramite il comando di calcolo delle distanze, CloudCompare chiede di definire il ruolo di ogni nuvola, ovvero quale delle due deve essere presa come riferimento per l'altra. Nel nostro caso è stata presa come riferimento la nuvola acquisita dal laser scanner per via della sua maggiore accuratezza che presenta, indicata con la colorazione gialla. Da questa saranno computate tutte le misure rispetto la nuvola di comparazione, quella fotogrammetrica, che è colorata in rosso [Fig. 69].



Fig. 69 – Finestra di selezione dei ruoli delle nuvole.

Il *software* esegue un primo calcolo con valori preimpostati, in seguito vengono personalizzati per meglio adattarsi al singolo caso studio. In questo caso nella finestra *General parameters* si trova il parametro denominato *Max dist.* [fig. 70], questo valore indica il raggio entro cui vengono presi in considerazione i punti rispetto un qualsiasi punto della nuvola. Di default vi era un valore di 32 m, è stato sostituito con un valore di raggio 0,3 m, più consono per descrivere un oggetto che si estende per un totale di circa 25 m. Nella finestra *Approx. results* [fig. 71] troviamo per l'appunto i valori approssimati di distanza massima, media e deviazione standard tra le nuvole ricavati dal primo calcolo. Si è eseguito nuovamente il calcolo con il nuovo valore di raggio, dove si nota come valori di distanza massima, media e deviazione standard tra i punti non varino. Mentre invece sul modello, ora definitivo, si può notare come varino i colori rappresentativi delle grandezze per via del nuovo valore del raggio.

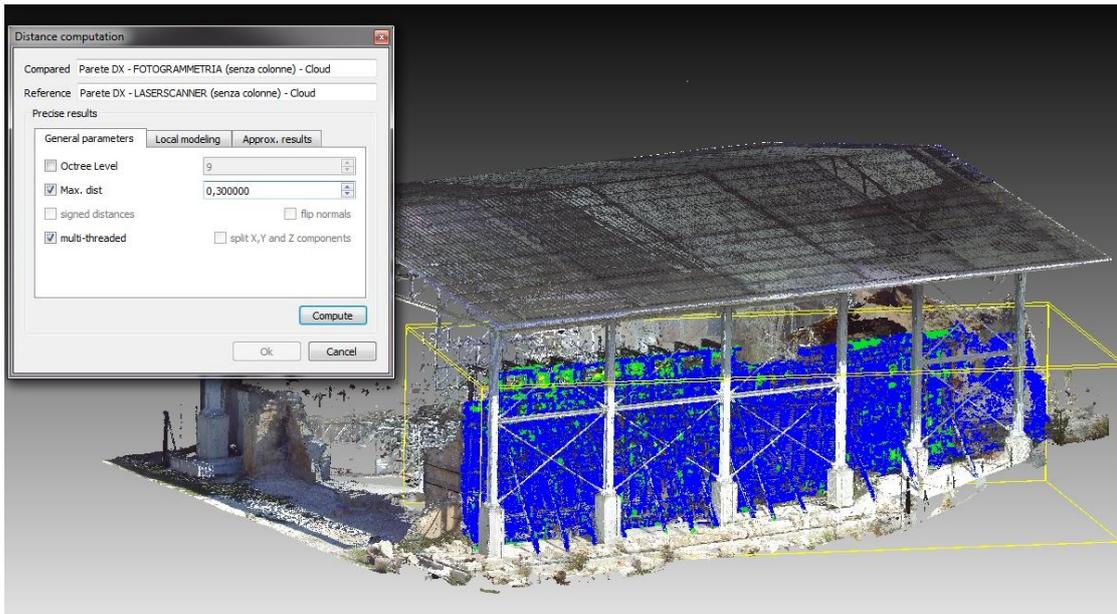


Fig. 70 – Schermata con inserzione del valore di raggio e modello colorato nel calcolo approssimato.

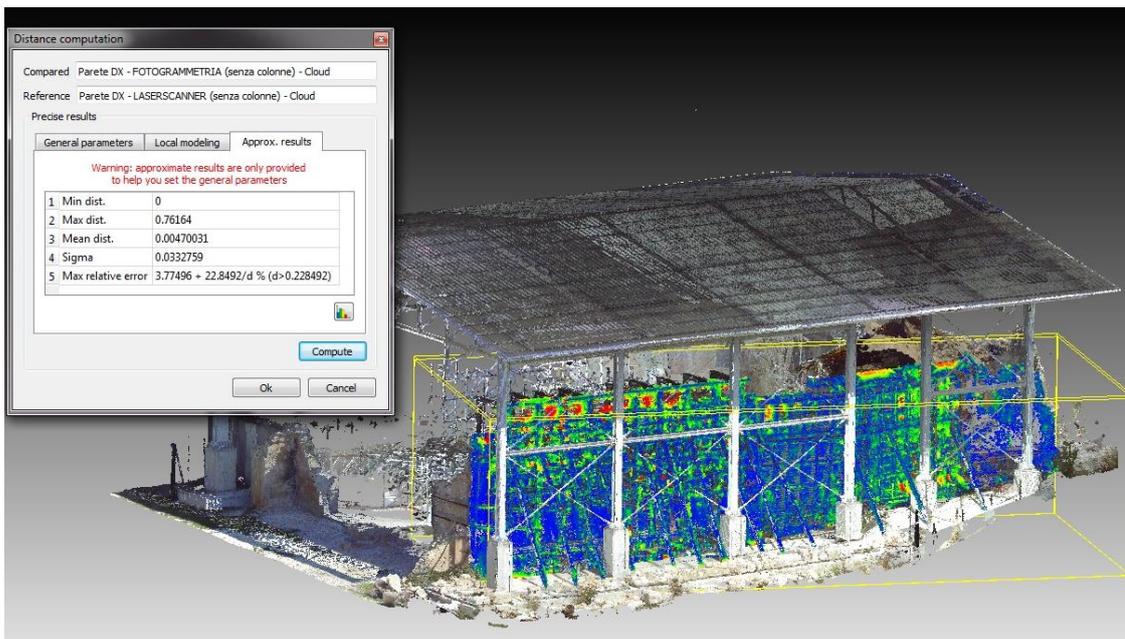


Fig. 71 – Valori di distanza massima, media e deviazione standard con modello colorato nel calcolo definitivo.

Successivamente al calcolo è possibile visualizzare legenda e istogramma riportanti i valori del computo. Nel nostro caso è stata utilizzata una scala associata ai colori RGB, dal rosso al blu a seconda delle distanze dei punti tra le due nuvole, blu per quelli più

vicini e rosso per i più lontani. Di seguito riportiamo i risultati grafici ottenuti sulla parete sud. Si nota una prevalenza di colorazione blu che indica una distanza tra i punti molto ridotta, evidenziando un minimo scostamento tra la nuvola fotogrammetrica e laser scanner.

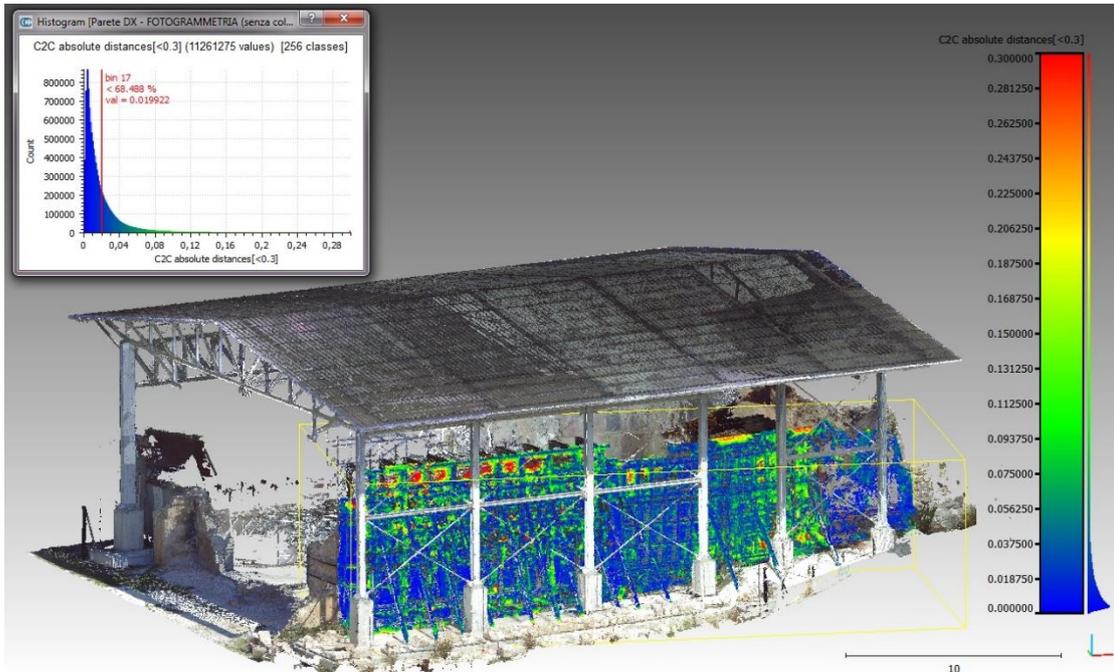


Fig. 72 – Immagine del risultato con modello e grafico a barre della parete sud.

Come si può notare dal grafico in figura 72, oltre il 68% dei punti ha una distanza inferiore ai 2 cm di errore prestabiliti per il nostro modello. Mentre un altro 19% è compreso tra i 2 e i 4 cm che sono il limite di tolleranza alla scala di rappresentazione scelta di 1:100, per un totale di oltre l'87% di punti entro i 4 cm, e una media collettiva inferiore al centimetro di distanza. Con questi risultati il rilievo fotogrammetrico risulta estremamente affidabile.

Lo stesso procedimento è stato eseguito per la parete est della chiesa di cui si riportano i risultati grafici nella pagina successiva.

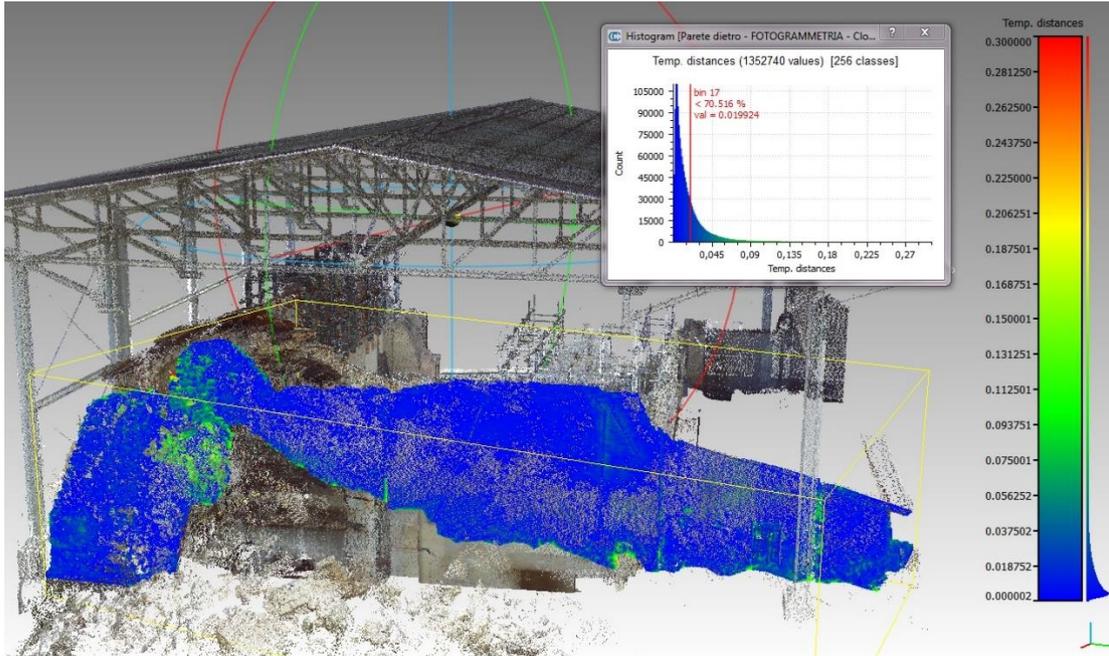


Fig. 73 – Immagine del risultato con modello e grafico a barre della parete est.

Anche in questo caso si sono ottenuti ottimi risultati, il colore blu indicante la minima distanza tra i punti prevale in quasi tutta la parete e ben oltre il 70% dei punti rientra entro i 2 cm di distanza [Fig. 73]. Quasi il 90% entro i 4 cm della tolleranza, con una media di solo 0,5 cm. Ulteriore conferma che le due nuvole sono altamente compatibili tra loro, e dunque entrambe impiegabili come base per la realizzazione di un modello della chiesa di San Salvatore.

4.3.2 Densità

È stato condotto un pure un computo della densità delle nuvole. Anche in questa circostanza lo studio è stato eseguito solo sulle due pareti prese in esame nel sottoparagrafo precedente. Per calcolare questo valore si accede alla voce *Tools - Other* e si utilizza il comando *Density – Accurate (at a given scale)*. Ciò ci permette di effettuare un'analisi automatica sulla densità dei punti della nuvola.

Selezionato il comando è richiesto di inserire un valore del raggio (*Radius*), che identifica la distanza massima entro cui viene calcolato il numero di punti presente attorno ad ogni singolo punto della nuvola in esame (*neighbours*). Nel nostro caso è stato inserito il valore di 0,40, ovvero un raggio di 40 centimetri da ogni punto [Fig. 74]. Questo valore consente di analizzare meglio la distribuzione della densità su un

oggetto di queste dimensioni. Un valore inferiore avrebbe prodotto risultati non significativi, perché relativi ad aree troppo piccole, uno maggiore avrebbe comportato un tempo di calcolo troppo elevato.

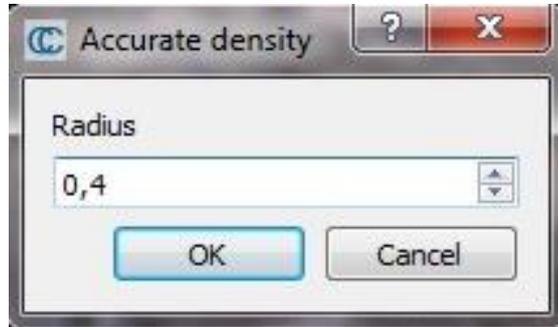


Fig. 74 – Impostazione del raggio.

A seguito sono riportati i risultati riguardanti la parete sud, rispettivamente sulla nuvola fotogrammetrica [fig. 75] e laser scanner [fig. 76]. La parete presenta una colorazione su scala RGB che indica con il verde le aree descritte da una media densità di punti, le zone blu indicano una densità bassa e quelle rosse un'alta densità.

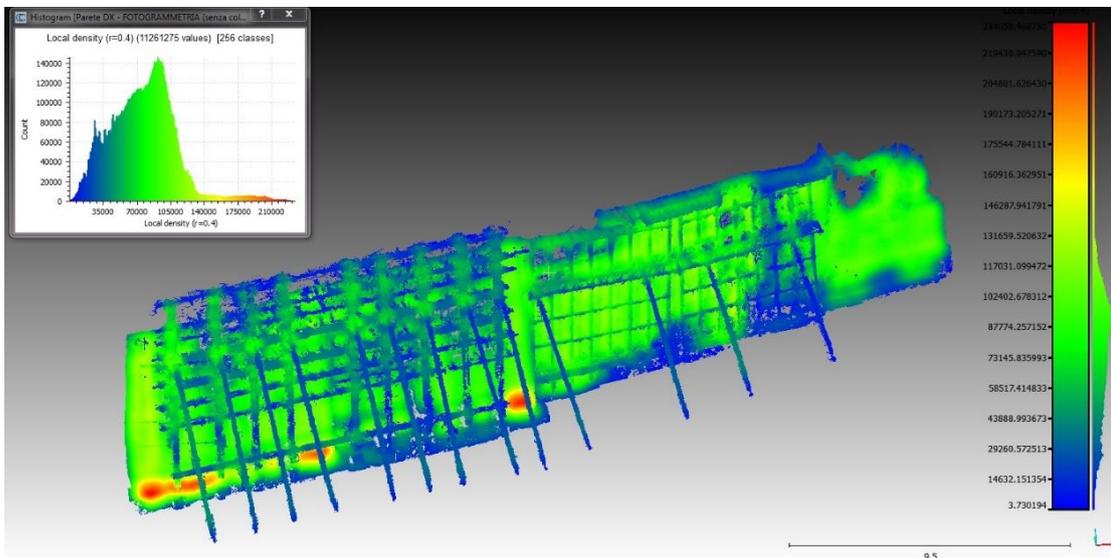


Fig. 75 – Analisi della densità sulla nuvola fotogrammetrica della parete sud.

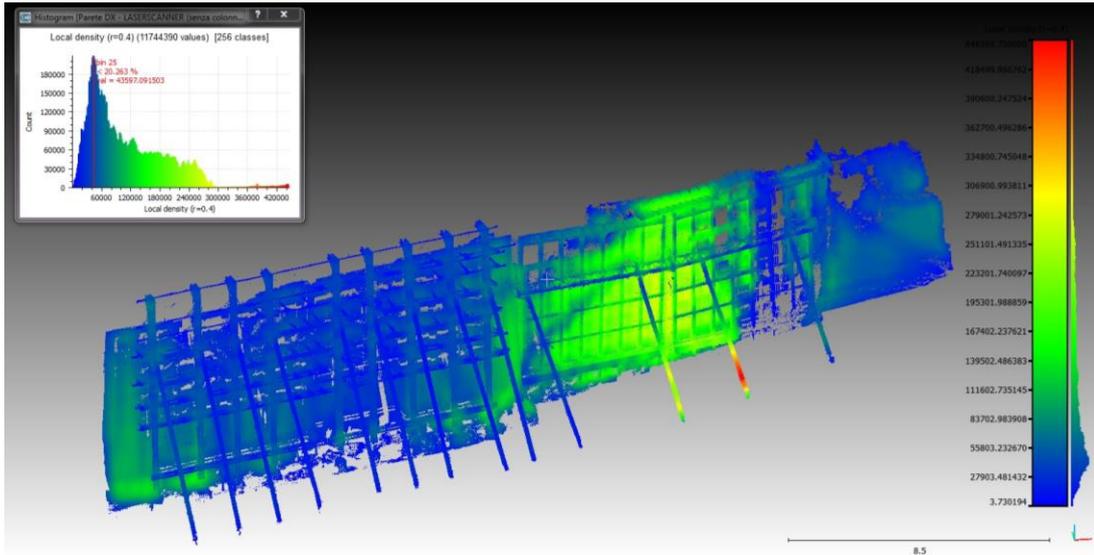


Fig. 76 – Analisi della densità sulla nuvola laser scanner della parete sud.

Come si può dedurre dalle immagini, in generale la nuvola fotogrammetrica presenta una maggiore densità, distribuita in maniera più uniforme rispetto a quella del laser scanner. Nel primo caso abbiamo un *range* di densità (*Local density*) più ridotto che va da 0 a oltre i 210,000 punti nell'intorno del punto in esame. Si raggiunge un picco massimo che indica più di 140,000 punti che individuano 100,000 punti nel raggio di 40 cm da loro.

Nella nuvola laser scanner invece si presenta una distribuzione meno omogenea, con una densità maggiore nelle zone dove il laser scanner è stato posizionato più vicino alla parete. In questo caso si ha un *range* di densità più vasto, da 0 a oltre i 420,000 punti nel raggio prefissato, e un picco di massima che indica più di 200,000 punti che individuano 44,000 punti nel raggio di 40 cm da loro.

In genere, le nuvole restituite da laser scanner generano nuvole più dense di quelle ottenute dalla fotogrammetria aerea. Essendo quest'ultima implementata con la fotogrammetria terrestre, le due nuvole riscontrano un numero di punto quasi identico (laser Scanner: 11,744,390 punti; fotogrammetria: 11,261,275 punti). Queste due tipologie di acquisizione si distinguono principalmente per la modalità di distribuzione dei punti sulle superfici.

A seguito sono riportati i risultati riguardanti la parete est, rispettivamente sulla nuvola fotogrammetrica [fig. 77] e laser scanner [fig. 78].

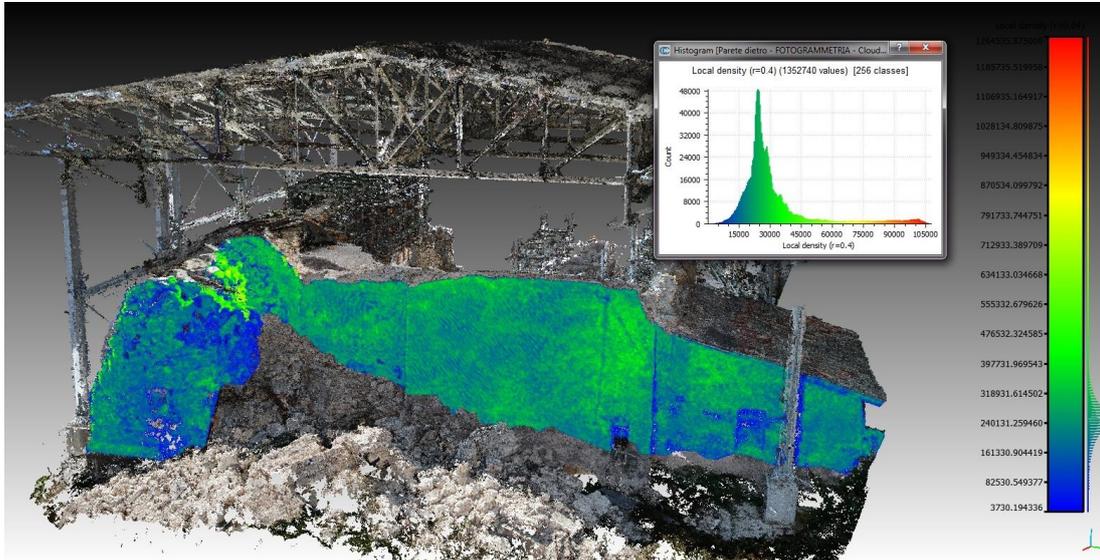


Fig. 77 – Analisi della densità sulla nuvola fotogrammetrica della parete est.

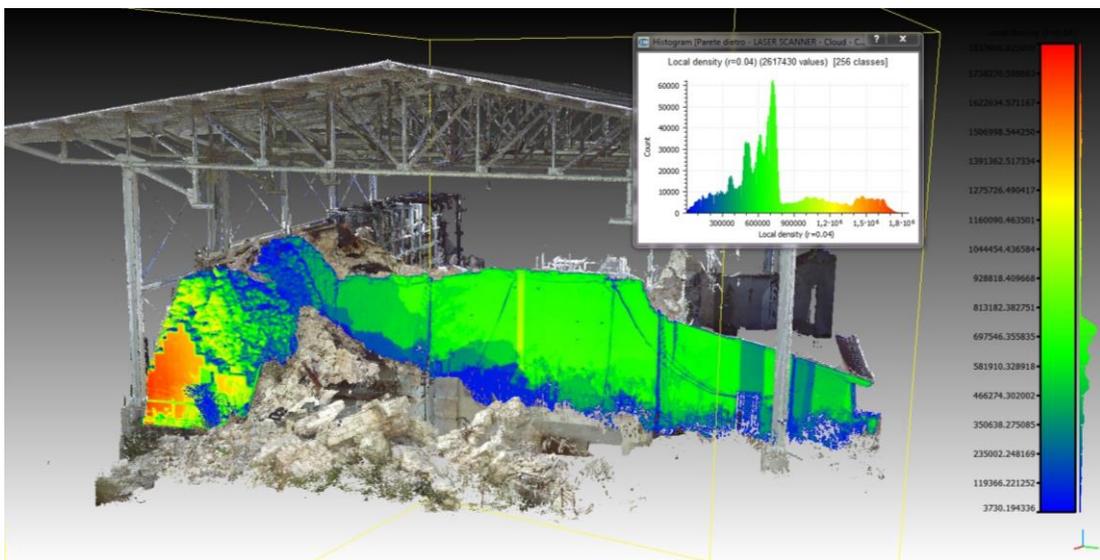


Fig. 78 – Analisi della densità sulla nuvola laser scanner della parete est.

Con la parete est si ha invece una netta differenza di densità tra le due nuvole di punti. Infatti se prima le due nuvole presentavano circa lo stesso numero di punti, in questo caso la nuvola laser scanner presenta il doppio dei punti rilevati da quella

fotogrammetrica. La nuvola laser scanner presenta una densità di picco che indica più di 60,000 punti che individuano 700,000 punti nel raggio di 40 cm da loro.

La nuvola fotogrammetrica invece presenta una densità minore ma una distribuzione molto più omogenea. Ha densità di picco che indica più di 48,000 punti che individuano 25,000 punti nel raggio di 40 cm da loro.

4.3.3 Risultati

Questi valori di distanza e densità soddisfano i requisiti minimi di accuratezza prefissati. Le due nuvole di punti, fotogrammetrica e laser scanner, discostano mediamente di meno di 1 cm di distanza tra loro, quando la precisione richiesta è di 2 cm. Le densità invece, per quanto non risulti omogenea su tutta la struttura rilevata, presenta dei valori che garantiscono una descrizione dettagliata della chiesa in rapporto alla scala di rappresentazione prefissata di 1:100.

In virtù di questi risultati è stato possibile unire le due nuvole in un'unica nuvola di punti tramite il comando *Merge multiple clouds*.

Si riportano numero di punti e grandezza delle nuvole:

▪ Nuvola di punti laser Scanner:	258,129,761	8,20 GB
▪ Nuvola di punti fotogrammetria:	234,591,026	7,42 GB
▪ Nuvola di punti totale:	492,720,787	15,62 GB

4.4 Utilizzo di ReCap 360

Ottenuta la nuvola di punti totale si è proceduto con la suddivisione della stessa in macroelementi. Questa operazione si rende utile per approcciarsi correttamente al successivo passaggio di realizzazione del modello in ambiente BIM. È necessario dividere la nuvola in elementi chiave, in modo da poterli gestire in modo più agevole.

4.4.1 Il software ReCap 360

Per questo passaggio si è inizialmente optato per l'impiego del programma Autodesk ReCap 360, un *software* di Autodesk derivante dall'acronimo di *Reality Capture*. Il programma consente gestire nuvole di punti e di creare *Mesh* 3D. oltre questo ReCap 360 consente anche di eseguire e la pulizia delle nuvole di punti e la

segmentazione delle stesse. Proprio questi ultimi comandi sono quelli necessari per il lavoro di segmentazione in macroelementi.

4.4.2 *Filtraggio e segmentazione della nuvola*

Il comando utilizzato in ReCap 360 è del tutto analogo al comando *Segment* già visto su CloudCompare. Questo permette di selezionare delle aree o punti tramite tre diversi metodi di selezione quali *Window*, *Fence* e *Plane* e per poi poter compiere diverse operazioni quali:

- Eseguire un *Clip Inside/Clip Outside*, rendendo temporaneamente non visibili i punti selezionati;
- Assegnare i punti a una data regione o sezione con il comando *Region*;
- Eliminare i punti con il comando *Delete*.

Per via della notevole dimensione del *file* iniziale, 15,6 GB, non risulta possibile eseguire queste operazioni di sezionamento. Il *software* non reagisce fluidamente, rischiando continui blocchi con la conseguente perdita di dati. Per alleggerire il *file* è stato suddiviso in sei porzioni che in linea approssimativa potessero contenere tutte un simile numero di punti [Fig. 79]. Ciò è stato realizzato tramite il comando *Segment* di CloudCompare. Con questo procedimento si è giunti a dividere il *file* iniziale di 15,6 GB in sei *file* così strutturati:

- Parte 1: 26,782,098 punti in 868 MB;
- Parte 2: 40,014,610 punti in 1,26 GB;
- Parte 3: 78,214,764 punti in 2,47 GB;
- Parte 4: 68,904,460 punti in 2,18 GB;
- Parte 5: 84,677,170 punti in 2,68 GB;
- Parte 6: 77,424,962 punti in 2,45 GB.

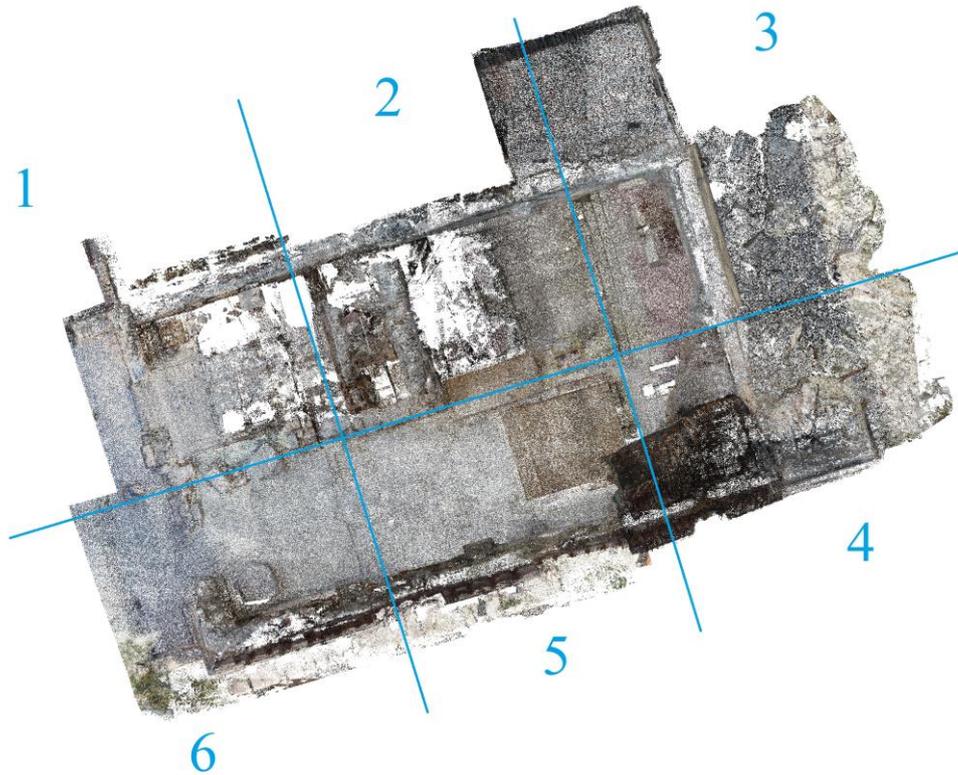


Fig. 79 – Suddivisione della nuvola di punti in sei porzioni.

Tuttavia anche in questo caso, durante l'elaborazione dei *file* tramite ReCap 360, persistono gli stessi problemi. Si è in seguito deciso di alleggerire ulteriormente i *file* delle nuvole di punti filtrandoli. Il Filtraggio di una nuvola di punti consente di escludere un certo numero di punti non ritenuti necessari per descrivere la geometria dell'oggetto analizzato, eliminandoli. Esistono tre diversi metodi di filtraggio:

- *Random*: il *software* semplifica la nuvola di punti in maniera casuale a seconda della densità con cui sono distribuiti i punti;
- *Octree*: il *software* suddivide la nuvola di punti in celle di dimensioni variabili a seconda della scelta dell'utente e diminuisce il numero di punti presenti all'interno di ciascuna cella;
- *Space*: un algoritmo che consente di specificare qual è la minima distanza che si vuole mantenere tra i punti della nuvola.

Nel nostro caso, con CloudCompare, si è utilizzato il metodo *Space*, accessibile tramite il comando *Subsample a point cloud*. È stato utilizzato con un intervallo di 0,005 m ossia 5 mm di distanza minima tra i punti. Il risultato di questo procedimento ha

restituito i sei *file* con un sensibile minor numero di punti, distribuiti omogeneamente. Di conseguenza anche le dimensioni degli stessi *file* risultano molto inferiori a quelle precedenti:

- Parte 1: 10,889,653 punti in 353 MB;
- Parte 2: 13,092,572 punti in 424 MB;
- Parte 3: 12,591,717 punti in 405 MB;
- Parte 4: 20,167,067 punti in 653 MB;
- Parte 5: 17,928,186 punti in 581 MB;
- Parte 6: 21,019,076 punti in 681 MB.

Anche dopo questo ultimo tentativo persistono i problemi di elaborazione e salvataggio dei *file* tramite ReCap 360. Sono stati utilizzati anche diversi computer per eseguire le stesse operazioni senza riuscire a ovviare dai medesimi problemi.

L'utilizzo del *software* ReCap 360 in questa fase è di estrema importanza in quanto permette la creazione di *file* in formato *.rcp*, unico consentito per l'inserimento delle nuvole di punti all'interno di Autodesk Revit che servirà per la modellazione BIM.

Durante i tentativi di utilizzo del programma si era proceduto cercando di dividere la nuvola di punti della chiesa in tre macroelementi:

- Copertura metallica;
- Edificio della chiesa;
- Impalcature di messa in sicurezza.

Grazie al comando *Fence* è possibile selezionare i punti desiderati di una nuvola e assegnarli a una specifica *Region*, iterando questo procedimenti per ogni porzione delle nuvole di punti, è possibile dunque assegnare tutti i punti alle tre macrocategorie, copertura, edificio e impalco.

Vista l'impossibilità nell'impiego di ReCap 360 si è deciso di procedere ancora una volta utilizzando CloudCompare che offre degli strumenti simili ma meno immediati nell'utilizzo.

Infatti si è utilizzato nuovamente il comando *Segment* per dividere ogni singola porzione di nuvola nelle tre macrocategorie. Oltre a questo comando è stato utilizzato anche il comando *Cross section* che ha permesso di suddividere ogni singola nuvola

in sezioni facilitando la selezione dei punti desiderati. Tutta l'operazione ha comportato circa una settimana di lavoro.

Infine si sono ottenute 13 nuvole:

- 1 della struttura di copertura (esportata in un unico blocco, senza suddividerla in parti);
- 6 parti dell'edificio;
- 6 parti dell'impalco.

In seguito, le sei nuvole dell'edificio e le sei dell'impalco, sono state unite tra loro tramite il comando *Merge multiple clouds* di CloudCompare. Come risultato si ottengono tre nuove nuvole di punti rispettivamente rappresentanti la copertura, l'edificio e l'impalco.

Come ultima operazione sono state importate queste tre nuvole nuovamente su ReCap 360 per salvarle senza apportare loro nessuna modifica, esportandole così in formato *.rcp* necessario per la loro introduzione in Revit.

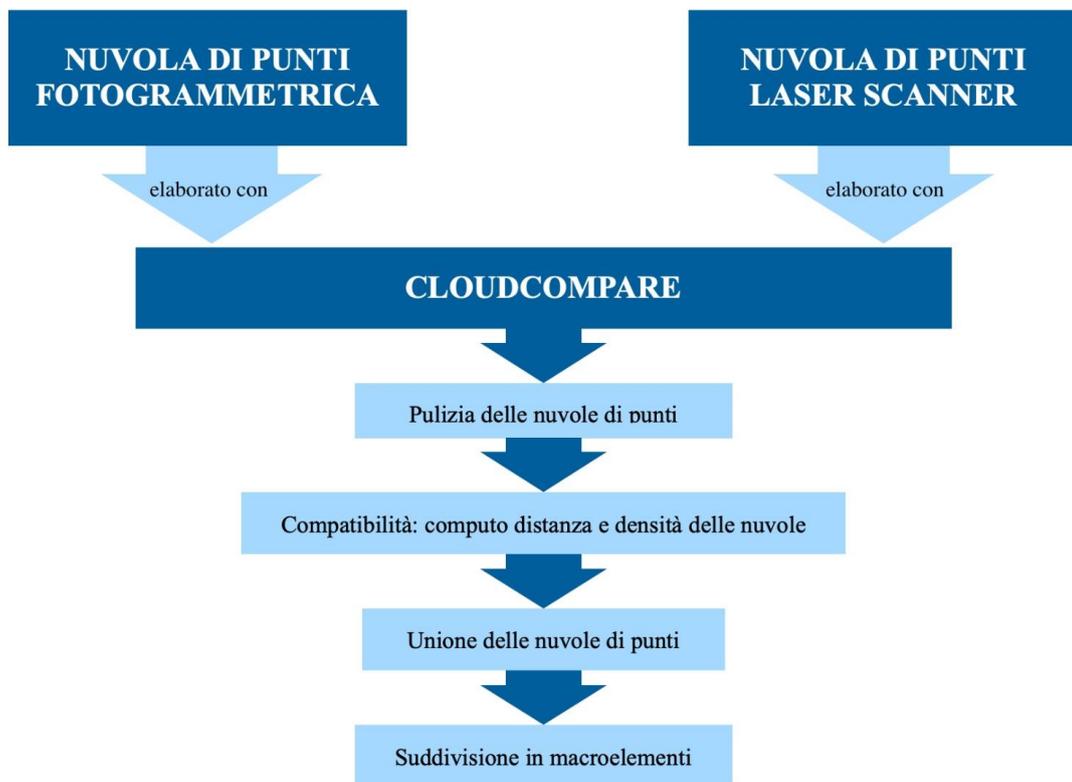


Fig. 80 – Flow chart riassuntivo del capitolo.

CAPITOLO 5

GENERAZIONE DEL MODELLO

TRIDIMENSIONALE

5.1 Scopo del progetto

Come già illustrato nel paragrafo 1.4.1 del capitolo 1, lo scopo del progetto ha l'obiettivo di realizzare un modello tridimensionale con annesso *database* della chiesa di San Salvatore. Questa decisione è stata presa in seguito a contatti con la SABAP – Umbria, su consiglio di un funzionario che ha suggerito come poter strutturare il *database* in base alle informazioni a loro necessarie.

Avendo elaborato tutti i dati acquisiti dal rilievo, e avendo restituito le nuvole di punti correttamente georeferenziate, queste sono state importate in ambiente BIM per proseguire con la modellazione tridimensionale.

5.2 La metodologia BIM

Il BIM è una metodologia per la realizzazione di modelli tridimensionali che non siano limitati alla sola informazione di tipo grafico. La geometria viene ora accompagnata con informazioni e dati riguardanti l'oggetto rappresentato. Questi dati possono essere di tipo tecnico e analitico, ma anche documentale, e aiutano a gestire il progetto in modo completo sotto tutti i suoi aspetti.

BIM è un acronimo che può assumere diversi significati:

- *Building Information Modeling*, in italiano “modello di informazione dell'edificio”. Si riferisce alla creazione di un accurato modello virtuale di un edificio al quale vengono associate informazioni che riguardano il suo intero ciclo di vita, dal progetto alla costruzione, fino alla sua demolizione;

- *Building Information Modelling*: definisce la metodologia che accorpa le varie discipline riferite all’edificio, attraverso la gestione di ogni informazione relativa alla sua realizzazione. Dentro questo modello si possono trovare, specifici elementi costruttivi, costi e programmi manutentivi;
- *Building Information Model*: permette una riproduzione delle caratteristiche tecniche e funzionali dell’edificio, questa metodologia facilita le scelte decisionali durante il ciclo di vita dell’edificio perché costituisce una rappresentazione digitale condivisa, garantita dall’interoperabilità tra *software*.

