



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Edile LM24

Tesi di Laurea Magistrale

La metodologia BIM applicata ai beni culturali.

Un caso specifico: il Sacro Monte di Varallo Sesia.

Relatore:

Prof. Marco Zerbinatti

Correlatori:

Prof. Andrea Maria Lingua

Prof.ssa Anna Osello

Prof. Alessandro Grazzini

Candidato:

Andrea Ursini

A.A. 2018/2019

“Il nostro è un Paese bellissimo ma fragile.

La nostra bellezza è un valore profondo al quale troppi di noi si sono assuefatti e non la colgono più. In Italia la bellezza è così straordinariamente diffusa che è diventata assuefazione, la gente la vive con distrazione, senza accorgersene.

Ma il mondo ci guarda come eredi scriteriati e ha ragione perché la fenomenale bellezza dell'Italia storica non appartiene solo a noi, è un patrimonio dell'umanità. Siamo eredi indegni perché non lo proteggiamo a dovere. Serve una svolta culturale, abbiamo il dovere di rendere meno fragile la bellezza dell'Italia ingentilita e antropizzata dai nostri antenati.

Un bene comune la cui responsabilità è collettiva.”

Renzo Piano, *La terra trema, ecco il mio progetto.*

Il sole 24 ore, edizione 2 ottobre 2016.

SOMMARIO

ABSTRACT	13
1. INTRODUZIONE	15
2. I SACRI MONTI	19
2.1 Sacri Monti di Piemonte e Lombardia	20
2.1.1 Riconoscimento UNESCO e Paesaggio culturale	23
2.1.2 Strutture e territorio – L'Autenticità urbanistica	28
2.1.3 Stili e materiali – L'autenticità architettonica	28
2.1.4 Piano di gestione, organizzazione e tutela	29
2.2 Il Sacro Monte di Varallo	32
2.2.1 La storia	36
3. IL CASO DI STUDIO	49
3.1 Il Complesso di Nazareth	49
3.1.1 Cappella 2: L'annunciazione	55
3.1.2 Cappella 3: La visitazione	59
3.1.3 Cappella 4: Il primo sogno di S. Giuseppe	62
3.2 Stato di conservazione e rapporto con l'ambiente	65

3.2.1	Il programma degli interventi del Sacro Monte	70
3.2.2	Manutenzione delle coperture	72
3.2.3	Manutenzione ordinaria degli interni	76
3.2.4	Monitoraggio dell'azione dell'umidità	77
3.2.5	Manutenzione della vegetazione	79
3.2.6	Manutenzione straordinaria del complesso di Nazareth	81
4.	<i>TECNICHE E METODOLOGIE DEL RILIEVO</i>	87
4.1	Concetti generali	87
4.2	Rilievo metrico	89
4.2.1	Rilievo topografico	92
4.3	Laser scanner	94
4.3.1	Ranging Scanner	96
4.3.2	Triangulation Scanner	98
4.4	Tecniche fotogrammetriche	100
4.4.1	SFM – Structure From Motion	101
4.5	Fotogrammetria aerea con UAV	106
4.5.1	UAV – Unmanned Aerial Vehicle	109
5.	<i>L'ACQUISIZIONE DEI DATI</i>	113

5.1 Gli strumenti utilizzati	113
5.1.1 Stazione totale Leica Nova Scan Station	114
5.1.2 Laser scanner FARO CAM 2 Focus 3D	116
5.1.3 UAV – DJI Phantom 4 PRO	118
5.1.4 I marker o target artificiali	120
5.2 Il rilievo	122
5.3 Rete topografica e di raffittimento	124
5.4 Rete di dettaglio	129
5.4.1 Misurazione dei marker	129
5.4.2 Acquisizione delle scansioni laser	132
5.5 Acquisizione fotogrammetrica aerea	135
6. L'ELABORAZIONE DEI DATI	137
6.1 Compensazione rete	138
6.2 Laser scanner	139
6.2.1 FARO SCENE 7.1.1.81	139
6.2.2 Metodi di elaborazione	140
6.2.3 Importazione e caricamento dei dati	141
6.2.4 Collocazione preliminare	142

6.2.5	La registrazione dei marker	145
6.2.6	La georeferenziazione e collocazione finale	151
6.2.7	La tensione dei target	156
6.2.8	La colorazione delle scansioni	161
6.2.9	Esportazione della nuvola di punti	163
6.3	MicMac	164
6.3.1	Il linguaggio e l'interfaccia	166
6.3.2	Workflow impiegato	175
6.3.3	Orientamento relativo delle immagini	175
6.3.4	Orientamento delle immagini nel sistema locale	181
6.3.5	Ortofoto e nuvola finale delle coperture	190
7.	<i>ELABORAZIONE DELLE NUVOLE DI PUNTI</i>	201
7.1	Il software CloudCompare	201
7.1.1	La pulizia delle nuvole	203
7.1.2	Il filtraggio del numero di punti	205
7.1.3	L'unione delle nuvole	207
7.2	Preparazione alla modellazione	211
7.2.1	Il software ReCap360	211

7.2.2	L'importazione	212
7.2.3	Discretizzazione in sottoregioni	215
7.2.4	L'esportazione	218
8.	<i>IL MODELLO TRIDIMENSIONALE</i>	221
8.1	La metodologia BIM	221
8.1.1	I concetti di interoperabilità ed utilizzazione	222
8.1.2	Il formato IFC	224
8.2	L'H-BIM	225
8.3	L'elaborazione in Revit Architecture	227
8.3.1	L'importazione della nuvola	229
8.3.2	La giacitura dei livelli di riferimento	232
8.3.3	Le piante di riferimento	233
8.3.4	Viste in sezione	235
8.4	Modellazione degli elementi strutturali	236
8.4.1	Murature strutturali	236
8.4.2	I pavimenti	242
8.4.3	Travi e colonne	244
8.4.4	Gradini	247

8.4.5 Superficie topografica	248
8.5 Problematiche riscontrate – 1^a parte	250
8.5.1 Modellazione degli elementi	250
8.6 Il software Rhinoceros	255
8.6.1 Le superfici voltate	256
8.6.2 L'importazione in Revit	259
8.6.3 Le coperture	260
8.7 Il modello ottenuto	264
8.7.1 Il modello analitico	266
8.8 Problematiche riscontrate – 2^a parte	268
8.8.1 Imprecisione degli elementi generati	269
8.8.2 Mancato calcolo di alcuni elementi	270
8.9 L'esportazione e la correzione	270
8.9.1 L'implementazione del modello analitico in Rhinoceros	273
8.9.2 L'editing delle mesh nel modello DXF	275
9. LA SIMULAZIONE STRUTTURALE FEM	281
9.1 Il software Pro_Sap RY2018	282

9.2 La modellazione	284
9.2.1 Importazione del modello	284
9.2.2 Applicazione di sezioni e materiali	287
9.2.3 Check dati struttura	293
9.3 Parametri da normativa di riferimento	295
9.3.1 Carichi e sovraccarichi strutturali	296
9.3.2 Parametri di carico sismico	299
9.3.3 Combinazione delle azioni	307
9.4 L'analisi strutturale	311
9.4.1 NTC 2018 e metodi di analisi	311
9.4.2 Esecuzione dell'analisi	313
9.4.3 I risultati ottenuti	314
9.5 Le verifiche	326
9.5.1 Eventuali interventi strutturali futuri	334
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	339
<i>FONTI</i>	345
<i>ALLEGATI</i>	353

Abstract

Il progresso in campo informatico, combinato con le nuove tecnologie, ha investito e rivoluzionato il campo dell'architettura degli ultimi anni, permettendo uno sviluppo innovativo delle pratiche comunemente svolte in ambito ingegneristico e costruttivo, soprattutto in relazione alle attività di controllo e gestione del patrimonio architettonico esistente.

In questo elaborato verranno trattate metodologie di rilievo con tecnologia *laser scanner* e fotogrammetria aerea tramite *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* applicate al Complesso di Nazareth, gruppo di cappelle votive situate nel sito patrimonio UNESCO del Sacro Monte di Varallo Sesia.

L'obiettivo è quello di applicare un processo di elaborazione digitale, attraverso metodologia *BIM*, che conduca ad una simulazione dinamica agli elementi finiti, con successiva verifica delle componenti strutturali esistenti secondo le prescrizioni normative dettate dalla Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 italiane.

Attraverso questo procedimento di elaborazione, infine, si è dimostrato come la modellazione tridimensionale con metodologie derivanti dall'*HBIM* possano agevolare le operazioni finalizzate al mantenimento ed alla conservazione dei beni storici esistenti.

The progress in information technology, combined with new technologies, has invested and revolutionized the field of architecture in recent years, allowing an innovative development of practices, commonly carried out in the engineering and construction area, especially in relation to control and management activities of the existing architectural heritage.

This paper will be dealt with survey methods using laser scanner technology and aerial photogrammetry using UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) applied to the Complex of Nazareth, a group of votive chapels located in the UNESCO world heritage area of the Sacro Monte of Varallo Sesia.

The objective is to apply a digital processing process, using the BIM method, which leads to a dynamic simulation of finite elements model, with subsequent verification of the existing structural components according to the regulatory requirements laid down by the Italian Technical Standards of Construction 2018.

Finally, through this elaboration procedure, it has been shown how three-dimensional modeling with methodologies deriving from HBIM can facilitate operations aimed at maintaining and preserving existing historical assets.

1. Introduzione

Ad aumentare l'interesse e le necessità di nuove soluzioni tecnico-pratiche per la conservazione e il restauro, hanno contribuito i danni e gli ammaloramenti causati da una cattiva gestione e manutenzione nel tempo, o determinati dai fenomeni naturali eccezionali (quali terremoti, smottamenti, allagamenti e copiose precipitazioni nevose) abbattutisi lungo la nostra penisola, minacciando costantemente così i beni di carattere storico e culturale.

È facile immaginare quanto possa essere grave anche solo ipotizzare la perdita di uno solo dei più di 33 beni ogni 100 km² censiti dal MiBAC¹, 51 dei quali sono stati classificati siti "Patrimonio dell'umanità"; il numero di beni più alto posseduto rispetto a ogni altro Paese del mondo.

Da questo quadro problematico è facile immaginare quanto la documentazione e la conoscenza di tale patrimonio sia fondamentale per generare un *back-ground* informativo solido e volto alla sua conservazione nel tempo.

Per dare il via al quadro storico legato a queste tematiche bisogna ritornare indietro alla Carta di Atene del 1931, con la quale si diede ufficialmente inizio alla nuova generazione di *"forme di documentazione del Patrimonio Culturale mediante l'istituzione di archivi che contengano tutti i documenti relativi ad ogni Bene Culturale censito"*.

Di lì a 30 anni, si arrivò alla Carta di Venezia, nella quale l'interesse alla documentazione viene recepito in maniera univoca dichiarando a livello

¹ MiBAC: Ministero per i Beni e le Attività Culturali

internazionale che “la conservazione e il restauro devono far ricorso a tutte le scienze e tecniche che possono contribuire allo studio e alla salvaguardia del patrimonio architettonico”.

Dal 1987, con la Carta di Washington, a seguire saranno validati documenti più specifici in base ai vari settori e campi applicativi: tra queste ricordiamo *Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage* (1990), *la Charter on the Built Vernacular Heritage* (1999) o i *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage* (2003), nelle quali viene palesata la necessità di ricostruire una fase storica di conoscenza del “come”, aspetto iniziale per la sua conservazione, e l'importanza di un continuo e costante aggiornamento dei dati e delle prove documentali al fine di garantirne un corretto monitoraggio pianificando manutenzione ordinaria e straordinaria, ottimizzandone la loro gestione e fruizione.

Con questa Tesi di Laurea Magistrale, perciò, si ha l'obiettivo di capire se un rilievo integrato e una conseguente modellazione su base *BIM*², insieme, possano ritenersi dei validi strumenti per l'ampliamento della conoscenza, per la conservazione e la manutenzione di questi beni. Ciò comporta la valutazione dell'efficacia di una tecnologia computerizzata avanzata applicata al patrimonio edilizio esistente, evidenziandone criticità e punti di forza, capendo in che modo possa essere di supporto in un progetto di restauro, con l'analisi per esempio delle patologie di degrado o creando un piano di manutenzione

² *BIM*: Sigla di *Building information modeling*. È un nuovo approccio al tema del progetto che ha suggerito varie evoluzioni dei *software* CAD (Computer-aided drafting), in cui si passa dal concetto di descrizione geometrica della forma a quello di analisi del flusso di informazioni necessarie a descriverla. Questo genere di considerazione è derivata dal fatto che gli elaboratori elettronici, nella maggior parte dei casi in forma implicita, consentono di generare, immagazzinare, organizzare e classificare molte più informazioni di quante si riescano normalmente a rappresentare. Fonte: Enciclopedia Treccani.

programmata, con lo sviluppo di una base dati affidabile e automatizzata; oppure ancora con la costituzione di un modello analitico strutturale per la simulazione dei fenomeni di crisi delle murature.

Questo lavoro ha anche il compito di provare quanto questo metodo sia versatile, standardizzabile e riproducibile non tanto per edifici di nuova costruzione, ma soprattutto per quelli costituenti il nostro patrimonio storico architettonico.

Lo studio ha anche lo scopo di ampliare e integrare il lavoro già precedentemente svolto negli scorsi anni sul complesso devozionale del Sacro Monte di Varallo, dichiarato Patrimonio Mondiale dell'Umanità nel 2003, avviato con le precedenti Tesi di Laurea magistrale degli studenti Francesca Matrone, Salvatore Sanna, Valeria Uffredi, Francesco Coniglione e Giorgia Nobile implementando il loro *database* in vista delle manutenzioni ordinarie e straordinarie del suddetto caso di studio.

In questo elaborato di Tesi, in particolare è stata sviluppata una prima analisi geometrica, legata all'acquisizione e all'elaborazione di dati *laser scanner* e fotogrammetrici aerei tramite *UAV*³; di conseguenza è stata effettuata una modellazione con metodologia e risorse *BIM* applicandola a un bene architettonico di interesse storico quale il Complesso di Nazareth, costituito da 3 cappelle devozionali (cappelle 2, 3, 4).

Per lo sviluppo di queste tematiche, inoltre, sono riportati degli approfondimenti legati all'elaborazione delle nuvole di punti da tecnica *LiDAR* e l'utilizzo dei *software FARO SCENE*, come anche dei cenni sul *software open source*

3 UAV: Sigla di *unmanned aerial vehicle*, velivolo senza pilota. Fonte: Enciclopedia Treccani

MICMAC, utilizzato per l'elaborazione delle nuvole di punti da fotogrammetria tramite *UAV*.

La nuvola di punti da fotogrammetria sarà utilizzata per la generazione delle porzioni mancanti nelle acquisizioni laser a terra e, soprattutto, per la copertura. Sfruttando così l'interoperabilità tra i vari *software* assieme all'applicativo *Revit Architecture*, avverrà la formulazione di un modello architettonico di supporto all'ultimo modello, di tipo analitico, per la simulazione dinamica.

Questo modello architettonico successivamente sarà discretizzato in maniera da individuare gli elementi tipologici caratteristici dell'edificio, costituendo così la base per la terza ed ultima parte, che verterà su una conseguente modellazione analitica strutturale semplificata in *PRO_SAP*, con una relativa simulazione dinamica in combinazione sismica e verifica secondo le prescrizioni delle NTC 2018.

2. I Sacri Monti



Figura 1 - La Porta Aurea, accesso alla Piazza del Tempio, Sacro Monte di Varallo.

Foto: A. Ursini.

2.1 Sacri Monti di Piemonte e Lombardia

I nove Sacri Monti di Piemonte e Lombardia sono caratteristici complessi religiosi dell'Italia Settentrionale, sorti tra il XV e il XVII secolo, caratterizzati dall'articolazione di cappelle devozionali, in un numero diversificato, e opere architettoniche e artistiche dedicate a differenti aspetti della fede cristiana, poste in ambiente pedemontano⁴, costituenti le tappe ai percorsi devozionali, mostrandone notevoli doti di bellezza, virtù e gradevolezza. Essi sono espressione della perfetta integrazione tra architettura, arte sacra e paesaggio per scopi didascalici e di educazione religiosa, vanno infatti letti come un progetto attuativo di notevole rilevanza, come un insieme di singoli elementi che avevano il compito di trasmettere la fede cristiana e di essere un baluardo difensivo a contrasto della discesa degli influssi protestanti dalla Germania, nuova tendenza religiosa, in un momento di crisi del cattolicesimo.



Figura 2 – Fonte: Sito web Ente di Gestione dei Sacri Monti.

Fu la Congregazione dei Frati Minori Osservanti, congiunta alla presenza di San Carlo Borromeo, Arcivescovo di Milano, a costituire in quest'area storico geografica il preciso progetto spirituale dell'intera estensione dei Sacri Monti.

4 - L'ambiente montano è stato scelto per la sua sacralità e per la predisposizione naturale alla realizzazione di percorsi difficoltosi in salita atti al pellegrinaggio. Inoltre, i boschi attorno ai complessi offrivano la possibilità di avere luoghi naturali e incontaminati per la riflessione spirituale.

Fu verso la fine del XV secolo infatti che venne decisa la trasformazione di luoghi cruciali del territorio, minacciati dall'espandersi della Riforma Luterana (1517). Essi erano già precedentemente sede di alcune forme devozionali spontanee in cui potevano essere rappresentati, per mezzo dell'architettura, della scultura e della pittura, gli episodi caratteristici della storia sacra dell'Antico e del Nuovo Testamento, inclusi gli episodi di vita di alcuni santi.⁵

Ne derivò così l'idea di rappresentare le scene con statue in vera grandezza, con volti il più possibilmente espressivi raffiguranti persone al tempo realmente esistite. Il loro compito era di stimolare la pietà in coloro che ammiravano e visitavano le cappelle. Solo dopo il Concilio di Trento (1545-1563), si decise di impedirne l'accesso con l'apposizione di grate metalliche, in modo da tutelare e salvaguardare l'operato degli artisti. Fu Gaudenzio Ferrari il principale artista dell'epoca a occuparsi di questi interventi a Varallo Sesia; personaggio poliedrico che ebbe il compito e l'onore di riuscire ad interpretare l'idea dell'ordine francescano, generandone una proposta culturale dal duplice valore.