Da queste definizioni si può dedurre come gli strumenti e i *software* che si interfacciano a questa metodologia siano molteplici. Nel nostro caso ci interfacciamo con il BIM attraverso il *software* Autodesk Revit, che ci permette di curare maggiormente la modellazione geometrica e grafica che ci porta a fare riferimento alla definizione del *Building Information Modeling*.

Uno dei notevoli vantaggi che offre la metodologia BIM è quella della collaborazione tra le diverse figure interessate nelle diverse fasi del ciclo di vita di una struttura. È possibile creare un modello che contenga informazioni su geometrie, materiali, struttura portante, caratteristiche termiche, impianti, costi, sicurezza, manutenzione, ecc. Attraverso il BIM l’edificio viene modellato prima della sua realizzazione fisica, e mediante questo modello virtuale collaborano le varie figure coinvolte nel progetto (architetti, ingegneri, progettisti consulenti, analisti energetici, ecc.) [Fig. 81].



Fig. 81 – Grafico degli aspetti gestiti dalla metodologia BIM.

Questo approccio risulta altamente strategico, offrendo la possibilità di analizzare l'edificio e valutare le sue prestazioni già in fase progettuale.

L'adozione di questo sistema di progettazione permette un miglior lavoro di squadra. I progettisti di un'impresa edile possono collaborare su un progetto centralizzato occupandosi ognuno della propria disciplina, lavorando su un modello locale [Fig. 82]. La condivisione di un unico modello riduce infatti drasticamente il tasso percentuale di errori e incongruenze, abbassando come conseguenza il numero di modifiche, le tempistiche e i costi di progettazione, rendendo il tutto più economicamente sostenibile.

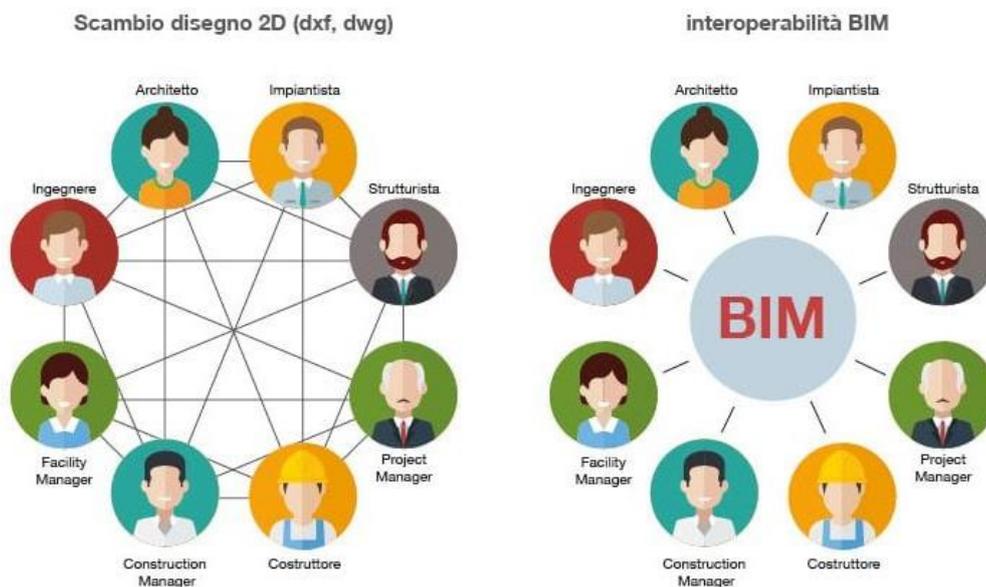


Fig. 82 – Interoperabilità del BIM.

La metodologia BIM consente, inoltre, la produzione di un *database*, un contenitore di informazioni, aggiornabili e estraibili dal modello stesso, a seconda delle necessità contingenti.

5.2.1 L'HBIM

Il termine HBIM è l'acronimo di *Historic Building Information Modeling* o *Heritage Building Information Modeling*. La metodologia BIM nasce per essere applicata a progetti *ex novo*, ovvero per la creazione da zero di nuovi edifici. Con l'HBIM invece si va ad applicare questa metodologia a edifici già esistenti, questo permette la realizzazione di modelli tridimensionali che consentono sia un'accurata

rappresentazione geometrica di un manufatto già costruito, sia la possibilità di associare a esso le informazioni sul manufatto stesso. Oltre alla rappresentazione grafica, in questo frangente il modello diventa anche un *database* interrogabile per analizzare l'edificio allo stato attuale e per reperire i dati utili nella previsione di interventi futuri.

Applicando la metodologia BIM agli edifici esistenti, e ai beni architettonici, si riesce ad avere una precisa conoscenza geometrica del manufatto, che viene modellato grazie alla realizzazione di accurati rilievi, ottenendo una solida base per lo sviluppo della progettazione.

5.3 Modellazione con Autodesk Revit

Per la modellazione tridimensionale dell'edificio, a partire dalla nuvola di punti, è stato utilizzato il *software* Autodesk Revit 2018, uno dei più diffusi per la progettazione in ambiente BIM.

5.3.1 Il software

Autodesk Revit 2018, è un *software* sviluppato da Autodesk che offre una piattaforma BIM per la realizzazione di un modello informativo tridimensionale. L'organizzazione di questo programma consente di creare un *file* di progetto dove realizzare un elaborato attraverso tutte le funzioni che vengono predisposte. Principalmente la modellazione avviene attraverso elementi predefiniti noti come famiglie, ma con la possibilità di personalizzare nel dettaglio ogni particolare in base alle situazioni dello specifico caso studio. Oltre la progettazione grafica consente anche l'inserzione di dati a livello informativo, che fanno dell'elaborato grafico un effettivo modello BIM. Il *software* inoltre consente la possibilità di esportare i dati su un vasto numero piattaforme, per esempio Microsoft Access gestione delle base di dati, o più semplicemente in ambiente CAD, o ancora, è possibile esportare anche immagini e video.

5.3.2 *Workset e famiglie*

Il modello BIM si basa su alcuni concetti base indispensabili per la corretta realizzazione di un modello che possa essere condiviso. Questi elementi sono i *workset* e le famiglie.

I *workset* possono essere intesi come contenitori all'interno dei quali suddividere le varie parti del progetto, suddividendo ad esempio gli elementi in base alla loro caratteristica architettonica, oppure in base alle tipologie di materiale, e così via a seconda delle esigenze dello specifico progetto. Questo offre la possibilità di collaborare con altri progettisti, permettendo ad ognuno di lavorare singolarmente su un *file* locale connesso a un *file* del modello centrale che viene aggiornato tramite una sincronizzazione.

Le famiglie invece, sono suddivise in tre tipologie all'interno di Revit:

- famiglie di sistema;
- famiglie caricabili;
- famiglie locali.

Le famiglie di sistema sono utilizzate per creare elementi di fattezze semplici e basilari di un edificio come ad esempio i muri o i pavimenti. Queste famiglie hanno un ridotto margine di modificabilità, limitandone la personalizzazione delle stesse che devono seguire esclusivamente i parametri preimpostati del *software*. Le famiglie di sistema sono impiegate in particolar modo per la realizzazione di edifici *ex novo*, ma possono essere impiegate anche per la modellazione di elementi esistenti come è stato fatto nel nostro caso per muri e pavimenti. Se si vogliono apportare delle modifiche a queste famiglie è necessario procedere attraverso la duplicazione di un elemento esistente, per poi modificarne i valori.

Le famiglie caricabili invece rappresentano elementi più specifici come ad esempio infissi, impianti, sanitari ecc. che cercano di rappresentare l'estesa varietà di prodotti presenti sul mercato dell'edilizia per metterli a disposizione dei progettisti. Queste famiglie sono memorizzate in librerie esterne al *file* di progetto e devono essere caricate al suo interno per il loro utilizzo. Le famiglie caricabili, vista la vasta gamma

di oggetti presenti sul mercato, consentono una maggiore possibilità di personalizzazione, tramite la creazione di parametri personalizzati.

Le famiglie locali, sono elementi specifici che vengono inseriti in un determinato progetto, queste vengono modellate e parametrizzate sulla base delle singole necessità che si presentano all'interno di un progetto, per via di ciò sono inutilizzabili al di fuori del progetto in cui vengono create. Nel nostro caso, queste famiglie sono state impiegate per la modellazione di dettagli della chiesa come la centina dell'iconostasi, i cornicioni, i capitelli ecc. Inoltre sono state impiegate anche per realizzare tutti i solidi di sottrazione per realizzare aperture o rastremazioni degli elementi.

5.3.3 Importazione delle nuvole

Prima di tutto è stato necessario creare un nuovo *file* di progetto Revit, come modello architettonico, e si sono definiti i *workset* di lavoro. Per fare questo si è dovuto accedere alla voce *Collabora* della barra degli strumenti, da qui attivarla tramite il comando omonimo *Collabora*. Si seleziona la tipologia di collaborazione da realizzare. Viene proposta la collaborazione tramite rete o tramite *cloud*, in questo caso la scelta è ricaduta su una collaborazione in Rete. Fatto questo passaggio vedremo attivarsi l'icona *Workset*, cliccandovi si può accedere alla finestra che consente di creare e gestire i *workset*. Di default Revit ne ha già creati due: *Workset1* e *Griglie e livelli condivisi* che sono stati lasciati all'interno del progetto deselezionando l'opzione di visibilità [Fig. 83]. In più sono stati creati cinque nuovi *workset*:

- Copertura_PointCloud: contenente la nuvola di punti che descrive la copertura metallica;
- Edificio_PointCloud: contenente la nuvola di punti che descrive le parti rimaste della chiesa;
- Impalco_PointCloud: contenente la nuvola di punti che descrive i sistemi di impalcature e carpenterie aggiunte post sisma;
- Murature: contenente gli elementi modellati seguendo le parti in muratura della nuvola dell'edificio;
- Elementi lignei: contenente gli elementi modellati seguendo le parti lignee della nuvola dell'edificio;
- DTM: contenente il modello digitale del terreno attorno la chiesa.

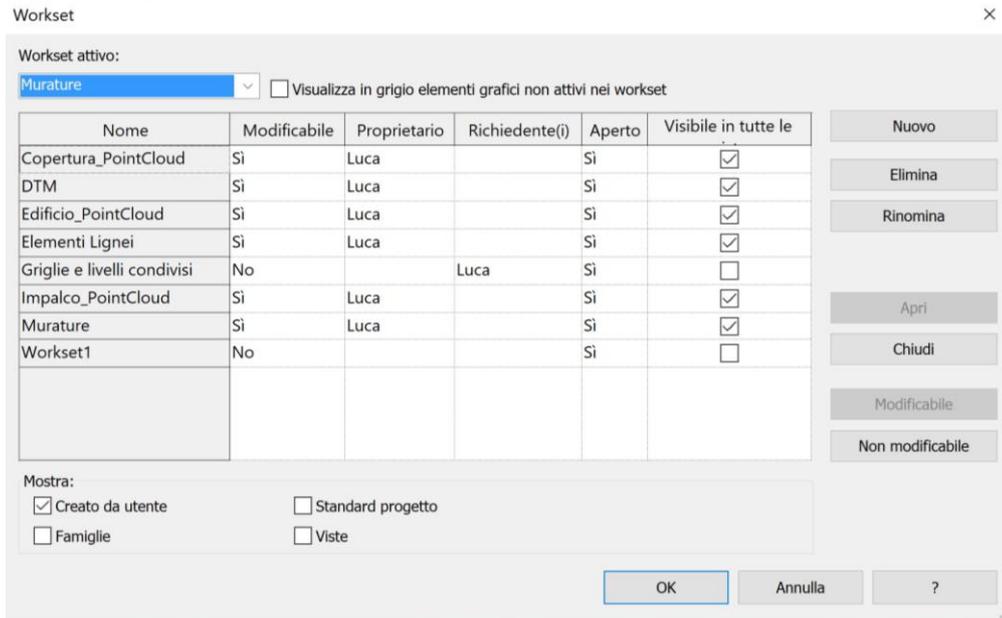


Fig. 83 – Finestra dei workset.

Come appena descritto, ciascun *workset* contiene elementi costituiti da parti di modello o nuvole di punti, attivabili e disattivabili in qualsiasi momento.

Per inserire le nuvole di punti nei rispettivi *workset* si è selezionata la voce *Inserisci* dalla barra degli strumenti e poi su *Nuvola di punti*, da qui è stato possibile selezionare i *file* di ReCap 360 in formato *.rcp* realizzati precedentemente [Fig. 84].

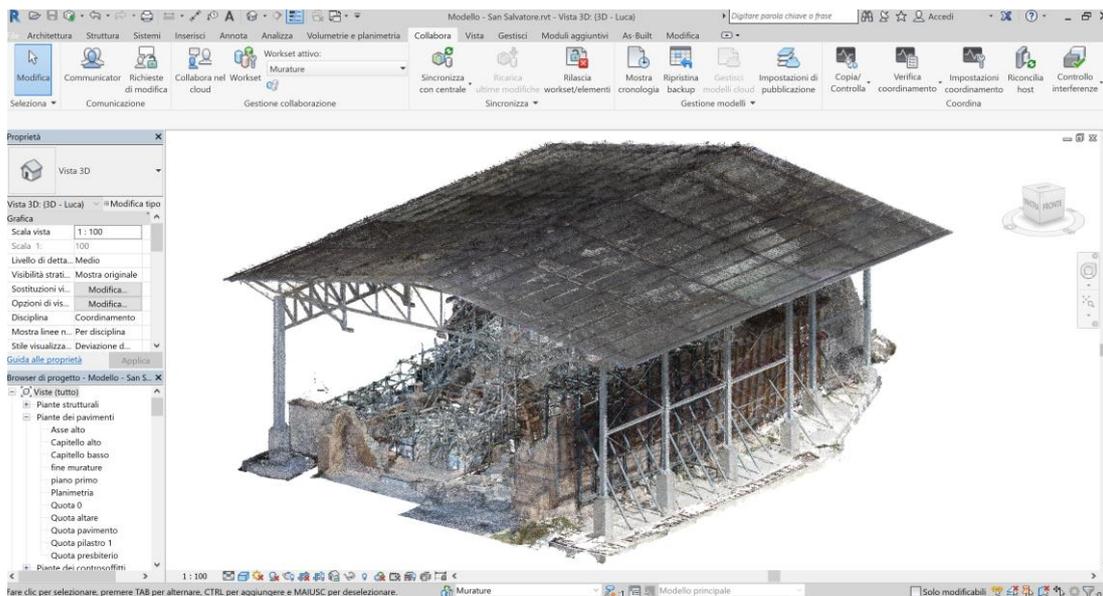


Fig. 84 – Vista 3D delle nuvole di punti caricate in Revit.

Si è presentato tuttavia un problema durante l’inserimento delle nuvole, in quanto le coordinate reali degli oggetti risultano troppo grandi per essere inserite correttamente su Revit. Il programma consente l’inserimento del *file*, ma non ne permette un’agevole gestione, l’elemento viene collocato troppo distante dal centro di progetto e non permette la visualizzazione in pianta, rendendolo di fatto ingestibile. Per ovviare a questo problema sono state modificate le nuvole di punti in formato *.las* ottenute alla fine dei processi compiuti su CloudCompare.

CloudCompare, come già citato nel capitolo 4.2.2, propone in automatico un ridimensionamento delle coordinate [Fig. 85], trasladole affinché esse possano essere posizionate sulla finestra di lavoro. Per risolvere il problema è stato necessario modificare queste coordinate in modo da rendere il nostro oggetto il più possibile vicino all’origine. Il procedimento prevede la variazione delle coordinate del medesimo valore proposto da CloudComapre all’apertura del *file* [Fig. 86]. Grazie a questo si va ad annullare la notevole distanza dal centro di progetto. Riportiamo l’esempio di come si è proceduto per una delle nuvole in questione, quella dell’edificio.

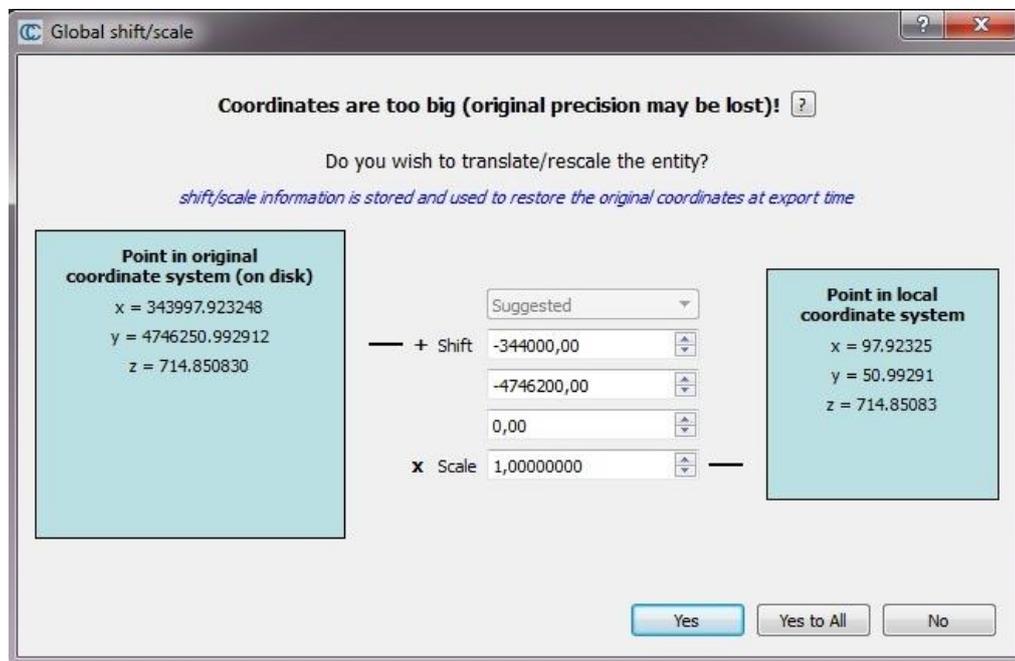


Fig. 85 – Traslazione coordinate proposta da CloudComapre.

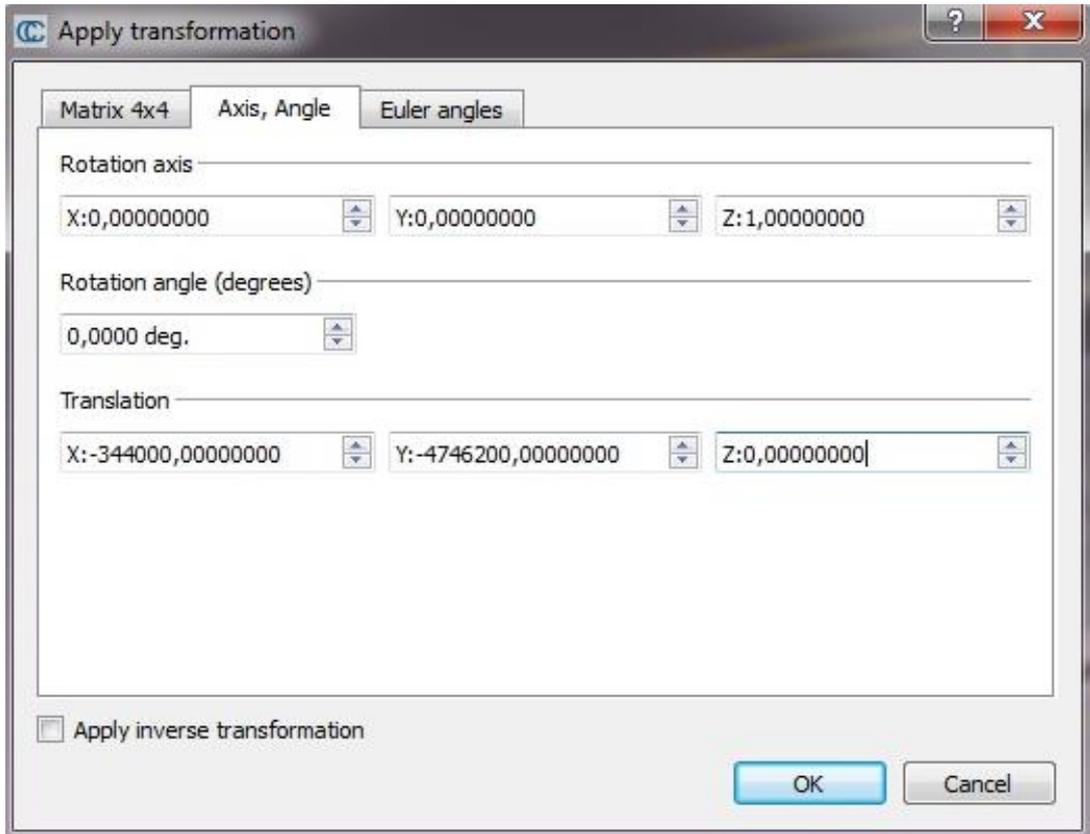


Fig. 86 – Trasformazione delle coordinate del medesimo valore mostrato in Fig. 79.

Tramite il comando di CloudCompare *Edit – Apply transformation* [fig.80] si modificano le coordinate e si salva la nuvola di punti. Ovviamente bisognerà rieseguire nuovamente il processo di apertura e salvataggio della nuvola su ReCap 360 per permetterne nuovamente l'utilizzo su Revit.

Ora che le nuvole presentano valori di coordinate accettabili da Revit, è possibile inserirle. Tuttavia le nuvole non risultano coincidenti con il punto base di progetto impostato dal *software*, questo viene spostato con una semplice azione di trascinamento del mouse in un punto all'incirca al centro della chiesa di San Salvatore [Fig. 87].



Fig. 87 – Vista planimetrica in Revit, con il punto base indicato in blu.

Così posizionato si è potuto proseguire con la realizzazione del modello impostando le varie viste del modello quali sezioni, linee di quota e le viste prospettiche dell'oggetto.

5.3.4 Modellazione muri

Per la modellazione dei muri si è proceduto inserendo gli elementi *Muro* delle famiglie di sistema. Generalmente, nella progettazione *ex novo*, è sufficiente impostare una tipologia di muro con dimensioni e materiali desiderati per ottenere un buon risultato. Tuttavia in occasione della modellazione della chiesa di San Salvatore ci si è trovati di fronte un elemento poco lineare, con variazioni di sezione e rastremazioni in altezza. In aggiunta, i crolli dovuti al sisma, hanno ulteriormente complicato la situazione.

Per fronteggiare la situazione si è optato per la realizzazione di un unico elemento murario di notevole spessore, 2,40 m, che poi è stato tagliato seguendo l'andamento

planimetrico della nuvola di punti. Per eseguire questi tagli si sono utilizzati dei modelli locali, creati come estrusione di vuoti, che sono stati sottratti alle murature di base disegnate [Fig. 88-89].

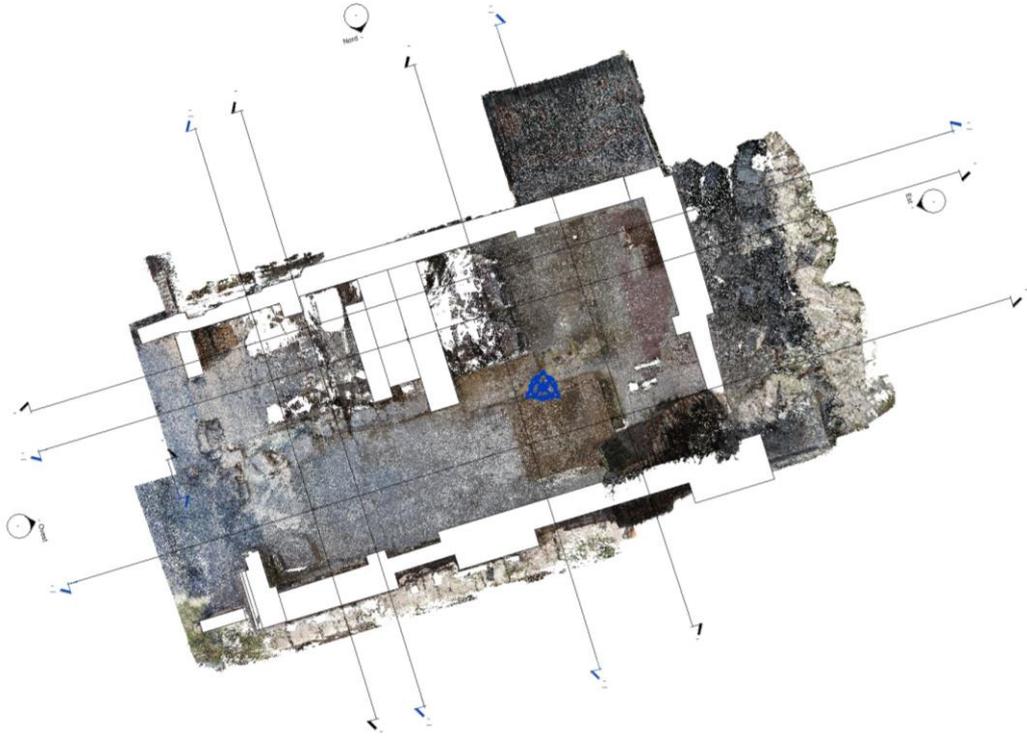


Fig. 88 – Vista planimetrica con modellazione dei muri sulla nuvola di punti.



Fig. 89 – Vista 3D con modellazione dei muri sulla nuvola di punti.

Con questa metodologia si sono realizzate dunque tutte le pareti perimetrali della chiesa e dell'iconostasi. Modellata la forma tramite la vista planimetrica si è proceduto nel delineare i bordi superiori delle mura seguendo l'andamento irregolare disegnato dai crolli. Per fare ciò è stato necessario modificare il profilo dei muri facendo un semplice doppio clic su di essi. I profili sono stati disegnati, ponendosi nelle viste di sezione o prospetto, tramite una linea spezzata, che consente di seguire l'andamento irregolare della nuvola di punti [Fig. 90].

Seguendo questa metodologia sono state realizzate anche le aperture delle finestre presenti nella parete sud e le porzioni di volte rimaste dell'iconostasi. Quest'ultima essendo estremamente danneggiata è stata rappresentata con tre elementi murari paralleli tra loro [Fig. 91].



Fig. 90 – Vista prospetto nord con modellazione dei profili dei muri.



Fig. 91 – Vista 3D con muri modellati secondo l'andamento dei crolli.

5.3.5 Modellazione volta a crociera

La chiesa di San Salvatore era quasi interamente coperta da volte a crociera, a eccezione della navata di sinistra davanti all'iconostasi. L'unica volta rimasta parzialmente in piedi è quella sovrastante l'altare di destra, quello più recente. In questo punto è possibile rinvenire anche l'unica porzione di copertura non crollata, che presenta i resti delle capriate lignee e dei coppi in laterizio.

Per modellare tale volta si è seguito l'esempio riportato nella tesi di Francesca Matrone su Sacro Monte di Varallo. In quel caso si presentava un notevole numero di volte a crociera ed era stato necessario creare un modello generico adattivo che potesse riprodurre le fattezze delle volte, adattandosi alle dimensioni dei quattro punti base su cui esse poggiavano. Si è deciso di seguire la medesima strada benché vi fosse un'unica volta da realizzare, in modo da poter garantire una più fedele rappresentazione della realtà.

È stata creata in primo luogo una semplice volta a crociera parametrica con i quattro punti di appoggio e un unico parametro di altezza in chiave di volta. In seguito, dato

che questa tipologia di volta non si adattava bene al caso di San Salvatore, si è creata una seconda volta parametrica con tre parametri per ogni arco.

Per realizzare una volta di questo tipo è necessario creare una nuova famiglia, costruire la geometria, e rendere adattivi i quattro punti di appoggio della volta attraverso l'omonimo comando. In seguito si procede disegnando le linee dell'elemento con delle *Spline*, e rendendole linee di riferimento. Si aggiungono poi le linee in altezza che vengono parametrizzate secondo la quota per regolare le altezze degli archi [Fig. 92]. A differenza del primo tentativo, in cui abbiamo inserito una sola quota parametrica per arco, nella versione finale sono state inserite tre quote parametriche per ogni arco.

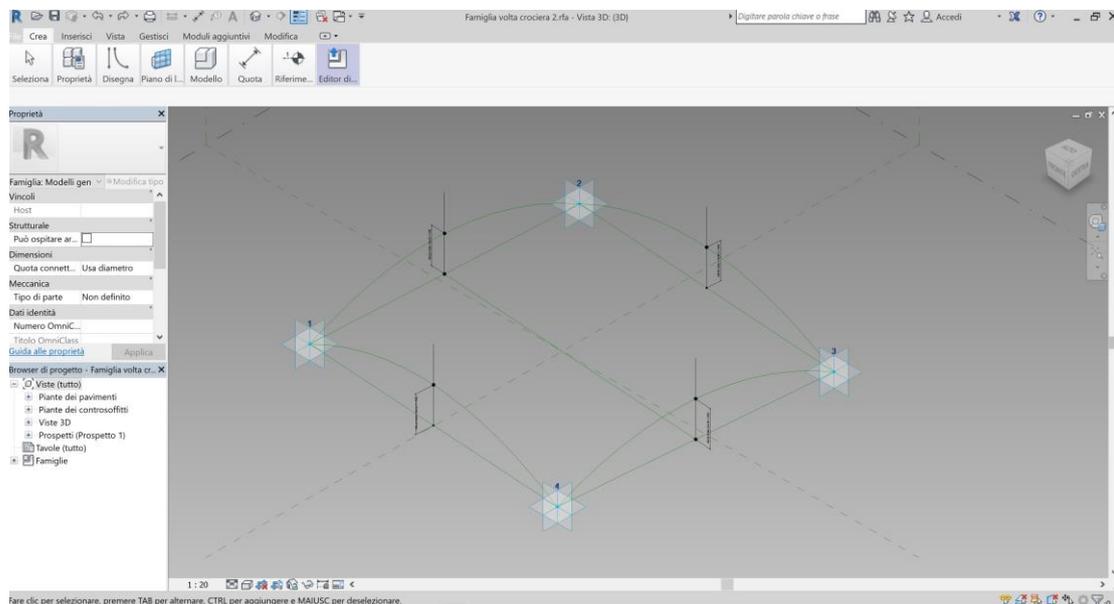


Fig. 92 – Volta parametrica con un parametro in chiave di volta.

Infine selezionando gli archi disegnati si costruisce il solido tramite il comando *Crea forma* e selezionando la voce *Vuoto*, necessario per sottrarre il volume dagli elementi del modello. Assieme a questo comando è necessario spuntare la voce *Taglio con vuoti* nelle proprietà [Fig. 93]. Quindi è possibile caricare la volta parametrica nel progetto e utilizzarla per tagliare le murature seguendo l'andamento della volta.

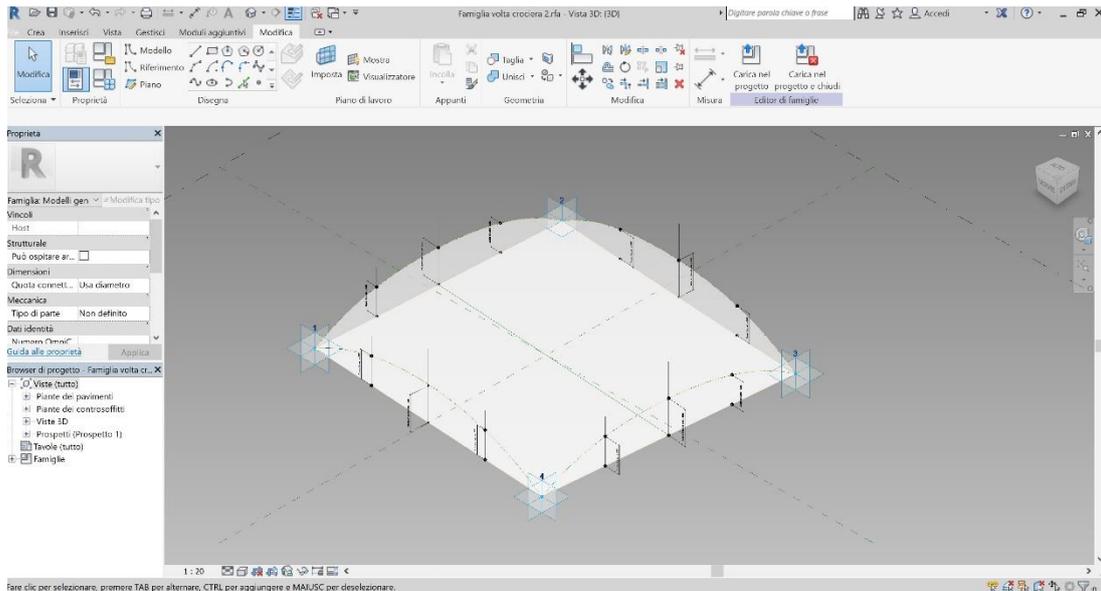


Fig. 93 – Volta parametrica a tre parametri con costruzione del solido.

Nonostante la volta con tre parametri si adatti correttamente nei punti parametrizzati, questa non riesce a descrivere a dovere l'andamento delle murature. Il problema principale è dovuto dal fatto che l'azione sismica ha deformato la volta rendendola leggermente asimmetrica, determinando delle misure non standardizzabili ma riproducibili solo per il singolo caso.

Dunque si è deciso di tagliare la muratura con una geometria creata come modello generico. Tramite la famiglia di sistema *Muri* è stato realizzato un grosso volume a forma di parallelepipedo. Per le dimensioni di tale oggetto si è fatto riferimento agli elementi murari descritti dalla nuvola di punti. In seguito si è proceduto tagliando questo volume con le medesime metodologie descritte nei paragrafi precedenti per delineare i profili delle mura. Si è delineato il profilo del parallelepipedo disegnando l'andamento dell'arco e della parte irregolare della copertura. Successivamente si è proceduto con il taglio tramite sottrazione di vuoti per estrusione, esattamente come per le mura, disegnando l'arco della seconda volta che compone la crociera [Fig. 94].

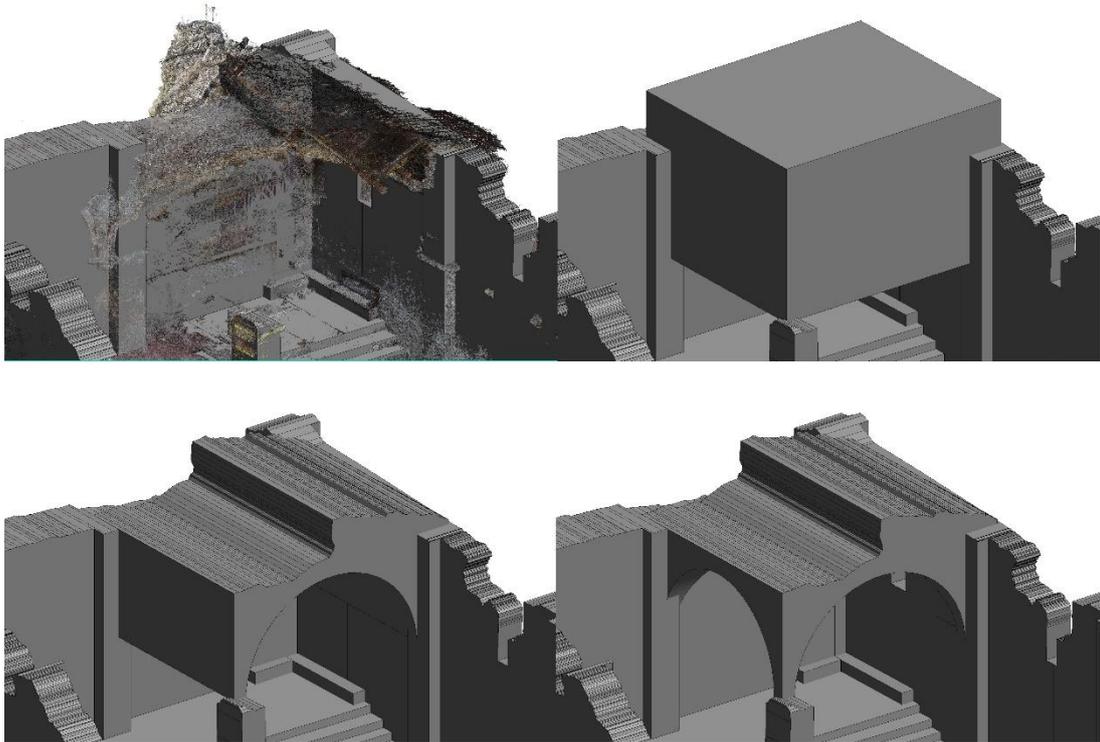


Fig. 94 – Modellazione della volta a crociera.

A questo punto tramite la vista dall'alto è stato possibile tagliare la volta all'incirca a metà, lungo uno dei costoni, sempre seguendo le forme descritte dalla nuvola di punti. Ulteriori tagli sono stati effettuati per rifinire le porzioni di volta crollate.

Come ultimo passaggio nella modellazione della volta, sono state inserite le porzioni di copertura a falde. Queste sono state realizzate con la famiglia di sistema *Tetto*, tramite il comando *Tetto da estrusione*. Si è disegnato un asse che fosse coerente con lo sviluppo della copertura nella sua lunghezza. Poi, in due fasi distinte, si è tracciato l'andamento della copertura cercando di rimanere il più possibile fedeli alle sue forme [Fig. 95]. Si è dovuto scendere a compromessi per via della estrema complessità degli elementi e anche della scarsa qualità della nuvola di punti in alcune zone. Il risultato ottenuto è comunque soddisfacente. Infine come ultima azione è stato eseguito un taglio sulla parte più esterna del tetto per delineare l'effettivo andamento dello stesso.

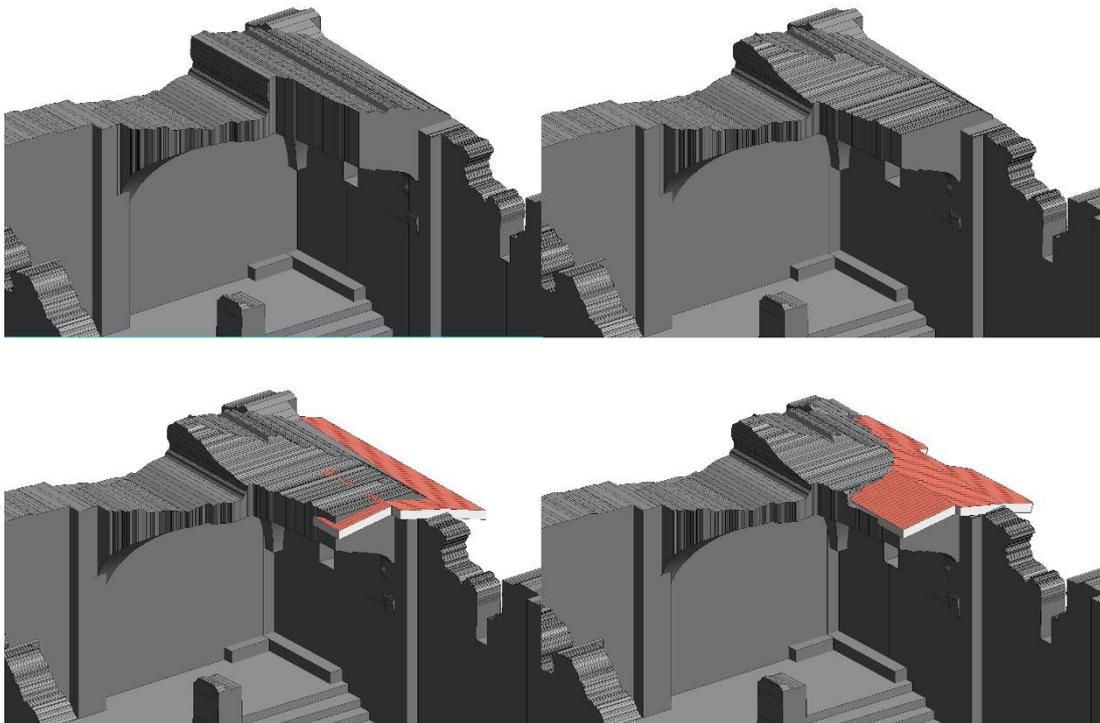


Fig. 95 – Modellazione della volta a crociera e della copertura.

5.3.6 Modellazione centina

Un altro elemento di notevole importanza è quello della centina lignea che sorregge l'iconostasi. L'oggetto in questione si presenta sostanzialmente intatto, anche se sensibilmente deformato dalle forze del sisma.

Nonostante la sua integrità fisica, l'elemento risulta dettagliato e coperto da altri elementi in vari punti. Proprio per questo la nuvola di punti che lo descrive presenta una qualità molto bassa, in alcune aree si ha addirittura una totale assenza di punti che la descrivano. Nonostante ciò, grazie anche all'ausilio dei fotogrammi acquisiti durante il rilievo, si è riusciti a modellare correttamente l'intera centina.

In primo luogo sono state modellate le assi montanti come *Componente locale* attraverso la voce *Modelli generici*. Per realizzarle si è impiegato il comando *Estrusione su percorso*, questo comando consente di disegnare un percorso a piacere e una sezione che viene estrusa lungo tutto tale percorso. Pertanto come percorso si è tracciata una linea retta che seguisse la direzione e l'inclinazione delle assi di legno. Successivamente, tramite la vista 3D di Revit, si è delineata la sezione delle assi disegnando un profilo che fosse il più possibile fedele alle effettive fattezze delle assi

di legno presenti. Questo procedimento è stato ripetuto quattro volte per assecondare le diverse inclinazioni dei vari filari presenti nella struttura.

Con lo stesso metodo è stato possibile disegnare i traversi, ovvero le assi che collegano orizzontalmente i montanti tra di loro. Sono state individuate cinque di queste assi, si è tracciato il percorso con una retta, e nuovamente si è disegnata la sezione delle assi rifacendosi ai dettagli desumibili dalla nuvola di punti [Fig. 96].

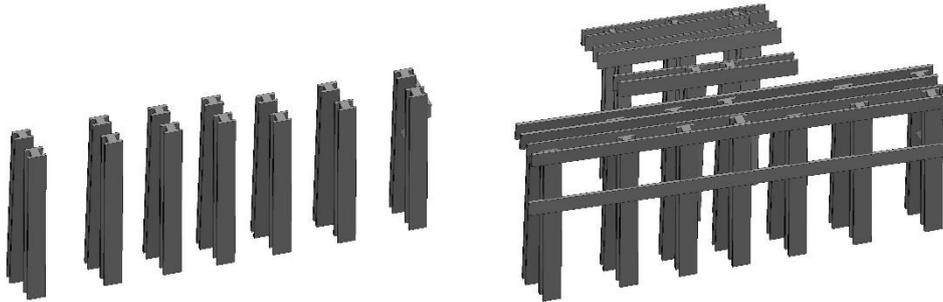


Fig. 96 – Modellazione di montanti e traversi della centina lignea.

In seguito si è passato a disegnare gli elementi ad arco che sorreggono la volta a botte, il comando e la metodologia impiegata sono simili a quelle appena illustrate. A differenza di come visto finora, il percorso di riferimento non è più un asse retta ma un arco che segue l'andamento della volta.

Sono state disegnate le assi che sorreggono il tavolato addossato alla superficie interna della volta a botte. In questo caso si è utilizzata una semplificazione geometrica riproducendo un'unica asse a forma di arco, ciò è stato necessario per cercare di ridurre al minimo il margine di errore nella rappresentazione. Successivamente sono state inserite anche le tre assi che sorreggono internamente gli archi, sempre con il metodo di estrusione.

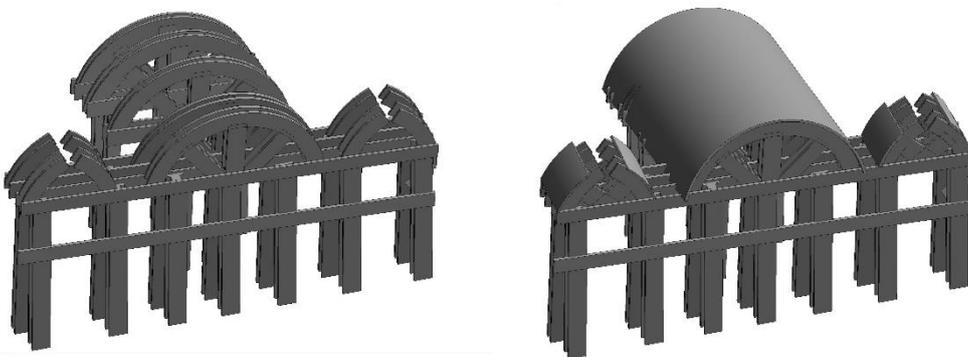


Fig. 97 – Modellazione degli archi della centina lignea.

Lo stesso procedimento è stato realizzato per gli archi delle due volte laterali [Fig. 97]. Queste ultime presentano dimensioni minori e, a differenza della principale, sono caratterizzate da un a sesto acuto. Come passo finale si sono realizzati i tavolati che sono addossati alle pareti delle volte.

5.3.7 Modellazione dettagli

I dettagli del caso in esame sono gli elementi della trabeazione, porzioni di volte, capitelli, cornici, nicchie, porte e macerie.

Per modellare elementi irregolari come massi, macerie, porzioni di muratura si è utilizzata la famiglia muri. Si sono in seguito modellate le fattezze degli elementi sottraendo volumi per avvicinarsi alla forma desiderata, esattamente come visto in precedenza per la modellazione delle murature. La medesima operazione è stata eseguita anche per la creazione di aperture o nicchie tramite la sottrazione di volumi con il comando *Taglia*. Invece per elementi lineari come ad esempio i capitelli e le cornici si è utilizzato il comando *Estrusione su percorso* inserendo dei componenti come *Modello locale*. Si è tracciato il percorso desiderato lungo le mura in base ai riferimenti della nuvola di punti, per poi disegnare una sezione dell'elemento da ripetere lungo il tragitto tracciato [Fig. 98].

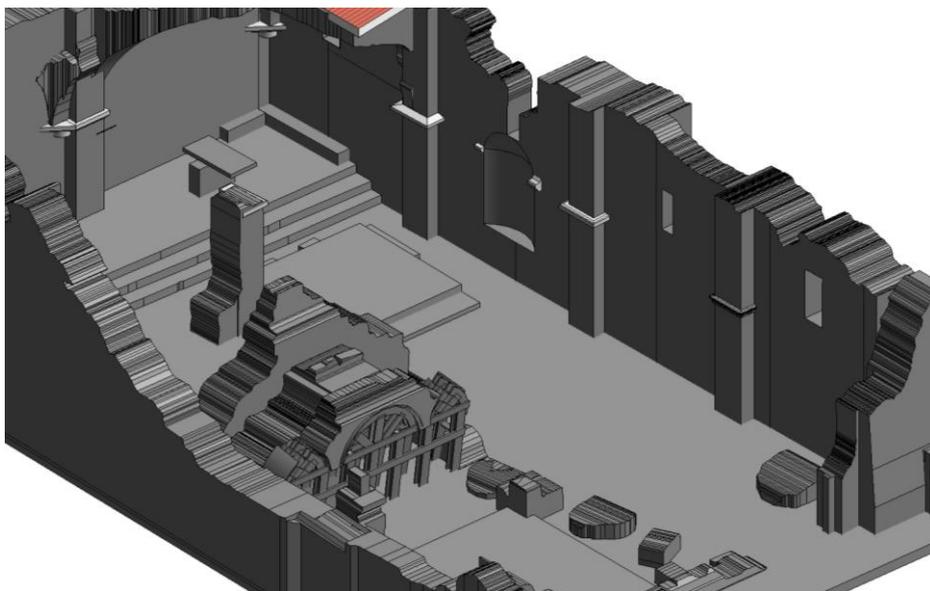


Fig. 98 – Dettagli modellati all'interno della chiesa di San Salvatore.

5.3.8 Creazione DTM

È stata creata una superficie di appoggio per il modello che descrive l'andamento del terreno nell'area circostante alla chiesa, un DTM (*Digital Terrain Model*). Per realizzare questa superficie è stata utilizzata la nuvola di punti acquisita dal drone Phantom. La suddetta nuvola è stata pulita attraverso CloudCompare, con i medesimi procedimenti già illustrati per le operazioni di pulizia delle nuvole di punti della chiesa.

Questa nuvola di punti non deve essere necessariamente chiara e ricca di dettagli, per la descrizione dell'andamento di un terreno in questo caso è sufficiente anche un punto ogni 50 cm. Dunque la nuvola è stata filtrata e ridimensionata, in quanto copriva un'area molto più estesa di quella utile ai fini del progetto. Sono stati inoltre rimossi tutti gli edifici del cimitero, la chiesa stessa, gli alberi, arbusti e qualsiasi altro elemento che non descrivesse l'andamento del suolo.

Questo procedimento ha portato a ridurre notevolmente il numero di punti e le dimensioni del *file*. Infatti il *file* di partenza presentava 80,571,534 punti e un peso di 2,05 GB [Fig. 99] che giunge ad avere solamente 67,225 punti e un peso di 2,2 MB al fine del trattamento [Fig. 100].



Fig. 99 – Nuvola di punti originale.

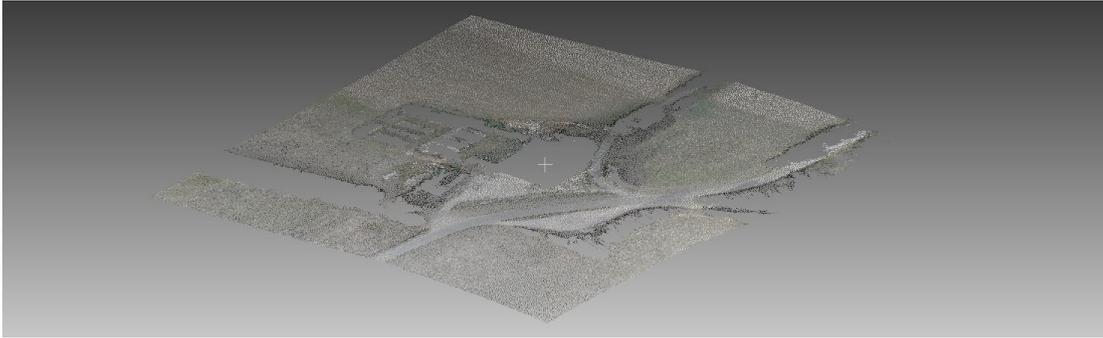


Fig. 100 – Nuvola di punti, ridimensionata, pulita e filtrata.

Per inserire il *file* come DTM all'interno di Revit è necessario che la nuvola di punti sia salvata in formato *.txt* o *.csv* separati da virgole. CloudCompare consente di esportare in questi formati, ma nel farlo esporta sia i valori delle coordinate *x,y,z* sia altri valori, come le tonalità RGB, che non sono utili in questo frangente. Per questo motivo si sono eliminate le colonne in eccesso tramite il *software Notepad++* lasciando solo le tre coordinate spaziali separate da virgole.

Il *file* così ottenuto, nel nostro caso in formato *.txt*, è stato inserito in Revit tramite il comando *Superficie topografica* in *Volumetrie e Planimetrie*, poi su *Crea da importazione* e *Specifica file dei punti*. Inserito il *file* Revit crea automaticamente la superficie. Visualizzata la superficie si sono riscontrati dei problemi in concomitanza dell'edificio. In questa zona il DTM non è descritto da alcun punto e la superficie realizzata è poco precisa e in alcuni punti si presenta al di sopra della pavimentazione del modello [Fig. 101].

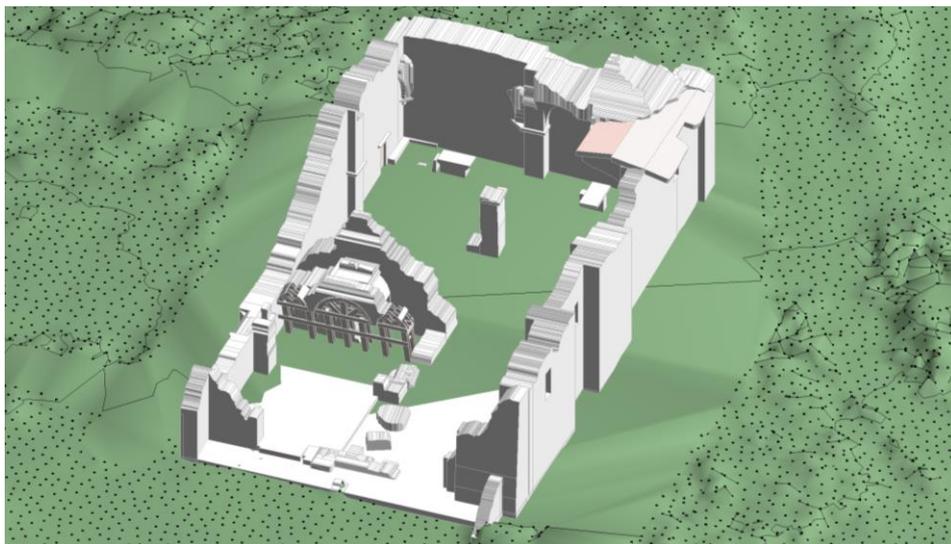


Fig. 101 – Il DTM presenta una superficie che copre la pavimentazione della chiesa.

Questo problema è stato risolto modificando la superficie all'interno della chiesa. Si sono inseriti dei punti aggiuntivi sul DTM tramite il comando *Inserisci punto*. Creati tali punti gli si è assegnata una quota coincidente con il punto inferiore della pavimentazione in modo che non la coprisse, ottenendo così il risultato desiderato [Fig. 102-103].



Fig. 102 – DTM correttamente posizionato al di sotto della pavimentazione.



Fig. 103 – Vista di insieme del modello con il DTM.

Le viste 3D del modello completo sono visualizzabili nell'ALLEGATO n°4.

5.4 Confronto tra modello BIM e nuvola di punti

La chiesa di San Salvatore presenta una morfologia molto irregolare e con un elevato numero di dettagli. Queste fattezze sono dovute principalmente ai crolli dovuti al sisma. Per questo motivo il modello BIM realizzato non riesce a descrivere esaurientemente tutti i dettagli del manufatto.

Per capire dove la modellazione si discosta maggiormente dalla realtà si ricorre all'utilizzo di un *plug-in* di Revit chiamato *FARO As-Built for Autodesk Revit*. Questa applicazione consente di mettere a confronto la nuvola di punti e modello BIM, valutando lo scostamento tra i due. Il *software* prende come riferimento una data superficie del modello e valuta le varie distanze che i punti presentano da questa. La suddivisione del calcolo avviene in celle e in particolare vengono valutate quattro distanze indicate con i termini [Fig. 104]:

- Valore medio: distanza media tra tutti i punti della nuvola di punti in una data cella;
- Valore minimo: deviazione minima assoluta all'interno della cella della griglia. I valori positivi si trovano all'esterno del componente, i valori negativi all'interno;
- Valore massimo: deviazione massima assoluta all'interno della cella della griglia. I valori positivi si trovano all'esterno del componente, i valori negativi all'interno;
- Valore più vicino: distanza tra il centro della cella della griglia e il punto più vicino al centro, quando proiettato su una superficie.

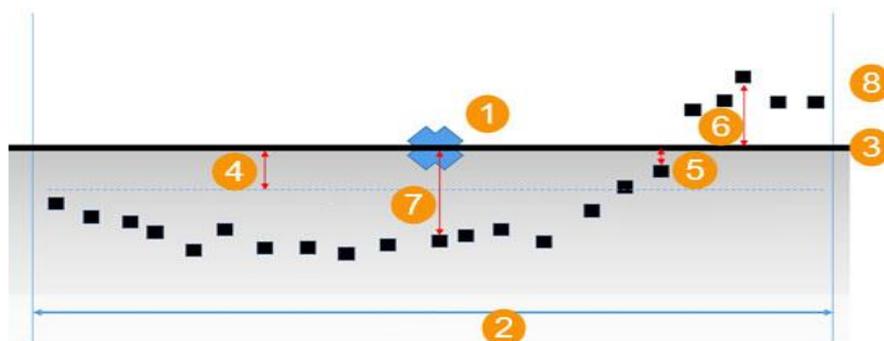


Fig. 104 – Schema dei valori impiegati da *As-Built*: (1) centro della cella della griglia, (2) larghezza cella, (3) taglio superficie, (4) valore medio, (5) valore minimo, (6) valore massimo, (7) valore più vicino, (8) punti della nuvola di punti.

Il risultato è una restituzione grafica che caratterizza le superfici colorandole in base alla disposizione dei punti. Viene indicato se un punto coincide con la data superficie oppure se si discosta in positivo o in negativo, infatti As-Built imposta una faccia positiva ed una negativa della superficie.

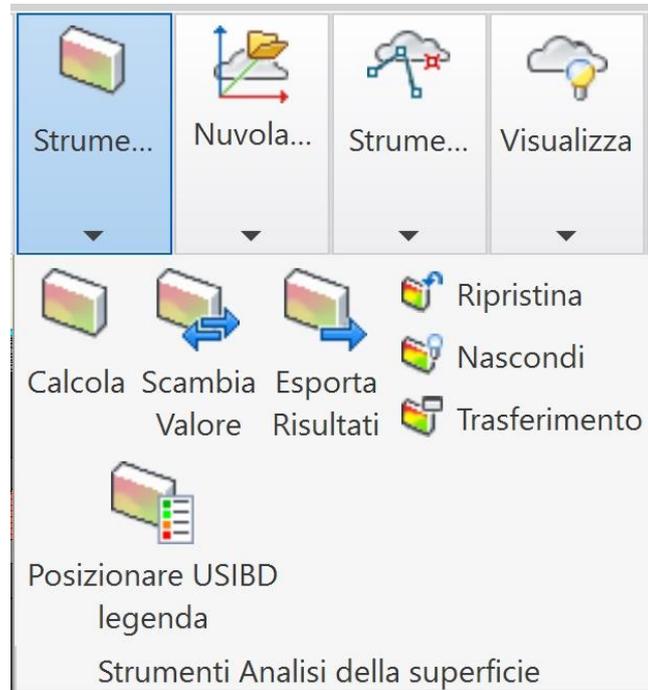


Fig. 105 – Interfaccia di analisi delle superfici di As-Built.

As-Built permette di indicare la categoria degli oggetti da selezionare quali modelli generici, muri, pavimenti e tetti. Fatto questo si possono selezionare le superfici che si desidera analizzare del modello tramite un semplice clic con il mouse. Come passaggio successivo è possibile impostare i parametri di analisi quali la dimensione media delle celle della griglia, ovvero le dimensioni delle singole aree di analisi attorno alla superficie scelta, e la distanza massima di analisi dalla superficie. Nel nostro caso si è optato per una piccola area di griglia, 1 cm, e una distanza massima di 40 cm [Fig. 106]. Inizialmente era stato impostato 60 cm come distanza massima, ma in diversi punti le pareti presentavano spessori minori e venivano rappresentati anche alcuni punti delle pareti interne, non rendendo chiari i risultati dei computi.

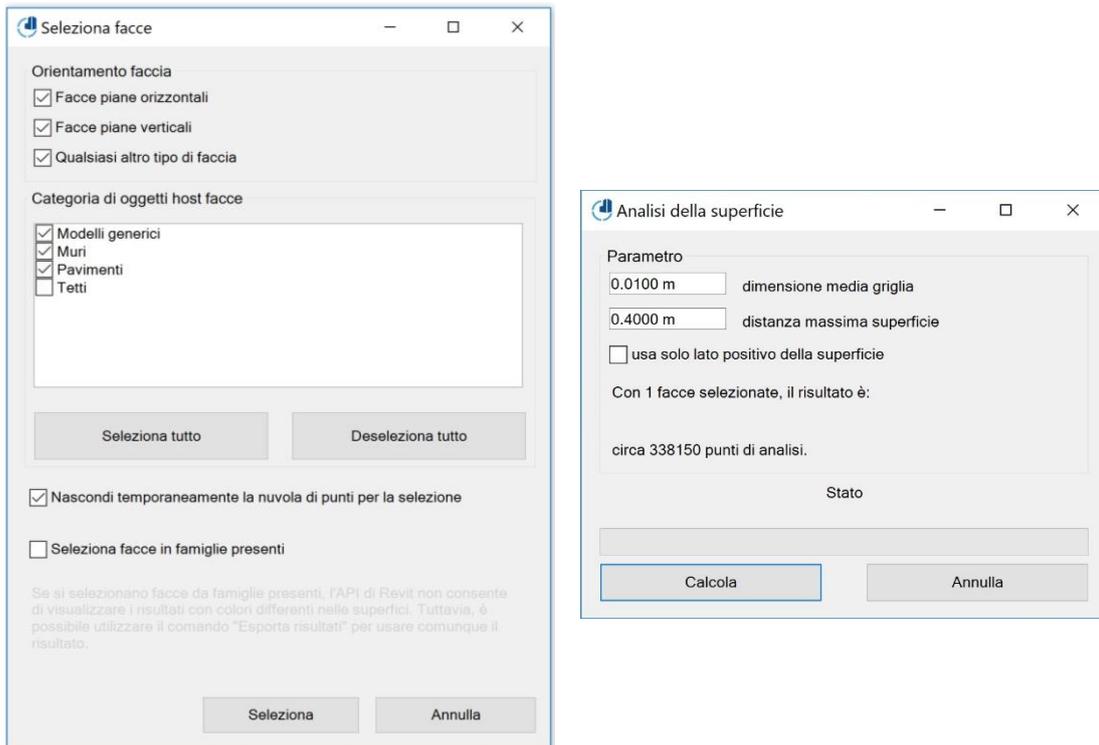


Fig. 106 – Finestra di selezione delle facce e di impostazione dei parametri di calcolo.

Tramite il comando *Calcola* l'applicazione esegue l'analisi e restituisce un risultato grafico colorando le superfici del modello in base alle distanze dei punti. È possibile modificare l'aspetto di questo risultato personalizzandolo a piacere, nel nostro caso si è scelta una scala cromatica RGB sfumata.

Le superfici prese in considerazione sono quattro:

- Parete esterna sud;
- Parete esterna est;
- Pareti e volta a crociera del fondo navata di destra;
- Iconostasi e la sua centina lignea.

Vedremo nel dettaglio ciascun caso nei prossimi sottoparagrafi.

In generale queste restituzioni riescono a far comprendere in maniera molto intuitiva le effettive fattezze delle chiese riuscendo a caratterizzare in maniera estremamente significativa le superfici del modello Revit.

5.4.1 Parete esterna sud

La prima porzione della chiesa presa in considerazione è quella della parete sud, che delimita la navata di destra. Riportiamo i risultati grafici prodotti [Fig. 107].

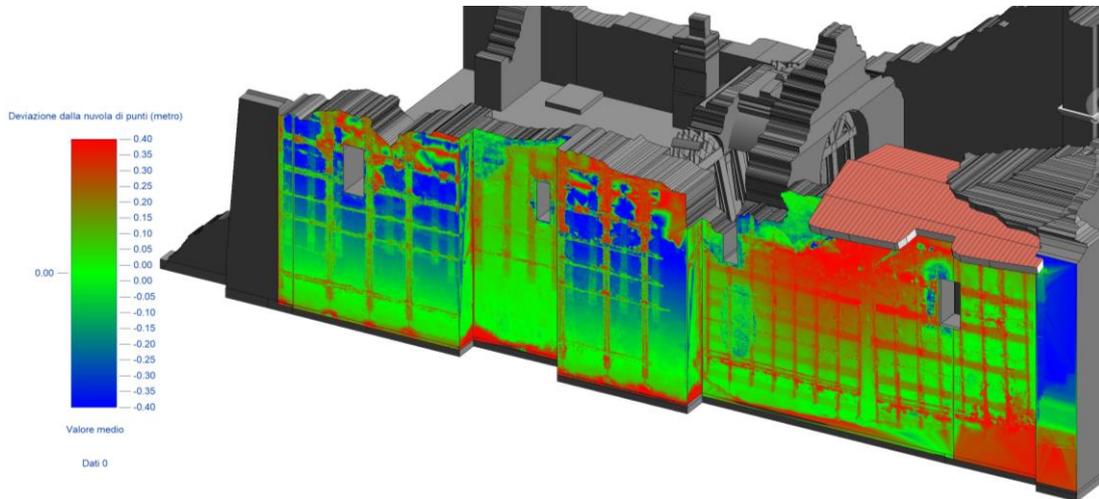


Fig. 107 – Risultati analisi As-Built parete sud.

Come indicato in legenda, il colore verde individua i punti della nuvola coincidenti con le superfici del modello. Le aree in blu indicano invece punti negativi, ovvero che rientrano all'interno della superficie. Infine le zone rosse indicano punti che si allontanano dalla superficie, esternamente alla parete.

Analizzando l'immagine si possono trarre numerose informazioni che non erano possibile cogliere attraverso il semplice modello BIM. Si nota chiaramente la presenza di griglie pressoché regolari lungo tutta la facciata, queste sono dovute dagli elementi di messa in sicurezza delle pareti che sono addossati direttamente sulle murature. Altro elemento desumibile dall'immagine è che alcune mura siano rastremate e presentino una sezione inferiore nella parte più alta, indicata dalle superfici blu. Si può notare inoltre che vicino al suolo ci sono delle aree rosse, queste sono dovute al terreno e alle macerie che si addossano alla parete, in particolare nell'angolo in basso a destra. Infine si può intuire un fuori piombo della parete sottostante la pozione di copertura, l'intero muro si sporge verso l'esterno della chiesa ed è indicato da un'area di punti rossi.

5.4.2 Parete esterna est

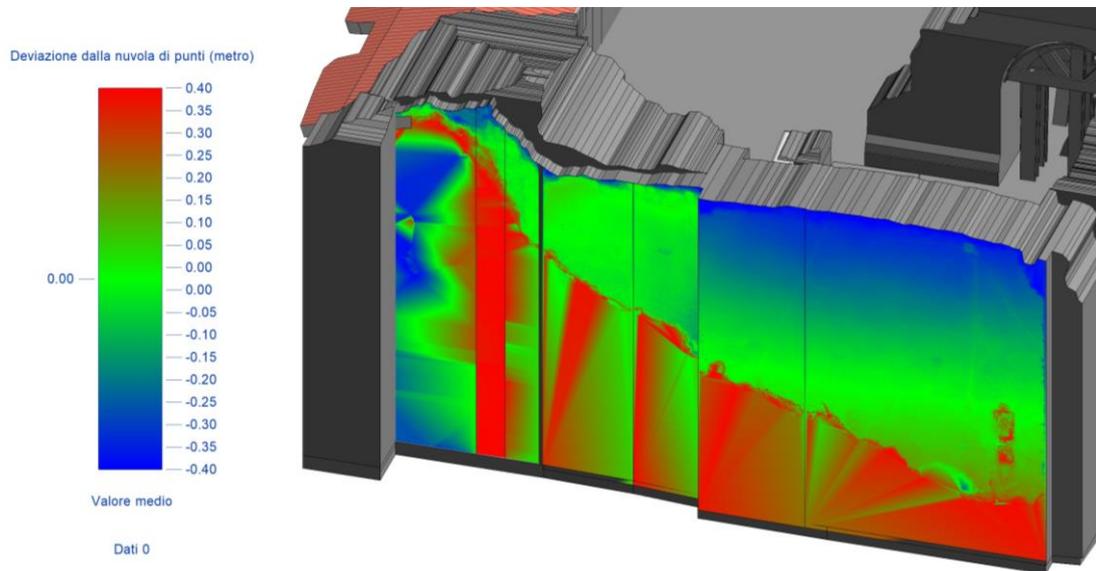


Fig. 108 – Risultati analisi As-Built parete est.

Per la parete sud, il retro della chiesa [Fig. 108], si può notare ugualmente la rastrematura della parete. Essa varia di colorazione dal verde, in basso, fino al blu, in alto. Questo lo si può intuire chiaramente soprattutto nella parte di destra della parete. Inoltre in questo caso si ha una strana distribuzione di colorazione per circa metà parete, divisa da una linea diagonale che parte all'angolo in alto a sinistra fino a quello in basso a destra. Questa restituzione poco interpretabile è dovuta dal fatto che tutta quest'area della parete è completamente coperta dalle macerie della torre campanaria. Questa zona non è descritta dalla nuvola di punti. Di conseguenza la estrema lontananza della nuvola, assieme alle sue irregolarità, portando *As-Built* a rappresentare questa zona in maniera non chiara, con brusche variazioni di tono e striature anomale

5.4.3 Pareti e volta a crociera del fondo navata di destra

Si analizza ora una parte interna della chiesa, la zona attorno all'altare di destra, quello della navata più recente [Fig. 109]. Anche qui, seppur in maniera più lieve, è possibile individuare alcune strutture lineari addossate alle pareti e in particolare alle volte, anche qui si tratta degli elementi di sostegno delle mura.

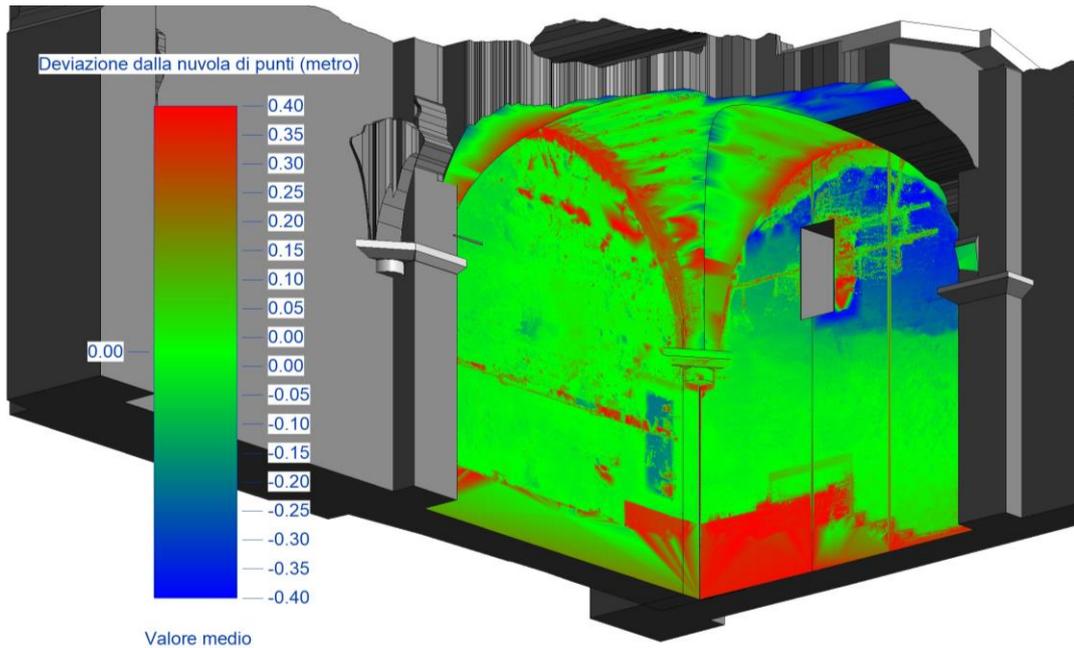


Fig. 109 – Risultati analisi As-Built pareti e volta del fondo navata di destra.

Tutta l'area in questione è in effetti interamente occupata da impalcature metalliche di sostegno, questo ha fatto sì che la nuvola di punti fosse poco definita e molto rumorosa. Rumore che è elevato in prossimità degli spigoli tra le mura e la volta, ciò è indicato dalle aree indicate in rosso. Un'altra area rossa è situata nella parte bassa delle pareti, questo è dovuto dal fatto che per realizzare questa veduta sono state momentaneamente rimosse le pavimentazioni del modello. Si possono dunque distinguere chiaramente le panche lapidee addossate alle mura e gli scalini che portano all'altare. Si può intuire la porta leggermente rientrante nella parete di sinistra, di colorazione blu. Infine si sottolinea la vasta area blu a destra accanto alla finestra, questa non è altro che la parte interna del fuori piombo visto nel paragrafo 5.4.1. Mentre prima avevamo una zona rossa che si sporgeva verso l'esterno della muratura, ora abbiamo una zona blu che indica una deformazione verso l'interno della muratura. In pratica l'intero muro sporge verso l'esterno della chiesa.

5.4.4 Iconostasi e la sua centina lignea

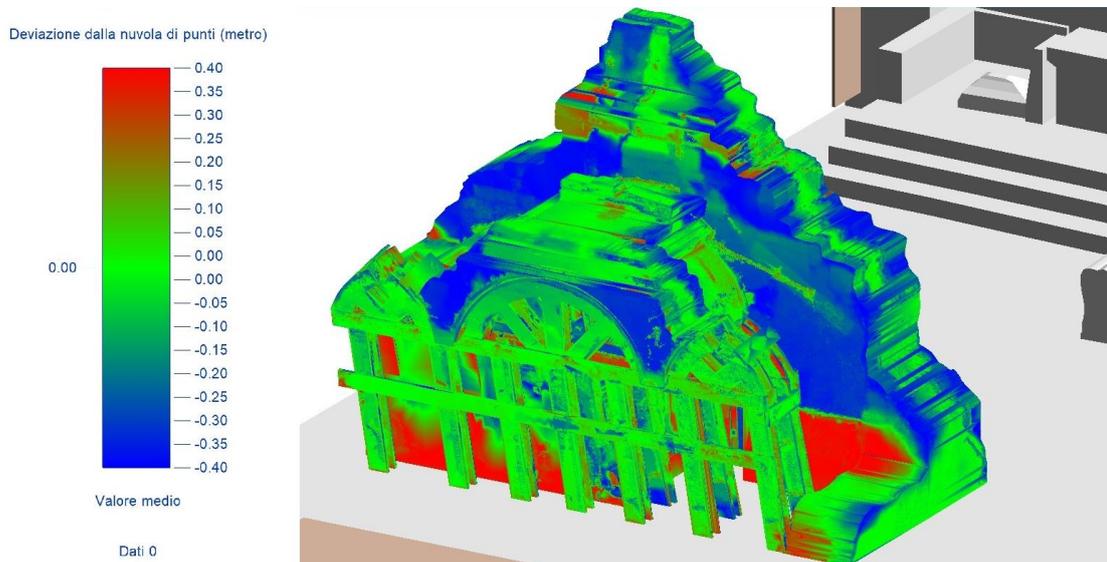


Fig. 110 – Risultati analisi As-Built iconostasi e la sua centina - vista anteriore.

L'ultimo elemento analizzato è l'iconostasi [Fig. 110], assieme alla centina lignea che la sorregge. È risultata una delle parti della chiesa più complesse da modellare per via di una poco dettagliata nuvola di punti a descrivere questa area. Ciò è dovuto dalla morfologia dell'iconostasi, e alle numerose impalcature addossate ad essa, infatti è risultato molto difficile ricreare nel dettaglio questo elemento. Di conseguenza il modello BIM trova diversi punti in cui si discosta dalla nuvola di valori ben più elevati di quelli visti negli esempi precedenti.

Durante la modellazione si è partiti da uno spessore murario maggiore a quello effettivo per poi andare a sottrarre le porzioni mancanti. Tuttavia nonostante questo procedimento, per via della complessità della struttura, le mura risultano in molti punti più spesse del dovuto andando ad evidenziare vaste aree blu. In queste zone infatti la nuvola di punti si trova al di sotto delle superfici rappresentate nel modello.

In altri punti, soprattutto in concomitanza della base dell'iconostasi, troviamo delle aree evidenziate dal colore rosso, ciò è dovuto dal fatto che qui vi sono ancora macerie non rimosse e addossate alla struttura. Molto più coerenti sono i risultati sia per la parete posteriore dell'iconostasi [Fig. 111] sia per gli elementi lignei che compongono la centina, quasi tutti evidenziate dal colore verde.

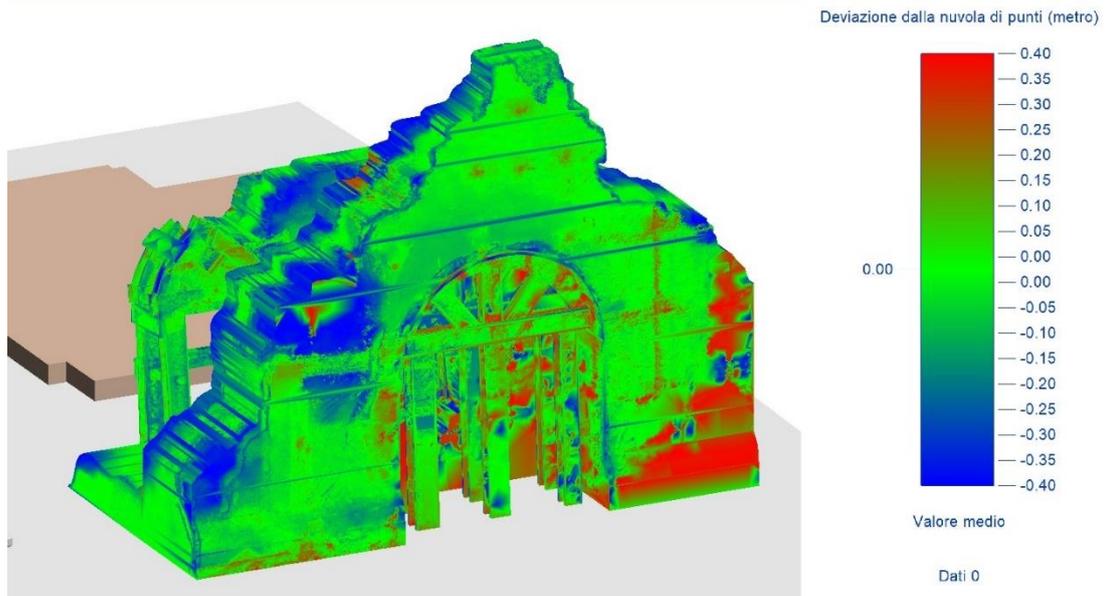


Fig. 111 – Risultati analisi As-Built iconostasi e la sua centina - vista posteriore.