Come prima cosa va evidenziata l'azione storica del suo operato, fortemente rappresentativa di strumenti, figure, usi e costumi legati alla quotidianità cinquecentesca; in seconda battuta, il forte senso di immedesimazione e coinvolgimento dello spettatore all'interno della storia, anche di fronte ad avvenimenti accaduti in un'epoca remota. Il complesso di Varallo fu tra tutti il primo ad essere realizzato, a partire dal 1486. Dopo il Concilio di Trento (1535) il modello costituito, fu riproposto anche per altri luoghi posti sia sotto

5 - Associazione Città Italiane Patrimonio UNESCO, Luoghi italiani patrimonio dell'Umanità, Elio-tecnica s.n.c., Ferrara, p. 9.

giurisdizione della curia milanese, sia allo sbocco delle vallate alpine. Essi andarono a rappresentare vere e proprie “cittadelle fortificate della fede cattolica”⁶.

La costituzione dei successivi Sacri Monti seguì l'impostazione e le specifiche regole dettate da San Carlo Borromeo (pianta centrale e ridotti portici per la sosta all'esterno). Essi non furono più consacrati solo alla vita di Gesù Cristo, ma anche alla vita di San Francesco (Crea e Orta, nel tardo Cinquecento), al tema del Rosario (Varese, prima metà del '600), alla vita di Maria (Oropa e Ossuccio), alla passione di Cristo e alla via Crucis (Domodossola, Belmonte e Ghiffa).

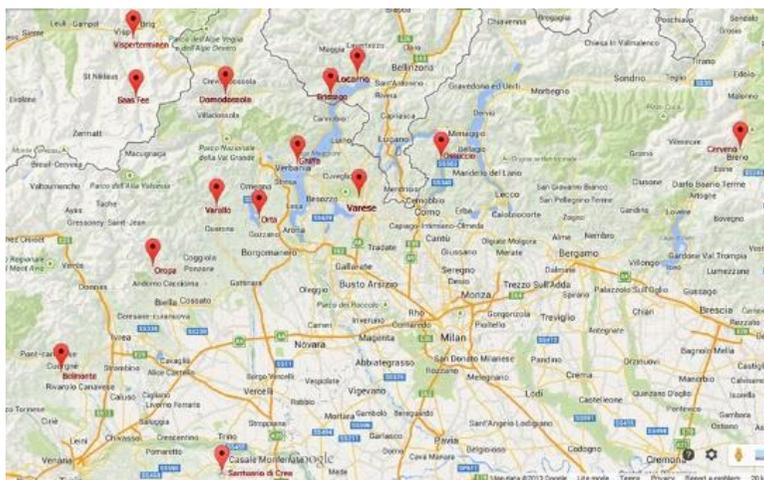


Figura 3 – Rete Sacri Monti di Piemonte e Lombardia; fonte: <http://www.viestoriche.net/indexold/sacrimonti/libro/sacri-it-ch.html>

6 - Associazione Città Italiane Patrimonio UNESCO, Luoghi italiani patrimonio..., op. cit., p. 9.

La rete di percorsi e l'insieme di questi territori e edifici possono dunque essere considerati come un bene seriale, più nello specifico come un insieme di architetture dislocate sul territorio, accomunate dalle stesse intenzioni di formazione spirituale e culturale, associabili ad un medesimo periodo storico.

2.1.1 Riconoscimento UNESCO e Paesaggio culturale

L'ICOMOS (*International Council of Monuments and Sites*), nel luglio del 2001, organizzò la visita del loro funzionario presso i nove Sacri Monti proposti⁷. Successivamente, nella 27^a sessione di Parigi, tutti i nove Sacri Monti furono iscritti (5 luglio 2003) come paesaggio culturale e sito seriale nella *World Heritage List* (WHL).

L'iscrizione di un sito nella Lista del Patrimonio Mondiale è motivata dalla presenza di un eccezionale valore universale e deve vedere soddisfatto almeno

7 - Nel 1998 la Regione Piemonte aveva proposto la candidatura di un Sistema di Sacri Monti, al quale erano interessati i soggetti gestori o proprietari di diciassette diverse realtà, appartenenti a tre regioni settentrionali e a una centrale, per un totale di dodici in Piemonte, tre in Lombardia, una in Veneto e una in Toscana. L'anno successivo, l'allora Ministero per i Beni Culturali e Ambientali invitò la Regione Piemonte a predisporre la documentazione necessaria alla presentazione del *dossier* di candidatura ufficiale in cui però poi, nel 2001, il numero di Sacri Monti proposti scese a nove.

Fonte: MASSONE E., "Il gruppo di lavoro sul Piano Unitario di Gestione: Presentazione delle attività in corso", in Minissale S. (a cura di), *Metodologia di organizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia*, Atti del Seminario tecnico, Domodossola, Italia, 24 novembre 2009, Tipografia Press Grafica, Verbania 2010, pp. 40-41.

uno dei dieci criteri⁸ di selezione illustrati nelle Linee Guida per l'applicazione della Convenzione del Patrimonio Mondiale. Fino alla fine del 2004, i siti del Patrimonio Mondiale venivano scelti esclusivamente sulla base di due gruppi di criteri: sei criteri culturali, e quattro criteri naturali. Successivamente, con l'adozione dell'ultima versione delle Linee Guida, i criteri sono stati accorpati a un singolo elenco, distinto in dieci punti e valido sia per i beni culturali che naturali.⁹

L'eccezionale valore universale di un bene deve inoltre soddisfare le fondamentali condizioni di integrità e/o autenticità (come definito nelle Linee Guida) e la presenza di un adeguato sistema di tutela e gestione, atte a garantire la sua salvaguardia.¹⁰

Dati questi presupposti, la decisione di iscrivere questi beni nella lista WHL da parte del World Heritage Committee, si è basata sui criteri:

- II - “mostrare un importante interscambio di valori umani, in un lungo arco temporale o all'interno di un'area culturale del mondo, sugli sviluppi nell'architettura, nella tecnologia, nelle arti monumentali, nella pianificazione urbana e nel disegno del paesaggio”;
- IV - “costituire un esempio straordinario di una tipologia edilizia, di un insieme architettonico o tecnologico, o di un paesaggio, che illustri uno o più importanti fasi nella storia umana”

8 - I criteri sono regolarmente aggiornati dal Comitato in modo da riflettere l'evoluzione del concetto stesso di Patrimonio Mondiale.

9 - Approfondimenti su tutti i criteri <http://www.unesco.beniculturali.it/index.php?it/9/requisiti-per-liscrizione>

10 - <http://www.unesco.beniculturali.it/index.php?it/9/requisiti-per-liscrizione> Ultima consultazione 19/03/2017.

Nel criterio II è stato inoltre riconosciuto che “l’impianto di architettura e arte sacra in un paesaggio naturale a fini didattici e spirituali ha raggiunto la sua espressione più eccezionale nei Sacri Monti del Nord Italia e ha avuto una profonda influenza sui successivi sviluppi in altri luoghi d’Europa”.

Nel criterio IV, si legge invece che: “i Sacri Monti del Nord Italia rappresentano la riuscita integrazione tra architettura e arte in un paesaggio di grande bellezza per ragioni spirituali in un momento critico nella storia della Chiesa cattolica romana”¹¹.

Inoltre, nel documento d’iscrizione alla Lista, ritroviamo le coordinate esatte del luogo, e l’estensione appartenente ad ogni singolo complesso espressa in ettari; in questi termini il Sacro Monte di Varallo si attesta alla terzultima posizione avendo una *Core Zone*¹² di soli 5,4 ha ed una *Buffer Zone* di 26,1 ha [Fig. 4 e 5].



Figura 4 - Delimitazione della *Core zone* (linea continua arancione) e *Buffer zone* (tratteggio arancione) del Sacro Monte di Varallo Fonte: PRG del Comune di Varallo Sesia

11 - Dati tratti dal documento d’iscrizione alla Lista, disponibile online in formato PDF. <http://whc.unesco.org/uploads/nominations/1068rev.pdf> - Ultima consultazione 17/03/2017.

12 - L’UNESCO, nelle Linee Guida Operative per l’applicazione della Convenzione sul Patrimonio Mondiale del 1977, definisce la zona tampone (*Buffer zone*) come un’area che deve garantire un livello di protezione aggiuntiva ai beni riconosciuti patrimonio mondiale dell’umanità (*Core zone*)”.

ID	Name & Location	State Party	Coordinates	Area	Date Inscribed
1068-001	Sacro Monte o 'Nuova Gerusalemme' di Varallo Sesia Vercelli, Piedmont, Italy	Italy	N45 49 7.00 E8 15 17.00	Property: 5.4 ha Buffer zone: 26.1 ha	2003
1068-002	Sacro Monte di S.Maria Assunta di Serralunga di Crea Alessandria, Piedmont, Italy	Italy	N45 5 41.00 E8 16 11.00	Property: 8.9 ha Buffer zone: 24.1 ha	2003
1068-003	Sacro Monte di San Francesco d'Orta San Giulio Novara, Piedmont, Italy	Italy	N45 47 51.80 E8 24 39.70	Property: 14 ha Buffer zone: 7.5 ha	2003
1068-004	Sacro Monte del Rosario di Varese Varese, Lombardy, Italy	Italy	N45 51 37.30 E8 47 35.60	Property: 14.6 ha Buffer zone: 32.6 ha	2003
1068-005	Sacro Monte della Beata Vergine. Cropa Biella, Piedmont, Italy	Italy	N45 37 43.00 E7 58 41.00	Property: 15.4 ha Buffer zone: 49.6 ha	2003
1068-006	Sacro Monte della Beata Vergine del Soccorso, Ossuccio Como, Lombardy, Italy	Italy	N45 58 28.40 E9 10 10.40	Property: 3 ha Buffer zone: 9 ha	2003
1068-007	Sacro Monte della SS.Trinità, Ghiffa Verbania, Piedmont, Italy	Italy	N45 57 49.00 E8 36 54.00	Property: 11 ha Buffer zone: 210 ha	2003
1068-008	Sacro Monte Calvario, Domodossola Verbania, Piedmont, Italy	Italy	N46 6 20.00 E8 17 13.00	Property: 3.6 ha Buffer zone: 41.4 ha	2003
1068-009	Sacro Monte di Belmonte, Valperga Canavese Turin, Piedmont, Italy	Italy	N45 22 0.00 E7 37 53.00	Property: 14.6 ha Buffer zone: 321.6 ha	2003

Figura 5 - Lista dei Sacri Monti iscritti alla WHL con indicazioni delle coordinate e dell'area; Fonte: <http://whc.unesco.org/en/list/1068>

Grazie alla coerenza tra l'ambiente, i complessi architettonici, materiali posti in opera nonché al carattere artistico e ambientale, questo complesso è stato riconosciuto, nella *Dichiarazione di Valore*, come un cosiddetto *"paesaggio culturale"*.

Nascendo sulla base di un definito progetto di catechesi a scala territoriale e avendo al suo interno delle caratteristiche di pregio, il complesso è soggetto a una particolare politica di salvaguardia e protezione in maniera da garantirne la conservazione e fruibilità nel tempo.

La particolarità di questi luoghi, come anche indicato nel *"Documento di Nara"* (1994) e nella *"Convenzione dell'UNESCO sulla Protezione del Patrimonio Mondiale"*, risiede non solo negli elementi naturali paesaggistici ma anche

nelle architetture e nelle realizzazioni artistiche che, nel loro insieme, costituiscono la peculiarità e unicità del bene.

L'organizzazione originale dell'impianto architettonico, inoltre, è ancora intatta e ben leggibile nelle sue varie addizioni. Ogni elemento aggiunto o variato nel tempo, per motivi culturali, religiosi o di gusto, non ha alterato l'equilibrio e l'integrazione tra gli elementi "originari" e le addizioni significative successivamente realizzate, il suo significato e la natura dei luoghi a cui è riconosciuta la salvaguardia.

Nella figura seguente [Figura 6] è possibile osservare e ritrovare la presenza degli stessi edifici e dell'ambiente naturale circostante, a titolo di esempio su come l'integrità artistica o compositiva e l'autenticità storica siano state confermate dai documenti storici.



Figura 6 - Città e Sacro Monte di Varallo, Teofilo Ladner, 1853. Varallo, Pinacoteca.
Fonte: COMETTI VALLE M. (a cura di), 1984, *Iconografia del Sacro Monte di Varallo. Disegni, dipinti e incisioni dal XVI al XX secolo*, Biblioteca civica Farinone Centa, Borgosesia, p. 70.

2.1.2 *Strutture e territorio – L'Autenticità urbanistica*

L'ideazione di ogni singolo Sacro Monte è quasi nella totalità dei casi partita da un luogo di fede già inserito nel territorio, che è stato successivamente ampliato e sviluppato, o modificato, a seconda dei nuovi indirizzi pastorali, e anche nei casi in cui sia stato progettato *ex novo*, la propria origine è in forte relazione con la realtà sociale, culturale nonché religiosa preesistente. In tutti i casi i Sacri Monti comunicano con la circostante realtà configurandosi come appendici dei centri territoriali derivanti dalla presenza di:

- Centri urbani antichi con forte aggregazione culturale (come a Varallo ed Orta);
- Antiche chiese (Oropa e Ossuccio);
- Conventi (Varese).

Ogni Sacro Monte è caratterizzato dalla presenza di un percorso sacro, sulla cui struttura urbanistica sono state edificate le cappelle di culto e gli edifici sacri; in alcuni casi il Sacro Monte ha funzione di collegamento tra due luoghi di culto separati tra loro da un paesaggio naturale, successivamente plasmato e trasformato a guisa di giardino, diventando a sua volta luogo adatto e caratterizzante del percorso di pellegrinaggio e di meditazione.

2.1.3 *Stili e materiali – L'autenticità architettonica*

Che si tratti di chiese, cappelle o edifici annessi, nella quasi totalità dei casi gli elementi architettonici conservano l'originalità sia in termini di materiali che di caratteristiche tipologiche, conservando le particolarità di ogni stile determinato dalle diverse influenze culturali e religiose.

Nel primo periodo di edificazione (1480 – 1530) l'architettura dei Sacri Monti è semplice e non riporta i canoni estetici e stilistici che poi si affermeranno nel Nord Italia.

Dal 1530-1620, in particolare dopo il Concilio di Trento, l'architettura assume un aspetto tipologico e un lessico dettato dalle restrizioni imposte dal clero; ciò ha fatto sì che alcuni caratteri stilistici siano ancora oggi evidenti e comuni alla maggior parte dei Sacri Monti.

Negli anni successivi l'edificato fu caratterizzato da espressioni più innovative, come nel caso di Varese dove le cappelle in stile barocco sono state edificate in un periodo relativamente breve sulla base di un unico progetto.

2.1.4 Piano di gestione, organizzazione e tutela

Il funzionamento del sito UNESCO è un chiaro esempio di intesa fra Enti ed Istituzioni.

Il documento normativo fondamentale per garantire una metodologia omogenea e un coordinamento consolidato nella gestione del sito è costituito dal Piano Unitario di Gestione, sottoscritto da 39 componenti di rappresentanza del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, delle Regioni, degli Enti Parchi, delle autorità e amministrazioni religiose e dei comuni. Per la gestione seriale del sito, le strutture previste sono un gruppo di lavoro, una conferenza, una

segreteria permanente¹³ (dal luglio 2009) ed un Centro Studi e Documentazione permanenti (dal febbraio del 2000).

Gli obiettivi e le finalità individuati nel Piano Unitario di Gestione sono:

- Coordinare le attività di salvaguardia e tutela dei rispettivi beni costituenti il Sito;
- Gestire in modo unitario e organico questo patrimonio
- Adottare politiche comuni di promozione culturale, socioeconomica e turistica¹⁴.

Per ciò che riguarda l'organizzazione e la tutela di questi territori la Regione Piemonte ha approvato, nel 2009, la Legge n. 19 definita "Testo Unico sulla Tutela delle aree naturali e della biodiversità". Essa abroga ben 152 leggi di settore, istituisce ed organizza a partire da zero le aree protette regionali e stabilisce le corrette procedure per la conservazione, delegando la gestione delle aree "SIC"¹⁵ e "ZPS"¹⁶ costituenti la cosiddetta "Rete Natura 2000"¹⁷.

13 - MASSONE E., "Il gruppo di lavoro sul Piano Unitario di Gestione: Presentazione delle attività in corso", in S. MINISSALE (a cura di), *Metodologia di organizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia*, Atti del Seminario tecnico, Domodossola 24 novembre 2009, Tipografia Press Grafica, Verbania 2010", op.cit, pp. 43-45

14 - *Piano Unitario di Gestione* disponibile online in PDF su <http://www.sacrimonti.net/Document-Folder/Documento-n-1.pdf>

15 - SIC: acronimo di Siti di Importanza Comunitaria. Costituiscono dei siti individuati in maniera da tutelare specie e/o ambienti piemontesi di interesse comunitario, oppure per la conservazione di siti rilevanti per la biodiversità regionale.

16 - ZPS: acronimo di Zone di Protezione Speciale.

17 - ASSANDRI G., "La legge della Regione Piemonte n.19 del 29/06/2009, con riferimento alla nuova organizzazione dei Sacri Monti", in S. MINISSALE (a cura di), *Metodologia di organizzazione...*, op. cit., p.47.

Nella nuova tipologia di classificazione delle aree protette, l'art. 5 sancisce:

- Parchi naturali
- Riserve naturali
- Zone naturali di salvaguardia
- Riserve speciali (Sacri Monti)
- Corridoi ecologici

All'interno di questo Testo Unico, l'art. 12 fornisce la definizione dei soggetti gestori delle aree protette, andandoli a distinguere rispettivamente in Enti Strumentali Regionali ed Enti Locali. In esso si prevede ulteriormente l'istituzione di un unico Ente di gestione dei Sacri Monti al quale sono affidate in gestione le Riserve speciali dei Sacri Monti di Belmonte, Crea, Domodossola, Varallo, Ghiffa, Orta e Oropa.

Nello stesso anno la Giunta Regionale, attuando quanto previsto dal T.U. (D. Lgs 42/2004, art. 15) ha approvato un atto disciplinante le forme più idonee per la valorizzazione di ogni singolo Sacro Monte, e ha individuato nel Sacro Monte di Varallo il Centro di conservazione dei Sacri Monti oltre ad attribuirvi la funzione di prevenzione e conservazione del patrimonio artistico.