CAPITOLO 6

CREAZIONE DEL *DATABASE*

6.1 Introduzione ai *database*

Un *database*, anche indicato come base di dati o banca dati, è un insieme di dati logicamente correlati tra loro, che ha lo scopo di soddisfare i fabbisogni informativi di una specifica organizzazione che si vuole automatizzare. Nella sostanza un *database* consiste nella realizzazione di tabelle, contenenti dati, correlate tra loro tramite relazioni.

I *database* si differenziano dalle documentazioni tradizionali in quanto consentono le relazioni tra i dati e ne permettono la gestione e l'aggiornamento.

Le basi di dati vengono alla luce come sostituzione degli archivi tradizionali, soggetti a numerose problematiche. Tra i problemi più diffusi si ha quello dell'incoerenza tra dati e la conseguente difficoltà nel dover adottare diverse procedure di utilizzazione degli stessi. Si presenta anche il problema della ridondanza dei dati che vengono ripetuti in più archivi, a volte in maniera non coerente a seguito di aggiornamenti male eseguiti creando incoerenze.

Inoltre mentre per gli archivi tradizionale è necessario un personale specializzato che se li gestisca, i *database* sono gestibili tramite l'impiego di appositi *software*. Questi programmi sono chiamati DBMS dall'acronimo di *Database Management System*, ovvero "sistema di gestione delle basi di dati", consentono di rendere più leggera e pratica la gestione dei dati.

6.1.1 Progettazione di un *database*

La realizzazione di un *database* è articolata principalmente in tre fasi, nelle quali si sviluppa un livello di correlazione e rappresentazione dei dati sempre più

complesso e completo. In questo passaggio si colgono tutti gli aspetti che sono presenti nel nostro oggetto di studio tenendo in considerazione solo quelli che sono utili allo scopo per cui il *database* viene creato. Inquadrati questi elementi si realizza uno schema che li correla tra loro.

Per giungere a realizzare lo schema finale per un *database* ci sono tre passaggi: progettazione concettuale, progettazione logica e progettazione fisica [Fig. 112].

- Progettazione concettuale: traduce gli elementi che vogliamo rappresentare della realtà in una descrizione formale e indipendente dai vincoli dell'ambiente tecnologico esistente.
- Progettazione logica: rappresenta la fase in cui si traduce lo schema concettuale nelle strutture proprie del sistema di gestione dati scelto per la realizzazione.
- Progettazione fisica: è la fase nella quale si realizza fisicamente il *database* tramite il linguaggio proprio del DBMS scelto.

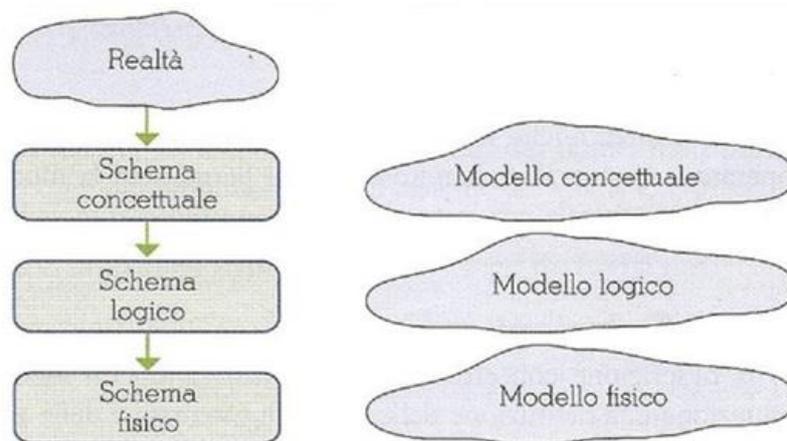


Fig. 112 – Schema delle fasi di progettazione.

Nel nostro caso ci concentriamo prettamente sulla progettazione concettuale del nostro *database*. In questa fase si produce il primo schema di rappresentazione della realtà di interesse. Questo schema presenta delle entità collegate tra loro tramite relazioni, creando il modello *Entità-Relazioni*.

6.1.2 Il modello Entità – Relazioni

Il modello Entità – Relazioni (E-R) ha lo scopo di descrivere in maniera coerente e semplificata lo schema concettuale per la progettazione di un *database* fisico. È essenzialmente costituito da due elementi di base: entità e relazioni.

Un'entità rappresenta un insieme d'oggetti della realtà cui si individuano proprietà comuni. Questa realtà può essere modellata in maniera diversa secondo l'organizzazione in questione. Si può pensare a un'entità come a una classe definita da un'astrazione di classificazione.

Una relazione o associazione è un'interazione fra entità. Normalmente, i nomi corrispondono ad entità, mentre i verbi corrispondono a relazioni.

Ogni entità è definita da un insieme di proprietà, dette attributi, che dipendono dal contesto dell'entità stessa.

Esistono tre tipi di relazioni:

- 1 a 1: consente di collegare una entità a un solo elemento della seconda entità e viceversa. Nel caso seguente l'associazione diretta e inversa sono univoche.



Fig. 113 – Relazione 1 a 1.

- 1 a molti: consente di relazionare a una entità più elementi della seconda. La relazione non vale nel senso opposto, perché l'associazione diretta è di tipo univoco mentre quella indiretta è di tipo multiplo.



Fig. 114 – Relazione 1 a molti.

- molti a molti: consente di relazionare agli elementi di un'entità a molti elementi di un'altra entità. In questo caso l'associazione diretta e indiretta sono multiple.

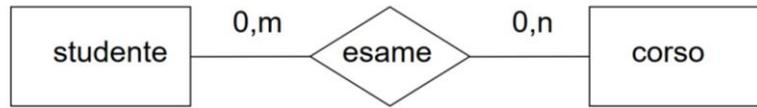


Fig. 115 – Relazione molti a molti.

6.2 Il database di Revit e la sua estensione

Il modello Revit crea automaticamente un *database*. Le entità che sono state create in ambiente BIM sono descritte tramite diversi parametri, questi possono essere facilmente visualizzati e modificati attraverso la voce *proprietà* dei singoli elementi [Fig. 116]. Selezionando ad esempio le proprietà di un qualsiasi muro del modello è possibile visualizzare la tabella che elenca tutte le informazioni che caratterizzano tale muro.

Proprietà	
Muro di base Conci pietra - 2,40 m	
Muri (1) Modifica tipo	
Dimensioni	
Lunghezza	26.3400
Area	14.810 m ²
Volume	211.893 m ³
Dati identità	
Immagine	
Commenti	
Contrassegno	
Workset	Murature
Modificato da	Luca
Fasi	
Fase di creazione	Stato di Progetto
Fase di demolizione	Nessuno
Guida alle proprietà	Applica

Fig. 116 – Tabella delle proprietà di un muro su Revit.

Tramite queste tabelle viene automaticamente delineato un *database* durante la modellazione in Revit. Com'è possibile notare in figura 116 esistono campi già compilati in automatico, come quelli riportanti le dimensioni del muro, altri invece presentano il campo vuoto. Nel nostro lavoro si implementa questo *database* con una struttura più completa progettata secondo le nostre esigenze. Per fare ciò bisogna esportare questo *database* per poterlo successivamente modificare.

Per realizzare quanto descritto è necessario esportare il *database* da Revit, modificarlo e reimportarlo. Per attuare questo procedimento è necessario servirsi dell'uso del *plugin* di esportazione dati Revit DB Link e del *software* che permette di creare e gestire *database* Microsoft Access.

6.3 Creazione di un *database* relazionale

È necessario in primo luogo realizzare un modello completo del *database*, strutturato a seconda dei dati che si vogliono inserire, principalmente seguendo i suggerimenti avuti dai funzionari della SABAP – Umbria.

A monte della progettazione per la ricollocazione di una porzione della chiesa nella sua posizione originale, è stata indicata la preferenza di poter disporre di un *database* capace di contenere i dati riguardanti i materiali che caratterizzano gli elementi della chiesa. Infatti per la ricollocazione dell'iconostasi si prevedono analisi dei materiale lapidei e delle malte rinvenute tra le macerie. Inoltre verrà anche delineato un quadro fessurativo della struttura.

Si è strutturato un modello Entità – Relazioni che possa soddisfare queste esigenze, di cui viene riportato in seguito un estratto [Fig. 117]. L'intero modello è consultabile nell'ALLEGATO n° 5.

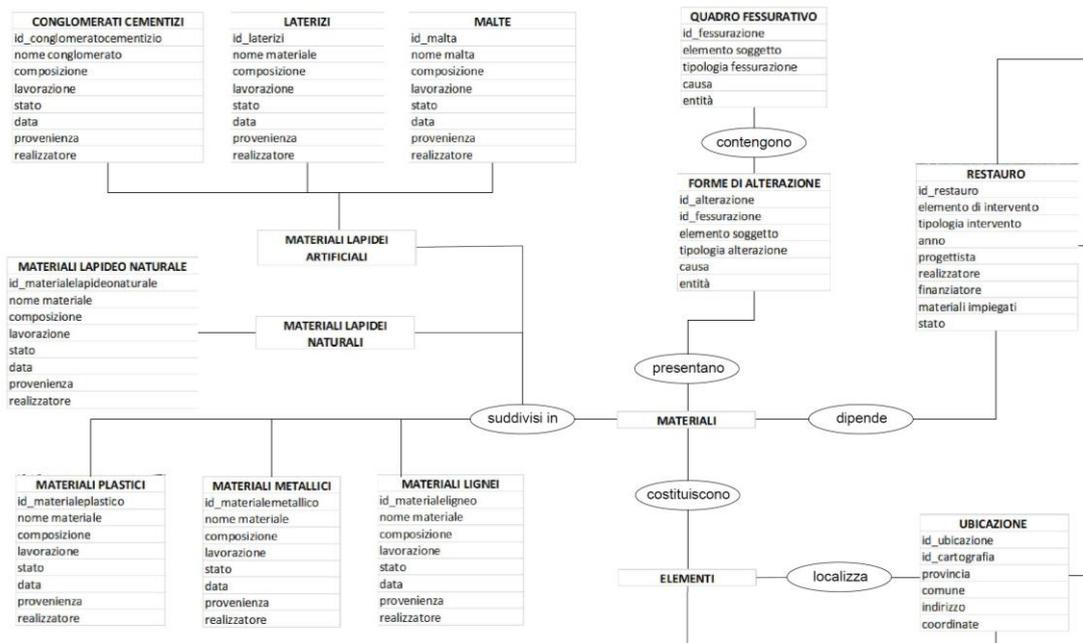


Fig. 117 – Estratto del modello Entità - Relazioni San Salvatore (ALLEGATO n°5).

6.3.1 Parametri condivisi

Prima di esportare i dati da Revit sono stati associati alcuni parametri alle entità modellate in modo da avere già le voci desiderate all'interno di alcune tabelle al momento dell'esportazione. Questo avviene tramite la creazione di parametri condivisi.

La realizzazione dei parametri condivisi è stata eseguita tramite il pannello *Gestisci* di Revit, grazie al comando *Parametri condivisi* [Fig. 118]. Da qui si è specificata la cartella dove salvare i parametri e si è dato un nome al gruppo di parametri, nel nostro caso *Gruppo San Salvatore*. Nello specifico sono stati creati sei parametri condivisi: *id_materiali*, *id_alterazione*, *id_fessurazione*, *id_danno*, *id_restauro*, *id_aedes*.

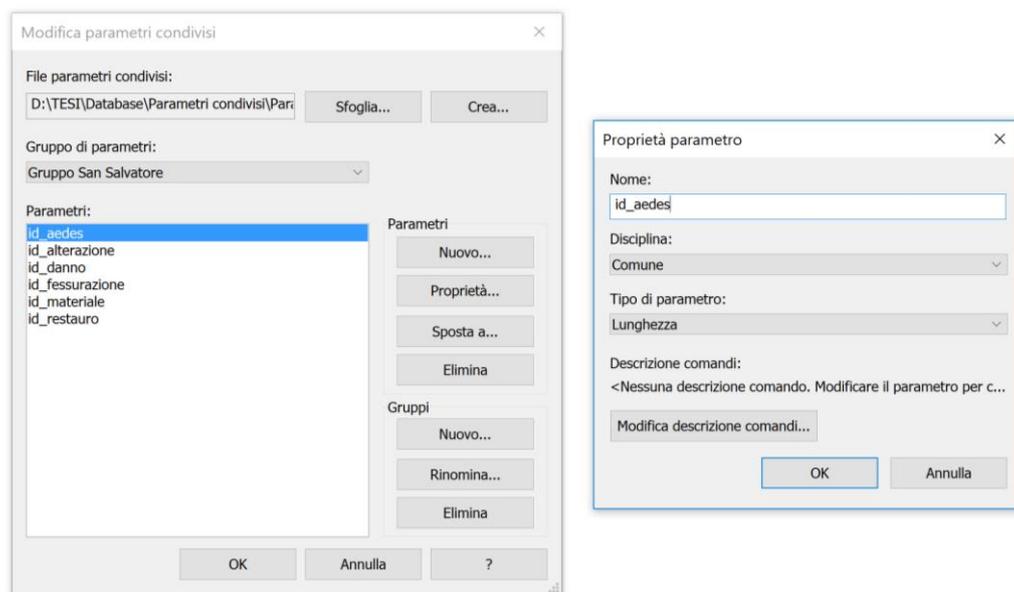


Fig. 118 – Finestre di creazione dei parametri condivisi.

Successivamente, questi parametri condivisi sono stati messi in relazione al modello attraverso un'altra voce del pannello *Gestisci*, quella di *Parametri di progetto*. Tramite questo passaggio si sono assegnati i parametri appena creati alle singole famiglie di sistema che compongono gli oggetti del modello: *Muri*, *Pavimenti*, *Tetti e Modelli generici* [Fig. 119]. In questo modo i parametri sono visibili nelle tabelle delle proprietà ed esportabili assieme ad esse [Fig. 120].

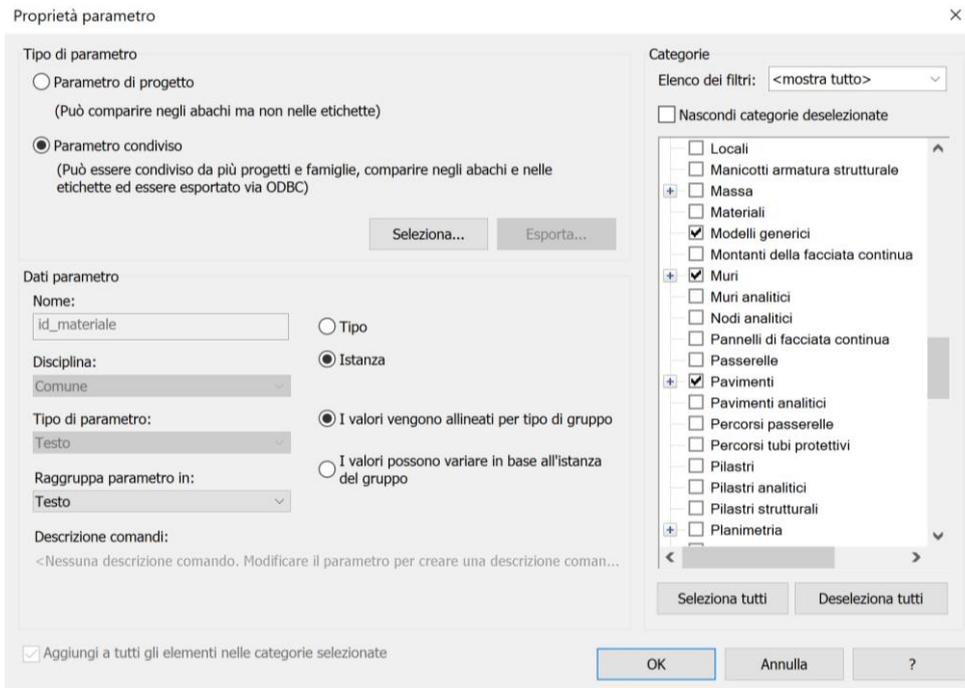


Fig. 119 – Finestra di impostazione dei parametri di progetto.

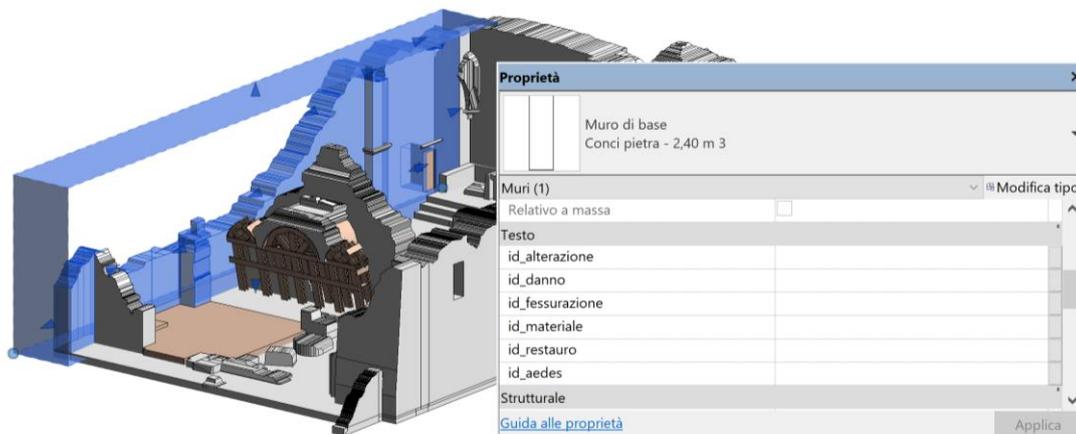


Fig. 120 – Parametri condivisi visibili nella tabella delle proprietà di un muro.

6.4 Esportazione con Revit DB link

L'esportazione del database di Revit è stata eseguita tramite il *plug-in Autodesk Revit DB Link 2018*. Questo elemento consente di estrarre le tabelle di dati create da Revit durante la modellazione. Per fare ciò è necessario munirsi del *software Microsoft Access* versione 2010, versioni successive non risultano compatibili con Revit e rendono impossibile l'operazione di esportazione. In primo luogo è necessario

creare un *database* vuoto che serva da riferimento come *file* dove esportare gli elementi di Revit. Nel nostro caso è stato creato un *file* Access denominato *DB_sansalvatore* in formato *.accdb*.

Dall'interfaccia di Revit si procede all'esportazione tramite la voce *Revit DB link* nel pannello *Moduli aggiuntivi*. Tuttavia, nella finestra che si presenta [fig. 122], non sono presenti i pulsanti di esportazione e importazione che dovrebbe normalmente fornire il plug-in [fig. 121]. Oltre a ciò non risulta nemmeno possibile selezionare i *file* di Access creato, mentre normalmente questo dovrebbe essere possibile.



Fig. 121 – Esempio di finestra di esportazione correttamente funzionante.

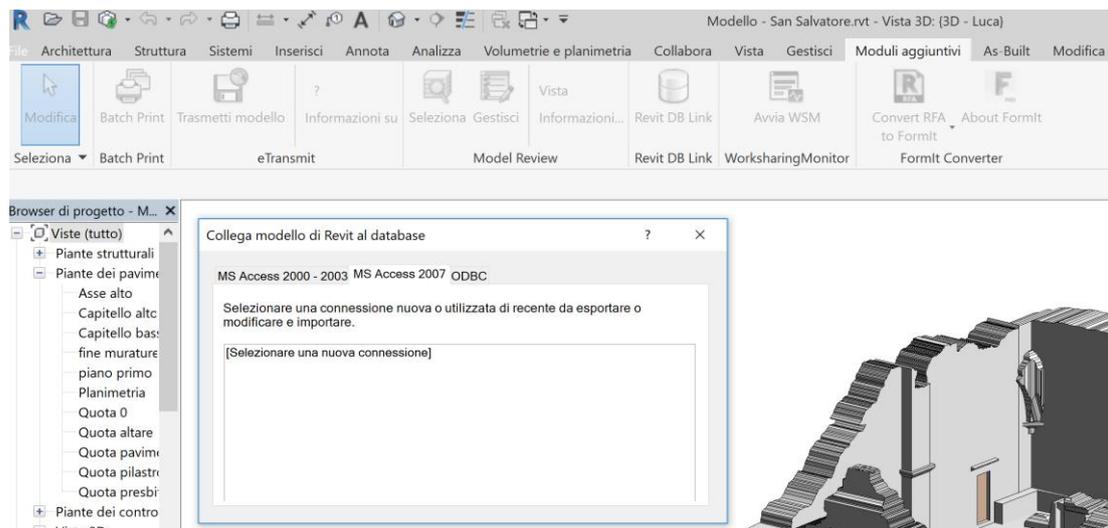


Fig. 122 – Finestra di esportazione database con problematiche di selezione.

A fronte di questo problema sono stati seguiti diversi procedimenti nel tentativo di ripristinare tali pulsanti senza ottenere risultati. Infine si è optato per seguire un altro percorso che conduce al medesimo risultato. Tramite la voce *File* della barra degli strumenti si è selezionato *Esporta – Database ODBC*, in questo modo è possibile salvare i dati di un modello in un *database*.

Tramite la finestra *Seleziona origine dati – Origine dati computer* si seleziona la voce *MS Access Database* che consente di esportare i dati su di un *file* in formato *.accdb* o *.mdb*, formati entrambi supportati da Access. Nel nostro caso si è scelto il *file* precedentemente creato *DB_sansalvatore*, cliccando su *Ok* il *database* di Revit viene esportato [Fig. 123].

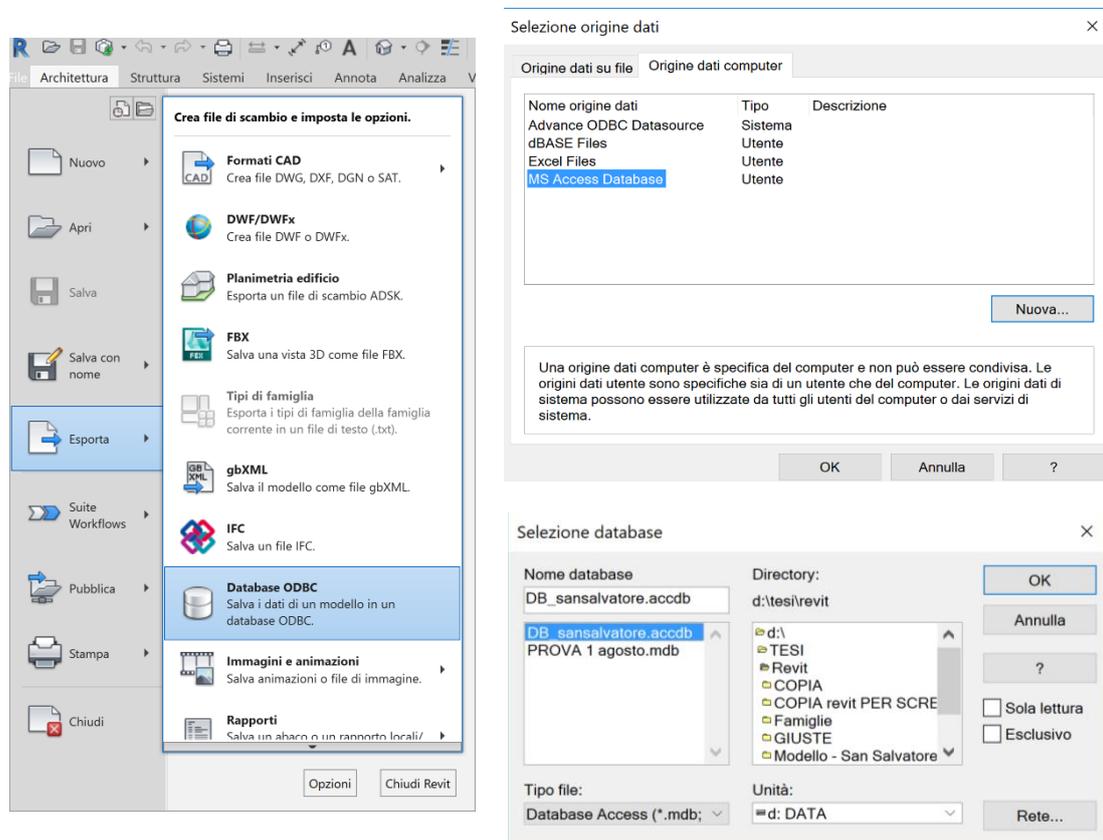


Fig. 123 – Modalità di selezione per l'esportazione dei dati.

In seguito è stato aperto il *file* *DB_sansalvatore* con Access, si può notare come questo sia ora caratterizzato da numerose voci esportate da Revit, tra questa moltitudine di voci solo alcune ci interessano direttamente, ovvero quelle riguardanti le famiglie del nostro modello: Modelli generici, Muri, Pavimenti e Tetti. All'interno di queste tabelle

possiamo trovare i parametri condivisi che avevamo inserito nel paragrafo precedente [Fig. 124].

Offsetbase	Vincolodibas	Altezzanoncollegata	Vincoloparte	Delimitailloc	id_alterazion	id_danno	id_fessurazio	id_materiale	id_restauro	id_aedes	Fare
0	1704	7,58581117062212	136491		1						1
0	1704	7,58581117062212	136491		1						1
0	1704	7,58581117062212	136491		1						1
0	933	8,22581117062211	136491		1						1
0	1704	2,00412370577742	1704		1						1
0	1704	7,58581117062212	136491		1						1
0	1704	3,90000000000001	255731		1						1
0	1704	3,90000000000001	255731		1						1
0	1704	3,90000000000001	255731		1						1
0	1704	7,58581117062212	136491		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1
0	146470	5,91687918459698E-02	135979		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1
0	146470	1,03798683727303	135979		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1
0	146470	0,226922987528624	135979		1						1

Fig. 124 – Vista delle tabelle di Revit esportate su Access.

6.5 Elaborazione database su Access

I dati esportati dal modello su Access vanno implementati aggiungendo le tabelle e relazioni rappresentate nello schema concettuale realizzato nel paragrafo 6.3 e rappresentato dal modello Entità – Relazioni mostrato nell'ALLEGATO n°5.

Per allestire il database è stato sempre utilizzato Microsoft Access 2010.

In primo luogo sono state visionate tutte le tabelle esportate, molte di queste trattano voci non inerenti come ad esempio quelle riguardanti aspetti impiantistici. Inoltre la maggior parte di queste tabelle risultano vuote, sono quindi state selezionate ed eliminate lasciando solo le tabelle riguardanti gli elementi impiegati nel modello.

Dopo aver “ripulito” il database da elementi superflui si sono aggiunte le nuove tabelle illustrate nello schema concettuale. Per fare questo procedimento basta accedere alla voce *Crea – Tabella* che in automatico consentirà l’inserimento di una nuova tabella dove inserire dei campi, ovvero delle colonne denominate con gli appositi attributi [Fig. 125].

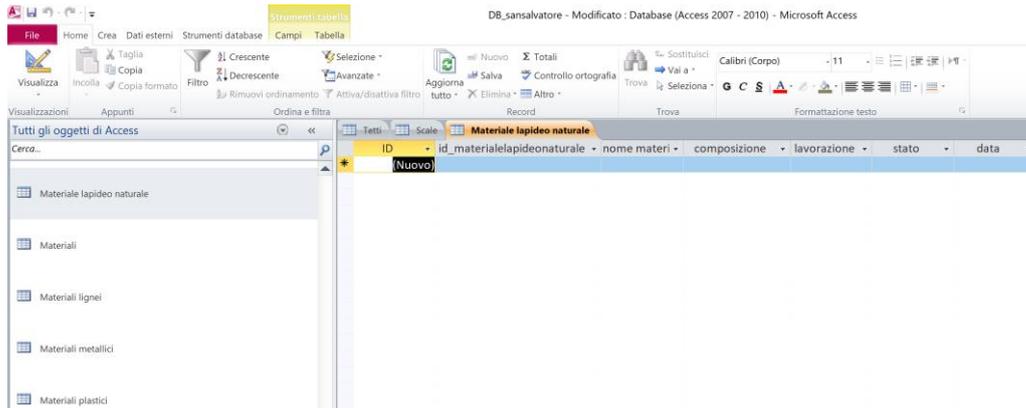


Fig. 125 – Inserzione nuove tabelle su Access.

Alcune tabelle indicate nello schema concettuale sono già presenti tra quelle esportate da Revit, in questo caso le voci degli attributi dello schema sono state integrate a quelle già presenti.

Inserite tutte le tabelle, queste risultano svincolate tra di loro, dunque si è proceduto a relazionarle tra loro tramite il comando *Strumenti database – Relazioni*. Questo comando permette di relazionare tra loro le entità del modello seguendo gli stessi collegamenti descritti nello schema concettuale.

È possibile creare le relazioni attraverso il comando appena descritto, ma anche attraverso un semplice *drag and drop* dell'attributo desiderato di una tabella sull'attributo di un'altra. Fatto uno di questi procedimenti si presenta la finestra della figura 126.

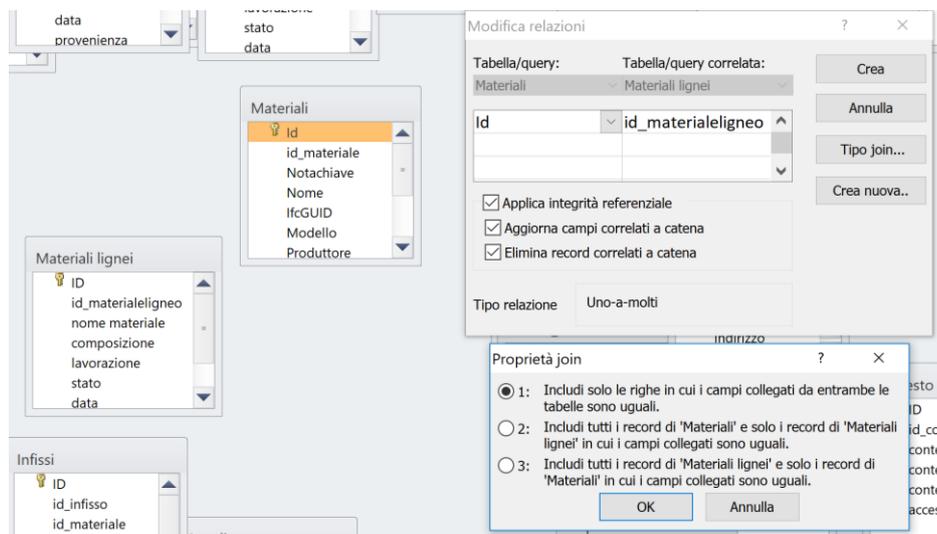


Fig. 126 – Inserzione nuove tabelle su Access.

Nella finestra sono illustrati gli attributi delle due tabelle che si vogliono mettere in relazione, si selezionano le voci *Applica integrità referenziale*, *Aggiorna campi correlati a catena* e *Elimina record correlati a catena*. Nella parte bassa della finestra è inoltre indicata la tipologia di associazione, nel caso in esempio *Uno-a-molti*. Infine cliccando su *Tipo join...* selezioniamo la prima opzione, che ci permette di collegare solo le righe in cui i capi da entrambe le tabelle sono uguali.

Iterando lo stesso procedimento per ciascuna tabella si ottiene l'intero schema del database progettato in precedenza [Fig. 127].

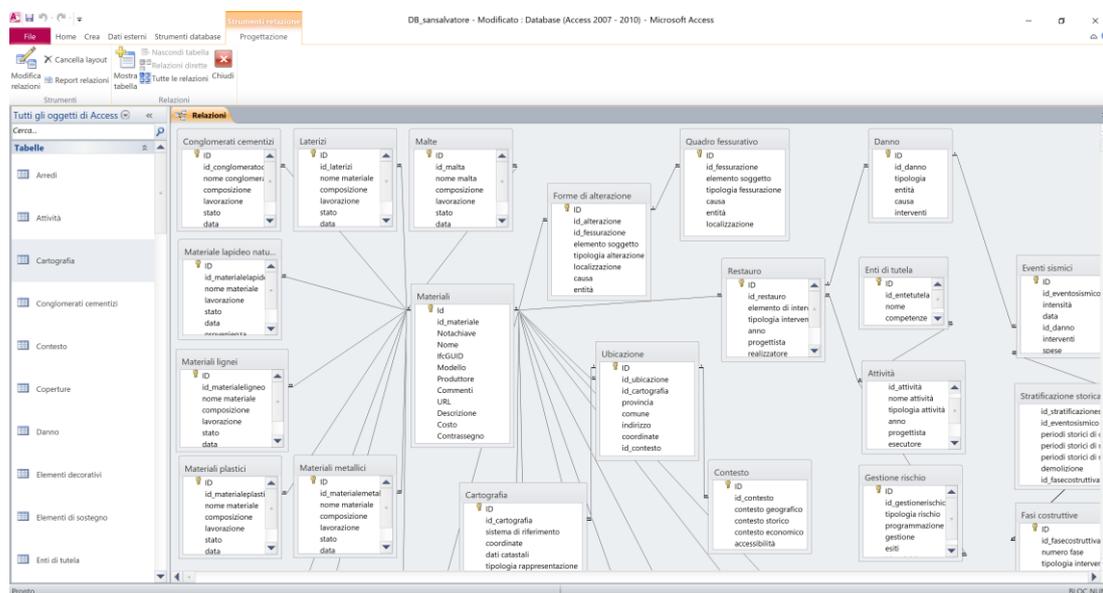


Fig. 127 – Database correttamente strutturato su Access, con entità e relazioni.

6.6 Compilazione del database

Il database così realizzato è in grado di svolgere le sue funzioni di correlazione tra le varie entità ed attributi in esso inseriti. Questo può essere nuovamente collegato a Revit reimportando i dati al suo interno.

6.6.1 Importazione del database in Revit

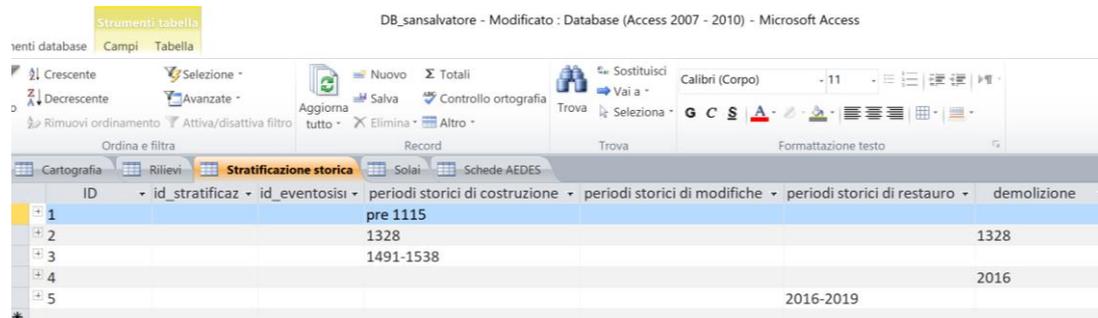
Si è cercato di reinserire la base di dati così strutturata all'interno dell'ambiente BIM, in modo da collegarlo al modello Revit della chiesa. Tuttavia questo processo è stato interdetto per via dell'incompatibilità tra i *software*, la medesima che aveva già prodotto situazioni problematiche in fase di esportazione (paragrafo 6.4). Il *plug-in*

DB Link non consente l'importazione del file, non sono presenti i comandi per attuare questo processo. Mentre per l'esportazione del *database* era stato possibile trovare un altro percorso, questa volta non è stato possibile.

Sono stati effettuati diversi tentativi, imbattendosi nel medesimo problema di incompatibilità, a livello di *server* del pc, e di versione dei *software* installati. Dunque si è deciso di non importare il *database* e di compilare alcune delle tabelle con i dati e le informazioni note.

6.6.2 *Compilazione del database*

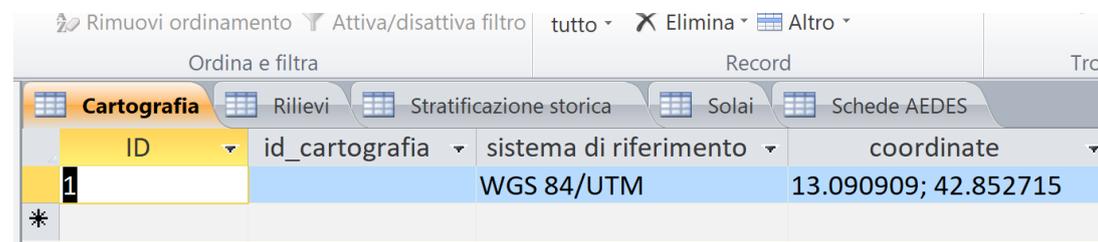
È stato possibile compilare alcune tabelle del *database* tramite Microsoft Access. Infatti tramite il lavoro di tesi, e soprattutto durante le fasi di rilievo, sono state acquisite diverse informazioni che possono essere inseriti manualmente nelle tabelle. Per esempio le date di costruzione [Fig. 128] e ubicazione [Fig. 129] della chiesa di San Salvatore.



The screenshot shows the Microsoft Access interface for a database named 'DB_sansalvatore'. The 'Stratificazione storica' table is open, displaying the following data:

ID	id_stratificaz	id_eventosisi	periodi storici di costruzione	periodi storici di modifiche	periodi storici di restauro	demolizione
1			pre 1115			
2			1328			1328
3			1491-1538			
4						2016
5					2016-2019	

Fig. 128 – *Compilazione delle tabelle con i dati storici.*



The screenshot shows the Microsoft Access interface for the 'Cartografia' table. The following data is displayed:

ID	id_cartografia	sistema di riferimento	coordinate
1		WGS 84/UTM	13.090909; 42.852715

Fig. 129 – *Compilazione delle tabelle con i dati cartografici.*

Infine sono stati inseriti anche i dati riguardanti il rilievo condotto. Nel modello Entità – Relazioni è presente la tabella *Rilievi*, creata appositamente al fine di inserire dati

riguardanti l'esecutore e il periodo di acquisizione. Inoltre sono stati indicate le metodologie adottate per eseguire i rilievi, come la fotogrammetria e il laser scanner. Sono stati inseriti i contatti e allegati dei *link internet* che permettono di visualizzare le restituzioni delle nuvole di punti realizzate [Fig. 130]. Garantendo così un completo quadro per chiunque si approcci al *database*.



id_riliev	id_atti	oggetto rilievo	rilevatore	tecnica	periodo riliev	contatti	link web
1		Chiesa San Salvatore	Politecnico di Torino	Fotogrammetria/Laser scanner	05/09/2018	Andrea Maria Lingua andrea.lingua@polito.it	https://imgur.com/3gz06Hw https://imgur.com/7Qp72vl
2							

Fig. 130 – Compilazione delle tabelle con i dati del rilievo.

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha evidenziato l'impiego di diverse metodologie di rilevamento metrico applicate ai beni architettonici; correlando le fasi di acquisizione alle tecniche di elaborazione dei dati, al fine di creare un modello tridimensionale in ambiente BIM. I beni architettonici di interesse, ovvero la chiesa di San Salvatore, sono stati rilevati tramite la tecnica fotogrammetrica sia terrestre che aerea. Inoltre è stata adottata anche la tecnologia LiDAR mediante l'impiego di laser scanner. Queste metodologie si distinguono per i rapidissimi tempi di acquisizione, che forniscono dati estremamente dettagliati, a discapito però di tempi di elaborazione molto più elevati.

Attraverso l'utilizzo di *software* come Photoscan e FARO SCENE, è stato possibile elaborare rispettivamente la nuvola fotogrammetria e quella acquisita tramite laser scanner. Le nuvole sono state georeferenziate e pulite dalle imperfezioni che presentavano.

Derivando da due tipologie di rilievo completamente differenti è stato necessario assicurarsi che queste potessero essere compatibili tra di loro al fine di garantire un risultato coerente. In questa fase di comparazione si è notato come le due tecniche di acquisizione descrivessero diversamente l'oggetto di studio.

In alcune porzioni della chiesa la fotogrammetria aerea soccorre le lacune derivate dall'acquisizione laser scanner, in altre aree accade l'opposto. Per questo motivo è stato fondamentale ricorrere all'integrazione di due tecniche differenti che hanno portato a generare infine una unica nuvola di punti che descrivesse la chiesa.

La nuvola di punti risultante è servita come base per la modellazione tridimensionale. Il lavoro è entrato nell'ambito della progettazione BIM tramite il *software* Autodesk Revit che ha consentito di modellare le fattezze della chiesa. La modellazione di un edificio storico attraverso una nuvola di punti consente di rappresentare in modo

preciso e rapido l'oggetto, tuttavia, nel caso in esame, per via dei crolli dovuti al sisma si è trovata difficoltà nel descrivere esaustivamente il manufatto. Per questo è stato necessario introdurre il plug-in AS Built che ha consentito di valutare con accurati i dettagli del modello. Ponendolo a confronto con la nuvola di punti ed evidenziandone le discrepanze.

Si è inoltre strutturato un *database*. Tramite lo strumento Microsoft Access è stato possibile realizzare fisicamente il modello della base di dati proposta. All'interno di tale *database* sono stati inseriti tutti i campi necessari per l'inserimento dei dati utili per le opere di restauro della chiesa.

La Soprintendenza ha suggerito le scelte durante il lavoro, indicando quali informazioni risultassero necessarie da inserire all'interno *database*, in modo che possa essere impiegato come elemento di supporto per la futura progettazione per la ricollocazione dell'iconostasi della chiesa. Durante lo sviluppo sono state apportate diverse modifiche al *database* per adattarsi a queste esigenze.

In conclusione, si può affermare che le tecniche di rilievo fotogrammetrico e laser scanner, costituiscono dei validi metodi di rilievo che assicurano prestazioni ottimali. Queste tecniche rappresentano delle metodologie ideali nel settore dei beni culturali per gli elevati livelli di accuratezza che possono offrire. L'uso del BIM inoltre dimostra la sua validità per rappresentare edifici esistenti. E la realizzazione di un *database* relazionale fornisce un affidabile documento di consultazione a disposizione di ogni utenza.

TESI

- F. Matrone - *Rilevamento metrico 3D e modellazione HBIM per la manutenzione programmata del patrimonio architettonico. Il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi di specializzazione, Facoltà di Architettura, 2016.
- L. M. Dalpiaz - *HBIM e rilevamento metrico 3D per i beni architettonici: il caso studio del Sacro Monte di Ghiffa*, Tesi Magistrale, Facoltà di Ingegneria Edile 2019.
- N. Bruno - *From survey to analysis for Cultural Heritage management: a new proposal for database design in BIM*, Tesi di dottorato, Ingegneria Civile e Architettura, 2017.
- F. Coniglione - *Gestione del patrimonio storico architettonico con metodologia HBIM: il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi magistrale, Facoltà di Architettura, 2017.
- S. Sanna - *Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi magistrale, Facoltà di Ingegneria edile, 2017.

ARTICOLI SCIENTIFICI

- C. Ferrari - *Chiesa di San Salvatore a Campi di Norcia*, Ingenio, 2016.
- T. Empler - *Procedura di Information Modeling per rappresentare un territorio colpito dal sisma*, Disegno, 2018.
- G. Pancani - *La città dei Guidi: Poppi. Il costruito del centro storico, rilievi e indagini diagnostiche*, Edifit - Edizioni Firenze, 2017.
- *Bilancio Demografico Nazionale*, ISTAT, 2016.
- C. Rodriguez - *Agisoft PhotoScan - Comandi base*.
- M. Lenzerini - *Progettazione concettuale*, SAPIENZA Università di Roma.
- *Il rilievo fotogrammetrico 1° Parte*, Georobotics.
- Francesco Guerini - *Rilievo, classificazione e metodologie*, Politecnico di Milano.

- *Caratteristiche dei territori colpiti dal sisma del 24 agosto 2016*, ISTAT, 2016.
- *Sisma 2016: l'Umbria che resiste. Campi di Norcia e la chiesa di San Salvatore*, MiBAC, 2016.
- F. Proietti - *Progettazione di database relazionali*, 2008.
- N. Russo - *Metodologia di progettazione database relazionali*, 1999.
- *Manuale As-Built™ for Autodesk® Revit® 2019*

SITI WEB

- [https://it.wikipedia.org/wiki/Campi_\(Norcia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Campi_(Norcia))
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Chiesa_di_San_Salvatore_\(Campi\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Chiesa_di_San_Salvatore_(Campi))
- <http://www.istat.it/>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Terremoto_del_Centro_Italia_del_2016_e_del_2017
- https://it.wikipedia.org/wiki/Classificazione_sismica_dell'Italia
- <http://www.norcia.net/san-salvatore-norcia.html>
- <https://www.ingenio-web.it/6157-chiesa-di-san-salvatore-a-campi-di-norcia-prime-analisi-del-crollo-definitivo-della-facciata-a-seguito-del-sisma-del-27102016>
- http://www.lavalnerina.it/dett_luogo.php?id_item=70
- <https://www.fondoambiente.it/luoghi/chiesa-di-san-salvatore-fraz-campi?ldc>
- <http://sansalvatoreincampi.beniculturali.it/>
- <https://www.linkedin.com/pulse/fotogrammetria-con-photoscan-parte-4-allineamento-corradeghini/?published=t>
- <https://3dmetrica.it/target-artificiali-rilievo-aerofotogrammetrico/>
- <https://knowledge.autodesk.com/>
- <https://www.rescult-project.eu/>
- <https://areeweb.polito.it/direct/>
- <https://www.researchgate.net/>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetria>
- <http://www.gisinfrastrutture.it/2016/05/il-nuovo-autodesk-recap-360-2017/>

- <http://biblus.acca.it/focus/bim-building-information-modeling/>
- <https://www.a-sapiens.it/bim/risorse/cose-un-modello-bim/>
- https://www.researchgate.net/publication/325469751_A_RESTORATION_ORIENTED_HBIM_SYSTEM_FOR_CULTURAL_HERITAGE_DOCUMENTATION_THE_CASE_STUDY_OF_PARMA_CATHEDRAL
- <https://www.dji.com/it>
- <https://www.faro.com/it-it/>
- http://www.diati.polito.it/didattica/team_studenteschi
- <https://www.rescult-project.eu/>
- <https://slideplayer.it/slide/4042831/>
- https://www.nadir.it/tecnica/DIMENSIONI_SENSORI/dimensioni-sensori.htm
- <https://www.projectems.it/cosa-significa-gsd-cosa-centra-con-la-fotogrammetria-con-drone/>
- <file:///D:/TESI/Ricerche%20Bibliografiche%20HBIM%20-%20ResCult/Villa%20strozzi/POLITECNICA%20PROGETTA%20IL%20RESTAURO%20DI%20VILLA%20STROZZI%20A%20MANTOVA.html>
- <https://www.microsoft.com/it-it/>
- <https://tesinarojas.weebly.com/database.html>

ALLEGATI

ALLEGATO n° 1 – Coordinate marker.

ALLEGATO n° 2 – Monografie.

ALLEGATO n° 3 – Report Photoscan.

ALLEGATO n° 4 – Tavole con viste 3D del modello Revit.

ALLEGATO n° 5 – Schema Entità – Relazioni, modello concettuale.

ALLEGATO n°1

Coordinate marker

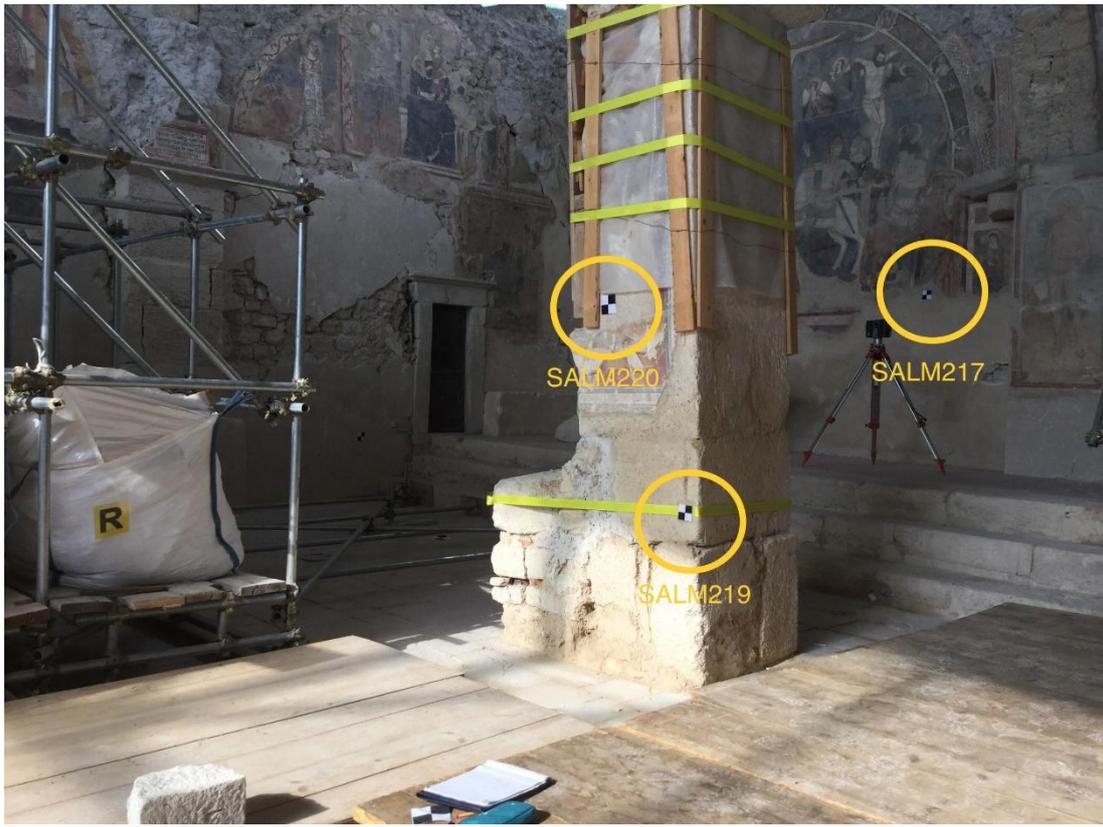
Nome marker	X	Y	Z
SAL100	34.398.195.100	474.621.494.800	71.512.600
SAL200	34.401.991.800	474.620.014.700	71.470.800
SAL400	34.402.241.776	474.622.393.110	71.550.909
SALM01	34.399.112.550	474.623.229.383	71.712.515
SALM02	34.400.274.603	474.623.300.699	71.662.738
SALM03	34.400.408.725	474.623.013.901	71.761.801
SALM04	34.400.655.155	474.622.803.456	71.671.503
SALM05	34.400.920.563	474.621.778.528	71.676.924
SALM06	34.401.012.475	474.621.070.340	71.724.984
SALM07	34.402.136.266	474.619.920.776	71.664.188
SALM08	34.402.513.961	474.622.855.350	71.753.158
SALM09	34.402.903.820	474.622.837.016	71.807.670
SALM10	34.403.001.766	474.622.652.687	71.726.007
SALM11	34.402.877.159	474.622.502.979	71.858.324
SALS12	34.400.097.170	474.623.519.706	72.678.033
SALT13	34.400.096.915	474.623.519.337	72.677.878
SALT14	34.400.976.470	474.620.801.833	72.678.619
SALT15	34.400.475.408	474.622.872.240	72.461.108
SALT16	34.400.901.503	474.621.539.530	72.462.464
SALG17	34.398.663.895	474.622.259.372	71.512.028
SALG18	34.400.031.238	474.622.523.883	71.538.009
SALG19	34.399.520.172	474.621.549.519	71.508.511
SALG20	34.401.338.468	474.621.206.184	71.558.012
SALG21	34.401.952.620	474.621.362.772	71.569.062
SALG22	34.400.921.643	474.622.678.587	71.464.202
SALG23	34.400.923.263	474.622.679.320	71.584.090
SALG24	34.401.419.344	474.622.118.501	71.543.919
SALG25	34.402.488.763	474.622.300.495	71.592.952
SALG26	34.402.048.824	474.622.100.211	71.544.656
SAL300	34.404.737.838	474.623.381.999	71.756.671
SALG50	34.399.519.675	474.621.549.761	71.506.740
SALG51	34.401.337.961	474.621.205.968	71.556.558
SALG52	34.401.952.293	474.621.362.804	71.567.813

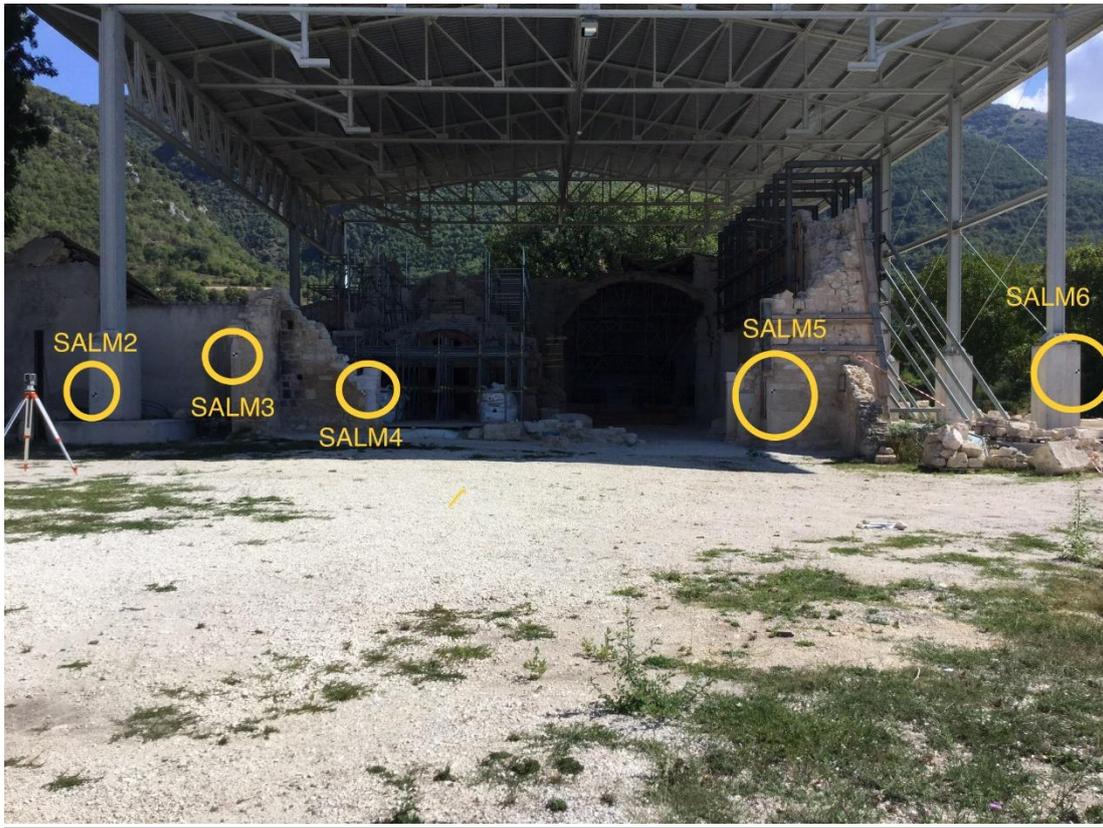
Nome marker	X	Y	Z
SALG53	34.402.478.545	474.621.566.586	71.592.198
SALG54	34.403.026.116	474.621.857.958	71.632.494
SALG55	34.403.554.523	474.622.089.754	71.684.097
SALM56	34.401.084.059	474.621.086.316	71.736.846
SALM57	34.401.329.657	474.621.565.508	71.732.119
SALM58	34.401.710.226	474.621.719.460	71.697.138
SALM59	34.402.227.231	474.621.455.260	71.772.159
SALM60	34.402.632.222	474.622.044.620	71.749.624
SALM61	34.403.159.279	474.622.006.505	71.742.959
SALM62	34.402.993.964	474.621.432.020	71.739.482
SALM63	34.403.688.082	474.622.411.002	71.966.739
SALT64	34.400.976.907	474.620.801.152	72.677.534
SALT65	34.403.987.161	474.621.777.248	72.678.666
SALT66	34.401.031.201	474.621.097.565	72.588.948
SALT67	34.401.601.293	474.621.281.669	72.588.876
SALT68	34.402.170.630	474.621.468.785	72.589.935
SALT69	34.402.740.936	474.621.652.454	72.590.158
SALT70	34.403.175.594	474.622.033.719	72.590.929
SALT71	34.403.679.911	474.622.196.070	72.589.806
SALG100	34.404.243.198	474.623.421.136	71.728.004
SALG101	34.403.975.088	474.624.081.505	71.684.712
SALG102	34.403.614.112	474.625.040.538	71.625.923
SALM103	34.404.620.720	474.623.053.557	71.886.248
SALM104	34.403.857.457	474.622.498.860	71.960.663
SALM105	34.403.293.738	474.622.949.469	72.141.189
SALM106	34.403.872.955	474.623.206.909	71.937.174
SALM107	34.403.217.172	474.623.340.664	72.080.410
SALM108	34.403.711.002	474.623.682.206	71.826.742
SALM109	34.403.077.667	474.624.200.712	71.895.092
SALM110	34.402.711.760	474.624.907.890	71.889.747
SALT111	34.403.109.378	474.624.494.124	72.672.431
SALT112	34.402.770.029	474.624.885.727	71.935.113
SALT113	34.402.647.556	474.625.138.759	71.921.562

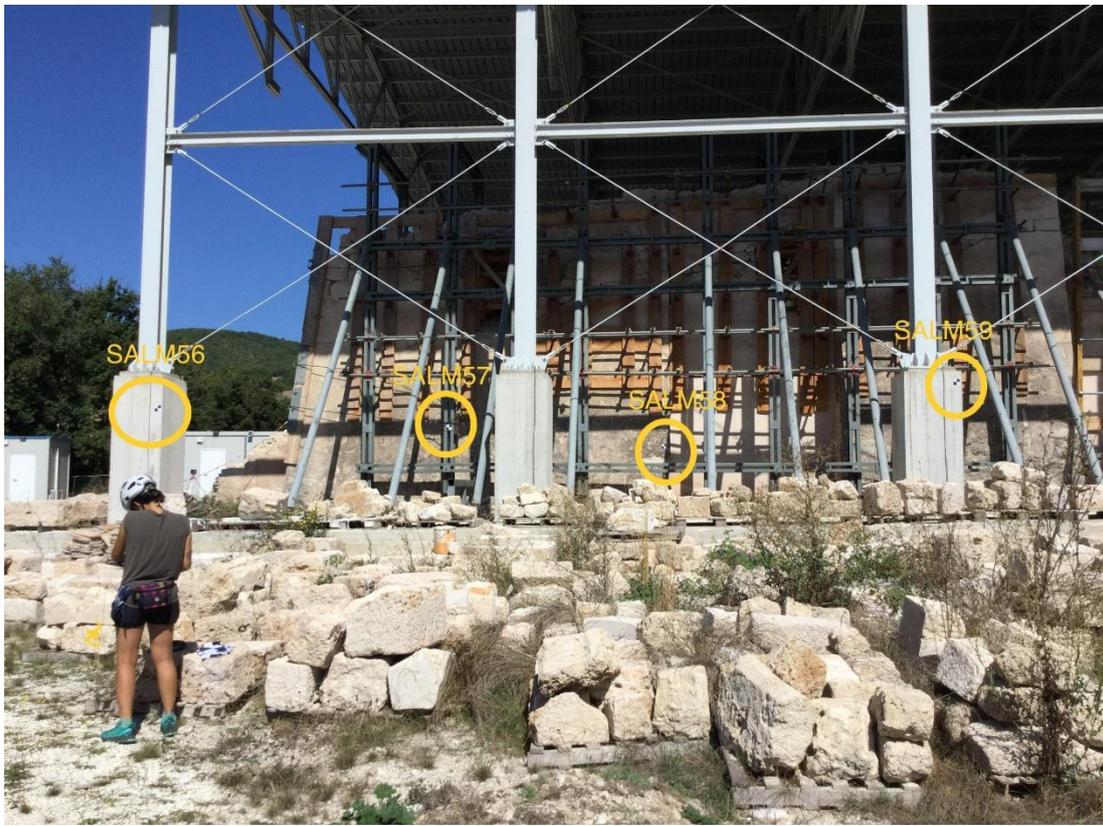
Nome marker	X	Y	Z
SALT114	34.402.465.151	474.625.771.547	71.847.755
SALT115	34.402.329.588	474.626.272.719	71.879.664
SALT116	34.402.180.921	474.626.837.147	71.872.433
SALT117	34.401.768.608	474.628.074.466	71.834.489
SALT118	34.401.366.043	474.629.417.927	71.895.057
SALT119	34.400.610.368	474.629.029.821	71.981.957
SALT120	34.402.419.586	474.624.615.118	72.079.668
SALT121	34.401.859.487	474.625.760.452	72.006.217
SALT122	34.401.558.563	474.626.761.706	72.003.553
SALG200	34.399.517.792	474.621.548.509	71.628.522
SALG201	34.398.662.400	474.622.258.040	71.631.697
SALG202	34.400.029.411	474.622.523.193	71.537.892
SALG203	34.398.662.102	474.622.259.127	71.511.485
SALG204	34.399.518.337	474.621.548.632	71.508.209
SALG205	34.402.579.376	474.623.286.956	71.563.569
SALG206	34.402.488.681	474.622.300.348	71.592.964
SALG207	34.401.419.408	474.622.118.437	71.544.224
SALG208	34.400.921.792	474.622.679.079	71.584.423
SALM209	34.401.021.411	474.621.900.688	71.695.937
SALM210	34.401.643.230	474.621.906.543	71.728.077
SALM211	34.402.348.919	474.622.078.277	71.764.129
SALM212	34.402.763.405	474.622.250.853	71.723.844
SALM213	34.403.015.463	474.622.287.993	71.805.160
SALM214	34.402.877.008	474.622.502.592	71.858.324
SALM215	34.403.001.670	474.622.652.308	71.726.303
SALM216	34.402.903.623	474.622.836.712	71.807.888
SALM217	34.403.097.848	474.623.198.152	71.822.965
SALM218	34.402.903.623	474.622.836.558	71.807.775
SALM219	34.402.536.553	474.622.810.517	71.646.511
SALM220	34.402.513.647	474.622.854.929	71.753.220
SALM221	34.402.884.123	474.623.671.237	71.821.875
SALM222	34.402.579.082	474.623.581.681	71.645.849
SALM223	34.402.250.158	474.623.504.657	71.807.676
SALM224	34.401.979.332	474.622.633.578	71.644.242

ALLEGATO n°2

Monografie

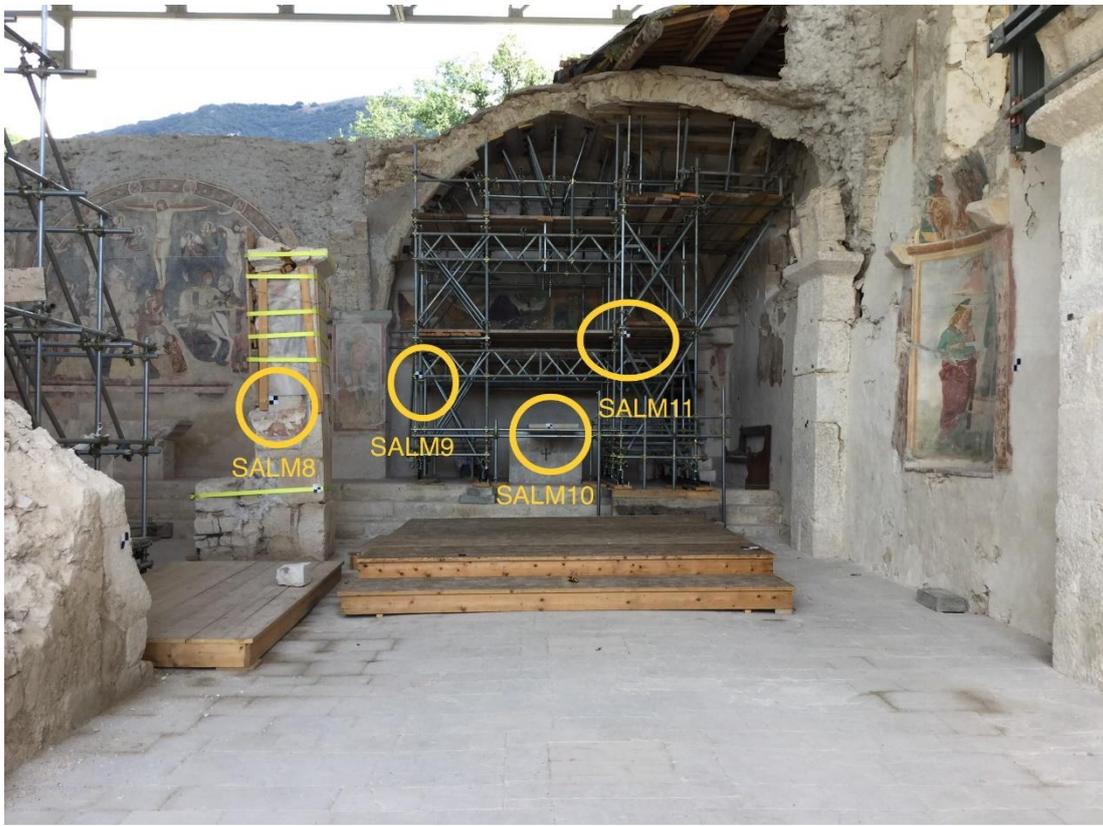


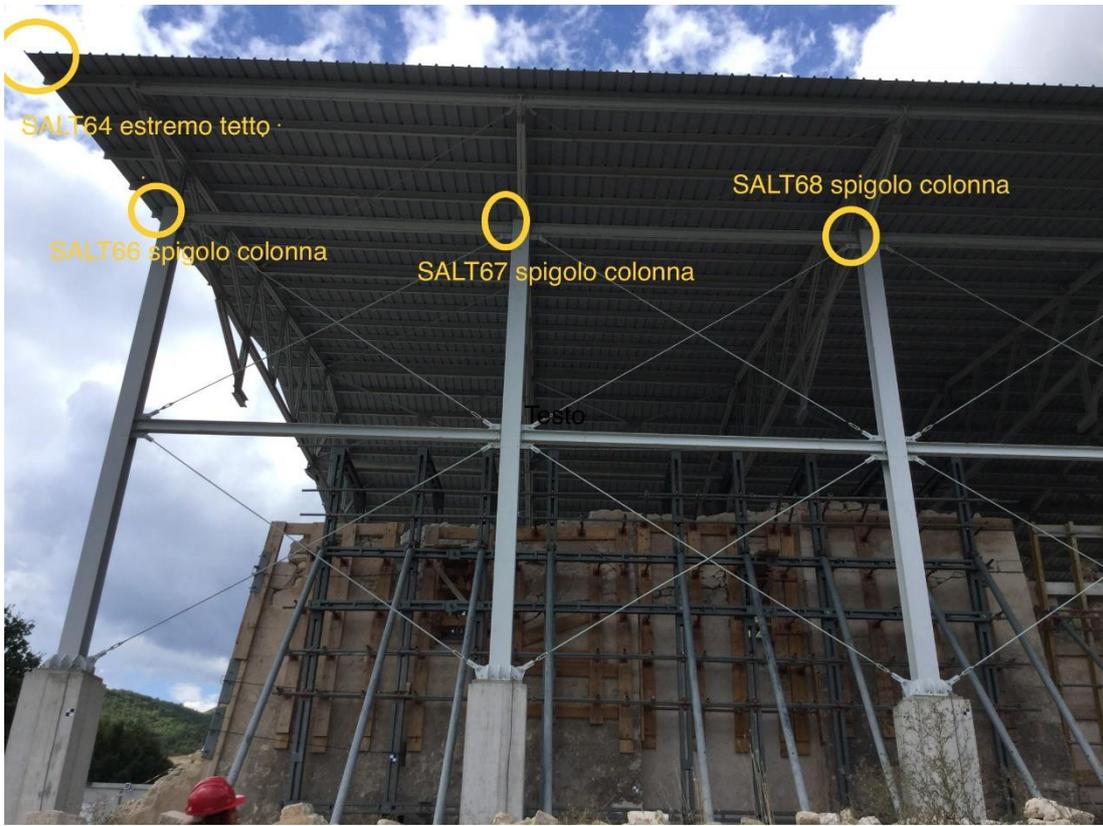
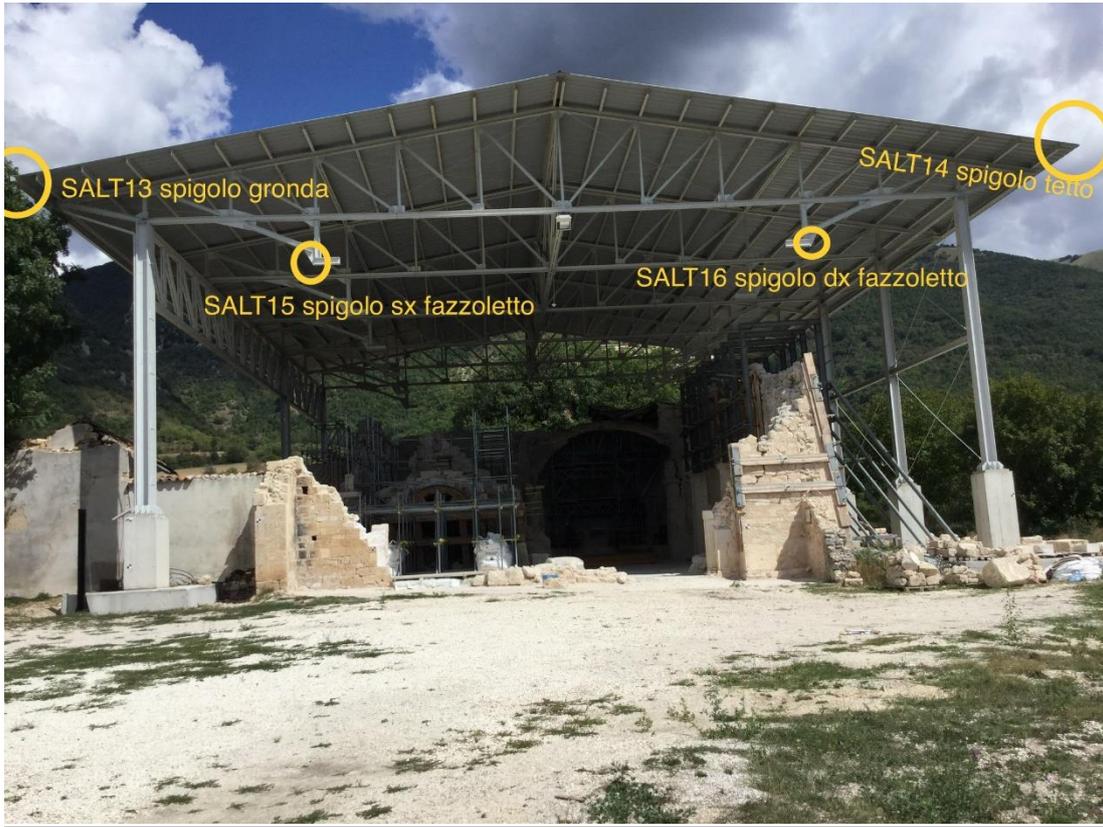


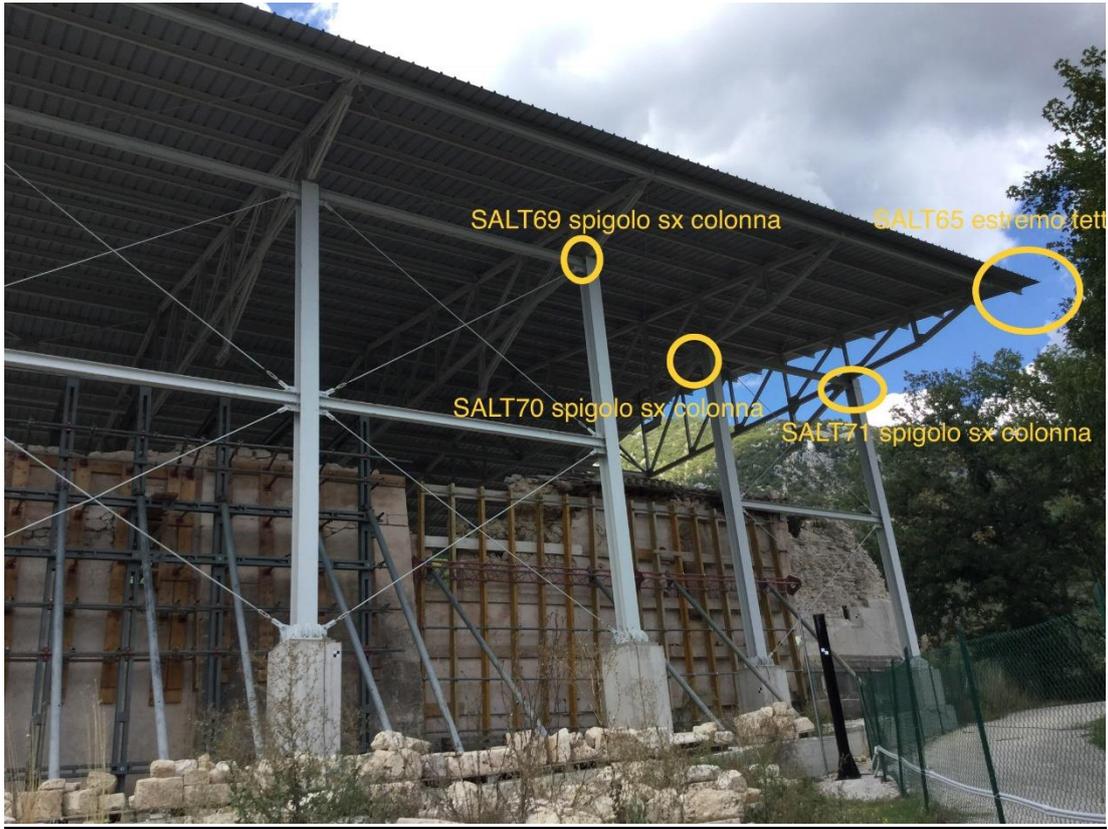




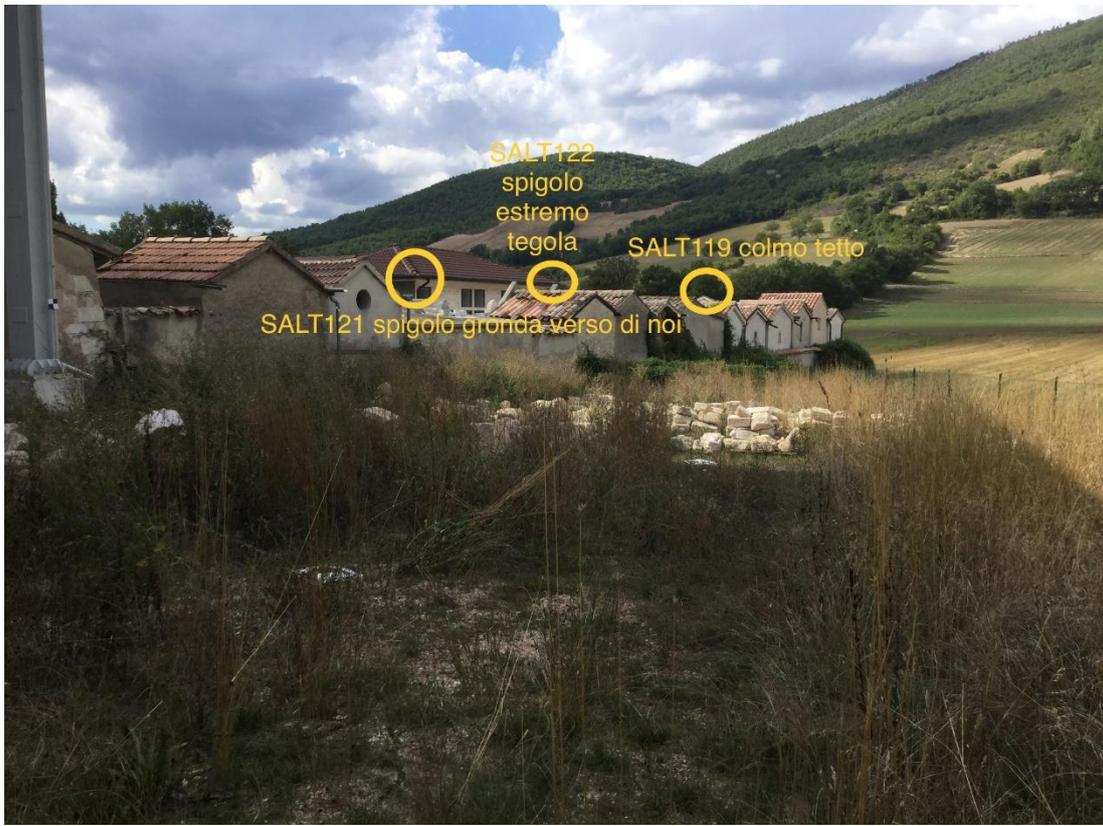
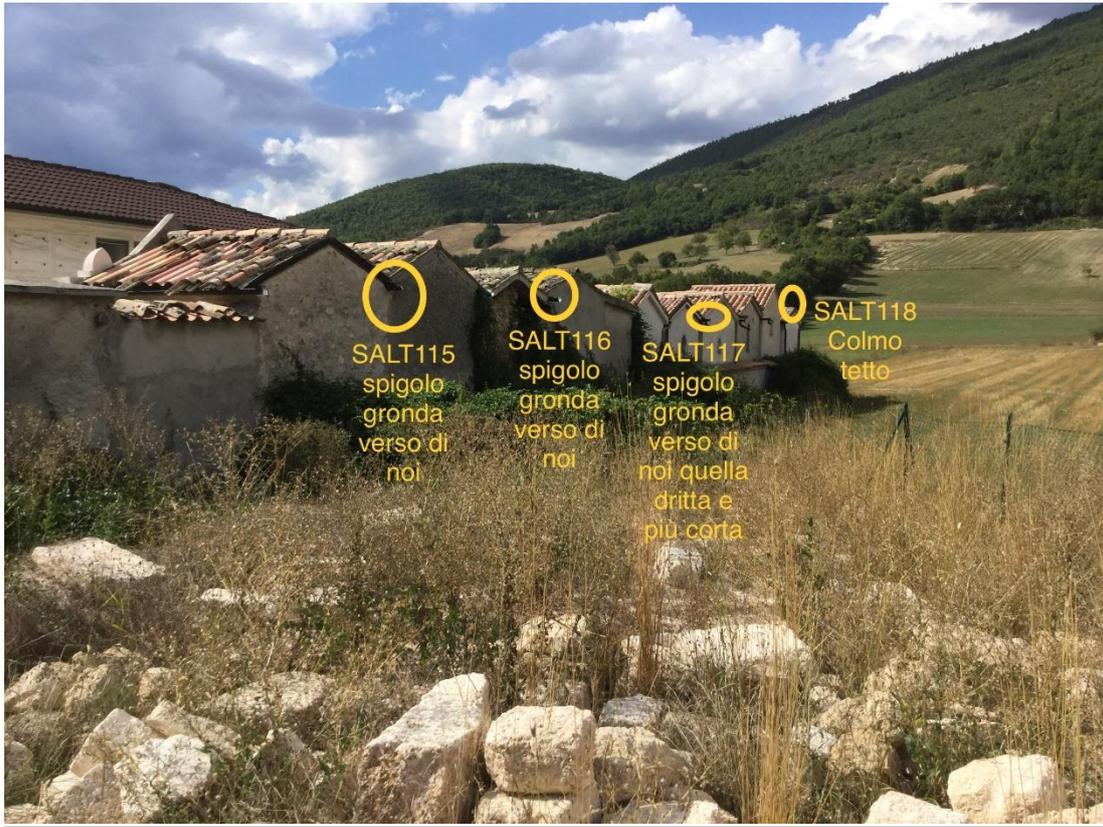