Va ricordato inoltre che i territori dei Sacri Monti sono individuati, censiti e salvaguardati tra i "beni culturali" e "beni paesaggistici ed ambientali" tutelati ai sensi del D. Lgs n. 490 del 29 ottobre 1999, che va ad unificare ed integrare le precedenti leggi che già sottoponevano tali beni alla tutela da parte dello Stato (n. 1089 del 01 giugno 1939, n. 1497 del 29 giugno 1939, n. 1985 dell'8 agosto 1985 e n. 352 dell'8 ottobre 1997).

2.2 Il Sacro Monte di Varallo



Figura 7 - Veduta invernale del Sacro Monte di Varallo;

Fonte: <https://www.invalsesia.it/home/tag/sacro-monte-di-varallo/>

Edificato alla fine del XV secolo su di uno sperone roccioso sovrastante la cittadina di Varallo Sesia, nel vercellese, situato a circa 600m s.l.m., il Sacro Monte di Varallo costituisce il più antico dei nove Sacri Monti piemontesi e lombardi.

Esso venne idealizzato da Padre Bernardino Caimi come nuova meta di pellegrinaggio definendola già al tempo come “nuova Gerusalemme”. È costituito da un percorso processionale che si snoda nel verde al di sopra della vallata; fornisce scorci altamente suggestivi attraverso le quarantacinque cappelle votive, inserite in un contesto ambientale mutevole a seconda della zona e dell'epoca costruttiva¹⁸, il tutto con lo scopo di insegnare la dottrina cattolica

18 - *Sacri Monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2007, p. 40.

al popolo ed immergere il pellegrino nelle sacre rappresentazioni all'interno di luoghi che riproducessero in maniera più fedele possibile gli spazi ed i percorsi della vecchia Gerusalemme cristiana.

Il Sacro Monte di Varallo costituisce uno dei luoghi votivi più caratteristici dell'arco prealpino non solo per le caratteristiche urbanistiche del percorso e delle due piazze (dei Tribunali e della Basilica), ma anche per le peculiarità architettoniche ed artistiche. In questo luogo, infatti, la storia permea e si riflette sulla varietà degli spazi, nonché sulle variazioni stilistiche lungo il percorso di narrazione dei passaggi salienti della vita di Cristo grazie ad affreschi e statue a grandezza naturale e, in alcuni casi, con barbe e capelli veri.

Questo Sacro Monte, al giorno d'oggi, si presenta come il risultato di una serie di mutazioni e miglioramenti legati soprattutto alla sensibilità religiosa. Le prime cappelle all'ingresso del percorso, infatti, ricordano l'esperienza religiosa dei Francescani, essendo caratterizzate da ambienti e chiesette costruite in un modo semplice ed immersi nella vegetazione, agevolando già dai primi passi il raccoglimento e la preghiera.

Nella parte iniziale del percorso del Sacro Monte si trovano i nuclei più antichi voluti dall'ordine francescano, cioè il complesso di Nazareth (c.2-3-4) e di Betlemme (c. 5-6-7), immersi all'interno di un bosco di faggi nominato "*il Val-lone dell'Inferno*".

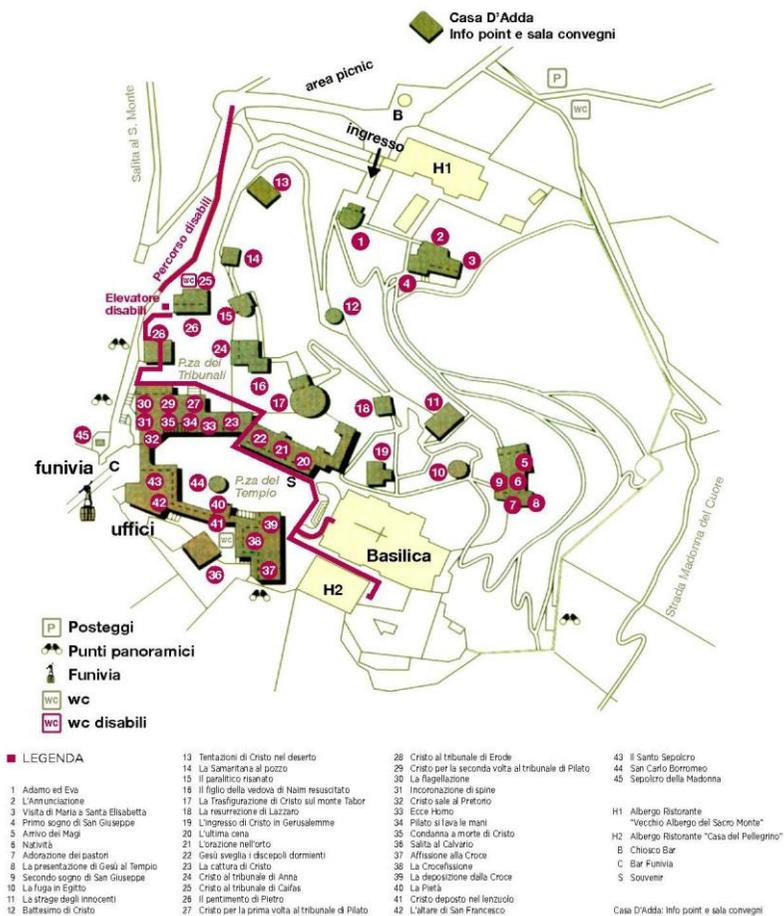


Figura 8 – Mappa attuale del Sacro Monte di Varallo.

Fonte: DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009.

Proseguendo lungo il percorso votivo, risalendo lungo i pendii del Vallone, la scenografia e l'architettura inizia a mutare in favore di uno stile sempre più raffinato, di tipo tardo rinascimentale; essi culminano con gli scorci delle due piazze, con veri e propri palazzi che affacciano direttamente sulle piazze. Sulla piazza Civica, quella dei Tribunali troviamo infatti troviamo il *Palazzo del tribunale di Caifa* (c.25), quello di *Pilato* (c.27), di *Erode* (c.28) e di *Anna*. Oltrepassando un'arcata a lato del palazzo di Pilato si accede alla seconda piazza coronata dalla Basilica e delimitata da edifici di epoche diverse. L'edificio del Sepolcro è datato 1491 mentre quello del Calvario è riconducibile al XVI – XVII secolo come quello di Pilato. Più recenti invece sono *l'albergo del Pellegrino* (XVIII secolo) e la *Casa Parella* (XIX secolo); la Basilica, vera meta terminale dell'intero percorso, ha visto l'inizio lavori nel XVII secolo ed è stato ultimato nel XIX. L'itinerario prosegue con le restanti cappelle dedicate alla passione di Cristo fino alla sepoltura della Madonna.

Ciò che caratterizza particolarmente questo luogo di culto è la meticolosità e laboriosità che gli autori hanno impiegato nella realizzazione di queste scene realistiche, con lo scopo di immergere ed emozionare l'osservatore, cercando di far rivivere gli eventi rappresentativi del Cristianesimo a fine educativo.

Essendo gli ambienti molto articolati, ricchi e dettagliati nonché popolati da circa 400 sculture lignee e circa 4000 figure affrescate, e per la loro particolare locazione e conformazione, l'intero complesso del Sacro Monte di Varallo presenta problemi connessi alla propria conservazione e mantenimento. A questo titolo il 4 Luglio 2003, l'UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura) ha deciso che il Sacro Monte va a tutti gli effetti considerato come "Patrimonio dell'Umanità"; notevole

riconoscimento che certifica il suo valore e la sua importanza per la perfetta combinazione tra architettura, arte e paesaggi.

Ricevendo questo titolo, la Regione Piemonte ha perciò attuato delle misure di tutela e protezione affidandola all'Ente di Gestione dei Sacri Monti dal primo gennaio 2012, che amministra l'intero complesso dei sette Sacri Monti del Piemonte. L'Ente ne garantisce la gestione della manutenzione, la conservazione e la valorizzazione del complesso storico-religioso, favorendone la fruizione, e salvaguardandone le caratteristiche ambientali e paesaggistiche. Attualmente il Sacro Monte di Varallo è di proprietà del Comune di Varallo e la cura spirituale è affidata agli Oblati della Diocesi di Novara.

2.2.1 La storia

L'esistenza di questo vasto complesso votivo è dovuta all'iniziativa di Padre Bernardino Caimi, Francescano dei Minori Osservanti, il quale, di ritorno dalla Terra Santa alla fine del '400, decise di riprodurre in piccolo e in parte quei luoghi della Palestina meta dei pellegrinaggi cristiani.

L'idea era quella di riprodurre in Italia, e nella fattispecie a Varallo, quei riferimenti storici e tradizionali della religione Cristiana, riproducendo ambienti e scenografie che insegnassero la vita di Gesù, narrandola grazie all'utilizzo di pitture e sculture lignee eseguite dai maggiori artisti piemontesi e lombardi (dal 500 all'800).

L'idea era dovuta principalmente al voler evitare un viaggio ai tanti cristiani che all'epoca intendevano compiere un'esperienza spirituale in Terrasanta,

esperienza che però sarebbe stata minacciata dalla presenza turca che la ostacolava.¹⁹

Nel 1481 Padre Caimi si recò per la prima volta a Varallo e scoprì le potenzialità dei luoghi grazie alla terrazza naturale ampia e di facile accesso che rispondeva perfettamente alle sue esigenze.

Agli inizi del 1490 viene ricondotto il primo insediamento della chiesa e del convento delle Grazie che diedero ufficialmente il via al cantiere del Sacro Monte. Ciò viene testimoniato da un atto notarile del 14 aprile del 1493 che certifica la donazione da parte della comunità di Varallo a padre Caimi degli edifici presenti in loco: ossia il convento, la chiesa della Madonna delle Grazie e le cappelle del Sepolcro, dell'Ascensione e della Deposizione.²⁰

L'intuizione di padre Caimi riuscì a prender forma soprattutto grazie all'appoggio economico del ceto nobile locale e grazie ai forti rapporti con Ludovico il Moro, Duca di Milano; l'idea infatti venne ritenuta valida in quanto avrebbe portato, oltre all'affluenza di fedeli, il nobile intento di rafforzare ed insegnare la fede cristiana, oltre al favorire allo stesso tempo un incremento di ricchezza in Valsesia.

Successivamente alla morte di Caimi nel 1499, l'originale progetto subì delle variazioni in favore delle nuove intenzioni di illustrare cronologicamente i fatti più rappresentativi della vita di Gesù.

19 - LONGO, P.G., ZARDIN, D. (a cura di), *I Sacri Monti, Bibliografia italiana*, Atlas, Ponzano Monferrato, 2010, p. 18.

20 - DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009, p. 155.

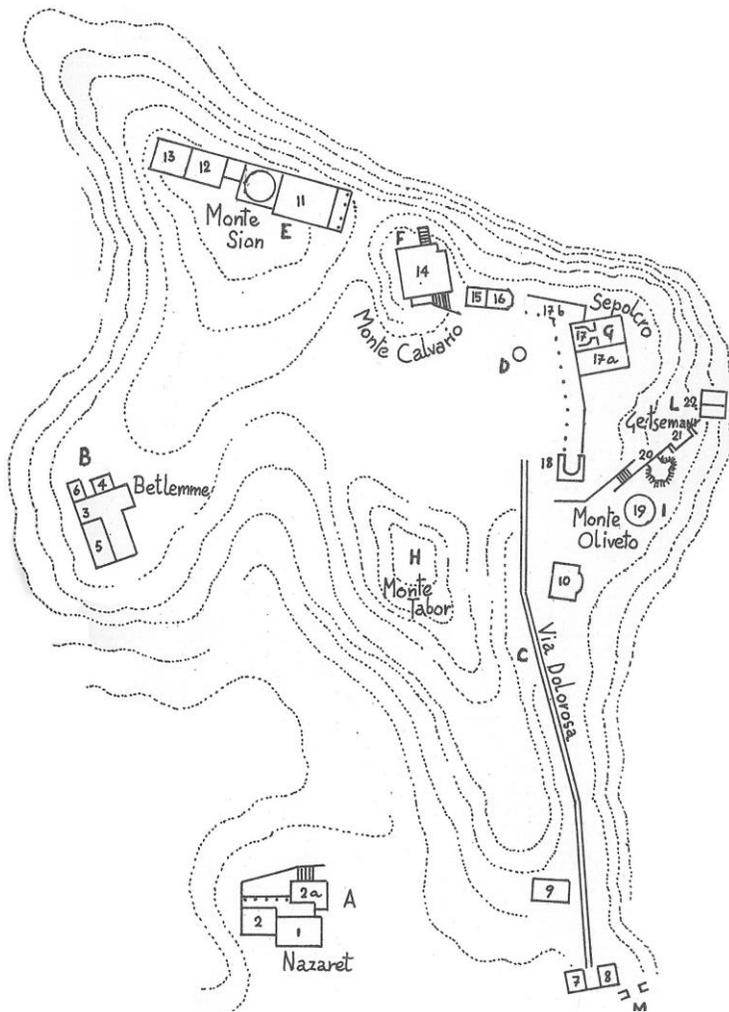


Figura 9 - Iniziale pianificazione attuata da padre Caimi con i complessi edificati in seguito secondo le sue direttive.

Fonte: ALESSI G., *Libro dei Misteri*, Arnoldo Forni Editore, Bologna, 1974.

Grazie alla guida più antica a noi pervenuta, la “Guida dei Misteri del Monte di Varallo” datata 1514, sappiamo che all’epoca il Sacro Monte possedeva ben 27 cappelle già terminate, di cui alcune costituenti i complessi sacri di Nazareth, Betlemme, del Getsemani, del Calvario, del Sion, etc. Vi è nota che già alcune di esse presentano raffigurazioni o pitture a supporto dei fedeli per la lettura spirituale delle scene rappresentate.

A supporto di questa nuova impostazione artistica, dai primi del Cinquecento fino al 1528, partecipò il pittore, scultore e architetto valsesiano Gaudenzio Ferrari, riversando notevole stile e naturalezza all’interno delle composizioni artistiche di sculture e dipinti, dando così riposta ai voleri francescani richiedenti una rappresentazione realistica e coinvolgente in aiuto al raccoglimento e alla preghiera. Fu infatti lo stesso Ferrari a dare l’impostazione artistica generale del progetto creando gli impianti scenici e le decorazioni delle cappelle, alternando fondali affrescati a statue a grandezza naturale con volti di personaggi ripresi dalla vita quotidiana, raffigurando così, ad esempio, la nobildonna o l’anziano sdentato. Per le statue, inoltre, Ferrari accantonò l’utilizzo del legno in favore della terracotta richiedendo manodopera e materiali dalle cave nei dintorni dello stesso Sacro Monte²¹. Lo stesso stile e le stesse tecniche tracciarono le linee guida nel cantiere del pieno Cinquecento, senza essere modificate o stravolte, ma presentando comunque dei piccoli aggiornamenti e variazioni negli interventi di altri artisti come Bernardino Lanino, allievo di Ferrari, e “fedele interprete della tradizione gaudenziana, pur con gli

21 - MASSONE E.(a cura di), *Sacri Monti in Piemonte, Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994, p.133

opportuni aggiornamenti²², a cui vengono attribuiti i dipinti dell'originario Palazzo di Pilato.

Negli anni Sessanta del Cinquecento, invece, il cantiere del Sacro Monte fu ripensato e rimaneggiato dal nuovo urbanista incaricato Galeazzo Alessi, ad iniziativa di Giacomo d'Adda²³, avvicinando lo stile dei luoghi a quello dell'epoca, inserendo giochi d'acqua, fontane, siepi e giardini.

L'intervento fu necessario dai numerosi spostamenti delle scene interne delle cappelle negli anni precedenti. Questi furono condotti con l'intento di attribuire una successione temporale alle rappresentazioni sacre, ma l'unico risultato ottenuto fu quello di avere un elevato numero di cappelle in cui non vi era più alcuna traccia dell'ordinamento iniziale basato sulla rappresentazione dei Luoghi Sacri, né quello nuovo in cui si sarebbero dovute succedere le scene secondo ordine cronologico²⁴.

L'Alessi perciò tracciò la complessa ed innovativa pianificazione urbanistica e ne descrisse le operazioni nel "*Libro dei Misteri*"; queste però non vennero favorevolmente accolte dai frati in quanto temevano la perdita dello spirito di quei luoghi originali, e dopo successive dispute con la fabbriceria laica delle famiglie nobili varallesi, Carlo Borromeo, Arcivescovo di Milano, decise di affidarsi (tra il 1571 ed il 1584) ad esperti di teologia e architettura al fine di

22 - DE FILIPPIS E., *Guida del Sacro Monte di Varallo*, op. cit., p. 25

23 - Ricco milanese, legato in matrimonio all'ultima discendente della famiglia degli Scarognini di Varallo, che aveva finanziato le prime cappelle del Sacro Monte.

24 - MASSONE E. (a cura di), *Sacri Monti in Piemonte*, , *Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994, op. cit., pp. 135-136.

valutarne una più idonea organizzazione del percorso e dei contenuti religiosi²⁵.

Il progetto dell'Alessi, quindi, venne realizzato solo in minima parte (furono edificate solamente le cappelle 1, 10, 14, 15, 16, 17, 19) per volere dell'Arcivescovo Borromeo che lo esclude immediatamente, poiché secondo lui il progetto negava il rapporto tra architettura sacra e simbologia religiosa, rimandando così i suoi voleri al proprio architetto di fiducia, Pellegrino Pellegrini.²⁶

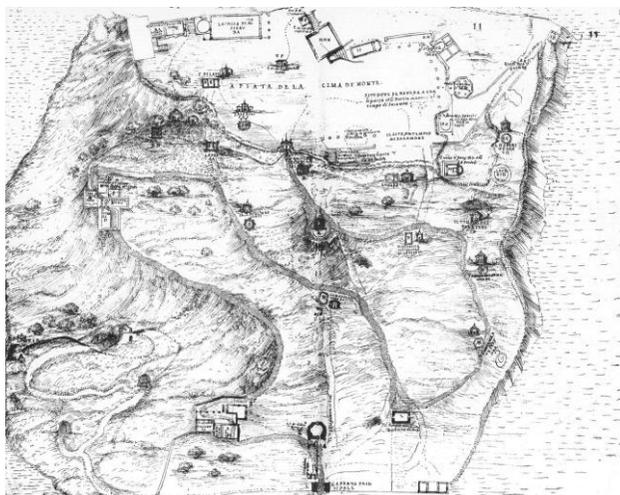


Figura 10 - Progetto di pianificazione generale del Sacro Monte di Varallo ad opera di Galeazzo Alessi.