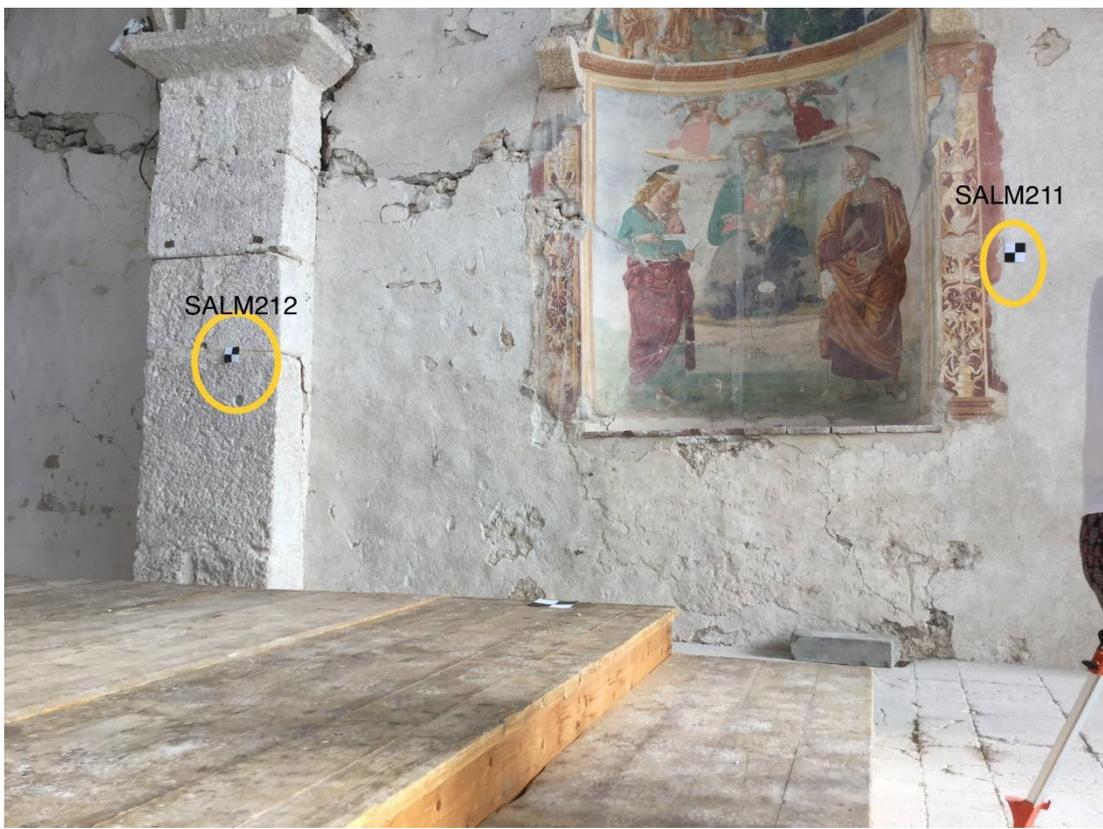


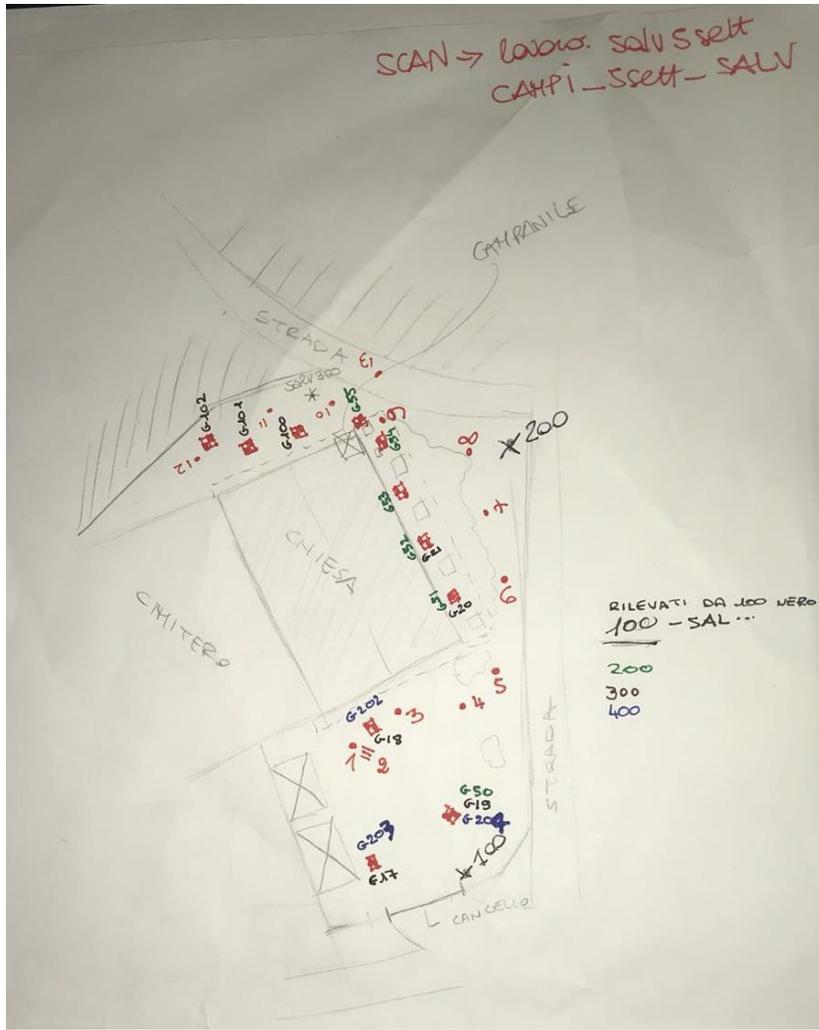
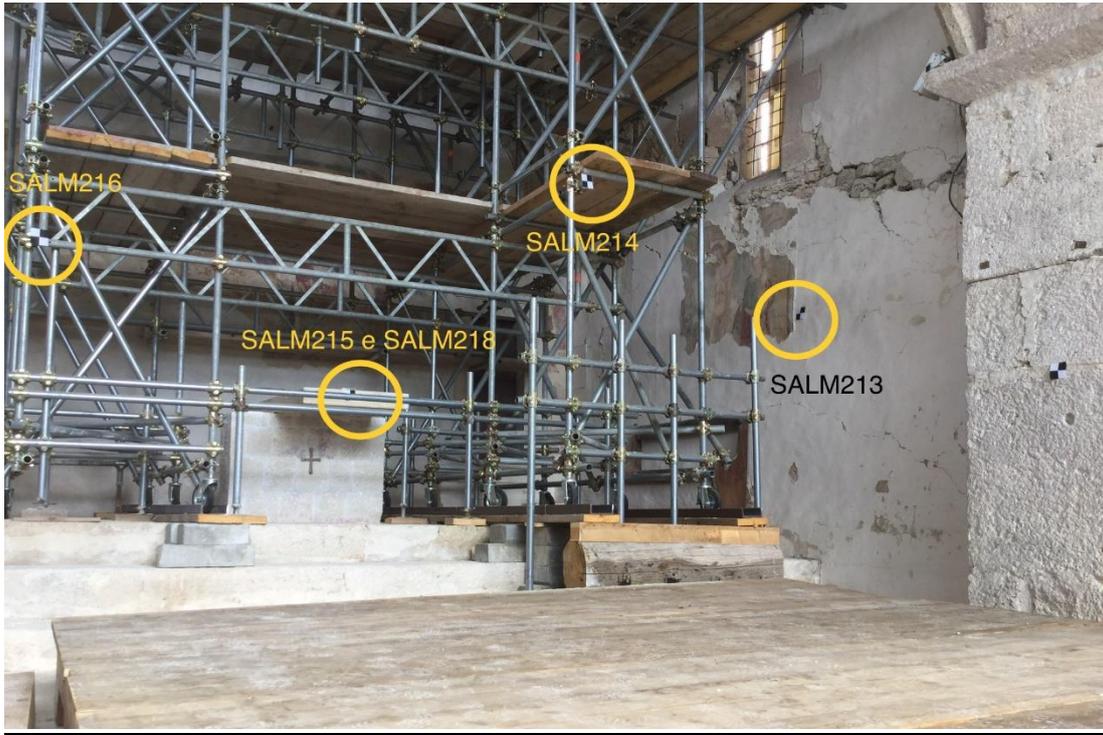












ALLEGATO n° 3

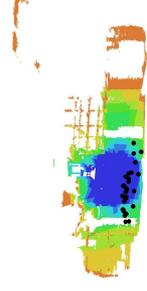
Report Photoscan

Affresco - Lumix

Processing Report
28 March 2019



Survey Data



10 m

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 29 Camera stations: 29
 Flying altitude: 3.77 m Tie points: 195,058
 Ground resolution: 1.1 mm/pix Projections: 659,328
 Coverage area: 92.2 m² Reprojection error: 0.651 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
DMC-GF3 (14 mm)	4000 x 3000	14 mm	4.33 x 4.33 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

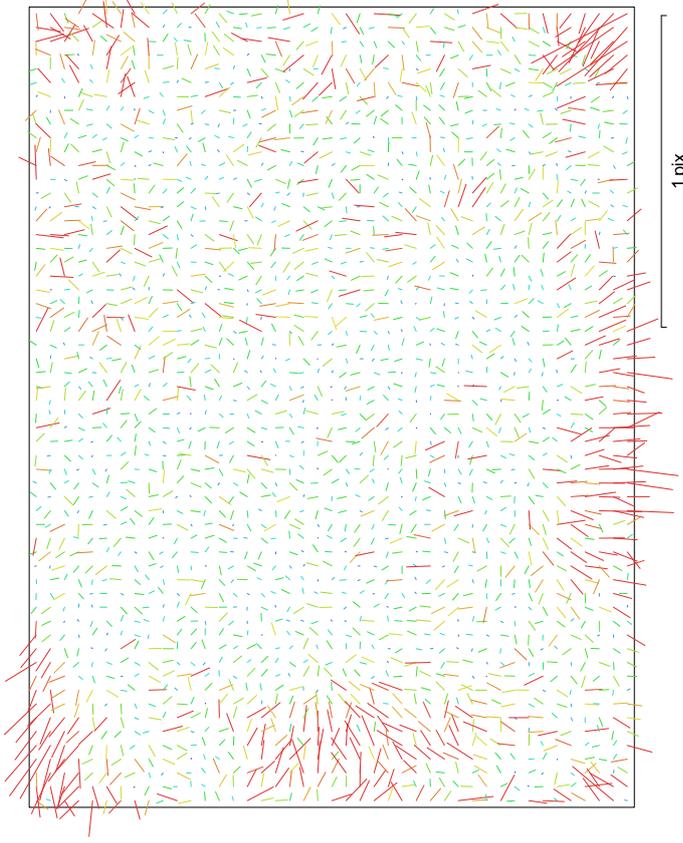


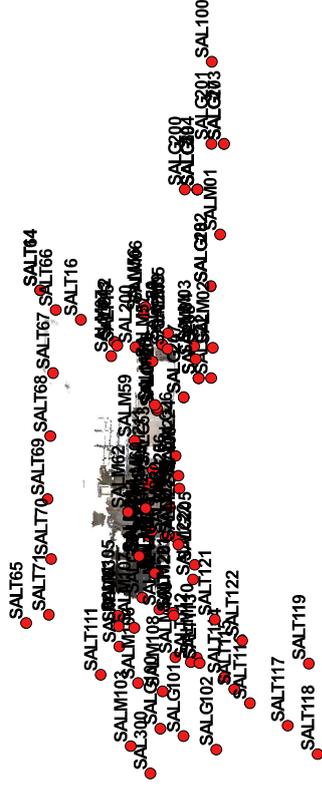
Fig. 2. Image residuals for DMC-GF3 (14 mm).

DMC-GF3 (14 mm)

29 Images

Resolution	4000 x 3000	Focal Length	14 mm	Pixel Size	4.33 x 4.33 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	3335.29		
Cx:		-17.5895		B1:	-0.55887		
Cy:		4.22877		B2:	0.831271		
K1:		-0.0491374		P1:	-0.00125509		
K2:		0.0439748		P2:	0.000718589		
K3:		-0.0307409		P3:	0.0099237		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points



● Control points
● Check points

Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
3	0.645331	0.609897	0.677578	0.887934	1.11693	0.146

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALM01					(0)
SALM02					(0)
SALM03					(0)
SALM04					(0)
SALM05					(0)
SALM06					(0)
SALM07					(0)
SALM08					(0)
SALM09					(0)
SALM10					(0)
SALM103					(0)
SALM104					(0)
SALM105					(0)
SALM106					(0)
SALM107					(0)
SALM108					(0)
SALM109					(0)
SALM11					(0)
SALM110					(0)
SALM209					(0)
SALM210					(0)
SALM211	-0.881612	0.0729255	-0.337043	0.946655	0.139 (19)
SALM212	0.236479	0.707947	-0.608317	0.962892	0.057 (7)
SALM213					(0)
SALM214					(0)
SALM215					(0)
SALM216					(0)
SALM217					(0)
SALM218					(0)
SALM219					(0)
SALM220					(0)
SALM221					(0)
SALM222					(0)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SAL100					(0)
SAL200					(0)
SAL300					(0)
SAL400					(0)
SALG100					(0)
SALG101					(0)
SALG102					(0)
SALG17					(0)
SALG18					(0)
SALG19					(0)
SALG20					(0)
SALG200					(0)
SALG201					(0)
SALG202					(0)
SALG203					(0)
SALG204					(0)
SALG205					(0)
SALG206					(0)
SALG207					(0)
SALG208					(0)
SALG21					(0)
SALG22					(0)
SALG23					(0)
SALG24					(0)
SALG25	0.645131	-0.780652	0.94535	1.38539	0.204 (8)
SALG26					(0)
SALG50					(0)
SALG51					(0)
SALG52					(0)
SALG53					(0)
SALG54					(0)
SALG55					(0)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALM223					(0)
SALM224					(0)
SALM56					(0)
SALM57					(0)
SALM58					(0)
SALM59					(0)
SALM60					(0)
SALM61					(0)
SALM62					(0)
SALM63					(0)
SALS12					(0)
SALT111					(0)
SALT112					(0)
SALT113					(0)
SALT114					(0)
SALT115					(0)
SALT116					(0)
SALT117					(0)
SALT118					(0)
SALT119					(0)
SALT120					(0)
SALT121					(0)
SALT122					(0)
SALT13					(0)
SALT14					(0)
SALT15					(0)
SALT16					(0)
SALT64					(0)
SALT65					(0)
SALT66					(0)
SALT67					(0)
SALT68					(0)
SALT69					(0)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALT70					(0)
SALT71					(0)
Total	0.645331	0.609897	0.677578	1.11693	0.146

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

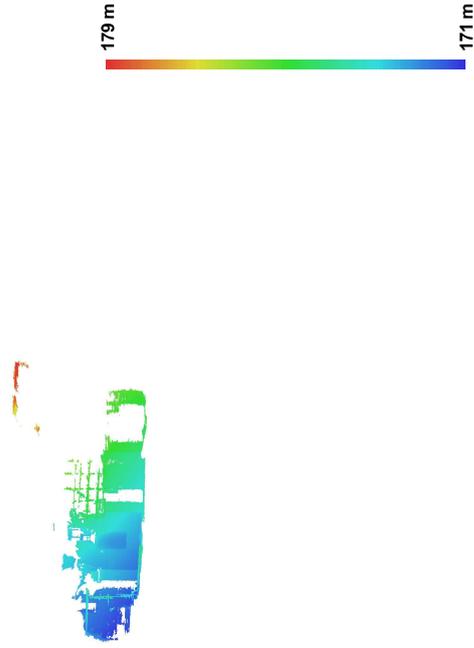


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
 Point density: unknown

Processing Parameters

General	
Cameras	29
Aligned cameras	29
Markers	100
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	195,058 of 211,691
RMS reprojection error	0.139568 (0.650969 pix)
Max reprojection error	0.521785 (32.7642 pix)
Mean keypoint size	3.92032 pix
Effective overlap	3.68758
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	4 minutes 30 seconds
Alignment time	28 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, ox, oy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	4 seconds
Dense Point Cloud	
Points	12,466,227
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	1 hours 57 minutes
Dense cloud generation time	5 minutes 1 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Esterni - Canon

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

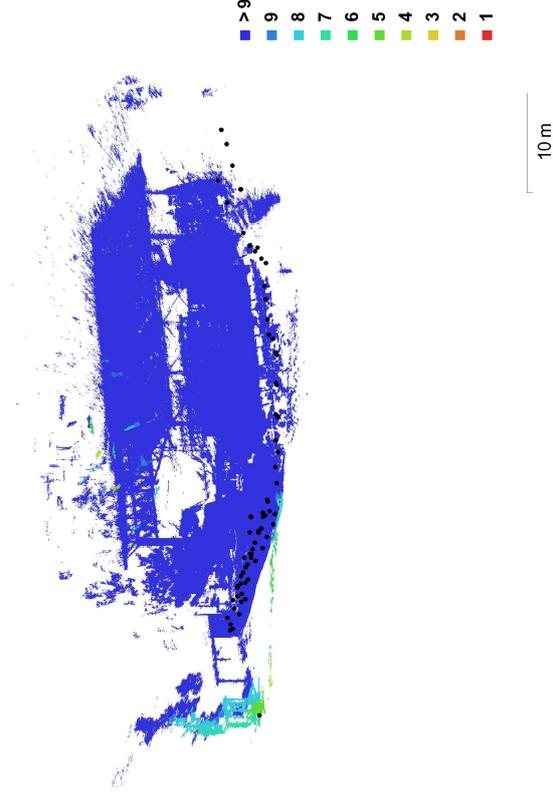


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 72 Camera stations: 72
Flying altitude: 38.2 m Tie points: 535,593
Ground resolution: 2.79 mm/pix Projections: 1,453,846
Coverage area: 685 m² Reprojection error: 0.943 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 5DS R (20 mm)	8688 x 5792	20 mm	4.24 x 4.24 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

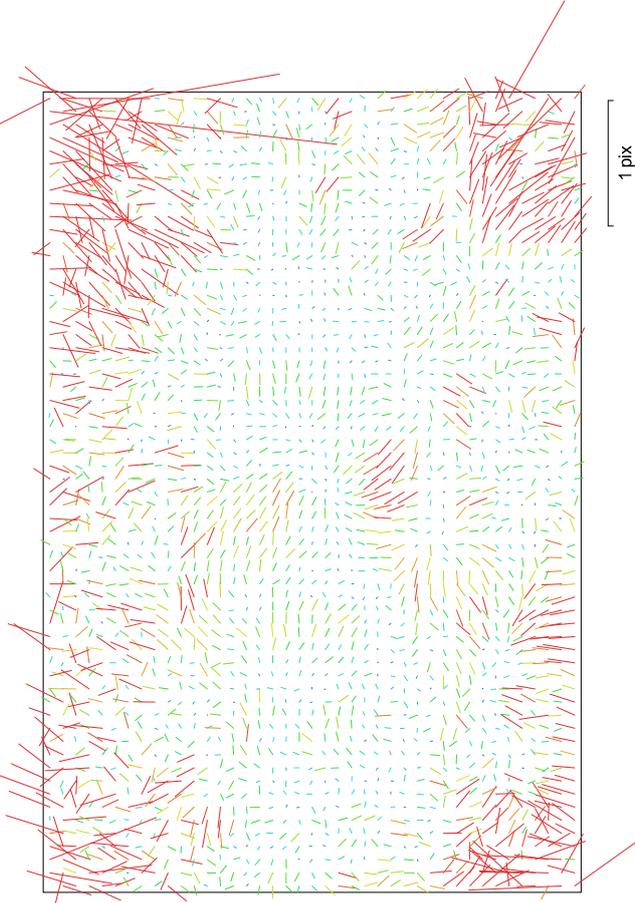


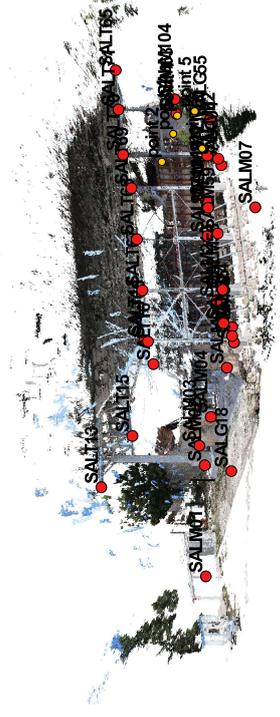
Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 5DS R (20 mm).

Canon EOS 5DS R (20 mm)

72 images

Resolution	8688 x 5792	Focal Length	20 mm	Pixel Size	4.24 x 4.24 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	4946.24		
Cx:		-48.845		B1:	-0.79142		
Cy:		-32.3357		B2:	3.29093		
K1:		-0.0837053		P1:	-0.000258803		
K2:		0.0731747		P2:	9.14005e-05		
K3:		-0.0152084		P3:	0.47226		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points



● Control points

● Check points

Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
34	0.552936	0.551512	0.83549	0.780964	1.14366	1.026

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALG18	-0.744412	0.310864	0.897772	1.20697	0.702 (8)
SALG24	0.0247844	0.341557	-0.00192046	0.34246	0.035 (2)
SALG54	0.108525	-0.935586	1.22355	1.54408	1.607 (5)
SALG55	-0.150839	0.271625	1.62188	1.65138	1.838 (4)
SALM01	-0.342594	0.284756	-0.580081	0.731404	2.036 (7)
SALM02	-0.615138	0.548198	-0.290019	0.873514	0.475 (22)
SALM03	-0.660648	0.338584	-0.344672	0.81847	0.476 (26)
SALM04	-0.549607	0.42065	-0.409747	0.804305	0.433 (32)
SALM05	0.140633	0.142527	-0.771697	0.79725	0.586 (31)
SALM06	0.375862	-0.448628	-0.759597	0.95892	0.479 (27)
SALM07	-0.315358	0.497596	-1.31488	1.44082	0.561 (9)
SALM104	-0.262083	-0.26972	1.17286	1.23168	0.303 (3)
SALM210	0.40714	0.453848	-0.730913	0.951827	0.575 (17)
SALM211	0.0237336	-0.0776626	-0.887839	0.891546	1.063 (8)
SALM212	1.01104	0.885383	-0.936796	1.6382	0.000 (1)
SALM56	0.432057	-0.563673	0.714316	1.0073	0.615 (6)
SALM57	0.322033	-0.103484	0.656777	0.738763	0.488 (9)
SALM58	0.255458	-0.239947	0.584383	0.681423	0.839 (9)
SALM59	0.308037	-0.201199	0.146606	0.396057	0.725 (11)
SALM60	-0.181693	-0.0555119	0.343892	0.392881	1.728 (12)
SALM61	-0.357657	-0.78535	0.645342	1.07757	1.406 (7)
SALM62	-0.811143	-0.830076	-0.136195	1.16856	0.992 (7)
SALM63	-0.765209	1.22435	-0.621961	1.57208	1.322 (8)
SALT13	1.01675	0.497686	-0.132055	1.1397	1.485 (16)
SALT14	1.00268	-0.481057	-0.706666	1.31764	1.058 (16)
SALT15	0.058599	-0.0786674	-0.333721	0.34784	1.170 (18)
SALT16	0.894063	-0.933566	-0.453275	1.3698	1.025 (20)
SALT65	-0.494236	-0.681662	-1.72001	1.91504	1.807 (6)
SALT66	-0.53677	0.0896102	1.18027	1.29969	1.250 (16)
SALT67	-0.076956	0.372931	1.8599	1.89848	1.105 (3)
SALT68	0.829044	0.193108	-0.00526471	0.851254	1.022 (5)
SALT69	0.613734	0.733394	0.282119	0.997059	0.954 (7)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALT70	0.580751	-0.800344	-0.608565	1.16111	1.450 (17)
SALT71	-0.646025	0.741257	-0.525806	1.11503	2.108 (7)
Total	0.552936	0.551512	0.83549	1.14366	1.026

Table 3. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1					3.026 (7)
point 2					3.433 (6)
point 3					1.963 (8)
point 4					2.024 (5)
point 5					1.063 (6)
Total					

Table 4. Check points.

Digital Elevation Model

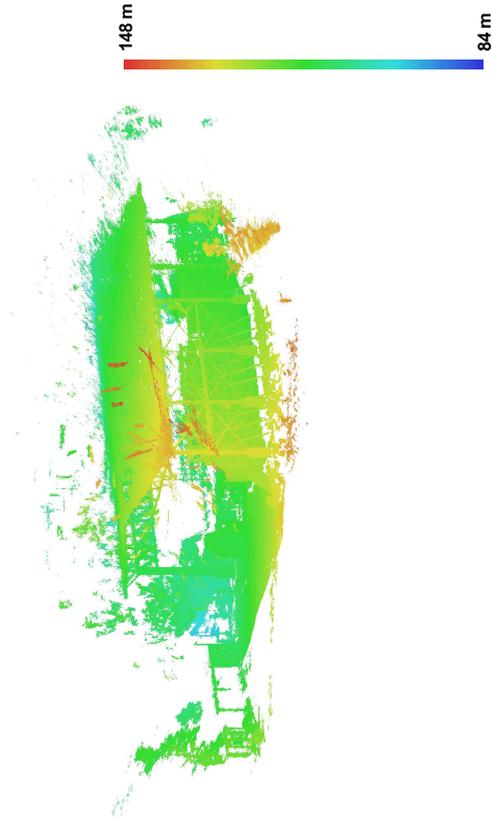


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
 Point density: unknown

Processing Parameters

General	
Cameras	72
Aligned cameras	72
Markers	106
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	535,593 of 748,847
RMS reprojection error	0.189521 (0.94282 pix)
Max reprojection error	3.36955 (51.2316 pix)
Mean keypoint size	4.28592 pix
Effective overlap	2.68656
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	24 minutes 44 seconds
Alignment time	3 minutes 38 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	18 seconds
Dense Point Cloud	
Points	42,536,048
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	1 days 21 hours
Dense cloud generation time	2 hours 16 minutes
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Interni - Canon

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

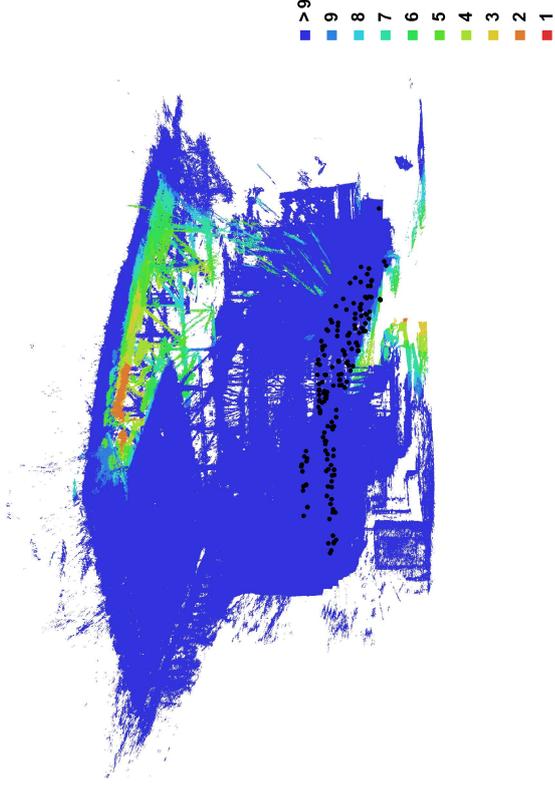


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	165	Camera stations:	165
Flying altitude:	7.18 m	Tie points:	2,169,024
Ground resolution:	1.29 mm/pix	Projections:	7,026,502
Coverage area:	378 m ²	Reprojection error:	1.02 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 5DS R (20 mm)	8688 x 5792	20 mm	4.24 x 4.24 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

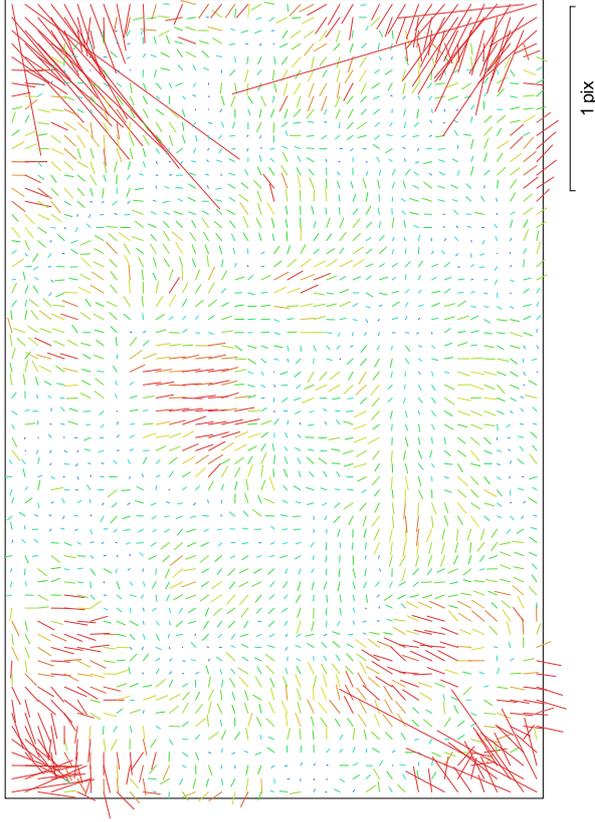


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 5DS R (20 mm).

Canon EOS 5DS R (20 mm)

165 images

Resolution	8688 x 5792	Focal Length	20 mm	Pixel Size	4.24 x 4.24 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	4951.18		
Cx:		-50.007		B1:	-0.283795		
Cy:		-35.4958		B2:	1.40819		
K1:		-0.0837583		P1:	-0.000336628		
K2:		0.0729336		P2:	8.48431e-05		
K3:		-0.0145151		P3:	0.523158		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points

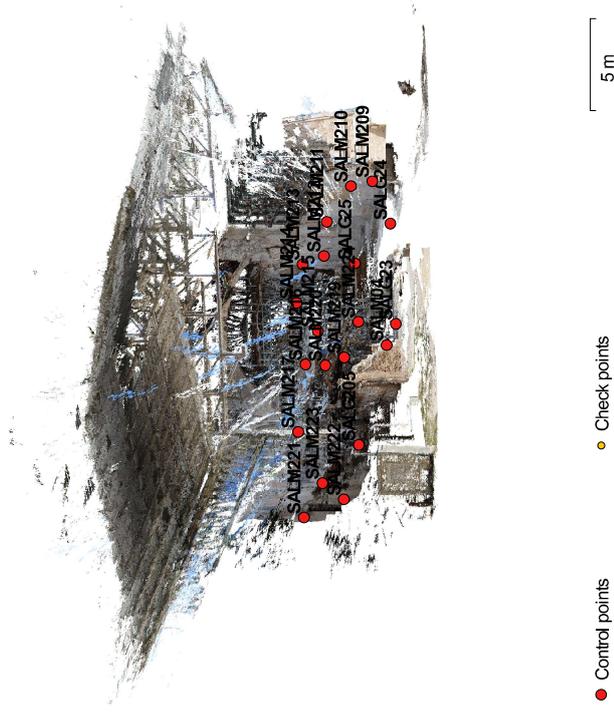


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
20	3.19949	4.5312	2.25511	5.54694	5.98782	5.174

Table 2. Control points RMSE.

Digital Elevation Model

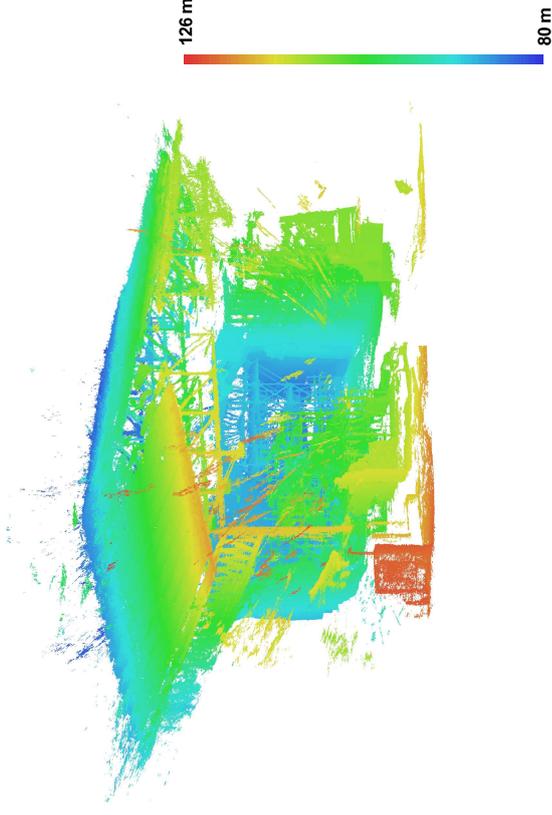


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
Point density: unknown

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALG205	3.88229	-12.3707	-3.93499	13.5495	25.517 (9)
SALG23	4.90159	3.65194	3.48954	7.0384	1.051 (8)
SALG24	-3.74911	-6.38756	4.01545	8.425	0.663 (4)
SALG25	-1.54281	-0.88736	1.7147	2.47141	1.157 (7)
SALM04	2.95498	4.89405	-1.21225	5.84407	0.379 (3)
SALM209	-0.783137	-6.27805	-1.48298	6.49819	0.635 (6)
SALM210	-0.577993	-2.10672	-2.69198	3.46685	0.400 (17)
SALM211	-1.30457	-0.973968	-1.62505	2.30028	0.768 (12)
SALM212	0.0177448	-1.11816	0.514406	1.23094	0.221 (3)
SALM213	-0.942476	0.292133	0.873887	1.31806	1.152 (19)
SALM214	-1.58802	1.08044	-0.589266	2.00908	1.247 (14)
SALM215	-6.02599	1.58069	-0.395411	6.24239	0.772 (9)
SALM216	-1.5353	1.78855	-1.26338	2.67435	0.725 (13)
SALM217	1.20565	3.40747	1.01303	3.75375	0.891 (23)
SALM219	-1.87458	-0.516794	-1.13988	2.25399	2.097 (13)
SALM220	-2.27024	-3.65935	-3.68323	5.66666	1.085 (6)
SALM221	-2.86035	5.5367	4.31852	7.58197	1.139 (15)
SALM222	1.13274	6.4598	1.52437	6.73318	1.514 (23)
SALM223	2.45629	1.5749	-0.531441	2.96582	0.936 (15)
SALM224	8.37374	5.05872	1.07402	9.84193	1.829 (11)
Total	3.19949	4.5312	2.25511	5.98782	5.174

Table 3. Control points.