Fonte: ALESSI G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974.

25 - DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009, p. 26.

26 - ALESSI G., *Libro dei Misteri*, Arnaldo Forni Editore, Bologna, 1974, p. 43.

Tra il XVI e XVII secolo, furono installate delle grate lignee finemente elaborate al fine di impedire l'accesso dei pellegrini nelle scene votive, che fino ad allora erano aperte e comunicanti con i passaggi di collegamento. Queste barriere avevano non solo funzione protettiva nei confronti delle opere, ma aiutavano e guidavano la lettura e la comprensione delle scene interne raffigurate.

Agli inizi del Seicento, il Sacro Monte di Varallo vide una nuova variazione del progetto originale a cura del Vescovo di Novara, Carlo Bascapè, che riaffermò l'intento di utilizzare quei luoghi come mezzo di "*insegnamento delle Scritture*". A tal proposito il Vescovo Bascapè fece riportare all'interno delle cappelle l'esposizione della storia del Cristo riportando fedelmente il contenuto dei testi sacri, seguendo in maniera fedele gli indirizzi fissati dal Concilio di Trento. A questa necessità, Bascapè si assunse il compito di autorizzare nuove raffigurazioni e decorazioni nelle cappelle, nonché la costruzione di alcune nuove.

Questi furono anni di notevole attività e lavoro all'interno delle mura del Sacro Monte, riunendo la presenza e l'opera di alcuni tra i migliori artisti valsesiani. Le cappelle che vennero costruite ed allestite furono: *La salita al Calvario* (c.36), *Il primo sogno di Giuseppe* (c.4 – Complesso di Nazareth), le cappelle del *Palazzo di Pilato*; alcuni dei "misteri" vennero rinnovati o spostati, mentre, a cura di Giovanni D'Enrico e Bartolomeo Ravelli, venne progettata l'area più alta del sito con l'ideazione delle due piazze (*Piazza dei Tribunali* e la *Piazza del Tempio*).

Altri illustri artisti che intervennero all'epoca nel sito del Sacro Monte sono: Pierfrancesco Mazzucchelli, detto il "Morazzone", Juan de Wespín detto il "Tabacchetti", Giovanni d'Enrico, i fratelli Della Rovere detti "i Fiammenghini", Antonio D'Enrico detto "Tanzio" da Varallo. Nello stesso periodo venne riprogrammata la costruzione della nuova Basilica, dato che l'impostazione spaziale della vecchia costruzione non consentiva una capienza sufficiente.

Contemporaneamente il Vescovo Bascapè assegnò la cura spirituale del luogo all'ordine dei Francescani, mentre la gestione economica e dei fondi del cantiere venne affidata alla Fabbriceria, assegnazioni che rimasero invariate fino al XVIII secolo.

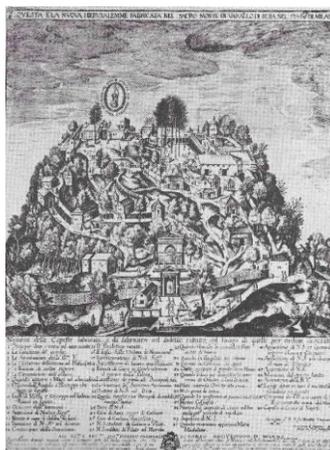


Figura 11.a – (a sinistra) *Il Vero Ritratto del Sacro Monte di Varallo*, Gaudenzio Sceti, 1671. Varallo, Museo del Sacro Monte.

Figura 11.b – (a destra) *Questa è la nuova Hierusalemme fabricata nel Sacro Monte di Varallo Sesia, nel Stato di Milano*, Hendrick Van Schoel prima metà XVII sec. Milano, Raccolta Bertarelli.

Fonte: COMETTI VALLE M. (a cura di), *Iconografia del Sacro Monte di Varallo. Iconografia del Sacro Monte di Varallo. Disegni, dipinti e incisioni dal XVI al XX secolo*, Biblioteca civica Farinone Centa, Borgosesia, op. cit., pp. 40 e 43.

Nel XVIII secolo, più esattamente il primo marzo 1707, il territorio valesiano passò, infatti, sotto giurisdizione dei Savoia, amministrando così il territorio per cui provavano un forte legame sia per ragioni di Stato che per motivi devozionali. Negli anni successivi, precisamente nel 1740, la famiglia inviò l'architetto reale dell'epoca, Benedetto Alfieri, col compito di redigere il progetto della Tribuna dell'altare e del suo relativo scurolo (cripta) contenente la madonna dormiente.

Nella prima metà del Settecento vennero eseguiti numerosi lavori grazie anche ai nuovi investimenti della comunità valesiana a Torino; tra questi nuovi interventi, quelli più rilevanti riguardano le cappelle di *Cristo al tribunale di Anna* (c.24), *Cristo depresso dalla sindone* (c.41), *l'Ospizio* per gli esercizi spirituali con il relativo portico (1770), attualmente conosciuto come albergo "*Casa del Pellegrino*" eretto attorno alla cappella del *Cenacolo*, sul lato sinistro della piazza della Basilica.

Arrivando ai giorni nostri, il sito del Sacro Monte assunse valenze ricettive nuove, avvicinandosi ai canoni richiesti dalla villeggiatura nobiliare.

Fu proprio nel 1800 infatti che venne permessa l'edificazione di due strutture ricettive ad utilizzo civile all'interno del perimetro del complesso religioso: trattasi della *Casa Parella* (1816) ai margini della *Piazza del Tempio*, edificata a spese della marchesa Saverino Sanmartino Parella, e le case al di sopra del *Sepolcro* (1863) che richiesero la demolizione di una parte dei locali costituenti l'antico Eremitorio francescano risalente al 1493²⁷.

27 - MASSONE E.(a cura di), *Sacri Monti in Piemonte, Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994, op. cit., p. 141.

É esattamente con l'arrivo dell'800 che il Sacro Monte viene investito da una nuova sensibilità verso discipline volte alla conservazione ed al restauro, attuando così operazioni volte al miglioramento di alcune strutture sugli edifici esistenti, oppure come la nuova costruzione del portico antistante alla cappella dell'*Arrivo dei Magi* (c.5) o al loggiato davanti alla cappella della *Crocefissione* (c.38).

Alla fine di questo secolo venne ufficialmente ultimata la Basilica (inaugurata nel 1896), che rispetto alla pianta originale, presenterà una nuova navata, sei cappelle laterali, presbiterio, coro, lo scurolo (o *cripta della Vergine*), oltre alla nuova facciata marmorea in stile eclettico.



Figura 12 - Facciata della basilica dell'Assunta del Sacro Monte di Varallo.

Foto: A. Ursini.

La cura spirituale del Sacro Monte fu affidata ad attori diversi nel corso di questi secoli, dalla fase iniziale sino al 1603 vennero incaricati i Minori Osservanti ai quali subentrarono i Francescani Riformati nel 1793; essi, in seguito, vennero sostituiti dai sacerdoti diocesani novaresi sino al 1819.

Dal 1819 ad oggi la cura spirituale è commissionata ai Padri Oblati di San Carlo e Gaudenzio di Novara per volere del Vescovo della Diocesi.

Nel 1980 fu ufficialmente istituita la Riserva Naturale Speciale del Sacro Monte di Varallo, sancendo così il passaggio all'Ente regionale dei compiti di conservazione e gestione.

Il 4 luglio 2003, infine, l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura (UNESCO) ha stabilito che il Sacro Monte di Varallo è da considerarsi ufficialmente "Patrimonio dell'Umanità" attribuendo valore inestimabile alle 45 cappelle costituenti l'organismo edificato, popolato dalle circa 800 statue in vera forma e alle oltre 4000 figure affrescate²⁸.

28 - A.S., "La prima grande nuova Gerusalemme", in Rivista "I Sacri Monti del Piemonte", Patrimonio UNESCO, Meridiani, p.16.

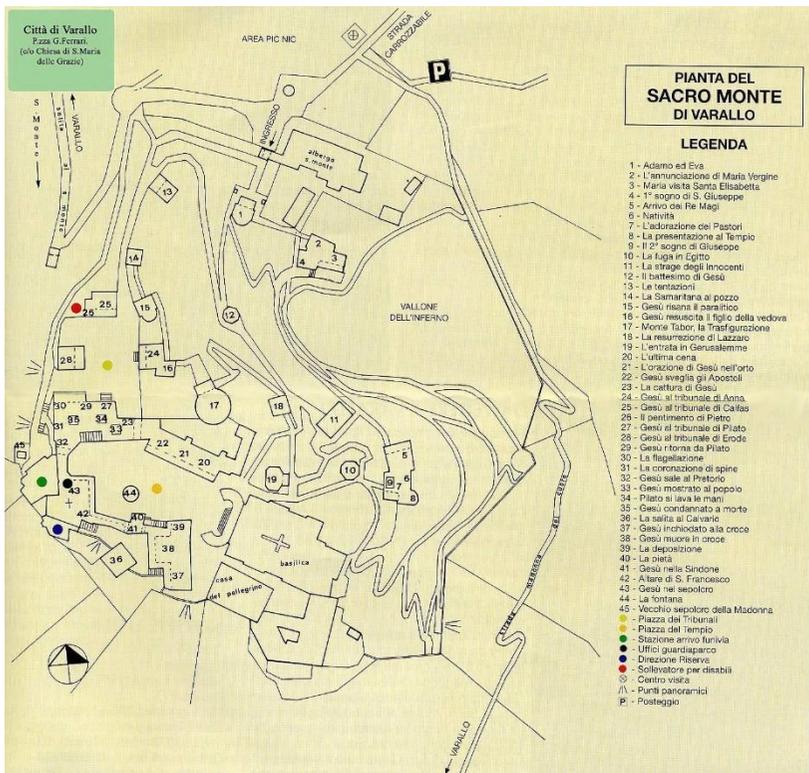


Figura 13 - Mappa del percorso del Sacro Monte di Varallo allo stato attuale.

Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/mapit.html>

3. Il caso di studio

3.1 Il Complesso di Nazareth

L'edificio oggetto di studio in questa Tesi di Laurea è il complesso di Nazareth, costituito dal gruppo di cappelle dell'*Annunciazione* (c. 2), della *Visitazione* (c. 3) ed *Il Primo Sogno di S. Giuseppe* (c. 4) con relativi ambienti di servizio annessi.



Figura 14 - Vista frontale dell'accesso al Complesso di Nazareth.

Foto: A. Ursini.

Il complesso di Nazareth è uno dei più antichi complessi costruiti al Sacro Monte, edificato per volere dell'ordine francescano e posto all'inizio del percorso devozionale e ai margini della faggeta del *Vallone dell'Inferno*. La sua costruzione è verosimilmente poco posteriore al 1514, data in cui fu pubblicata la prima guida dell'intero complesso nel quale compare già la sagoma dell'edificio.

Come le altre costruzioni del primo periodo, il complesso di Nazareth è una costruzione di piccole dimensioni, dai caratteri molto semplici. In esso ritroviamo un esempio di accostamento tra architettura "naturale" e costruzione rurale tipica dei modelli architettonici più antichi delle chiesette montane valsesiane.

Un chiaro esempio di questo accostamento è costituito dalla grotta scavata a mano nella roccia affiorante al di sotto della cappella 2, sul lato sinistro della cappella del *Primo sogno di S. Giuseppe* (c. 4), accessibile e visibile solamente dalla piccola porta tra il passaggio di accesso alla cappella 2 e l'apertura ovale sul paramento murario della cappella 4.

Pur essendo un organismo edilizio di modeste dimensioni, il complesso di Nazareth presenta notevoli peculiarità sia considerando i volumi costituenti, sia osservando gli incastri degli elementi architettonici costruiti, aggiunti o modificati nel corso degli anni. Queste 3 cappelle infatti costituiscono un edificio molto irregolare, sviluppato su più livelli, e concede al visitatore un percorso discendente verso il *Vallone dell'Inferno*.

La prima cappella che si incontra, accedendo dal piccolo ponte in pietra a lato sinistro della cappella 1, è quella dell'*Annunciazione*, che costituisce la parte più alta del Complesso di Nazareth, e che in origine era una cappella diversa.

Aveva infatti un accesso laterale, ed era sprovvista di porticato e non era collegata a nessun altro edificio. Superato il suo portale di accesso con il piccolo timpano, si viene accolti in un ambiente semplice e a pianta rettangolare sormontato da una volta a botte affrescata con un motivo stellato dal quale è possibile ammirare la prima scena del complesso, dietro il divisorio di vetro e legno.

Sulla parete subito a destra vi è un semplice passaggio che concede l'accesso a un corridoio a pianta trapezoidale; questo passaggio, sormontato da una successione di volte a crociera, irregolari in pianta, invita il visitatore a proseguire verso un piccolo loggiato ribassato rispetto al punto di arrivo e a ridosso di un piccolo terrazzamento, dal quale è possibile ammirare la cappella 3 attraverso un altro diaframma ligneo.

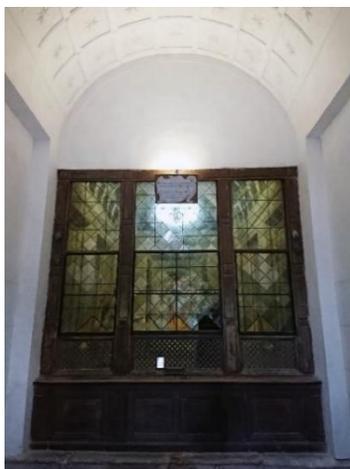


Figura 15 - Vista interna della cappella dell'Annunciazione.

Foto: A. Ursini



Figura 16 - Vista interna del passaggio di collegamento verso la cappella 3.

Foto: A. Ursini



Figura 17 - Vista esterna dal terrazzamento in prossimità della cappella 3.

Foto: A. Ursini

Dalla terrazza sul *Vallone dell'Inferno*, sorretta da un imponente muro di contenimento in pietra, si prosegue il percorso devozionale scendendo verso il blocco inferiore della cappella 4. Rispetto al resto del complesso, questa porzione di edificio è divisa in due livelli sovrapposti, e costituita da quattro ambienti. La cappella dedicata al *Primo Sogno di S. Giuseppe* occupa uno di questi locali, per l'esattezza l'ambiente posto allo spigolo più esterno del livello inferiore, ed è possibile osservarlo solamente grazie ad una finestra arretrata ricavata nel maschio esterno.



Figura 18 - Vista prospettica esterna della cappella 4, nella parte bassa.

Foto: A. Ursini

Gli altri tre ambienti costituenti questa porzione di edificio sono disposti due al piano inferiore ed uno nel sottotetto superiore. Nonostante il loro pregio e le loro caratteristiche, attualmente sono chiusi al pubblico e utilizzati come locali di servizio e di sgombero.

Uno di questi locali di servizio è un ambiente molto particolare, molto simile a una grotta scavata nella roccia, posto al di sotto del passaggio voltato di collegamento tra la cappella 2 e la cappella 3.



Figura 19 - Locale di servizio adiacente la scalinata, cappella 4.

Foto: A. Ursini

Data la conformazione dell'ambiente e considerando che il Complesso di Nazareth è uno dei primi edificati del Sacro Monte, ci lascia pensare che la *grotta* potesse anticamente ospitare nei primi anni del '500 la scena dell'*Annunciazione*.²⁹



Figura 20 - La Grotta, locale di sgombero adiacente alla cappella 4. Foto: A. Ursini.

Superata la porzione di edificio dedicata alla cappella 4, il percorso devozionale prosegue in un viale ciottolato risalendo lungo il pendio del *Vallone dell'Inferno*, andando verso il *Complesso di Betlemme*.

²⁹ Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

3.1.1 Cappella 2: L'annunciazione

La prima cappella del Complesso di Nazareth illustra l'annuncio da parte dell'Arcangelo Gabriele alla Madonna che diverrà la madre di Gesù, figlio di Dio.



Figura 21 - Scena dell'Annunciazione (c.2).

Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-ii/05.jpg>

Originariamente questa cappella era destinata a riprodurre fedelmente la santa casa di Loreto e ospitava la statua della Madonna con il Bambino, a opera di Gaudenzio Ferrari, attualmente collocata nella cappella del *Secondo sogno di S. Giuseppe* (c. 9).³⁰

30 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

Al di là delle problematiche storiche e archeologiche legate alla Santa Casa di Loreto, le particolarità di questa cappella costituiscono la memoria della casa di Maria a Nazareth, definita come Santuario vero e proprio dell'incarnazione, luogo in cui si fa ricordo dell'evento iniziale della vita di Gesù, quando al sì di Maria si fa uomo nel suo grembo, dopo aver ricevuto l'annuncio dall'Arcangelo Gabriele.³¹

Dopo la riprogettazione del Sacro Monte voluta da Galeazzo Alessi e Giacomo d'Adda (1572), la cappella fu adattata ad ospitare il mistero dell'Annunciazione³².

A tale proposito vi furono trasportate al suo interno le statue dell'Arcangelo e della Madonna, statue cinquecentesche attribuite a Gaudenzio Ferrari: sono sculture lignee rivestite di tela gessata e sono tra le più antiche dell'intero Sacro Monte, distinguibili per questo particolare materiale, mentre le altre per la stragrande maggioranza sono di terracotta.

I loro volti e le loro movenze esprimono il turbamento della Madonna all'annuncio dell'angelo e dimostrano l'aggiornamento dell'artista, a un altissimo livello qualitativo, alle riflessioni avviate da Leonardo sulla raffigurazione dei

31 - Fonte: http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/

32 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

moti dell'anima, tema di grande attualità nell'ambiente artistico lombardo dalla fine del Quattrocento.³³



Figura 23 - L'Arcangelo Gabriele.
Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-ii/06.jpg>



Figura 22 - La Vergine dell'Annunciazione.
Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/uploads/2011/07/07.jpg>

Le pareti della cappella sono decorate con cinque personaggi in stile gaudenziano della prima metà del Cinquecento, personaggi che spesso ritorneranno nelle cappelle successive del Sacro Monte: essi sono cinque profeti

33 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

dell'Antico Testamento, nella fattispecie sono i cinque che profetarono l'Annunciazione e stanno a significare la continuità tra Antico e Nuovo Testamento.³⁴

La scena presentata può essere dunque vista come una catechesi, una spiegazione o una teologia attraverso le immagini e non attraverso lo scritto. Il messaggio è che il Cristo non è venuto ad abolire ma a completare le rivelazioni delle scritture ed il predetto dai profeti. Questo concetto lo si comprende in particolare fissando lo sguardo su Isaia, il profeta alle spalle di Maria sulla parete di fondo, il quale regge un brano iscritto su di un cartiglio tratto dal suo libro "la Vergine concepirà e partorirà un figlio", attestando che la Vergine è Maria che sta concependo l'annuncio dell'angelo.³⁵

34 - Fonte: http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/

35 - Fonte: http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/

3.1.2 Cappella 3: La visitazione

La cappella numero 3 del Sacro Monte è una cappella di poco più recente di quella dell'Annunciazione e risale alla metà del Cinquecento (1544), come testimoniato dalla data inscritta nell'antica vetrata racchiusa nell'unica finestra della scena.

Dalla sua edificazione ospita l'illustrazione dell'incontro tra la Madonna e la più vecchia cugina Elisabetta, in quel momento entrambe in attesa di un bambino per volere di Dio. Accanto a loro troviamo Zaccaria, marito di Elisabetta, e Giuseppe, promesso sposo di Maria.



Figura 24 - La Visitazione.

Fonte: <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-iii/08.jpg>

A seguito della riprogettazione del Sacro Monte su richiesta dell'Alessi e di Giacomo d'Adda (1572), fu adattata a ospitare il mistero della Visitazione.

Le sculture di terracotta risalgono ai primi del Seicento e sono di autore ignoto, come le decorazioni pittoriche, attribuite tradizionalmente a Giulio Cesare Luini; lo stile nuovamente riporta il gusto gaudenziano del Cinquecento valsesiano e illustrano, nelle lunette della volta ad ombrello, i profeti che riportavano l'Annunciazione³⁶, richiamando parallelismi alle decorazioni della Cappella di Loreto posta fuori Varallo Sesia, dove inizia la strada per Civasco.

La rappresentazione di questo mistero è inserita in una decorazione parietale molto elaborata molto più recente e risalente all'800. La volta ad ombrello è finemente decorata con putti e angeli che variano un po' lo schema architettonico consueto e lascia trasparire la meticolosità con cui tutto il Sacro Monte è stato curato: lo spazio non risulta quindi semplicemente intonato e tinteggiato in modo anonimo ma è decorato con finezza ed attenzione. Nella zona inferiore, troviamo una rappresentazione di tappezzeria, ridipinta alla fine del XIX secolo in



Figura 25 - Scorcio della volta ad ombrello interna alla cappella della Visitazione. Foto: A. Ursini

36 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

quanto molto deteriorata e simula l'interno dell'abitazione in cui avvenne l'incontro.

Dall'immagine precedente è possibile scorgere nuovamente la presenza dei profeti con dei cartigli, alcuni dei quali ormai sono deteriorati o illeggibili, ma lasciando intendere all'osservatore come l'idea della vita del Cristo sia già stata prefigurata nelle antiche scritture.

Proseguendo il percorso verso la cappella quattro, è possibile osservare l'ambiente circostante dalla terrazza presente. La faggeta che è possibile osservare, come già indicato in precedenza, costituisce il cosiddetto *Vallone dell'Inferno*, lungo questo pendio l'architetto perugino Alessi progettò la realizzazione del purgatorio e dell'inferno, opere che successivamente non vennero mai compiute. Il *Vallone* non è naturale, ma è frutto del riutilizzo della cava utilizzata per l'estrazione delle migliaia di pietre costituenti l'intero Sacro Monte.



Figura 26 - Scorcio esterno della terrazza sul Vallone dell'Inferno. Foto: A. Ursini

3.1.3 Cappella 4: Il primo sogno di S. Giuseppe

La cappella più in basso del complesso di Nazareth è la cappella numero 4 e ospita la scena del primo sogno di Giuseppe descritto nel Vangelo di Matteo, ossia la scena in cui l'angelo gli apparve per annunciarli che la sua sposa, Maria, aspettava un figlio per volere di Dio, anticipandogli cosa ne sarà di lui, della sua sposa e del bambino. Per questo motivo Giuseppe decise di riaccogliere Maria nella sua casa, evitando di ripudiarla secondo legge ebraica.



Figura 27 - Scena interna della cappella 4. Foto: A. Ursini.

Il vano, attualmente occupato dalla cappella, originariamente fungeva da portico esterno della primitiva cappella dell'Annunciazione, che originariamente era allestita nel vano contiguo alla sua sinistra³⁷.

Anticamente in questo portico i fedeli erano soliti fermarvisi per trovare ristoro e riposo dopo il lungo pellegrinaggio a piedi che li aveva condotti al Sacro Monte. Per questo motivo il Vescovo Bascapè, a fine '500, decretò l'interdizione all'accesso alle cappelle, richiedendone l'immediata chiusura del por-



Figura 28 - Vista esterna dei tamponamenti aggiuntivi della cappella 4. Foto: A. Ursini

tico, facendo aggiungere i tamponamenti esterni, ben distinguibili, dando origine all'attuale cappella e al locale di sgombero accessibile dalla prima porta vicino alla scalinata.

Parallelamente il Vescovo ordinò la costruzione dell'ospizio esterno (attualmente conosciuto come Albergo Sacro Monte) in prossimità del portale di accesso, ma

all'esterno delle mura che delimitavano lo spazio dedicato esclusivamente al raccoglimento e alla preghiera. La Cappella 4 nel 1613 risultava ancora spoglia e le statue che compongono la scena (S. Giuseppe, l'angelo e la Madonna che cuce) furono realizzate nei primi del '600 a firma di Giovanni d'Enrico.³⁸ Attorno alle figure vi è riprodotto un interno di un'abitazione,

37 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

38 - Fonte: http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292

rapresentato da una finta tappezzeria affrescata sulle mura; questi affreschi furono successivamente ridipinti intorno al 1930 in quanto molto deteriorati.



Degna di nota è la statua centrale della composizione, ossia la *Madonna che cuce*, probabilmente una delle statue più famose di tutto il sito e visibile su numerose pubblicazioni legate al Sacro Monte; questa è una rara raffigurazione nella storia dell'arte di Maria ritratta nell'atto di cucire: questo è un compito che all'epoca era associato alle madri, alle mogli e più in generale alle donne di casa. Questo permetteva così un'identificazione emotiva molto forte da parte delle donne popolarie valesesiane che spesso venivano in questi luoghi a pregare e meditare.³⁹

Figura 29 - La Madonna che cuce, cappella 4.

Foto: A. Ursini

Era inoltre tradizione per le giovani spose tirare una moneta nel cestino ai piedi della Madonna, come auspicio per una prossima gravidanza. E la Madonna, dal volto quasi quattrocentesco, raccolta e in atteggiamento domestico, che cuce mentre il suo sposo riposa, è un'immagine viva nella memoria collettiva. Il restauro conferma l'ipotesi che la nostra Vergine, valesesiana DOC, stesse ricamando il puncetto⁴⁰ valesesiano.⁴¹

39 - Fonte: http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/

40 - È un pizzo ad ago tipico dell'alta Valsesia, la cui arte è stata inventata dalle donne valesesiane di un tempo.

41 - Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15255>

3.2 Stato di conservazione e rapporto con l'ambiente

Come nel resto delle cappelle dell'intero Sacro Monte, anche in quelle costituenti il Complesso di Nazareth troviamo la sola presenza di grate traforate a fungere da separazione con l'esterno. Solamente nei locali di servizio del blocco della Cappella 4 troviamo la presenza di porte in legno, ma in ognuno di questi locali comunque presente una finestra con grate metalliche per impedire l'accesso fisico dall'esterno ma che allo stesso tempo consentono l'accesso della luce naturale per illuminare le scene interne.

Questa particolarità delle cappelle, le rende a tutti gli effetti dei locali "semi-confinati", cioè locali vincolati ad avere un continuo e costante interscambio climatico con l'ambiente circostante che soprattutto in prossimità del Vallone dell'Inferno risulta essere molto umido.

Data la funzione attribuita al Sacro Monte, le cappelle non possono essere mai chiuse, trasformandole così in una sorta di opera museale, ma questo allo stesso tempo comporta l'impossibilità di verificare e controllare il microclima interno dei locali. Vista la conformazione architettonica perciò questi ambienti non possono null'altro che convivere con questi mutamenti climatici e variazioni di umidità, fattori sensibilmente degradanti per l'intero complesso.

L'umidità in particolare è la più aggressiva e principale causa di degrado naturale; essa agisce in diverse maniere sugli edifici e nella fattispecie sul complesso di Nazareth: troviamo la presenza di infiltrazioni dirette dai tetti nelle cappelle e nel vano sottotetto, oppure troviamo l'azione indiretta dell'umidità di risalita capillare proveniente dal basso anche per effetto dei muri contro

terra, o ancora per le azioni di dilavamento causate dalle precipitazioni sulle superfici esterne.

Le infiltrazioni di natura diretta sono conseguenza dell'esistenza di fessurazioni nell'involucro esterno nelle murature o nelle coperture; queste fessurazioni andranno a costituire un percorso possibile o, in alcuni casi, agevolato



Figura 30 - Vista del corridoio di passaggio tra c. 2 e c. 3 con alterazione della pigmentazione superficiale degli intonaci: presenza di umidità di risalita ed infiltrazioni dal quadro fessurativo nella superficie voltata superiore.

Foto: A. Ursini

per lo scorrimento delle precipitazioni esterne sull'involucro.

La risalita capillare invece è quella che permette all'acqua di giungere dal basso, tramite forze di coesione, nelle porosità dei materiali e di inzupparli, causando un degrado generalizzato delle strutture.⁴²

La soluzione più immediata per ovviare ai problemi dei fenomeni di risalita è quella di convogliare idoneamente le acque piovane, scongiurando il ristagno in prossimità del piede della struttura o di porzioni di essa.

L'acqua meteorica accumulata e non opportunamente allontanata può

42 - Fonte: LOMBARDI S., *Umidità nelle murature: diagnosi e recupero*. 2005.

facilmente diventare causa o concausa del deterioramento precoce del materiale che la trattiene, sia pietra che intonaco, legno o altro.

Direttamente collegato al fenomeno dell'umidità, vi è il degrado causato dai microorganismi quali muffe e batteri in colonizzazioni biologiche: le muffe, infatti, sono la principale causa di degrado biologico e proliferano solitamente in ambienti con umidità relativa superiore al 70%.

Come si può ben immaginare, in monumenti riccamente affrescati o con statue policrome, come per esempio nel Sacro Monte di Varallo, la presenza costante di umidità relativa elevata, e quindi di muffa, costituisce una vera e propria sciagura. In queste condizioni il degrado fisico chimico dei materiali costituenti viene ulteriormente accelerato, generando un decadimento precoce causato dallo sfarinamento degli intonaci fino ad arrivare al vero e proprio sgretolamento o decomposizione degli strati nelle murature.

L'ampia presenza di colonizzazione biologica in tutto il complesso, con crescita di microrganismi, genera i cosiddetti fenomeni di biodeterioramento, cioè alterazioni indesiderate ed irrimediabilmente dannose per i materiali. Ciò fondamentalmente è causato dal mantenimento di una soglia di umidità superficiale da parte della colonia batterica.⁴³

Data la presenza di queste colonie, va inevitabilmente valutata l'interazione che viene ad instaurarsi con i substrati, in funzione delle differenti forme ed estensioni del loro sviluppo.

43 - SCARZELLA P., ZERBINATTI M., *Problemi conservativi relativi a materiali lapidei naturali o artificiali con decorazioni presso la Cappella 13, la Cappella 17 e le cappelle 23, 27, 29, 34 al Sacro Monte di Varallo Sesia*. Giornata Seminariale Progetto REFRESCOS, 2010.



Figura 31 - Dettaglio di muratura esterna deteriorata tra la cappella 3 e l'attacco del muro di contenimento del terrazzamento. Foto: A. Ursini.

Conseguenza è che, quando vi è evidente crescita di biodeteriogeni, il conservatore dovrebbe verificare in quale misura questa stia danneggiando il substrato.⁴⁴

Sulle superfici esterne si possono anche notare segni di dilavamento e di distacco degli intonaci o addirittura, in alcuni punti interni, vere e proprie lacune nei paramenti murari; frequentemente si possono notare delle aree interessate dallo sviluppo di muffe lungo la base dei muri dell'edificio, nel perimetro esterno e interno o sui lembi delle coperture, umidità che viene assorbita e trasmessa inevitabilmente alla struttura, degradandola e allo stesso tempo indebolendola.

Questo indebolimento strutturale causa irrimediabilmente una riduzione a livello prestazionale dei materiali costituenti le murature; indebolimento che,

44 - PINNA D., *La crescita biologica sui materiali lapidei di alcune cappelle del Sacro Monte di Varallo Sesia*. Esempi di Architettura 39:53-59, Aracne Editrice, 2017.

arrivando precocemente, può condurre alla crisi anticipata dei paramenti murari per superamento dei limiti di resistenza dei materiali sotto le azioni proprie della struttura, quali il peso proprio, sia sotto azioni eccezionali quali forti nevicate, o per azioni laterali dovute al sisma o allo scorrimento causato da frane e smottamenti.

A tal proposito, con questa Tesi di Laurea, si cerca di far risaltare l'importanza delle tecniche costruttive dell'edificio ed il loro studio, passando dalla loro valutazione in favore di una più agevole comprensione dei meccanismi resistenti delle murature e delle superfici voltate.

Il rilievo perciò riveste un ruolo fondamentale per la comprensione delle vulnerabilità sia di tipo geometrico che di tipo materico, in quanto la stabilità complessiva dell'opera in muratura e pietra dipende inevitabilmente sia dalla forma geometrica che dalla propria apparecchiatura, ossia da come sono disposti gli elementi e, di conseguenza, i materiali costituenti.

Le volte presenti nella totalità dell'edificio, con eccezione del vano sottotetto della cappella 4, sono per loro natura degli elementi dotati di una discreta capacità di adattarsi agli assestamenti delle strutture portanti, grazie alla presenza dei giunti di malta, relativamente deformabili. Nelle volte inoltre, la presenza di un quadro fessurativo rappresenta di per sé un problema minore, ma può essere indicatore della presenza di fenomeni anomali di pressoflessione⁴⁵.

45 - FACCIO P. (slide in formato pdf a cura di...), *Teoria e tecnica delle costruzioni storiche*, Università IUAV di Venezia, a.a. 2013-2014

Questo lascia dedurre la possibile tendenza della struttura al generarsi di avvallamenti o abbassamenti lungo la superficie voltata, dovuta a fenomeni di ribaltamento o rotazioni fuori piano anomale nei paramenti murari. Sono esattamente questi i fenomeni che, se individuati, destano maggior preoccupazione in quanto vanno a compromettere la forma degli elementi, e di conseguenza il funzionamento degli elementi costituenti.

La stabilità globale dell'opera pertanto dipende da condizioni legate ai vincoli esterni, che devono essere idonei e in grado di contrastare efficacemente le azioni di pressoflessione trasmesse dalle coperture e dalle volte o dagli archi, con la presenza di catene o contrafforti. Per tanto l'efficienza di questi sistemi ed il controllo del loro degrado risulta essere di vitale importanza per l'efficace mantenimento in essere degli edifici costituenti il Sacro Monte e, più in generale, lo sono per ogni bene del nostro patrimonio architettonico storico.

3.2.1 Il programma degli interventi del Sacro Monte

Parte delle strutture costituenti il Sacro Monte di Varallo sono immerse nella faggeta del Vallone dell'Inferno, scenario contraddistinto da fitta vegetazione e dalla presenza di alberi di notevole dimensione che, per loro natura, tendono a crescere e valicare il perimetro di rispetto degli edifici. Ciò richiama la necessità continua di attenzione e soprattutto di particolari interventi di manutenzione.

Per quanto concerne il cosiddetto Vallone, la maggior parte dell'attenzione viene rivolta al convogliamento delle acque meteoriche, con corretta e attenta regimazione del loro percorso naturale e, in parallelo, all'ottimizzazione di

tutta l'area boschiva, garantendone completa fruibilità dei percorsi lungo i percorsi.

In generale, in una realtà complessa come quella del Sacro Monte, dovrebbe essere garantita una costante attenzione e cura nel tempo, ma ciò risulta complesso in relazione con la scarsità di risorse economiche a ciò destinate.

Agli inizi della storia del Sacro Monte vi era la Fabbriceria, ossia un Ente morale che aveva l'onere di costruzione delle singole cappelle con la relativa gestione dell'ordinaria manutenzione sia per la sistemazione delle coperture, che per opere di pulizia da polvere o foglie, ma anche nel ridipingere le statue sbiadite.

Dopo il suo scioglimento il sito ha patito lunghi periodi di trascuratezza che hanno lasciato segni importanti. Storicamente il Vescovo, oltre ad occuparsi delle scelte "narrative", dava in incarico le opere di conservazione a partire dagli interventi sulle coperture, fossero esse di riparazione o di pulizia delle gronde dalle foglie; avviava al ripristino di elementi danneggiati, come statue o vetri, fino alla cura della vegetazione in cui sono immerse le cappelle.

Con questa politica di gestione il sito del Sacro Monte subì un lento deterioramento per tutto il XIX secolo, fino ad arrivare ad un vero e proprio stato di abbandono e trascuratezza.