Processing Parameters

General
Cameras 165
Aligned cameras 165
Markers 100
Coordinate system WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud
Points 2,169,024 of 2,548,676
RMS reprojection error 0.209839 (1.02244 pix)
Max reprojection error 7.87428 (55.5314 pix)
Mean keypoint size 4.42271 pix
Effective overlap 3.41861
Alignment parameters
Accuracy High
Pair preselection Generic
Keypoint limit 0
Tie point limit 0
Constrain features by mask No
Adaptive camera model fitting No
Matching time 1 hours 48 minutes
Alignment time 36 minutes 12 seconds
Optimization parameters
Parameters f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time 26 seconds
Dense Point Cloud
Points 149,088,472
Reconstruction parameters
Quality High
Depth filtering Mild
Depth maps generation time 2 days 22 hours
Dense cloud generation time 13 hours 43 minutes
Software
Version 1.2.6 build 2834
Platform Windows 64 bit

Phantom

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

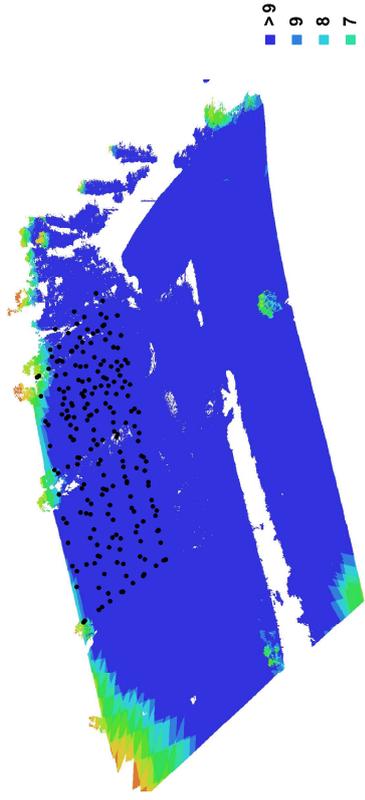


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 207
 Flying altitude: 61.4 m
 Ground resolution: 1.48 cm/pix
 Coverage area: 0.0306 km²

Camera stations: 207
 Tie points: 1,624,603
 Projections: 5,139,849
 Reprojection error: 1.31 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8 mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2,41 x 2,41 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

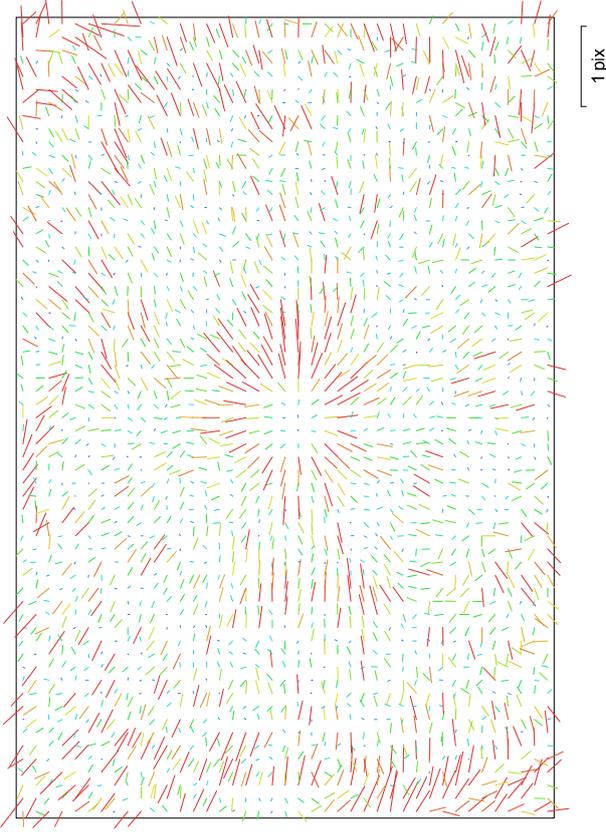


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8 mm).

FC6310 (8.8 mm)

207 images

Resolution: **5472 x 3648**
 Focal Length: **8.8 mm**
 Pixel Size: **2,41 x 2,41 μ m**
 Precalibrated: **No**

Type: Frame
 F: 3678.33
 Cx: 26.1238
 B1: 0.935693
 Cy: 1.78358
 B2: 2.25814
 K1: 0.00390555
 P1: 0.00237256
 K2: -0.00445284
 P2: 0.000663699
 K3: 0.00582599
 P3: 0.207481
 K4: 0
 P4: 0

Ground Control Points



● Control points

● Check points

Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
50	1.86504	1.46677	1.8022	2.37272	2.97955	7.629

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALG100	0.0605284	-2.03844	2.09958	2.92697	9.588 (41)
SALG101	-1.92552	-1.41637	2.01592	3.12693	2.382 (41)
SALG102	-1.87543	-1.35498	3.66254	4.33214	2.364 (46)
SALG17	0.168738	-1.48426	1.69917	2.26245	0.886 (34)
SALG18	0.453954	-0.520909	1.41553	1.57517	0.735 (29)
SALG19	-0.533603	-0.683979	0.348483	0.934879	0.889 (36)
SALG23	1.03624	-0.0334653	0.697893	1.24979	1.133 (5)
SALG24	1.86547	0.0555189	2.12708	2.82975	1.555 (3)
SALG51	1.4052	-0.0475297	2.11691	2.54129	2.599 (21)
SALG52	-2.23341	1.24463	-2.06318	3.28541	6.030 (19)
SALG53	-3.03941	-1.27249	-0.180384	3.29996	9.913 (22)
SALG54	2.71948	-0.837223	0.255163	2.85686	11.859 (18)
SALG55	0.941655	0.812375	0.0772741	1.24605	19.974 (24)
SALM01	-0.400164	0.275362	-1.56204	1.63582	0.566 (15)
SALM02	-0.180305	0.122566	0.829935	0.858093	0.301 (3)
SALM03	-0.669126	0.34166	1.3389	1.53529	0.631 (5)
SALM04	-0.943405	0.248483	1.42476	1.72676	1.177 (5)
SALM05	1.41114	0.301981	-2.10621	2.55316	2.523 (20)
SALM06	1.28845	0.331362	-1.62424	2.09954	1.218 (7)
SALM07	3.12101	2.18714	-1.76118	4.19834	16.239 (28)
SALM103	-3.81268	0.841259	1.55738	4.20353	5.232 (6)
SALM104	2.94524	1.89899	0.123168	3.50653	8.695 (14)
SALM105	-0.692375	-2.80519	-1.84032	3.42568	2.516 (7)
SALM106	-0.987915	-0.900267	-1.53261	2.03355	3.974 (15)
SALM107	1.72807	-1.3082	0.535896	2.23267	6.361 (15)
SALM108	-2.33731	-1.39577	-1.47438	3.09597	2.156 (5)
SALM109	-1.36036	-1.32528	1.36242	2.33734	3.312 (12)
SALM56	0.252785	-1.29792	2.16456	2.5365	0.737 (13)
SALM57	0.501523	-0.35747	-0.232792	0.658409	1.176 (8)
SALM58	0.197945	-0.821735	0.173875	0.862939	0.827 (6)
SALM59	-0.283051	-3.68872	0.0238989	3.69964	30.302 (22)
SALM60	-0.355344	0.950021	-1.46697	1.76348	0.346 (4)

Digital Elevation Model

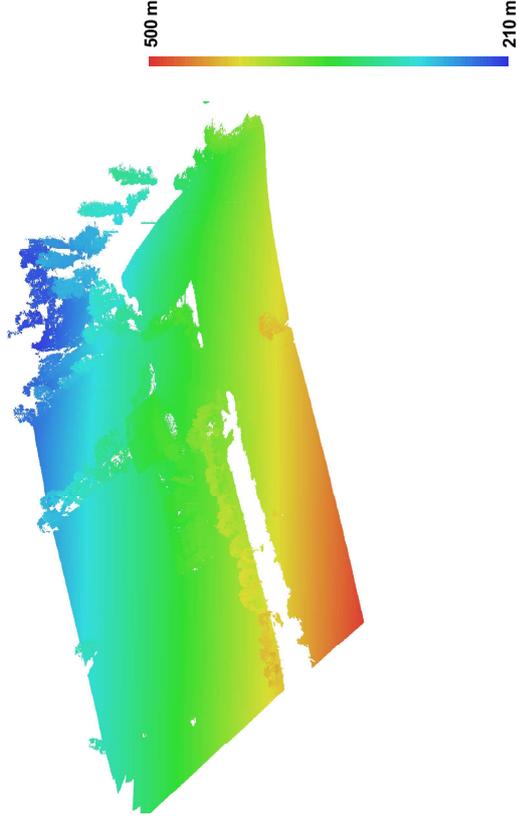


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
 Point density: unknown

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALM62	-3.32197	2.77672	-0.2294	4.3357	21.024 (21)
SALM63	-1.46333	-1.00045	-0.988737	2.02974	0.000 (1)
SALT111	-1.29685	-0.890098	1.53592	2.19844	2.400 (42)
SALT112	-2.94338	0.0235734	-3.79991	4.80659	2.248 (23)
SALT113	-1.47408	-0.175817	1.7713	2.31113	2.902 (26)
SALT114	-3.81545	-0.33373	3.1332	4.94833	1.690 (40)
SALT115	2.04757	0.653592	-1.24211	2.48246	2.257 (13)
SALT116	1.9563	-0.67696	-3.62909	4.17801	1.201 (14)
SALT117	1.80145	2.11004	-0.847611	2.90102	1.197 (14)
SALT118	1.21219	3.28579	-2.53877	4.32564	1.745 (44)
SALT119	2.96035	3.22978	2.10877	4.86231	1.345 (48)
SALT120	-1.18325	-1.40168	0.0713609	1.83573	1.347 (8)
SALT121	-0.337193	0.51934	2.45246	2.52942	1.650 (48)
SALT122	-2.201	2.76168	-2.89251	4.56485	2.763 (35)
SALT13	1.53747	-0.0708726	-0.725535	1.70154	1.640 (40)
SALT14	3.54863	0.293687	-3.00077	4.65657	3.144 (40)
SALT15	1.64877	-0.101923	-0.650864	1.77551	1.392 (14)
SALT65	0.94908	2.29373	-1.91153	3.13303	3.641 (30)
Total	1.86504	1.46677	1.8022	2.97955	7.629

Table 3. Control points.

Processing Parameters

General
Cameras 207
Aligned cameras 207
Markers 103
Coordinate system WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud
Points 1,624,603 of 1,716,073
RMS reprojection error 0.358019 (1.3127 pix)
Max reprojection error 17.0789 (55.4564 pix)
Mean key point size 4.17987 pix
Effective overlap 3.36174
Alignment parameters
Accuracy High
Pair preselection Generic
Key point limit 0
Tie point limit 0
Constrain features by mask No
Adaptive camera model fitting No
Matching time 58 minutes 59 seconds
Alignment time 11 minutes 6 seconds
Optimization parameters
Parameters f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time 49 seconds
Dense Point Cloud
Points 80,572,929
Reconstruction parameters
Quality High
Depth filtering Mild
Depth maps generation time 2 days 3 hours
Dense cloud generation time 7 hours 16 minutes
Software
Version 1.2.6 build 2834
Platform Windows 64 bit

Spark - Esterni

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

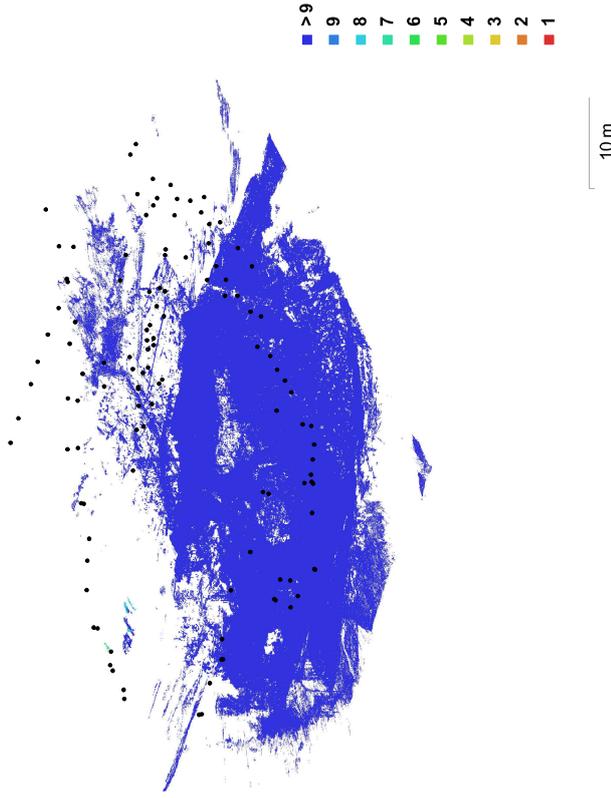


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 133
 Flying altitude: 20 m
 Ground resolution: 5.59 mm/pix
 Coverage area: 1.11e+03 m²

Camera stations: 119
 Tie points: 286,256
 Projections: 729,755
 Reprojection error: 1.56 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC1102 (4.49 mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

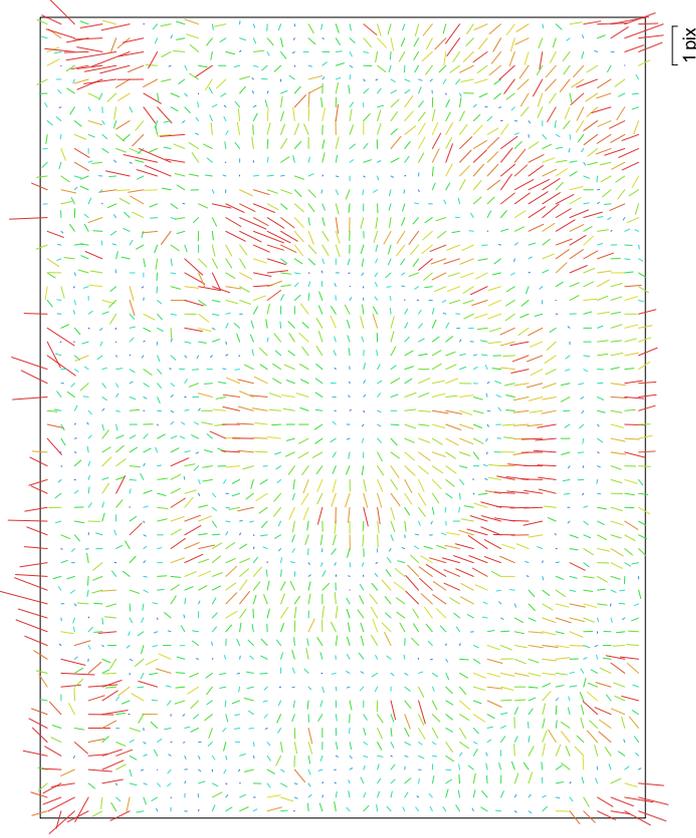
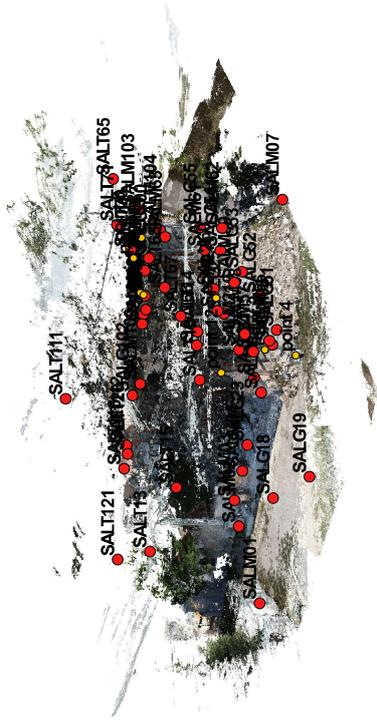


Fig. 2. Image residuals for FC1102 (4.49 mm).

FC1102 (4.49 mm)
 133 images

Resolution	3968 x 2976	Focal Length	4.49 mm	Pixel Size	1.57 x 1.57 μ m	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	2885.78		
Cx:		-40.73		B1:	2.48924		
Cy:		-17.5341		B2:	-4.13761		
K1:		0.14973		P1:	-0.000653347		
K2:		-0.366468		P2:	-0.000118232		
K3:		0.20925		P3:	1.45		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points



● Control points
● Check points

Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
53	1.07098	1.06481	1.15117	1.51024	1.89895	2.758

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALG100	-1.21166	-1.89346	-1.00861	2.46385	3.547 (37)
SALG101	-1.45917	-1.88781	-0.016939	2.38606	4.874 (25)
SALG102	-1.45343	-1.66704	-0.276838	2.22893	5.107 (28)
SALG18	-0.536615	0.342635	-0.117515	0.647429	1.581 (11)
SALG19	-0.249793	-0.541896	-0.577826	0.83062	1.223 (3)
SALG23	0.925078	0.245747	0.0335063	0.957749	1.110 (21)
SALG24	0.4304	0.707406	0.896636	1.2205	1.750 (19)
SALG25	0.786556	-1.81224	1.27731	2.35253	2.099 (26)
SALG51	1.44725	-0.208779	0.307325	1.49418	1.828 (14)
SALG52	1.7397	-0.642994	0.797697	2.01899	2.163 (17)
SALG53	1.33998	-0.619502	0.433977	1.53872	2.542 (23)
SALG54	-0.10463	-1.35157	-0.265902	1.38145	2.865 (25)
SALG55	-1.57113	-0.122756	-1.50025	2.17583	3.868 (18)
SALM01	-1.8428	0.660309	-0.350088	1.98859	2.398 (16)
SALM02	0.918814	0.755176	-2.13247	2.44171	0.989 (12)
SALM03	0.339681	1.11713	-1.44192	1.8554	0.768 (13)
SALM04	0.741797	0.771457	-1.1947	1.60397	0.997 (19)
SALM05	0.205088	0.296374	-0.816703	0.892694	0.755 (16)
SALM06	0.544795	-0.746145	-1.0127	1.3708	1.623 (7)
SALM07	-1.69559	-1.463	0.633452	2.32737	2.559 (7)
SALM103	1.7247	-0.658388	-1.43318	2.33711	5.411 (12)
SALM104	-0.467854	-0.343778	0.233509	0.625777	2.646 (14)
SALM105	-0.684902	0.337621	0.324889	0.829839	1.827 (25)
SALM106	-1.0033	0.452003	-1.92225	2.21494	1.734 (13)
SALM107	-0.673304	0.803318	0.572945	1.19454	2.573 (33)
SALM108	-0.372341	2.33181	0.1172	2.36425	1.567 (11)
SALM109	-0.706499	1.41243	2.00569	2.55282	3.046 (24)
SALM210	-1.11878	1.32677	0.513337	1.80984	2.010 (14)
SALM211	-1.67264	-0.756032	0.956016	2.0696	0.683 (4)
SALM56	0.516421	-0.827127	0.756639	1.23423	1.043 (8)
SALM57	0.436868	-0.340917	0.235311	0.602038	1.218 (16)
SALM58	1.0307	-0.330382	0.499124	1.1919	2.331 (16)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALM59	1.72908	-0.882212	-0.099891	1.94371	1.895 (13)
SALM60	0.868144	-0.359941	0.0576533	0.941571	1.412 (21)
SALM61	-0.341888	-2.10484	-0.197715	2.14158	1.425 (9)
SALM62	0.924285	-0.547301	1.70007	2.01099	4.905 (10)
SALM63	-1.11842	-0.769246	-1.48449	2.01154	2.280 (31)
SALT111	-0.051987	-0.0212043	1.70557	1.7065	3.239 (21)
SALT112	-1.3798	0.985373	1.72922	2.42177	2.616 (12)
SALT113	-1.75946	1.01578	0.295492	2.05301	3.543 (7)
SALT120	-0.540835	0.118282	1.64664	1.73722	4.353 (34)
SALT121	0.137999	-0.653955	2.27916	2.37514	3.751 (8)
SALT13	-0.506327	0.941577	-2.17933	2.42743	2.125 (11)
SALT14	1.12066	1.46956	-1.42396	2.33306	1.719 (10)
SALT15	-0.620463	2.07665	-1.04246	2.40503	1.759 (36)
SALT16	-0.542754	1.79799	0.948639	2.10411	1.626 (31)
SALT65	2.0901	-0.217272	-0.895503	2.28422	2.870 (15)
SALT66	-0.549155	1.54781	1.85564	2.47804	2.535 (15)
SALT67	0.507564	0.933745	1.66834	1.97809	1.293 (7)
SALT68	1.24028	1.1144	0.410525	1.71718	1.425 (10)
SALT69	2.01595	-0.093361	-0.176913	2.02585	3.776 (21)
SALT70	0.459744	-0.670894	-1.71309	1.89635	2.104 (10)
SALT71	-0.116558	-1.05869	-1.59735	1.91988	0.785 (4)
Total	1.07098	1.06481	1.15117	1.89895	2.758

Table 3. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 2					0.046 (2)
point 3					0.673 (4)
point 4					1.642 (6)
point 6					3.852 (10)
point 7					4.571 (9)
point 8					2.672 (6)
point 10					1.993 (6)
point 11					2.917 (5)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 12					0.924 (12)
Total					

Table 4. Check points.

Digital Elevation Model

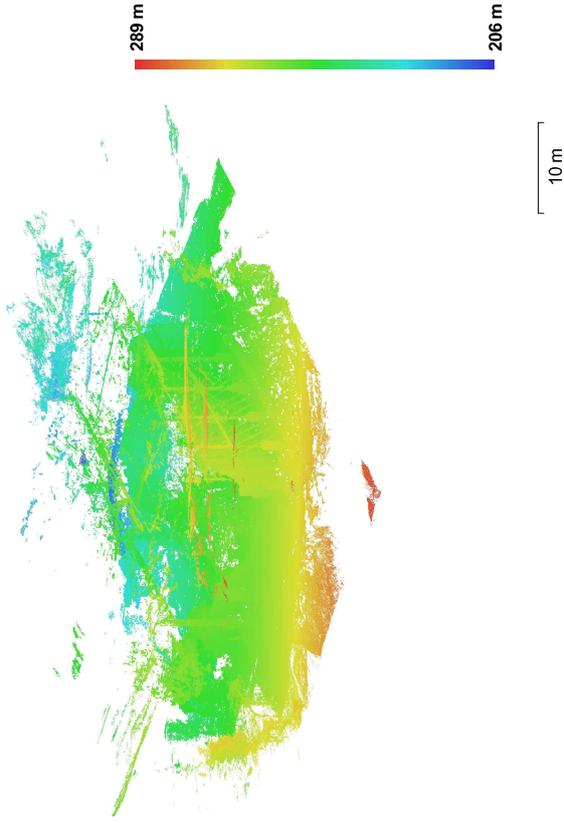


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
 Point density: unknown

Processing Parameters

General	
Cameras	133
Aligned cameras	119
Markers	106
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	286,256 of 406,146
RMS reprojection error	0.408206 (1,56016 pix)
Max reprojection error	8.81949 (72,1933 pix)
Mean keypoint size	4,56752 pix
Effective overlap	2,63265
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	8 minutes 54 seconds
Alignment time	2 minutes 40 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, ox, oy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	6 seconds
Dense Point Cloud	
Points	21,673,121
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	13 hours 1 minutes
Dense cloud generation time	34 minutes 9 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Spark - Interni 2

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

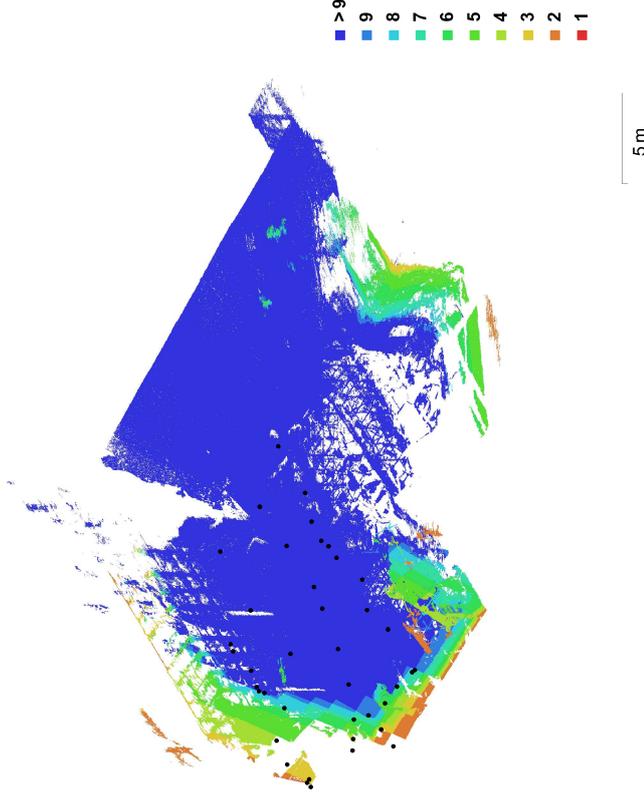


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 40 Camera stations: 40
Flying altitude: 17.1 m Tie points: 123,710
Ground resolution: 3.89 mm/pix Projections: 402,734
Coverage area: 390 m² Reprojection error: 1.24 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC1102 (4.49 mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

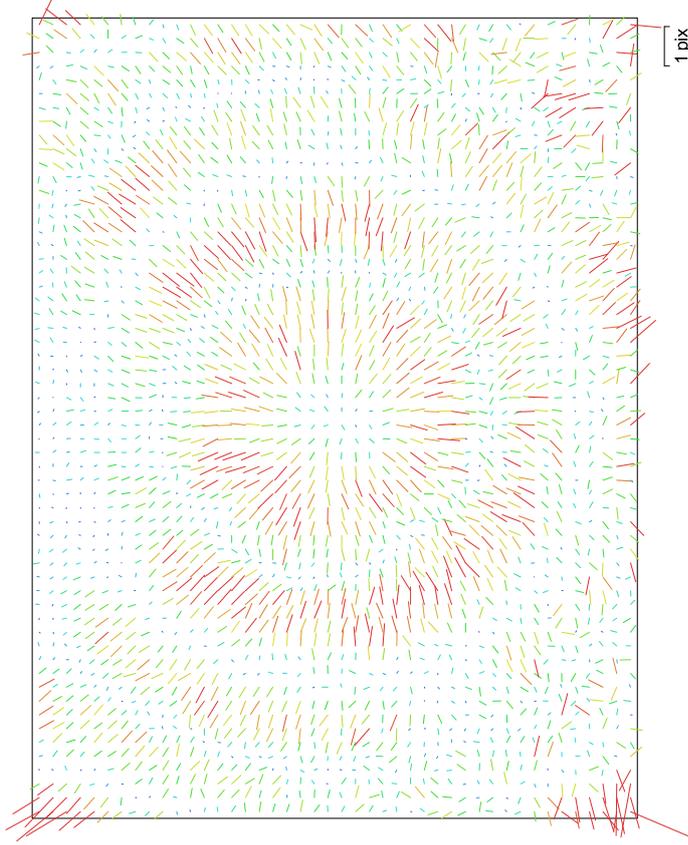


Fig. 2. Image residuals for FC1102 (4.49 mm).

FC1102 (4.49 mm)
40 Images

Resolution	3968 x 2976	Focal Length	4.49 mm	Pixel Size	1.57 x 1.57 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	2873.24		
Cx:		-35.8051		B1:	9.88423		
Cy:		-2.25117		B2:	-4.98111		
K1:		0.131562		P1:	-0.000358857		
K2:		-0.303688		P2:	-5.76694e-05		
K3:		0.14918		P3:	2.52591		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points

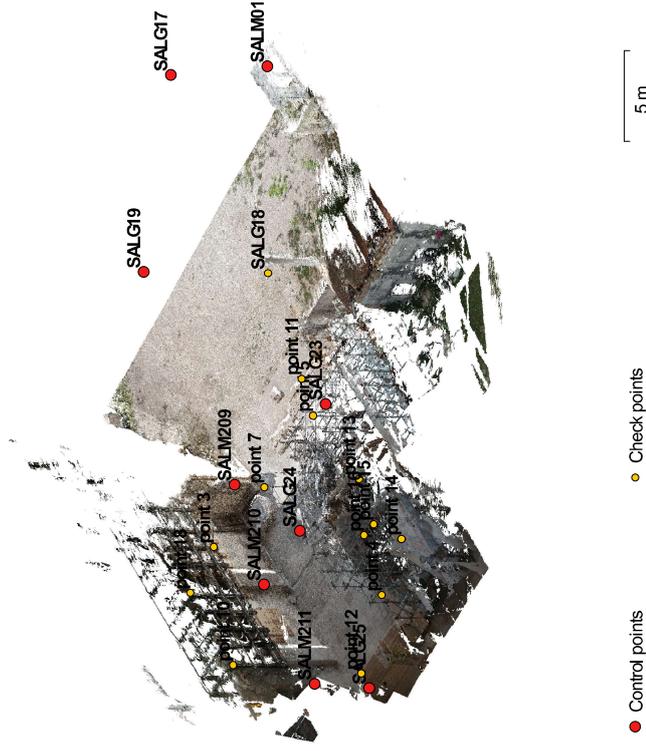


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
9	4.8948	5.26813	3.19659	7.19112	7.86959	0.905

Table 2. Control points RMSE.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
1	1.75422	2.69181	7.63889	3.21296	8.28708	0.798

Table 3. Check points RMSE.

Digital Elevation Model

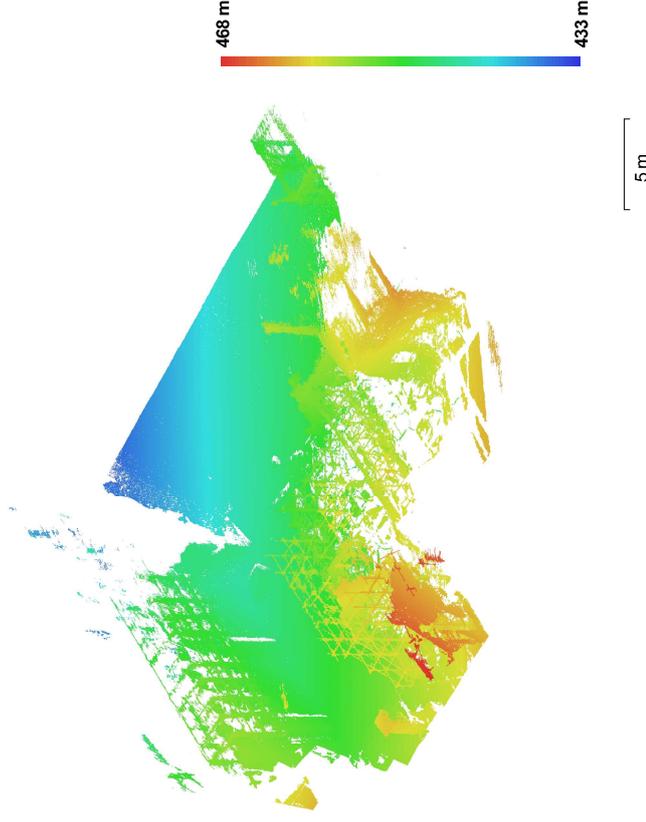


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
 Point density: unknown

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALG17	4.71065	-3.33441	3.11673	6.55916	0.000 (1)
SALG19	-10.7288	7.61098	3.5298	13.6196	0.614 (19)
SALG23	4.00845	-6.49667	1.9808	7.88657	1.127 (7)
SALG24	3.20571	0.0717447	1.56039	3.56602	0.841 (25)
SALG25	5.90654	0.818567	3.47185	6.90007	1.155 (4)
SALM01	0.362257	-9.87742	-2.09564	10.1038	0.754 (21)
SALM209	0.809626	5.93111	-2.54954	6.50643	1.105 (28)
SALM210	-3.72346	1.8434	-5.84127	7.16817	0.947 (21)
SALM211	-1.56582	1.30835	-2.52307	3.24492	0.000 (1)
Total	4.8948	5.26813	3.19659	7.86959	0.905

Table 4. Control points.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALG18	1.75422	-2.69181	7.63889	8.28708	0.798 (40)
point 3					0.966 (22)
point 4					1.336 (14)
point 5					0.947 (16)
point 7					0.945 (26)
point 10					0.712 (5)
point 11					2.242 (6)
point 12					0.810 (7)
point 13					0.983 (10)
point 14					0.947 (9)
point 15					0.730 (11)
point 16					1.040 (15)
point 18					1.334 (6)
Total	1.75422	2.69181	7.63889	8.28708	0.798

Table 5. Check points.

Processing Parameters

General
Cameras 40
Aligned cameras 40
Markers 117
Coordinate system WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud
Points 123,710 of 137,052
RMS reprojection error 0.27994 (1.23843 pix)
Max reprojection error 1.22699 (61.6447 pix)
Mean key point size 4.30376 pix
Effective overlap 3.38113
Alignment parameters
Accuracy High
Pair preselection Generic
Key point limit 0
Tie point limit 0
Constrain features by mask No
Adaptive camera model fitting No
Matching time 4 minutes 5 seconds
Alignment time 21 seconds
Optimization parameters
Parameters f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time 3 seconds
Dense Point Cloud
Points 11,903,543
Reconstruction parameters
Quality High
Depth filtering Mild
Depth maps generation time 3 hours 50 minutes
Dense cloud generation time 3 minutes 51 seconds
Software
Version 1.2.6 build 2834
Platform Windows 64 bit

Spark - Interni 3

Processing Report
28 March 2019



Survey Data

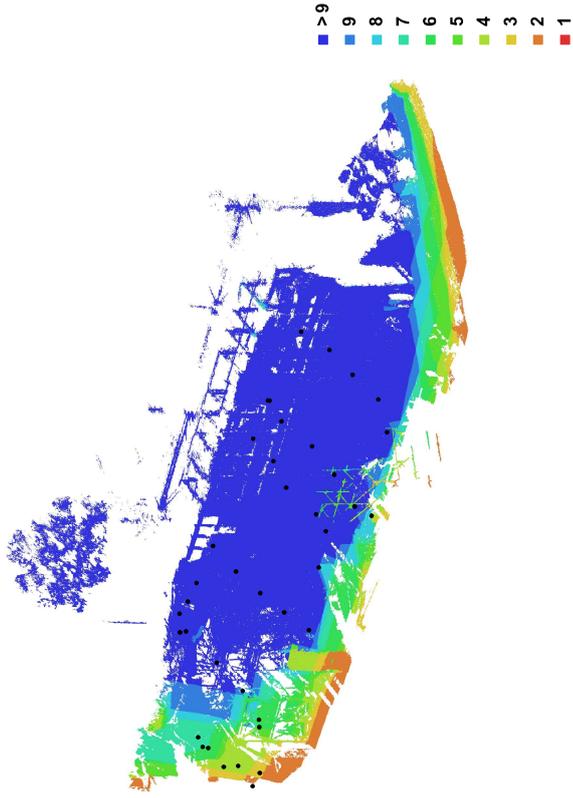


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 39
 Flying altitude: 9.39 m
 Ground resolution: 2.88 mm/pix
 Coverage area: 276 m²

Camera stations: 39
 Tie points: 145,811
 Projections: 400,527
 Reprojection error: 1.01 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC1102 (4.49 mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

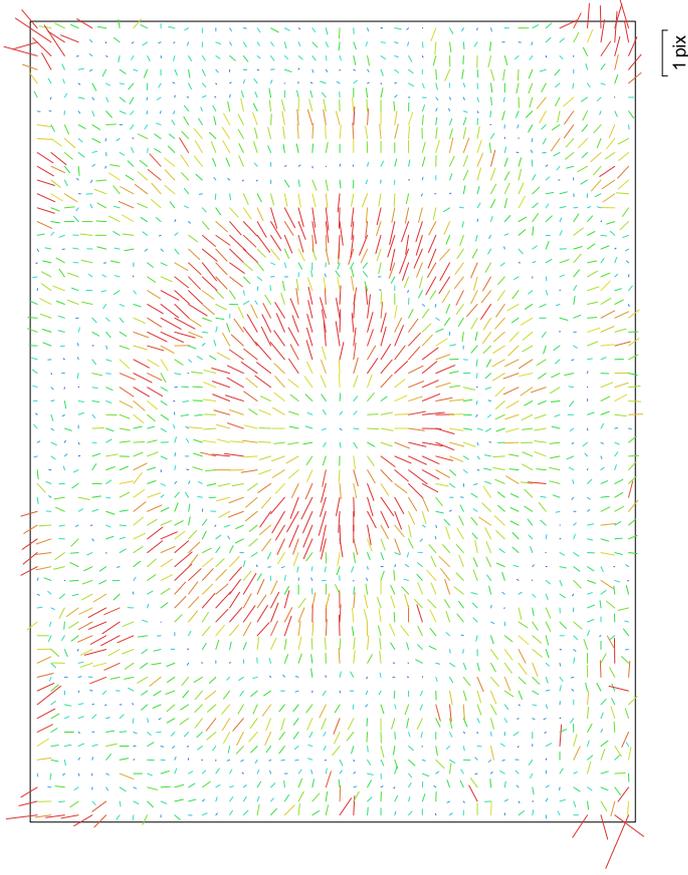


Fig. 2. Image residuals for FC1102 (4.49 mm).

FC1102 (4.49 mm)

39 images

Resolution	3968 x 2976	Focal Length	4.49 mm	Pixel Size	1.57 x 1.57 μ m	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	2877.61		
Cx:		-33.4212		B1:	15.9784		
Cy:		-36.7693		B2:	-16.5932		
K1:		0.138545		P1:	0.000694534		
K2:		-0.32526		P2:	-0.00161789		
K3:		0.170306		P3:	-1.11756		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points



- Control points
- Check points

Fig. 3. GCP locations.