Recentemente, per l'esattezza con la legge n.28 del 30 aprile 1980, la situazione è migliorata con la nascita dell'Ente Regionale Riserva Naturale Speciale del Sacro Monte di Varallo, pur rimanendo sito di proprietà del Comune

di Varallo con cura religiosa del Santuario affidata ai Padri Oblati, diretti dal Vescovo di Novara.⁴⁶

L'Ente Regionale fu sostituito in seguito il primo gennaio 2012, grazie alla Legge Regionale n. 19/2009, dall'ente denominato "Ente di Gestione dei Sacri Monti", con l'incarico di amministrazione di tutti i sette Sacri Monti piemontesi. L'Ente ha inoltre l'incarico di garantirne la completa conservazione, favorendone l'utilizzo e salvaguardandone le peculiarità ambientali e paesaggistiche, nonché favorire gli studi scientifici, culturali e didattici.

Per stabilire i criteri e gli oggetti di intervento di riqualificazione e valorizzazione, l'Ente di Gestione si è adoperato a redigere un Piano Naturalistico e d'intervento, approvato dal Consiglio regionale, col fine di limitare il deterioramento del complesso, la Riserva Naturale Speciale del Sacro Monte ha attuato una serie di attività manutentive, che prevede:

- Manutenzione straordinaria e ordinaria dei tetti;
- Manutenzione ordinaria dell'interno delle cappelle;
- Monitoraggio e studio dell'azione dell'umidità;
- Manutenzione della vegetazione.

3.2.2 Manutenzione delle coperture

Per salvaguardare l'intero complesso del Sacro Monte di Varallo, il primario rischio da scongiurare è il degrado delle coperture delle singole cappelle, evitando il deterioramento delle opere per infiltrazione. A tal proposito l'Ente

46 - Guida al Sacro Monte di Varallo, E. De Filippis, tipolitografia di Borgosesia, 2009, p.14.

Regionale preposto interviene attuando sistematicamente la manutenzione e la revisione dei tetti.

In tutto il Sacro Monte i tetti sono costruiti secondo le tradizionali tecniche diffuse nell'Italia nord-occidentale, ossia con lastre sovrapposte in gneiss o scisti, dette "beole", provenienti da cave locali, posate in opera su un'orditura in tavolato ligneo sorretta da una travatura.

Lo sviluppo di questa tecnica principalmente lungo il versante alpino occidentale è dovuto al fatto che questa tipologia di copertura ha ottime caratteristiche di protezione degli edifici in inverno dalla neve, che a queste quote può raggiungere spessori considerevoli e, quindi, notevoli carichi accidentali aggiunti.

La provenienza dei materiali era legata fortemente al territorio, infatti il materiale litico, che deriva il proprio nome dalla località di Beura in Val d'Ossola, era estratto da apposite cave locali; il blocco è prima fratturato lungo il piano orizzontale per poi essere successivamente diviso in lastre e posato sulla superficie del tetto da sapienti artigiani specializzati. Essendo in pietra, la travatura di sostegno doveva essere adeguatamente dimensionata e, di conseguenza, doveva essere molto robusta in maniera da sopportare interamente i carichi, sia propri che accidentali.

Essendo materiali e tecniche tradizionali, la conoscenza e l'applicazione risulta essere particolarmente difficoltosa, sia per la scarsa presenza di operai specializzati sia per la difficoltà di operare con scarsità di materiali.



Figura 32 - Deposito di beole utilizzate per eventuali sostituzioni nelle coperture del Sacro Monte. Foto: A. Ursini.

Esiste infatti solo un limitato numero di operai o artigiani qualificati nel settore che possiede la capacità di posa e di lavorazione delle beole, acquisita dalle generazioni precedenti.

Altro fattore è che l'artigiano di una diversa valle o area montana, segue una propria tecnica, distinguibile dalle altre, derivata essenzialmente dai materiali presenti nel luogo, dalle loro dimensioni e spessore, tecnica di posa che non sempre può essere applicata altrove.

Ogni beola infatti, di spessore variabile tra i 4-5 cm, prima di essere posata in opera, viene lavorata sui margini e *sbardata* al centro per migliorarne lo scorrimento delle acque meteoriche; quelle di dimensioni maggiori, inoltre, sono utilizzate nelle file più basse, per poi risalire lungo i margini degli spioventi con quelle di dimensioni minori.

Esse sono affiancate orizzontalmente e poste in serrata successione, per poi essere sovrapposte l'una all'altra in modo che lo sgocciolamento dell'acqua piovana percorra la parte in luce della beola sottostante. Essendo il manto in beole caratterizzato dalla forte irregolarità in dimensione delle lastre, non presenta misure fisse ed interassi precisi e ciò permette all'artigiano esperto di realizzare curvature, impluvi,

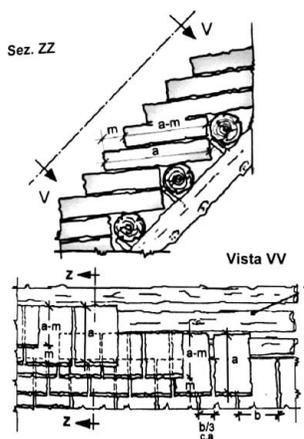


Figura 33 - Frequente schema di posa di manti in lastre di gneiss (beole). I corsi sono alternati; in pianta i giunti dei corsi consecutivi sono prevalentemente sfalsati all'incirca di un terzo della larghezza delle lastre. Fonte: SCARZELLA P., ZERBINATTI M., (a cura di...), *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea editrice, p.187

displuvi e raccordi o cambi di pendenze solo grazie alla sua abilità di lavorazione e posa degli elementi.⁴⁷

La sottostruttura portante di un tetto in beole odierno non si scosta sostanzialmente da quella eseguita in passato. I carichi statici risultanti sono rimasti sostanzialmente gli stessi; le due importanti differenze che ne derivano dipendono dal fatto che la carpenteria moderna è fissata e legata con chiodi e viti ed è opportunamente dimensionata in modo da non concedere praticamente nessuna azione di flessione.

Come le restanti componenti strutturali edilizie, il tetto in beole moderno richiede un opportuno calcolo statico effettuato da un ingegnere civile, e di norma si tiene conto che una squadra di quattro operai specializzati arriva a lavorare e posare anche 10 tonnellate di beole di cava al dì. Grosso modo questa grandezza corrisponde a circa 30 m² di superficie coperta, considerando anche un peso indicativo di circa 333 Kg/m².⁴⁸

Gli interventi sulle coperture del Sacro Monte devono garantire in maniera efficace il buon funzionamento del sistema di convogliamento e di allontanamento delle acque meteoriche, e garantire assolutamente la pulizia e il buon funzionamento dei canali di gronda, con eventuale creazione ai piedi delle murature di pozzetti di raccolta ispezionabili.

Date queste considerazioni, la manutenzione delle coperture al Sacro Monte viene effettuata almeno due volte l'anno, in primavera dopo lo scioglimento

47 - SCARZELLA P., ZERBINATTI M.(a cura di...), *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea editrice, 2009

48 - BREU S.(lavoro individuale di approfondimento...), *Tetti in piode (beole) – Un'arte infinita*, Muratori 3c, Scuola professionale Mendrisio, a.a. 2006-2007.

delle ultime nevi e nel tardo autunno, dopo la caduta delle foglie, andando a effettuare la pulizia delle gronde con rimozione dei residui vegetali.

In queste occasioni di manutenzione ordinaria, viene verificato l'effettivo stato di conservazione dei tetti, valutando le condizioni del manto di copertura e della sua complessiva stabilità.

3.2.3 Manutenzione ordinaria degli interni

All'interno delle cappelle è condotta una puntuale verifica, con programmazione di restauri dei dipinti e delle sculture, solo dopo aver garantito la corretta tenuta delle coperture.

Per garantire un adeguato controllo dello stato di ogni opera, è stata effettuata un'opportuna schedatura dello stato di conservazione da parte di un esperto restauratore incaricato, che ha l'onere e il compito di verificare le condizioni delle opere almeno due volte all'anno.

La figura del restauratore ha il compito ulteriore di rimozione di ragnatele e delle polveri, per garantire un senso di cura e di decoro alle scene, andando a sistemare, ove necessario, gli accessori mobili e anche le parrucche dei personaggi.

Nel caso in fase di lavoro siano ritrovati dei frammenti di statue, il restauratore stesso provvede al loro incollaggio, supportando l'intervento con fotografie per stabilire la piena leggibilità della scena. Allo stato attuale parte delle statue sono danneggiate dalle condizioni ambientali e, nella fattispecie, dall'umidità, presentando perdita di colore superficiale, caratteristica che rende molto delicata persino la sola opera di spolvero.

Tutti i dati delle schedature sono stati opportunamente inseriti all'interno di un *database*, a cura della restauratrice Alessandra Perugini, la quale ha permesso di individuare gli interventi da effettuare in ordine di urgenza e concatenazione logica.

3.2.4 *Monitoraggio dell'azione dell'umidità*

Come già definito, la principale causa di ammaloramento del complesso del Sacro Monte è legata alla forte presenza di umidità legata alla peculiare conformazione degli edifici e alle particolari condizioni ambientali. L'umidità quindi agisce prettamente in due modalità:

- Per infiltrazione diretta dalle coperture
- Per risalita capillare

La presenza di acqua e di umidità nelle murature si manifesta in superficie con un'alterazione cromatica che tende all'oscuramento del pigmento superficiale, ma anche alla nascita di efflorescenze saline, colonie batteriche e muffe.⁴⁹

Recentemente tutto il complesso è in fase di studio sotto questo aspetto, ma attualmente si è evidenziata la maggior presenza nei manufatti di due fondamentali tipologie di sali, appartenenti alla categoria dei nitrati e dei solfati. In particolare, una di queste specie è il segno di decomposizione di sostanze organiche presenti nell'ambiente circostante e pervenute, per mezzo

49 - SCARZELLA P., ZERBINATTI M. (a cura di...) *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea editrice, 2009, p.56.

dell'acqua, all'interno delle stratigrafie murarie; di origine non del tutto chiara, la loro presenza può essere più o meno marcata anche in funzione delle caratteristiche intrinseche della composizione mineralogica.

Questi sali sono per loro natura fortemente igroscopici e provocano un continuo e costante meccanismo di imbibizione ed evaporazione delle superfici. Questo processo, nel tempo, per i noti meccanismi di evaporazione dell'acqua e di precipitazione di ioni in forma di cristalli salini, provoca una precoce decoesione delle malte, della terracotta o degli intonaci⁵⁰. Tal processo inoltre è determinato e agevolato dalla elevata porosità delle superfici, sia interne che esterne.

Dato il quadro problematico, le scelte possibili da adottare devono essere di volta in volta valutate con restauratori specializzati e condivisi con gli organi della Soprintendenza e, sostanzialmente prevedono:

- Rimozione dei nitrati nel suolo, operazione complicata se dovessero essere presenti in profondità
- Isolamento ambientale, per quanto possibile, del vano interno limitando gli scambi termoigrometrici con l'esterno.

Per ottimizzare le operazioni e avere dati più solidi e utili alle scelte future, attualmente sono stati avviati dei monitoraggi all'interno delle cappelle più problematiche.

50 - *Sacri monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2007, p.94

3.2.5 Manutenzione della vegetazione

Uno dei compiti dell'Ente di Gestione dei Sacri Monti è quello di tutelare i caratteri naturali, ambientali e paesaggistici del complesso e ciò viene garantito grazie a una pianificazione di interventi volti alla migliore gestione della vegetazione presente, rispettandone la naturale evoluzione.

L'Ente ha previsto che durante l'anno solare, in diversi periodi, siano svolti interventi specifici dettati dalla crescita naturale delle alberature, svolgendo attività di manutenzione ordinaria.

Agli inizi della stagione primaverile, indicativamente nel mese di marzo, sono svolti i lavori di preparazione del prato, con pulizia dai materiali depositati in inverno, successivamente è effettuata un'arieggiatura del terreno con successiva fertilizzazione di aree specifiche. Inoltre, in primavera, si effettua lo sfoltimento delle siepi e degli alberelli, eseguendo lavori di alleggerimento e riduzione delle chiome sugli alberi più grandi.

Dal successivo mese di aprile, fino al mese di ottobre, sono pianificati i lavori di taglio e rasatura delle aiuole e dei prati prospicienti al recinto murario dell'intero complesso.

Il mese di maggio, invece, è dedicato alla sarchiatura, concedendo l'estirpazione di piante infestanti e, dove necessario, un'operazione di rimescolamento superficiale del terreno. A giugno, invece, sono compiute le potature in forma delle siepi di ligustro, degli olmi e del carpino bianco.

Le opere di taglio e sistemazione delle aree verdi vengono successivamente intensificate nel periodo estivo, eseguendo anche lavorazioni di diserbo e

decoro delle piazze, incrementando le operazioni di pulizia nelle aree maggiormente frequentate.

Alla fine della stagione estiva e con l'arrivo dell'autunno, le operazioni sono diradate, affidando a ditte specializzate le operazioni sugli alberi ad alto fusto nelle zone boschive del Vallone dell'Inferno.

L'Ente pianifica di anno in anno le operazioni, compatibilmente con i fondi disponibili nel bilancio, provvedendo anche alla manutenzione delle infrastrutture, come i percorsi ciottolati, dei mancorrenti, e anche opere di consolidamento dei muretti a secco. Degno di nota è l'affidamento all'IPLA (Istituto regionale Piante da Legno e Ambiente) del monitoraggio e manutenzione straordinaria del patrimonio arboreo.

La pianificazione delle opere di manutenzione legate al patrimonio vegetale e della sicurezza infrastrutturale del Sacro Monte di Varallo sono legate al finanziamento della Regione Piemonte e degli altri Enti competenti.⁵¹

51- *Sacri Monti*, A. Barbero, G. Greco, O. Girardi, S. Minissale, L. Racchelli, C. Silvestri, 2007

3.2.6 Manutenzione straordinaria del complesso di Nazareth

Dato l'evidente stato di ammaloramento di alcune porzioni del complesso di Nazareth, l'Ente di Gestione del Sacro Monte ha previsto, nel corso degli ultimi anni, alcune opere di manutenzione straordinaria e di restauro.

Gli interventi più rilevanti e degni di nota riguardano la manutenzione e/o rifacimento dei manti di copertura dell'intero complesso, il trattamento e l'allontanamento idoneo delle acque localizzate al piede della cappella 4, nonché operazioni di restauro al suo interno.

Dalle opere di manutenzione ordinaria fu identificato e riconosciuto un grave ammaloramento delle componenti di sostegno delle diverse falde nelle superfici di copertura.

Ciò ha comportato l'idonea scelta di manutenzione straordinaria con oggetto il rifacimento integrale della struttura lignea, mantenendo, ove possibile, le caratteristiche statiche, geometriche e gli elementi originali delle travature come illustrato dalle fotografie successive.



Figura 37 - Dettaglio della nuova trave portante ad angolo, con travi secondarie originali (c.4). Foto: A. Ursini



Figura 36 - Vista d'insieme dell'orditura in travi lignee in copertura (c.4). Foto: A. Ursini



Figura 34 - Dettaglio ad angolo esterno (c.4). Foto: A. Ursini



Figura 35 - Dettaglio dell'affiancamento tra trave originale (a destra) e nuova trave portante (a sinistra). Bisogna doverosamente notare che la trave originale, avente inizialmente funzione portante, allo stato attuale non assolve più la sua funzione di sostegno, ma essendo avvitata ad uno dei travetti secondari superiori, non poggiando sulla trave principale in basso ed essendo infine poggiata sul paramento murario nell'altro capo, costituisce un vero e proprio carico aggiunto alla copertura. Nella fattispecie essa inciderà sulla nuova trave di sinistra, generando un probabile momento flettente sulla muratura all'altro capo. Foto: A. Ursini

L'intervento, avvenuto tra il 2014 e 2015, ha avuto come obiettivo il completo restauro delle coperture, sostituendo le beole e i canali di gronda per le acque piovane, scongiurando così un ulteriore ammaloramento delle superfici interne ed esterne.

Le operazioni sono state seguite da uno studio di architettura locale, che ne ha redatto il Piano di Sicurezza e Coordinamento del PSC, con annesso Coordinamento della Sicurezza in fase di Esecuzione, con importo percepito di 74.444,57€.⁵²

Altri interventi importanti svolto sul Complesso di Nazareth sono le operazioni effettuate attorno alla cappella 4 per il trattamento efficace dell'umidità, realizzato nel 2011.

Le pareti erano interessate e ammalorate da marcati fenomeni legati all'umidità di risalita e, a tal proposito, l'Ente di Gestione ha ordinato la revisione del sistema fognario circostante, decidendo di proteggere le murature con la realizzazione di una trincea areata, ossia uno scavo perimetrale coperto da beole, sulle quali viene ricostruito l'antico ciottolato, nascondendo all'osservatore l'operazione compiuta.

La cappella fu liberata dal terreno a ridosso della muratura sul lato esterno, concedendo un periodo di areazione e favorendo una parziale asciugatura. Questa soluzione ha precedenti molto antichi proprio al Sacro Monte: troviamo infatti lo stesso tipo intervento al di sotto della cappella di Cristo

52 - Fonte: Curriculum Professionale dell'Architetto (nome riservato)

condotto al Pretorio, ma anche nelle indicazioni tecniche fornite dai Vescovi di metà '600.

Dopo aver effettuato le operazioni di scavo, sono stati inseriti i cablaggi per i sistemi di illuminazione e videosorveglianza. Lo scavo inoltre ha permesso di confermare la datazione dei primi anni del Cinquecento, e del successivo cambio di destinazione d'uso, da portico aperto al pubblico, a cappella scenica confinata da successivi tamponamenti.⁵³



Figura 38 - Dettaglio dello scavo e posa degli impianti. Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo>



Figura 39 - Vista d'insieme delle operazioni di scavo. Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo>

53 - Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15023>

Per quanto concerne i lavori all'interno del complesso di Nazareth, degno di nota è l'opera di restauro della cappella 4 del Primo Sogno di Giuseppe, inaugurata il 12 novembre 2011 con la collaborazione e sostegno della Fondazione Banco Popolare di Novara per il Territorio che seguì l'intervento sin dal 2009. Il primo finanziamento, di 40.000 €, fu destinato al restauro dei dipinti; il secondo, di ulteriori 35.000 €, fu destinato alle statue, alla inferriata e al pavimento, curati dal restauratore Claudio Valazza di Boca.⁵⁴



Figura 40 - Dettaglio del volto della Madonna che cuce durante le fasi di restauro. Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15255>

54 - Fonte: <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15255>

4. Tecniche e metodologie del rilievo

4.1 Concetti generali

Lo studio storico e tecnico e, più in generale, la conoscenza dei beni architettonici e artistici storici è stata notevolmente influenzata negli ultimi anni dall'enorme progresso tecnologico.

Le tecnologie rivestono un ruolo fondamentale contribuendo attivamente all'acquisizione e gestione di dati sempre più accurati, affidabili e fruibili negli ambiti del restauro o della manutenzione, agevolando sempre più spesso l'operato degli addetti ai lavori. Enti come l'ICOMOS, l'ICCROM, CIPA⁵⁵ e l'UNESCO, hanno attribuito negli ultimi anni un notevole valore allo sviluppo tecnologico, dedicando attenzione alle tecniche legate alla documentazione metrica digitale, applicata sia allo studio di siti o reperti archeologici, sia legata ad ambiti più ampi quali centri storici, sia a complessi di rilevanza storico-architettonica.

55 - ICOMOS: *International Council of Monuments and Sites*, ente che si occupa della conservazione e protezione del patrimonio culturale.

ICCROM: *International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*, organizzazione intergovernativa avente lo scopo di promuovere la conservazione di tutte le tipologie di patrimonio culturale.

CIPA: *International Committee of Architectural Photogrammetry*, ente fondato nel 1968 volto all'applicazione delle tecnologie di misurazione e di visualizzazione, oltre alle scienze informatiche, con lo scopo di registrazione, conservazione e documentazione del patrimonio culturale in tutte le sue forme. Oggi ha il nome di CIPA *Heritage Documentation* ed è diventato un'organizzazione internazionale, associata all'ICOMOS e all'ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) costantemente aggiornata sulle ultime tecnologie in maniera da garantire l'utilità per la conservazione del patrimonio, l'istruzione e la diffusione dei suoi valori.

L'innovazione tecnologica segue di pari passo lo sviluppo delle tecniche di documentazione metrica in scala architettonica, le cui linee guida mirano all'utilizzo di metodi di documentazione, ormai abbastanza diffusi e richiesti, che vedono l'applicazione di strumenti dal costo ragionevole e dai vantaggiosi tempi di utilizzo. Questo si esprime nell'ormai consolidato utilizzo della tecnologia *laser scanner* integrata all'utilizzo della fotogrammetria digitale, due tecniche in grado di rispondere a molte richieste di base rilevando informazioni spaziali complete e tridimensionali.⁵⁶

Nel campo del disegno e più in generale della rappresentazione digitale del costruito, la metodologia *BIM*⁵⁷ sta passando sempre più spesso dall'applicazione a progetti *ex-novo* all'applicazione su edifici storici esistenti, acquisendo il nuovo appellativo di *H-BIM*⁵⁸, ossia *Heritage* o *Historical BIM*, pur presentando ancora alcune limitazioni in fase di modellazione.

L'utilizzo del *BIM* conferisce, in fase di rappresentazione maggiore dettaglio e controllo del modello attraverso componenti "*smart*" e "parametrici", favorendo un'ottimizzazione del coordinamento tra i diversi attori del processo edilizio nelle diverse fasi di costruzione, restauro o conservazione.

La componente di integrazione e la complementarietà delle diverse discipline è, probabilmente, il requisito fondamentale da ottenere per una conoscenza approfondita del bene architettonico in oggetto. E in questo ambito, il campo

56 - *I sistemi laser scanning nei progetti e percorsi formativi d'Architettura*, F. Chiabrando, A. T. Spanò, in "Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia", n.3, SIFET, 2012, pp. 65-84.

57 - *BIM*: Building Information Modeling, indica un metodo per l'ottimizzazione della pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite aiuto di *software* appositi.

58 - *HBIM*: metodi, approcci e programmi informatici dedicati alla rappresentazione informativa di quanto già edificato.

della rappresentazione architettonica riflette inevitabilmente le informazioni ottenute dalla fase del rilevamento.

A tal proposito, quindi, le tecniche e le metodologie innovative hanno il compito di mostrare come sia possibile restituire un modello tridimensionale attraverso la seguente serie di operazioni e strumentazioni:

- Rilievo metrico;
- *Laser scanner*;
- Tecniche fotogrammetriche
- *UAV*

4.2 Rilievo metrico

Uno dei principali problemi da affrontare, nelle fasi di rilevamento applicate ai beni culturali, è l'oggettiva difficoltà di descrivere le diverse operazioni entro schemi convenzionali e metodologie operative standardizzate. Ormai è frequente l'applicazione di diverse metodologie in base alle caratteristiche del rilievo in termini di scala e dimensioni; vengono diversificate in base ad accurate considerazioni che, nelle diverse situazioni, concedono di applicare approcci di rilievo diversi e/o multiscala. Quest'ultimo termine si adotta nei casi per cui il rilievo accurato di un oggetto viene inserito in un rilievo di minore dettaglio in relazione al contesto.⁵⁹ Le diverse strumentazioni potrebbero generare problematiche nelle restituzioni di precisioni non omogenee all'impiego

⁵⁹ - BETELLI G., *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali*, in "Atti 6a Conferenza Nazionale ASITA", 2002, p.3

di differenti sistemi di riferimento. L'accuratezza stessa del rilievo è opportunamente valutata in fase di pianificazione in base alle applicazioni specifiche, arrivando a precisioni in scala millimetrica come nel caso oggetto di questa Tesi di Laurea. Esistono scale di valutazione contraddistinte da tre categorie: regionale, locale, puntuale. Come indicato di seguito [Tab.1] esse vanno a definire l'ampiezza degli oggetti o delle aree oggetto di analisi, fornendo indicazioni su dati e tecniche opportune di rilievo.⁶⁰

Tabella 1: Scale di lavoro e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale non invasivo. Fonte: GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in "Archeologia e Calcolatori", N° 22, (2011), p. 171.

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala Regionale	<ul style="list-style-type: none"> • Territorio • Topografia • Sito 	<ul style="list-style-type: none"> • Immagini satellitari • Immagini aeree a piccola scala • Radar aereo e da satellite • <i>LiDAR</i> aereo • GPS/GNSS
Scala Locale	<ul style="list-style-type: none"> • Sito • Architetture • Scavo • Strati 	<ul style="list-style-type: none"> • Immagini satellitari ad alta risoluzione • Immagini aeree a grande scala • Radar aereo • <i>LiDAR</i> aereo • <i>Laser scanner</i> terrestre TOF/CW • Immagini terrestri • Stazione totale • GPS/GNSS • SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
Scala Oggetto	<ul style="list-style-type: none"> • Ritrovamenti • Oggetti Museali 	<ul style="list-style-type: none"> • Immagini terrestri • <i>Laser scanner</i> a triangolazione • Sistemi a luce strutturata • Scanner 3D manuali (<i>Freestyle FARO</i>)

60 - ALBERY E., LINGUA A., RINAUDO F., *Tecniche e strumenti innovativi per il rilievo metrico dei beni culturali*, in "Atti di convegno: Giornata nazionale di studi del CIPA", 2000, p.79

Più in generale le tecniche di rilievo sono distinte in due tipologie: rilievo diretto e rilievo indiretto. Questa distinzione viene effettuata fondamentalmente in base agli strumenti di lavoro adottati, infatti il rilievo diretto si avvale di una metodologia classica e consolidata nel tempo eseguendo misurazioni direttamente sull'oggetto.

Il rilievo indiretto invece risulta essere più articolato e si avvale di elaborazioni computerizzate derivanti da acquisizioni tramite strumenti ottici, dotati di cannocchiali e mirino, utili con oggetti in lontananza o poco accessibili.

L'intento di generare delle immagini tridimensionali della scena oggetto del rilievo richiede oggi l'utilizzo di strumenti specifici che operano per mezzo della radiazione luminosa, sfruttandola in fase di misurazione. Questi sensori sono suddivisi in due categorie o tipologie:

- *Sensori passivi*, che sfruttano la luce naturale, come ad esempio la fotogrammetria, o i teodoliti;
- *Sensori attivi*, che codificano la radiazione luminosa durante la misurazione, come nei *laser scanner* o stazioni totali.

Il processo di scelta delle tecniche da adoperare e della mole di dati da impiegare è funzione delle caratteristiche della superficie da rilevare, dell'accuratezza e del livello di dettaglio geometrico richiesto, delle dimensioni dell'oggetto e della sua collocazione spaziale, dell'esperienza, dei costi di progetto, etc.⁶¹

61 - GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p.169

Considerando quindi l'oggetto di questa Tesi di Laurea ed il contesto ambientale in cui è situato, si è optato di effettuare un rilievo integrando le diverse tecniche.

La rete di inquadramento è stata fissata ai vertici trigonometrici definiti nelle precedenti campagne di rilievo. Grazie ai vertici delle poligoni poi è stato possibile generare il rilievo topografico con strumenti *laser scanner*, applicato all'acquisizione delle superfici a terra e in facciata, integrandolo con un rilievo *fotogrammetrico* con *UAV (Unmanned Aerial Vehicle, Veicolo Aereo Senza Pilota)*, idoneo alla rappresentazione delle coperture.

4.2.1 *Rilievo topografico*

Si può definire il rilievo topografico come l'insieme delle operazioni di misura e delle procedure adottate al fine della rappresentazione grafica e numerica di una limitata porzione di superficie. Prima dell'innovazione tecnologica portata dal *GPS/GNSS*, il rilievo topografico era fondamentalmente applicato alla produzione cartografica. Attualmente invece il rilievo topografico viene utilizzato anche come base integrativa al rilievo fotogrammetrico e della tecnologia *LiDAR* o nel rilievo di limitate estensioni.⁶²

Una delle tecniche topografiche ormai consolidate e affidabili è quella della triangolazione, che consente la rilevazione tramite l'individuazione sul terreno di alcuni punti che, collimati e collegati fra loro, generano una rete di triangoli

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

aventi i lati in comune a due a due. L'ordine di grandezza del triangolo individuato definisce la tipologia del rilievo:

- Geodetico, con lato superiore ai 10km. In queste situazioni si parla di trigonometria sferica, caratterizzata da misure molto accurate;
- Topografico, con lato inferiore ai 10km. In questo caso si applica la trigonometria piana ed è caratterizzata da misure meno accurate o grezze.

I vertici dei triangoli, detti trigonometrici o punti geodetici, hanno la peculiarità di essere scelti in modo da garantire la massima intervisibilità reciproca, caratteristica ad ora non più richiesta grazie all'applicazione integrativa di sistemi basati su tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Di conseguenza essi vanno a costituire una rete di appoggio per i conseguenti rilievi topografici. A tal proposito le procedure consequenziali corrette per effettuare un congruo rilievo topografico prevedono:

- Individuazione dei vertici trigonometrici (con coordinate note misurate con elevata precisione), costituiscono i punti chiave della triangolazione formando la rete di appoggio o una rete di stazione permanente;
- Impostazione della rete d'inquadramento;
- Impostazione della rete di raffittimento;
- Reti poligonali o reti di appoggio;
- Rilievo metrico di dettaglio.

La componente di intervisibilità ha costituito uno dei limiti fondamentali per la pratica tradizionale della triangolazione. Ciò è stato risolto adeguatamente dal metodo topografico satellitare basato su *GPS/GNSS*, che concede la

definizione dei vertici fondamentali in maniera più precisa non richiedendo l'intervisibilità dei vertici da misurare anche in caso di rilievo topografico a fini architettonici che in caso di limitata ampiezza.

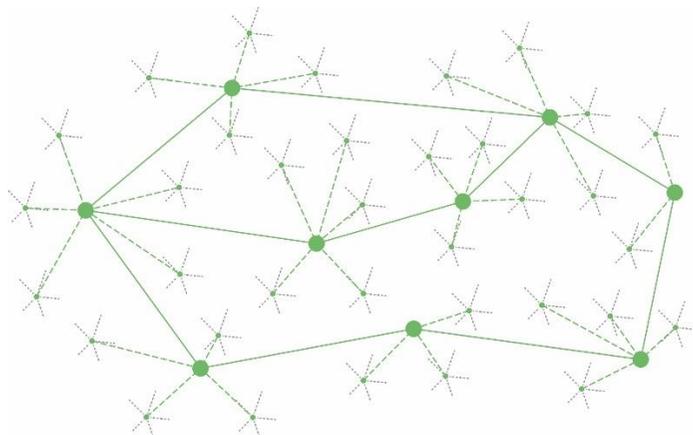


Figura 41 - Schema rappresentativo della copertura di un'area da rilevare. Bisogna notare che i punti sono in numero crescente passando da una rete di inquadramento (poligonale verde), al raffittimento (punti minori verdi) fino alla scala di dettaglio (linee tratteggiate grigie). Rappresentazione: A. Ursini.

4.3 Laser scanner

Lo strumento da noi utilizzato viene definito *laser scanner* ed è in grado di emettere e proiettare una *lama di luce*⁶³. Questo strumento appartiene alla

63 - La cosiddetta *lama di luce* è generata grazie alla riflessione di un raggio laser al di sopra di uno specchio roteante, che man mano viene registrato da una camera digitale interna in posizione disassata, definendo le coordinate spaziali al segmento illuminato.

classe dei sensori ottici attivi, ossia a quelli strumenti atti alla misurazione di oggetti a distanza in maniera non invasiva, in grado di restituire, a posteriori, una nuvola densa di punti orientati nello spazio, contraddistinti da coordinate $[X, Y, Z]$ rispetto al centro strumentale.

Ciò è reso possibile grazie alla cosiddetta tecnologia *LASER* (*Light Amplification by the Simulated Emission of Radiation*), ossia sistemi in grado di emettere un fascio di luce sull'oggetto del rilievo e che, grazie a radiazioni luminose elettromagnetiche corte a singola frequenza, è in grado di ritornare alla sorgente che l'ha emessa.

Questa tecnologia viene anche definita con tecnica *LiDAR*, acronimo di *Light Imaging Detecting And Ranging* ed è, qualora lo strumento disponga di sensori in grado di misurare gli angoli per la direzione del raggio, in grado di fornirci le coordinate spaziali superficiali dell'oggetto di rilievo, in modo automatico e con alta velocità di intervento.

Il *laser scanner* utilizzato per questo tipo di operazioni è dotato di un distanziometro interno accoppiato a un sensore ad alta precisione, ed è capace di emettere impulsi *laser* a ripetizione e registrarne in automatico la relativa distanza. Oltre a rilevare la distanza, alcuni *scanner* possiedono anche sensori in grado di acquisire i dati *RGB* (*Red Green Blue*) e della riflettanza delle superfici analizzate, immagazzinando così parametri relativi ai colori delle superfici misurate.

In base alle modalità operative di funzionamento, gli *scanner* sono distinti in due tipologie differenti:

- *Ranging Scanner*, ossia a misura diretta;
- *Triangulation Scanner*, ossia a triangolazione.

4.3.1 Ranging Scanner

I *laser scanner* appartenenti a questa tipologia sono quelli maggiormente utilizzati e il principio teorico su cui si basa questa tecnica di rilevamento è definito *tempo di volo*. Questi strumenti infatti sono in grado di misurare, oltre alla direzione di puntamento, il tempo richiesto dall'impulso *laser* per raggiungere la superficie di rilievo e tornare indietro fino al sensore ricevente, misurandone istantaneamente il *TOF (Time Of Flight)*, con precisione leggermente inferiore rispetto agli strumenti *laser scanner triangolatori*.

Il principio del *TOF* sfrutta il calcolo del tempo impiegato dal segnale emesso per tornare allo strumento, seguendo la formula:

$$d = \frac{\Delta t * v}{2}$$

In cui:

d = distanza da calcolare tra *scanner* e oggetto;

Δt = tempo trascorso tra emissione del raggio luminoso e la sua ricezione;

v = velocità di propagazione dell'impulso *laser*, $3 \cdot 10^8$ [$\frac{m}{s}$].

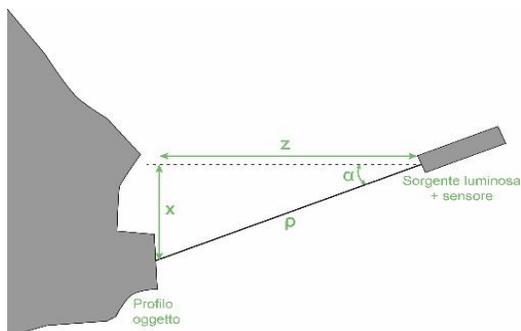


Figura 42 - Schema del principio di tempo di volo (TOF). Rappresentazione: A. Ursini.
 Fonte: GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti...*, op. cit., p. 174.

Conoscendo l'angolo verticale e orizzontale dell'emissione del raggio potremo definire le coordinate del punto misurato sull'oggetto. Questi *laser scanner* si caratterizzano per l'abilità di rilevare dati molto distanti dalla fonte emissiva, arrivando addirittura a un raggio di 6km.⁶⁴

A causa dell'altissima velocità della luce infatti, sistemi di questo tipo hanno un'incertezza della misura che difficilmente scende al di sotto dei 2 mm, circa 20 volte peggiore rispetto a quelli a triangolazione. Questa incertezza però non risulta influente sulle superfici di grandi dimensioni, per esempio edifici o interi siti, come nel nostro caso.⁶⁵

64 - Fonte: <https://www.microgeo.it/it/quante-tipologie-di-laser-scanner-esistono.aspx>

65 - GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 175.

Un esempio di strumento *laser scanner* a misura diretta è il *Laser Scanner* RIEGL VZ-400i [Figura 43] che concede, tramite connessione *Internet*, un flusso di dati in tempo reale, abilitato attraverso piattaforme idonee di trasformazione, acquisizione dati ed elaborazioni di forme d'onda.

Figura 43 - *Laser Scanner* RIEGL VZ-400i. Fonte: <https://www.microgeo.it/it/laser-scanner-full3d-multipletargets/laser-scanner-riegl-vz400i.aspx>



4.3.2 *Triangulation Scanner*

Gli *scanner* a triangolazione, a differenza di quelli a misura diretta, a volte possono avvalersi di un proiettore in grado di emettere un *pattern luminoso*, definito come luce strutturata, e sono caratterizzati da una distanza fissa e nota tra l'emettitore di impulsi ed il ricevitore, definito come *base line*.