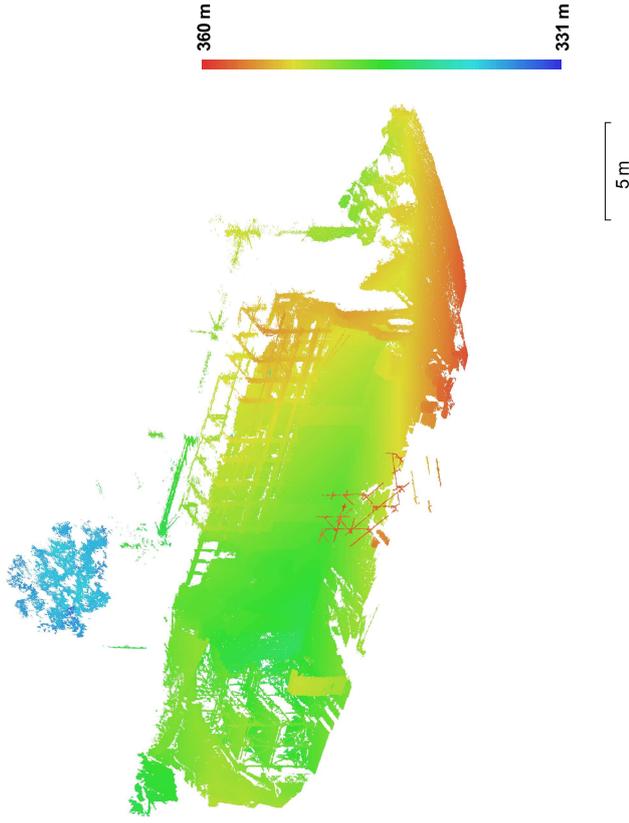
Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
8	3.68485	2.51189	2.15106	4.45956	4.95124	0.746

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
SALG24	-5.28923	-3.05103	1.08147	6.20115	0.661 (8)
SALG25	-4.8919	-2.23988	-3.86246	6.62316	0.778 (7)
SALM209	3.34754	0.387107	-0.55361	3.41502	0.538 (7)
SALM210	1.06114	5.12059	0.246897	5.23521	0.762 (14)
SALM211	4.08382	-2.10771	-2.08234	5.04541	0.662 (10)
SALM212	-1.14468	0.140748	-0.43229	1.23165	0.757 (15)
SALM213	-1.94078	-0.479848	2.44605	3.15912	0.617 (6)
SALM214	4.75727	2.25565	3.17094	6.14609	0.988 (10)
Total	3.68485	2.51189	2.15106	4.95124	0.746

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model



Resolution: unknown
 Point density: unknown

Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

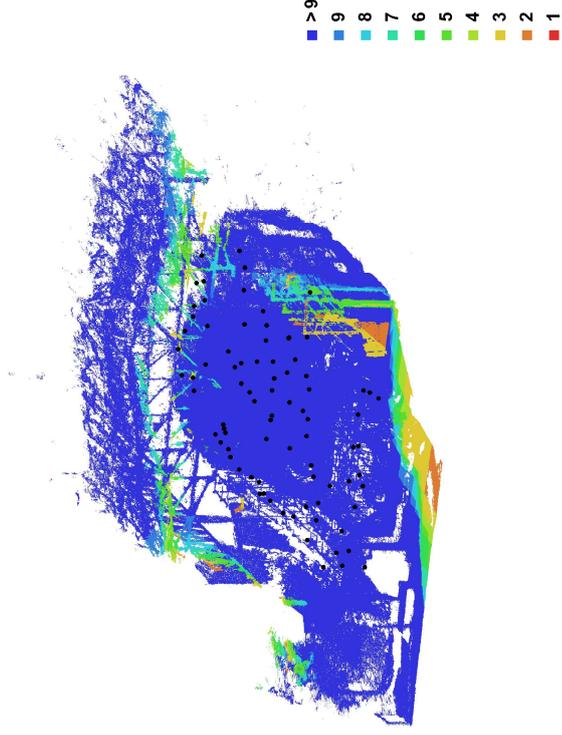
General	
Cameras	39
Aligned cameras	39
Markers	99
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	145,811 of 165,002
RMS reprojection error	0.237832 (1.00669 pix)
Max reprojection error	1.29087 (39.2504 pix)
Mean key point size	4.35204 pix
Effective overlap	2.84266
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Key point limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	2 minutes 41 seconds
Alignment time	26 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	4 seconds
Dense Point Cloud	
Points	13,474,876
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	1 hours 11 minutes
Dense cloud generation time	4 minutes 3 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Spark - Interni

Processing Report
28 March 2019



Survey Data



10 m

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 163 Camera stations: 84
Flying altitude: 17.8 m Tie points: 305,896
Ground resolution: 3.41 mm/pix Projections: 972,848
Coverage area: 434 m² Reprojection error: 1.19 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC1102 (4.49 mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

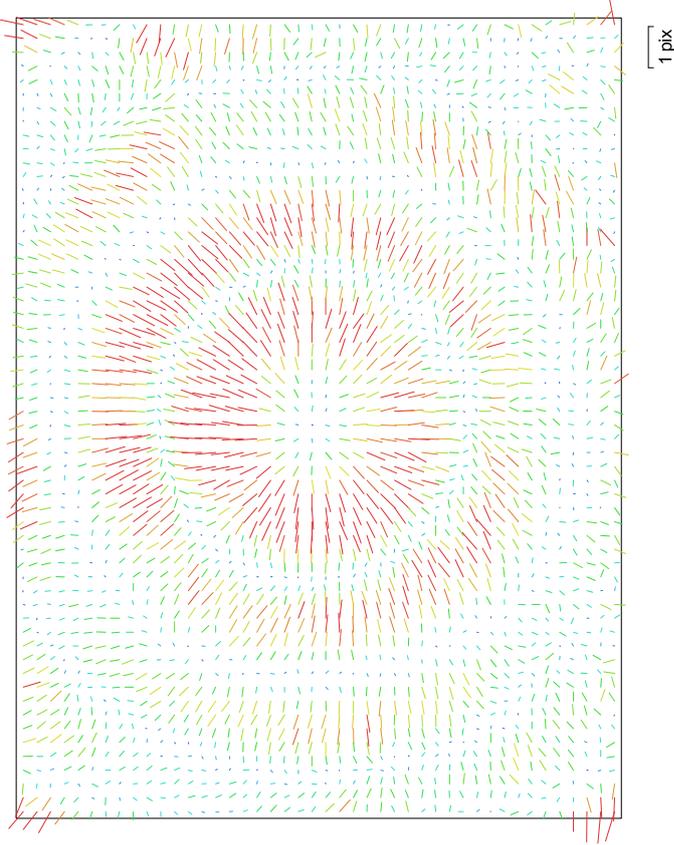


Fig. 2. Image residuals for FC1102 (4.49 mm).

FC1102 (4.49 mm)
163 images

Resolution	3968 x 2976	Pixel Size	1.57 x 1.57 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame	F:		2883.37
Cx:	-18.57	Focal Length	4.49 mm	B1:	4.38499
Cy:	-23.84			B2:	-4.39257
K1:	0.131728			P1:	0.00230701
K2:	-0.299352			P2:	-0.0012311
K3:	0.140885			P3:	-0.994426
K4:	0			P4:	0

Ground Control Points

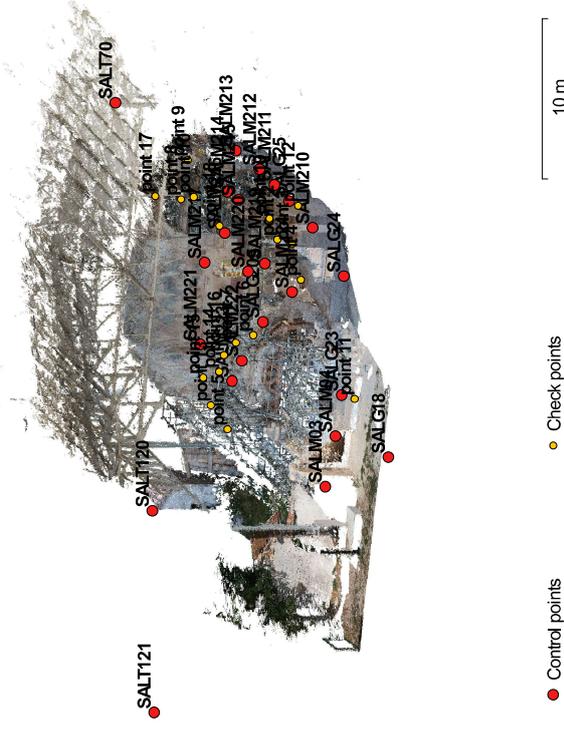


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
24	0.840164	0.591083	0.625448	1.02726	1.20268	2.356

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALG18	1.00442	0.271146	-0.368555	1.10372	0.361 (2)
SALG205	-0.765327	-1.03963	-1.12788	1.71426	2.923 (22)
SALG23	0.595273	-0.315757	0.13758	0.687736	1.176 (13)
SALG24	-1.049	0.278308	1.18911	1.60992	1.419 (6)
SALG25	-1.39544	-0.664054	0.625801	1.66728	0.995 (17)
SALM03	0.295573	1.36143	0.0452012	1.39388	2.312 (3)
SALM04	0.94678	0.328209	-0.768166	1.26261	1.514 (6)
SALM210	-0.648609	0.659845	0.126959	0.933921	0.386 (5)
SALM211	-1.0014	-0.181827	0.202787	1.03778	0.888 (10)
SALM212	0.500607	-0.660683	-0.111137	0.836338	1.014 (14)
SALM213	0.81088	-0.82002	0.188527	1.16855	1.015 (13)
SALM214	1.14548	-0.134682	-0.0897297	1.15686	0.972 (27)
SALM215	1.01076	-0.4421	-0.436446	1.18642	1.087 (26)
SALM216	0.731612	0.276257	-0.319679	0.844849	1.005 (17)
SALM217	-0.104215	0.264195	0.0850275	0.296461	0.834 (15)
SALM219	0.213245	-0.292306	-0.454578	0.580997	1.595 (14)
SALM220	0.399262	0.025	-0.227065	0.459993	1.160 (13)
SALM221	-0.135581	0.719486	-0.770319	1.06275	1.429 (15)
SALM222	-0.0161477	0.222126	-0.0899667	0.240197	8.059 (20)
SALM223	0.168384	1.08472	-0.818737	1.36942	1.334 (22)
SALM224	-1.29955	-0.0326703	0.103969	1.30411	1.235 (7)
SALT120	-0.883659	-0.709434	1.456	1.84502	1.169 (16)
SALT121	-1.20942	-0.572893	0.476138	1.42043	1.078 (30)
SALT70	1.25096	0.228103	1.12396	1.69712	0.481 (5)
Total	0.840164	0.591083	0.625448	1.20268	2.356

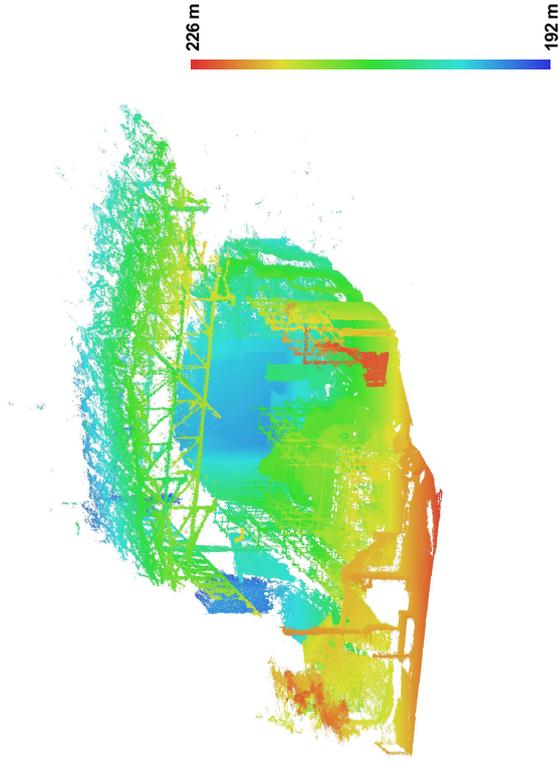
Table 3. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 2					0.779 (2)
point 3					0.057 (2)
point 4					0.946 (6)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 5					0.996 (29)
point 6					0.990 (18)
point 7					0.876 (19)
point 8					1.201 (12)
point 9					0.622 (6)
point 10					0.872 (8)
point 11					0.707 (6)
point 12					0.789 (16)
point 13					0.886 (28)
point 14					1.180 (13)
point 15					0.867 (14)
point 16					0.960 (9)
point 17					1.236 (13)
point 18					1.093 (7)
point 19					0.668 (5)
Total					

Table 4. Check points.

Digital Elevation Model



Resolution: unknown
 Point density: unknown

Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	163
Aligned cameras	84
Markers	117
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	305,896 of 641,135
RMS reprojection error	0.312803 (1.18878 pix)
Max reprojection error	3.41155 (49.7947 pix)
Mean keypoint size	4.17815 pix
Effective overlap	3.19009
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	15 minutes 50 seconds
Alignment time	3 minutes 54 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	9 seconds
Dense Point Cloud	
Points	19,839,979
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	4 hours 54 minutes
Dense cloud generation time	9 minutes 25 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Spark - Pavimenti

Processing Report
28 March 2019



Survey Data



20 m

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images: 47
Flying altitude: 6.64 m
Ground resolution: 2.01 mm/pix
Coverage area: 314 m²

Camera stations: 43
Tie points: 160,559
Projections: 450,013
Reprojection error: 0.958 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC1102 (4.49 mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

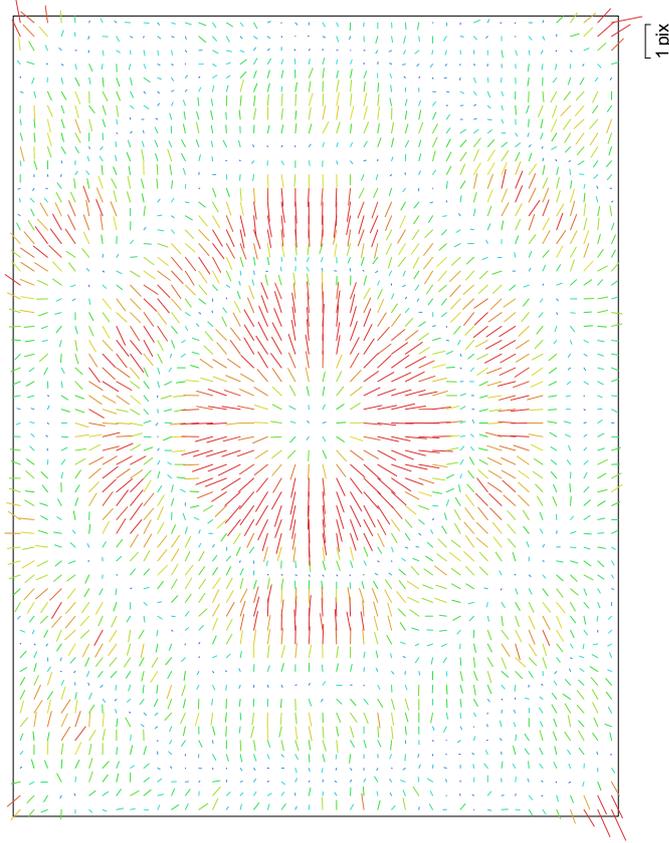


Fig. 2. Image residuals for FC1102 (4.49 mm).

FC1102 (4.49 mm)
47 Images

Resolution	3968 x 2976	Focal Length	4.49 mm	Pixel Size	1.57 x 1.57 μm	Precalibrated	No
Type:		Frame		F:	2917.08		
Cx:		-31.9963		B1:	2.80308		
Cy:		-16.175		B2:	-2.80472		
K1:		0.132567		P1:	0.000893643		
K2:		-0.30499		P2:	-0.0010664		
K3:		0.142241		P3:	-0.76986		
K4:		0		P4:	0		

Ground Control Points

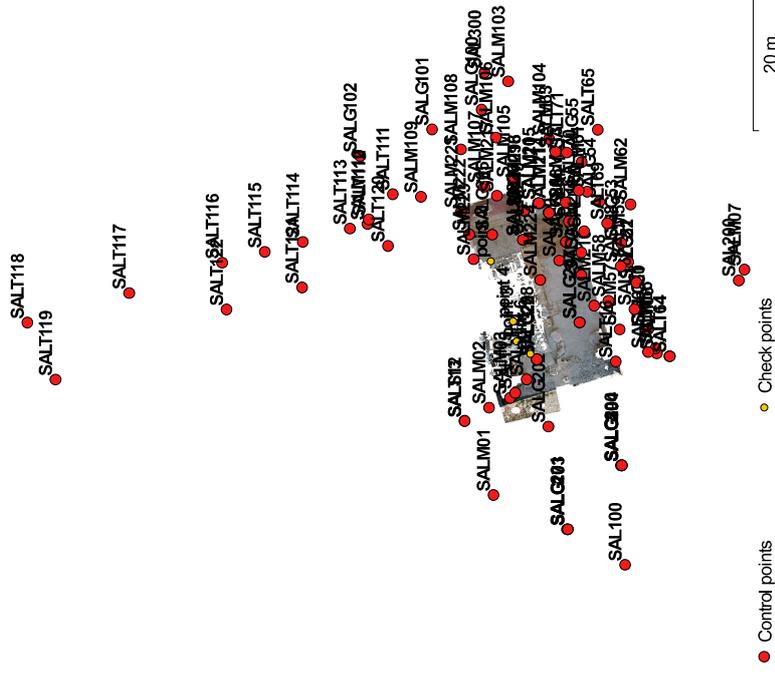


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
16	0.501316	0.948566	0.804781	1.07289	1.34118	0.464

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SAL100					(0)
SAL200					(0)
SAL300					(0)
SAL400					(0)
SALG100					(0)
SALG101					(0)
SALG102					(0)
SALG17					(0)
SALG19					(0)
SALG20					(0)
SALG200					(0)
SALG201					(0)
SALG202					(0)
SALG203					(0)
SALG204					(0)
SALG205	-0.891681	-2.60775	-0.611011	2.82291	0.678 (7)
SALG206					(0)
SALG207					(0)
SALG208					(0)
SALG21					(0)
SALG22					(0)
SALG23	0.463756	0.763469	-0.661958	1.11182	0.337 (7)
SALG24	-0.152904	0.6339	-0.314218	0.723839	0.513 (9)
SALG25	0.327215	0.434628	-0.539153	0.765936	0.573 (6)
SALG26					(0)
SALG50					(0)
SALG51					(0)
SALG52					(0)
SALG53					(0)
SALG54					(0)
SALG55					(0)
SALM01					(0)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALM02					(0)
SALM03	-0.846807	-0.546957	-0.797801	1.28559	0.392 (2)
SALM04	-0.564762	-0.170362	0.706504	0.920395	0.461 (2)
SALM06					(0)
SALM07					(0)
SALM08					(0)
SALM09					(0)
SALM10					(0)
SALM103					(0)
SALM104					(0)
SALM105					(0)
SALM106					(0)
SALM107					(0)
SALM108					(0)
SALM109					(0)
SALM11					(0)
SALM110					(0)
SALM210					(0)
SALM211					(0)
SALM212	0.547251	0.978207	-0.34595	1.17305	0.000 (1)
SALM213					(0)
SALM214					(0)
SALM215	0.232318	1.07134	-0.895385	1.41544	0.000 (1)
SALM216	0.735059	1.00434	-0.167819	1.25586	0.000 (1)
SALM217	0.0920934	1.18691	-0.419856	1.26234	0.604 (3)
SALM218					(0)
SALM219	0.373571	0.328646	0.155449	0.521276	0.035 (2)
SALM220	0.484175	0.631783	1.00256	1.28012	0.000 (1)
SALM221	-0.0667207	0.362708	-0.490136	0.613386	0.367 (3)
SALM222	0.508011	-0.637519	-0.323416	0.876985	0.414 (3)
SALM223	0.478881	-0.378833	1.74631	1.84998	0.110 (2)
SALM224	0.276304	0.619265	1.57373	1.71361	0.182 (2)
SALM56					(0)

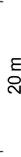
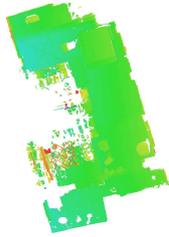
Table 3. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 2					0.104 (2)
point 3					0.819 (2)
point 4					0.433 (2)
point 6					0.608 (3)
Total					

Table 4. Check points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
SALM57					(0)
SALM58					(0)
SALM59					(0)
SALM60					(0)
SALM61					(0)
SALM62					(0)
SALM63					(0)
SALS12					(0)
SALT111					(0)
SALT112					(0)
SALT113					(0)
SALT114					(0)
SALT115					(0)
SALT116					(0)
SALT117					(0)
SALT118					(0)
SALT119					(0)
SALT120					(0)
SALT121					(0)
SALT122					(0)
SALT13					(0)
SALT14					(0)
SALT15					(0)
SALT16					(0)
SALT64					(0)
SALT65					(0)
SALT66					(0)
SALT67					(0)
SALT68					(0)
SALT69					(0)
SALT70					(0)
SALT71					(0)
Total	0.501316	0.948566	0.804781	1.34118	0.464

Digital Elevation Model



Resolution: unknown
 Point density: unknown

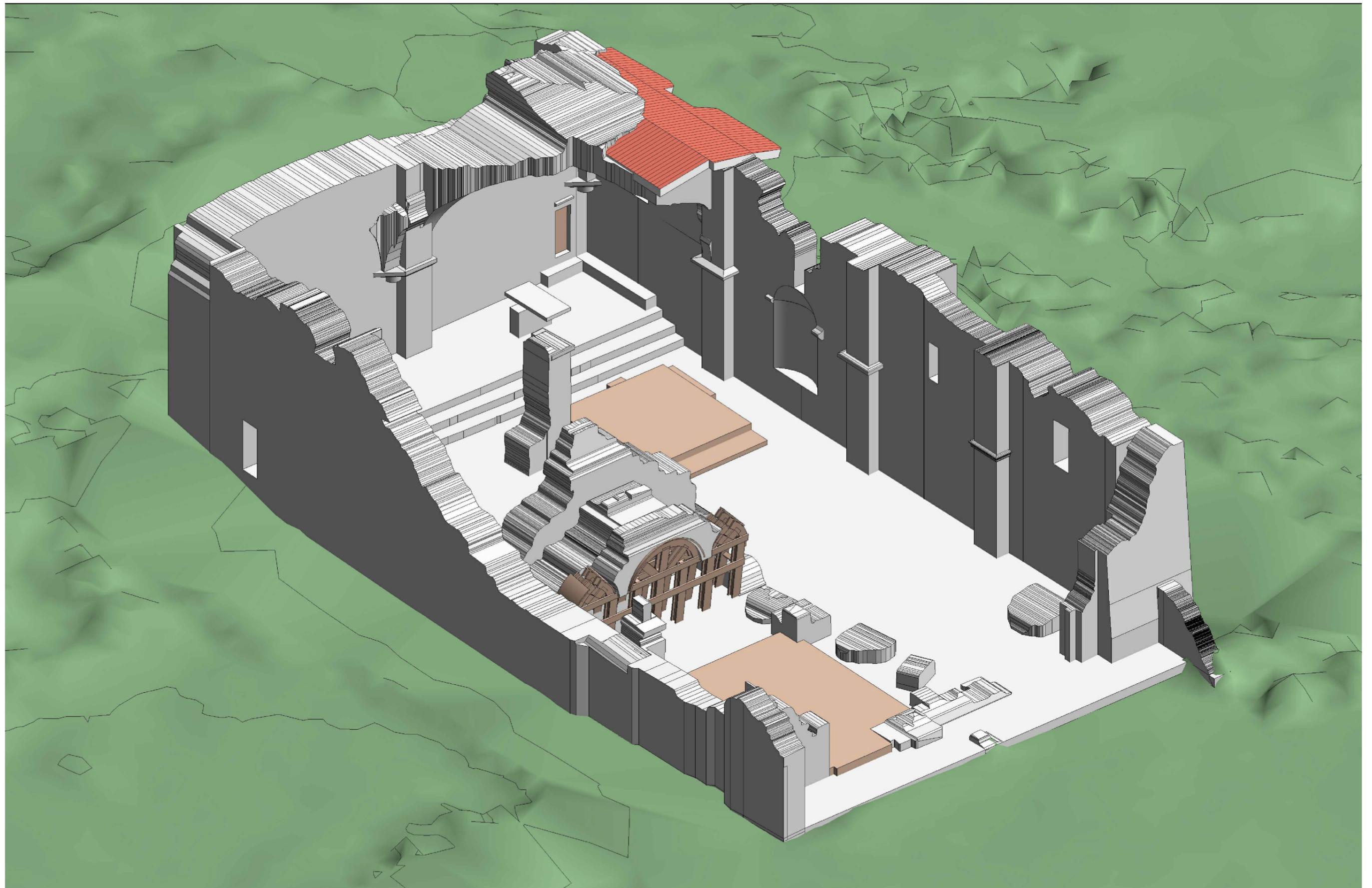
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	47
Aligned cameras	43
Markers	106
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG:32633)
Point Cloud	
Points	160,559 of 165,782
RMS reprojection error	0.258194 (0.957944 pix)
Max reprojection error	1.00089 (29.8045 pix)
Mean keypoint size	4.26961 pix
Effective overlap	2.82052
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	2 minutes 59 seconds
Alignment time	1 minutes 7 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, ox, oy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	3 seconds
Dense Point Cloud	
Points	21,231,741
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	23 minutes 4 seconds
Dense cloud generation time	1 minutes 23 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

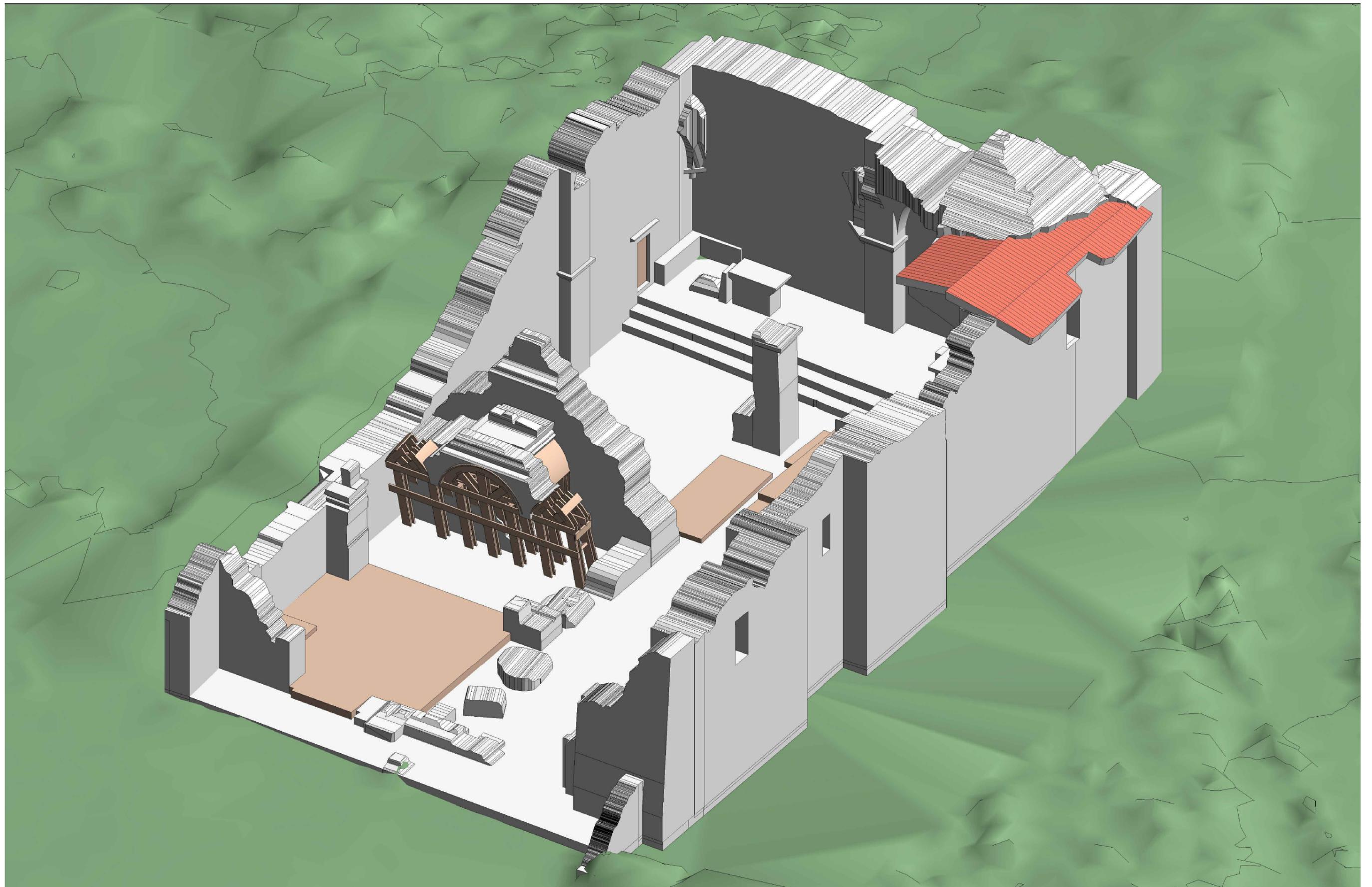
ALLEGATO n°4

Vista 3D - Vista ovest.



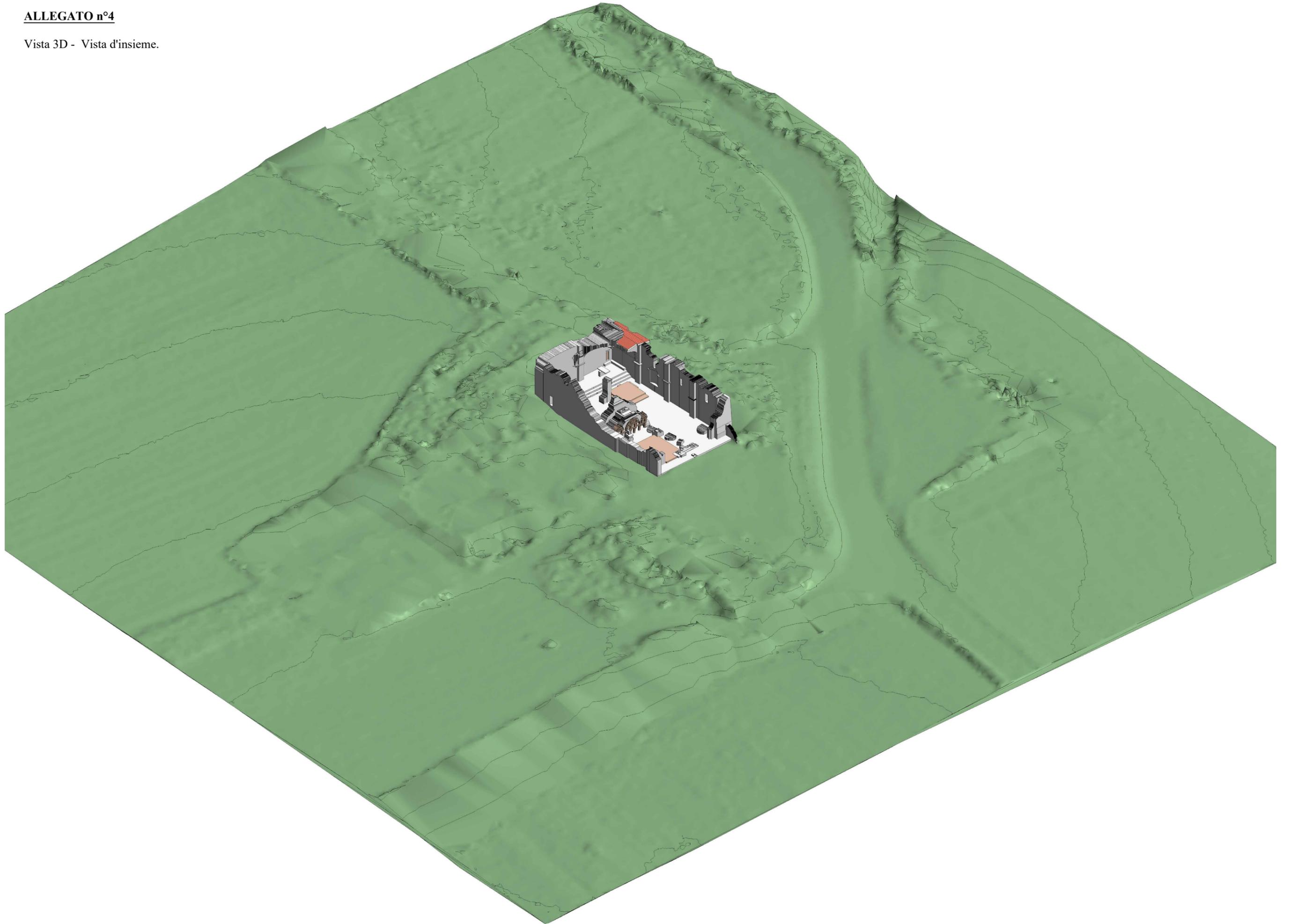
ALLEGATO n°4

Vista 3D - Vista sud.



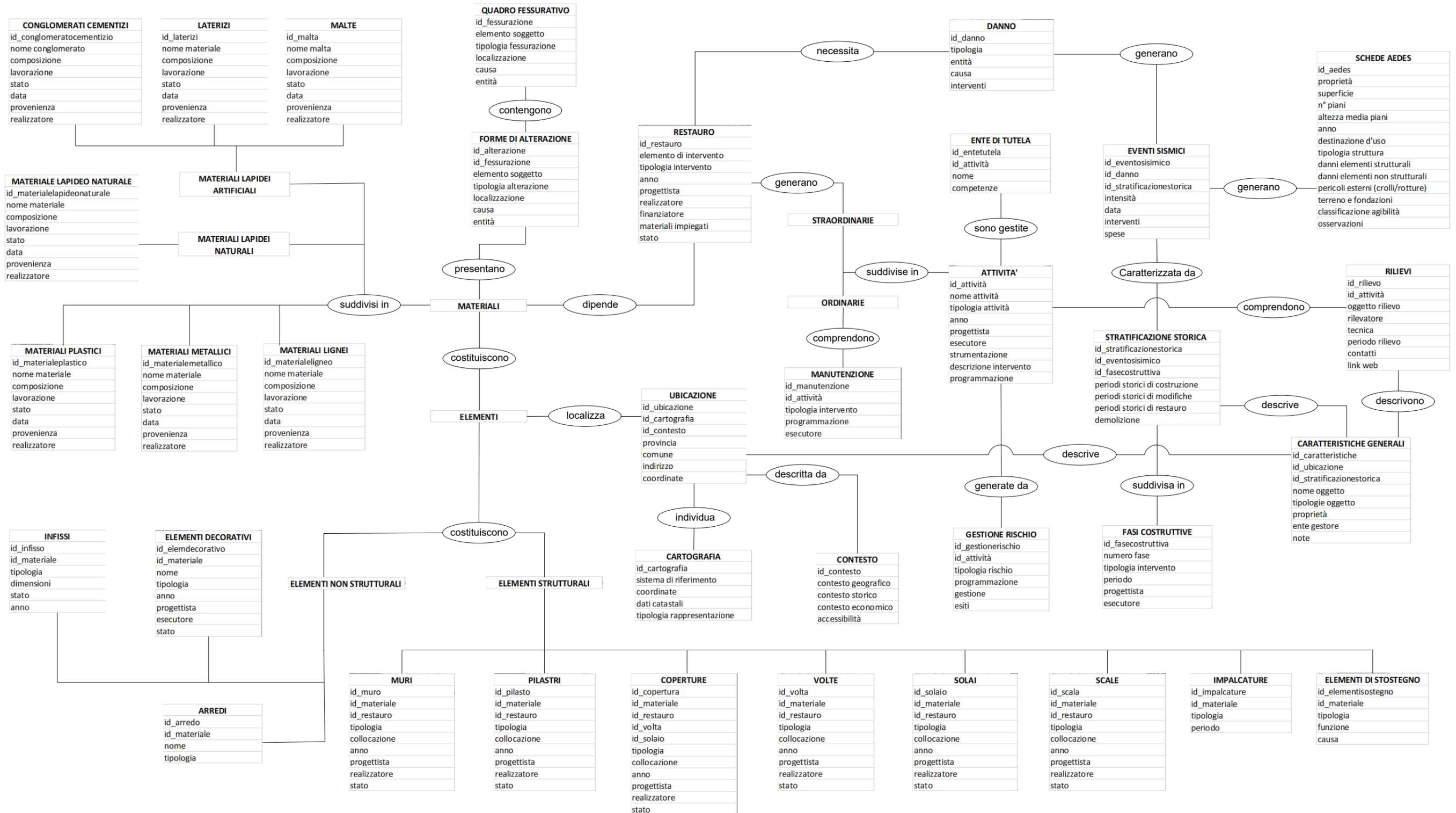
ALLEGATO n°4

Vista 3D - Vista d'insieme.



ALLEGATO n°5

Schema Entità - Relazioni, modello concettuale.



RINGRAZIAMENTI

Ringrazio prima di tutto chi ha reso possibile materialmente la realizzazione di questa tesi, ovvero il professor Andrea Lingua, Francesca Matrone, il professor Marco Zerbinatti e tutte le altre persone che ho conosciuto del dipartimento DIATI, che hanno reso più piacevoli le giornate passate davanti ad uno schermo del pc.

Poi, in secondo luogo, voglio egoisticamente ringraziare me stesso. Perché ho trovato tante difficoltà lungo questo percorso e tantissime volte ho creduto che non sarebbe stato possibile venirne fuori, ma ce l'ho fatta. Ho sofferto, ho perso capelli, ho avuto male al petto per via dell'ansia, ho rinunciato a tante cose che non avrei mai voluto rinunciare, ma ci sono riuscito. Mi ero fissato un obiettivo e l'ho raggiunto, sono stato bravo.

Non vanno messe in secondo piano però tutte le persone che hanno contribuito a creare il "me", e renderlo capace di affrontare tutto questo:

La mia più grande certezza sono i miei genitori. Loro mi hanno reso la persona che sono ora, mi hanno permesso di fare tutto quello che volevo senza mai impormi nulla e senza mai dubitare di me. Non so se io nei loro panni sarei stato capace di fare altrettanto, sono una persona estremamente fortunata, e non basteranno mai delle parole per descrivere questo.

Grazie a chi più di altri è mi ha supportato durante la stesura della tesi: al Baccio, che anche se aveva ben altro a cui pensare, non si tirava mai indietro se c'era bisogno di un aiuto, alla Kikka che assieme a Dario mi han salvato letteralmente dalla pazzia negli ultimi giorni aiutandomi con le grafiche. Grazie alla Chiara, perché lei c'è veramente sempre, e quando hai bisogno di qualcuno sai che lei è presente, e anche nei momenti di crisi ti aiuta a rialzarti e continuare. Grazie a Giovi e Seve che mi hanno aiutato sia

con un notevole supporto informatico che morale, non potevo chiedere di più. Grazie ad Andri, il coinquilino che mi son trovato sotto il tetto quasi per caso, e che come un fratello mi ha aiutato in ogni situazione difficile dall'inizio alla fine senza mai tentennare. Sia quando tornavamo entrambi a casa disperati per l'università, sia quando scalavamo i monti affannando, fino a persino il giorno prima della consegna della tesi, riguardando per me se fosse formattata correttamente.

Grazie agli amici che sono partiti per questa avventura torinese assieme a me, anche se con il tempo ci siamo un po'persi, Alex e Paola. Grazie ai miei amici di viaggio, che son troppi per dirli tutti, ma voi mi avete aiutato a vivere il mondo al di fuori dell'università, ed è stato tanto importante quanto imparare ad andare avanti dentro Politecnico. Grazie a chi è venuto a trovarmi nella mia dimora torinese, Nicoletta, Ale, e Fra. Grazie al team WorkSkassa. Grazie alla mia fidanzata che non ho, per non avermi deconcentrato durante i periodi di studio. Grazie ai nuovi amici torinesi e fuori sede; con alcuni ho legato tanto e passato serate indimenticabili, altri un po' meno, altri ancora per niente, ma sono stati importanti anche loro, a volte mi hanno aiutato capire cosa non volevo essere. Grazie a tutte le persone che in qualche modo hanno fatto parte di questa parentesi durata 3 anni, e che con anche solo un saluto, un messaggio, o uno sguardo hanno contribuito a renderli veri.

Grazie a Torino e grazie a Fano, perché sono entrambe due città che porto nel cuore, ma non poteva esserci solo una o l'altra.

Grazie a chi non mi odierà dopo che avrà letto questi ringraziamenti e non avrà visto il suo nome. Non me né volere, se lo stai leggendo adesso sei sicuramente stato importante anche tu, ma la verità è che ho scritto tutto velocissimo perché domani devo consegnare la tesi e ancora non ho finito di impaginare tutto, quindi grazie, e buona giornata!