Questa tecnologia concede di ottenere rilievi ad elevate precisioni, arrivando all'ordine di grandezza del decimo di millimetro, ma sono vincolati dalla distanza operativa di rilievo che non può superare i due metri dall'oggetto [Figura 44].

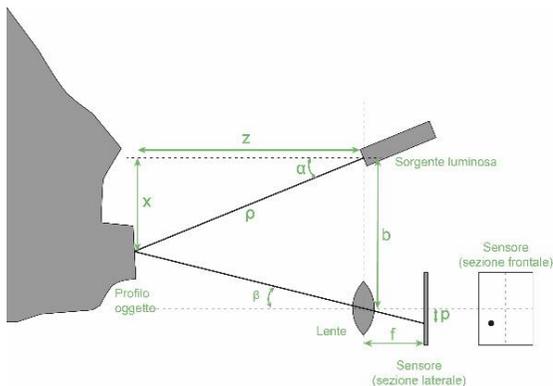


Figura 44- Schema rappresentativo del principio di rilievo di rilievo di uno scanner 3D a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser. Rappresentazione: A. Ursini. Fonte: GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., Principali tecniche e strumenti..., op. cit., p174.

I proiettori infrarossi a oggi permettono di proiettare fino a 300'000 raggi 60 volte al secondo, concedendo l'acquisizione 3D in movimento e in tempo reale. Questi laser scanner si caratterizzano per l'elevata maneggevolezza d'uso e per l'abilità di scansionare zone d'ombra non rilevabili con i laser scanner di altra tipologia.⁶⁶



Figura 45 - FARO Freestyle 3D. Fonte: <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/triangolatori--alta-precisione/faro-freestyle-3d.aspx>

Un esempio di questa tipologia di laser scanner è il modello Freestyle 3D prodotto dall'azienda FARO [Figura 45].

66 - Fonte: <https://www.microgeo.it/it/quante-tipologie-di-laser-scanner-esistono.aspx>

È uno strumento molto compatto ed intuitivo; è adatto a tutte le applicazioni che richiedono una rapida acquisizione di dati da diverse prospettive o angolazioni fornendo una superficie istantanea di scansione fino ad 8 m². I campi di applicazione spaziano dal settore delle costruzioni alla produzione industriale fino al settore forense.⁶⁷

4.4 Tecniche fotogrammetriche

Le tecniche fotogrammetriche sono quelle che si basano sull'utilizzo di sensori ottici passivi, come le macchine fotografiche e rappresentano i sistemi più completi, precisi e rapidi a parità di costi.

La fotogrammetria è in grado di ottenere informazioni metriche e geometriche legate alla dimensione e alla posizione dell'oggetto di rilievo. Ciò è possibile mediante l'interpretazione e l'analisi di almeno due fotogrammi dello stesso oggetto ripreso da punti diversi, restituendo informazioni mediante l'uso di semplici immagini e basandosi sui principi dell'ottica, della fotografia e, in particolare, basandosi sulle regole della prospettiva inversa: un'immagine fotografica, infatti, può essere paragonata ad una proiezione centrale dalla quale, tramite modelli analitici e grafici, è possibile stabilire le posizioni dei punti nello spazio. La possibilità di lavorare direttamente su immagini fotografiche permette un'elevata ottimizzazione delle condizioni operative, limitando la probabilità di commettere errori grossolani, numerici o interpretativi.

67 - Fonte: <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/triangolatori--alta-precisione/faro-freestyle-3d.aspx>

La fotogrammetria è nata principalmente per essere applicata al rilievo architettonico, ma attualmente viene utilizzata anche in campo topografico per il rilievo del territorio.

Le peculiarità dei sensori passivi utilizzati in termini di tipologia di sensore, distanza dall'oggetto, ottica, stabilità e costo, incidono direttamente sull'accuratezza dell'elaborazione fotogrammetrica, e possono essere raggruppati in:

- Fotogrammetria terrestre, che sfrutta sistemi fotografici terrestri;
- Fotogrammetria aerea, che sfruttano sistemi fotografici installati su mezzi aerei o *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*.

Un'ulteriore distinzione può essere effettuata in relazione agli approcci e alle metodologie di restituzione dei dati, distinguendo le tecniche fotogrammetriche in:

- *Convenzionale*, se sfrutta l'approccio stereoscopico nella restituzione;
- *Non convenzionale*, quando utilizza opportuni *software* dedicati

Nel nostro caso, si è sfruttata la fotogrammetria aerea con *UAV*, con successiva elaborazione non convenzionale tramite il *software* di *Structure From Motion open-source MicMac*. Più avanti verranno descritti in maniera più dettagliata i passaggi eseguiti ed i risultati ottenuti.

4.4.1 *SFM – Structure From Motion*

La tecnica *Structure From Motion (SFM)* applicata al campo della fotogrammetria digitale è una successione di processi automatizzati, tramite *software* dedicati, che consente la restituzione tridimensionale dei punti superficiali di

un oggetto (*Structure*) in relazione alla posizione ed orientamento della camera di presa (*Motion*).

Questa tecnica si basa fondamentalmente su sistemi ed algoritmi legati al *computer vision*, determinando parametri ignoti ma necessari al calcolo e alla costruzione di un modello 3D, restituendone coordinate, posizioni e orientamenti delle singole prese fotografiche in maniera totalmente automatica, riducendo drasticamente il tempo generale della restituzione e soprattutto le tempistiche di intervento dell'operatore.

Questa tecnica negli ultimi anni si è evoluta in maniera significativa, introducendo nel mercato numerosi *software* dedicati, sia in versione *open-source* che commerciali, ma basati tutti sull'analisi dei punti omologhi del *set* di immagini ottenute in fase di rilievo.

Gli algoritmi interni si basano sul passaggio fondamentale di individuazione automatica dei punti caratteristici delle immagini, denominati *features*, applicandogli una identificazione univoca anche in immagini diverse, in cui vi è possibile variazione delle condizioni spaziali, prospettiche o luminose.

L'individuazione dei *features* pertanto costituisce il ruolo centrale e fondamentale di tutto il procedimento *SFM*, consentendo così di eliminare il processo di individuazione manuale dei punti omologhi da parte dell'operatore, passaggio che, prima dell'avvento di questi *software*, richiedeva decisamente una quantità di tempo rilevante per tutto il processo fotogrammetrico.

Negli ultimi tempi, il metodo *SFM* è stato notevolmente integrato, ampliando gli algoritmi e rendendoli in grado di effettuare la comparazione e corrispondenza tra i diversi *pixel* delle immagini del rilievo, andando a costituire il cosiddetto *dense image matching*. Quest'ultima operazione andrà

sostanzialmente a creare una nuvola densa di punti sparsi, in riferimento ad un oggetto rilevato e fotografato da diverse posizioni, ottenuto mediante il riconoscimento automatico da parte dei software delle caratteristiche corrispondenti visibili.

Al fine di ottimizzare la restituzione, ed aumentarne la precisione, numerosi *software* utilizzano il metodo del *bundle adjustment* o fasci proiettivi. Questo metodo va a definire per ogni singolo fotogramma, o immagine, i corrispettivi orientamenti interni ed esterni, eliminando l'accumulo di errori per ogni iterazione dell'algoritmo.

Andando quindi ad accostare la tecnica *SFM* all'algoritmo di *dense image matching*, è possibile costruire un modello 3D senza conoscere i parametri esatti di orientamento delle singole prese fotografiche, costituendo un processo di lavoro totalmente automatizzato e computerizzato.

La tecnica *SFM*, perciò, si configura come una fondamentale risorsa per il rilievo, soprattutto considerando la molteplicità degli strumenti presenti sul mercato dedicati all'acquisizioni di immagini volte alla ricostruzione tridimensionale di un oggetto.

Come si può ben immaginare, le strumentazioni richieste dalla tecnologia *Lidar*, risultano essere finanziariamente inaccessibili per il dilettante o per lo studente; in questo scenario la fotogrammetria elaborata con tecnica *SFM* e *software open-source* (come *MicMac*, *Blunder*, *PMVS*, *VisualSFM*) risultano essere una valida soluzione per il rilievo, anche sfruttando sensori ottici di smartphone, webcam, fotocamere digitali.

Va però puntualizzato che, come in ogni caso di elaborazione di immagini, il problema principale della tecnica *SFM* per la restituzione 3D dell'oggetto

rilevato, sta nella qualità delle immagini catturate nei diversi punti di vista. Non rispettare dei buoni *standard* di acquisizione, o qualità di immagine, può indurre l'elaborazione a grandi possibilità di fallimento negli *step* successivi di produzione. Per evitare di incorrere in queste problematiche, è fondamentale acquisire le immagini seguendo i canoni totalmente opposti a quelli che si utilizzerebbero per ottenere una vista panoramica: al posto di acquisire numerose immagini nelle diverse direzioni dallo stesso punto di stazionamento, occorre focalizzarsi sul singolo oggetto acquisendolo da più angolazioni possibili, col fine di identificare più punti comuni ben visibili sul maggior numero di immagini.⁶⁸

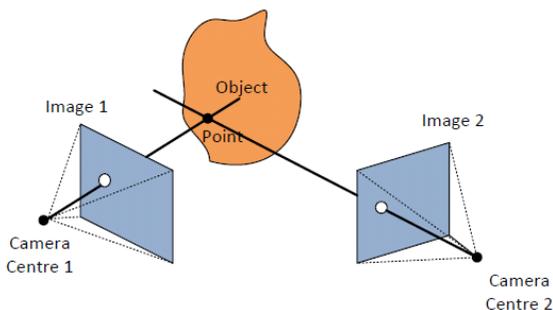


Figura 46 - Esempio di presa fotografica ai fini fotogrammetrici. Fonte: <https://www.gim-international.com/content/article/dense-image-matching-2>

Bisogna però notare che la combinazione di diversi punti di presa, e quindi posizioni spaziali differenti tra oggetto e punto di presa, comporta un'elevata

68 - Fonte: M FRIEDT J., *Photogrammetric 3D structure reconstruction using Micmac*, 5 September 2014

variazione di scala e rotazione delle immagini, rendendo l'elaborazione in *SFM* molto delicata.

Le analisi multiscala e le opportune rotazioni dei fotogrammi perciò sono state implementate negli ultimi anni, introducendo nei *software* dedicati il cosiddetto algoritmo *SIFT* (*Scale-Invariant Feature Transform*), pubblicato da David G. Lowe nel 1999, riuscendo a colmare alcune lacune di correlazione incrociata.⁶⁹ A tal proposito, l'identificazione automatica ed incrociata delle caratteristiche di riferimento ben visibili in tutte le immagini, risulta essere un aspetto fondamentale della successiva catena di elaborazione, ma risulta essere solo il primo passo per la ricostruzione delle nuvole dense di punti da fotogrammetria, essendo funzione anche delle proprietà ottiche dell'obiettivo e della posizione della camera in fase di ripresa, e della complessiva qualità delle immagini.

In questo caso specifico si è deciso di utilizzare il *software SFM MicMac* in quanto racchiude al suo interno tutti gli algoritmi sopracitati. È uno strumento *open-source* molto versatile ed è inoltre in grado di recuperare ed analizzare tutte le condizioni di acquisizioni delle immagini in termini di posizioni della fotocamera, proprietà dell'obiettivo, lunghezza focale dell'obiettivo.

Le condizioni necessarie per l'utilizzo di tale *software*, rispecchiavano la nostra casistica, in quanto tutte le immagini dedicate all'elaborazione fotogrammetrica sono state acquisite dalla stessa fotocamera, nelle stesse condizioni di illuminazione, evitando l'utilizzo di *flash*, e mantenendo un'abbondante

69 - Fonte: LOWE DAVID G. "Object recognition from local scale-invariant features", in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, vol.2, 1999, pp. 1150-1157

sovrapposizione tra un'immagine e l'altra, mantenendo costante la lunghezza focale della camera digitale.

4.5 Fotogrammetria aerea con UAV

Tra le tecniche di rilievo avanzate, negli ultimi decenni, sono state implementate le tecniche di presa fotogrammetrica aerea.

Con la fotogrammetria aerea si è in grado di restituire i dati metrici di un'oggetto, in termini di dimensione, forma e posizione, attraverso l'analisi di coppie o più fotogrammi contigui, sfruttando il principio ottico della stereoscopia.

Le prime fotografie aeree vengono attribuite al francese Gaspard Félix Tour-nachon (detto "Nadar") nel 1855, che scattò le prime immagini a bordo in un aerostato. A fine dell'800, le prime foto aeree scattate in Italia vennero effettuate sul Foro Romano tramite una camera posta su di un pallone aerostatico.

Nei primi anni del 1900, lo spaziale tedesco Julius Neubronner, appassionato di fotografia, montò delle camere automatiche dal peso ridotto (30-75 grammi) su alcuni piccioni viaggiatori, testando il sistema di foto aeree portando il piccione a 100 km da casa.

A causa del peso del dispositivo il piccione tendeva ad intraprendere il percorso più breve per potersene liberare, ma al contempo riuscendo a scattare foto da circa 50-100 m dal suolo.



Figura 47 – (In alto) Foto aeree di Francoforte scattate dal sistema di Julius Neubronner nel 1914. (In basso) Piccioni con imbracature e fotocamere utilizzate. Fonte: <http://www.steamfantasy.it/blog/2012/01/07/i-piccioni-fotografi-di-neubronner/>

Negli anni successivi, di pari passo allo sviluppo dei mezzi nel settore aeronautico, vennero effettuati i primi esperimenti con camere installate su aeromobili ad ala fissa, utilizzati prettamente in ambito militare.

La fase successiva fu quella di iniziare catalogare e descrivere i pro e i contro dei sistemi disponibili in funzione del range di misura, durata di volo, influenza del vento e manovrabilità complessiva [Tabella 2].

Confronto tra i vari sistemi				
Sistema	Range	Durata volo	Vento	Manovrabilità
Pallone aerostatico	Scarso	Ottima	Molto influente	Scarsa
Aquiloni	Buono	Bassa	Molto influente	Scarsa
Aerei ad ala fissa	Ottimo	Alta	Scarsa influenza	Buona

Tabella 2: Schema di confronto tra i vari sistemi di acquisizione fotografica aerea.

Come già detto, le acquisizioni fotografiche aeree sono sperimentate da diverso tempo ed applicate a diversi settori, arrivando, al giorno d'oggi, ad essere utilizzate dall'ambito militare a quello civile, fino al settore del monitoraggio ambientale o dei beni culturali ma anche a quello cinematografico.

L'utilizzo maggiore della fotografia aerea in ambito architettonico è legato alla tecnica della fotogrammetria aerea, effettuata con camere digitali applicate a UAV, volte alla realizzazione di fotografie georeferite e ad alta risoluzione; questa tecnica trova larga applicazione in relazione alla cartografia, la geologia e all'archeologia. Ciò è possibile grazie ad un'adeguata modellazione tridimensionale, derivata dall'uso delle tecniche stereoscopiche e dalle correlazioni analitiche ed ottiche, arrivando ad ottenere un processo in grado di restituire e modellare un oggetto 3D vero e proprio.

In ambiti legati al rilievo, l'utilizzo di *software* in post processing e di *editing*, consentono l'estrapolazione di nuvole di punti dense e georeferite dell'oggetto o dell'area d'interesse.

4.5.1 UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*

I mezzi aerei non convenzionali, con volo pilotato da remoto e senza presenza fisica di pilota a bordo, sono definiti *UAV*, dall'inglese *Unmanned Aerial Vehicle*. Sono mezzi radio comandanti, di diverse dimensioni e caratteristiche, in grado di volare a quote più basse degli aerei convenzionali, in maniera più stabile, agevole ed in maggior sicurezza. Questi mezzi sono solitamente dotati di camere digitali compatte ad alta risoluzione, in grado di acquisire set di immagini fotografiche o video in posizione nadirale o obliqua.

Gli *UAV* sono stati sviluppati per la prima volta a partire dagli anni '50 fondamentalmente per scopi militari, ma hanno subito un notevole sviluppo ed implementazione anche nel campo del rilievo, sia architettonico che archeologico, o ambientale e territoriale.

La notevole maneggevolezza e versatilità delle camere da presa che possono essere applicate agli *UAV*, rendono questi strumenti idonei a diverse applicazioni quali, ad esempio, in caso di eventi naturali distruttivi, come terremoti, per la documentazione fotografica degli edifici danneggiati, che in alcuni casi risultano essere difficilmente raggiungibili. In base all'equipaggiamento adottato, alle caratteristiche e ad i parametri di volo necessari, gli *UAV* possono essere utilizzati per:

- *Video e foto aere*: applicabili in diversi settori, sia in applicazioni commerciali e cinematografiche come nella cartografia o in geologia, con set fotografici ad alta risoluzione e georeferiti;
- *Analisi multispettrali*: legate allo studio, tramite variazioni di lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico emesso, dello stato di

conservazione degli edifici o in campo geologico, costituendo una tecnica non invasiva in grado di analizzare le superfici a diversi livelli di profondità;

- *Mappatura termica*: sostituendo la camera digitale con una camera termica è possibile analizzare il grado di irraggiamento dell'oggetto inquadrato, ed è una tecnica basata sull'acquisizione in infrarosso delle immagini, utilizzato in ambito civile o militare.

L'utilizzo dell'*UAV*, e delle fotografie aeree, costituiscono inoltre uno strumento molto utile ai fini delle modellazioni tridimensionali, associando le immagini ottenute alle tecniche sopracitate.

La versatilità di questi strumenti è evidente anche osservando le classificazioni indicate dal *Unmanned Vehicle System International Association*, che racchiude tutti i mezzi presenti in commercio in tre possibili classi di utilizzo: *Tactic*, *Strategic* e *Special Purpose*.

Quelli dedicati al campo architettonico e, più nello specifico, impiegati in sede di rilievo, rientrano nella categoria *Tactic*, e com'è possibile osservare nella seguente tabella [Tabella 3], sono diversificati e normalizzati in base a categorie di peso.

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

Tabella 3: Classificazione degli UAVs Tactic a cura della Unmanned vehicle System International Association. Fonte: CHIABRANDO F., LINGUA A., MASCHIO P., RI-NAUDO F., SPANO A., *Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico*, in "Una giornata informale per i 70 anni del Prof. Carlo Monti, 3 maggio 2012", 2012, p.1.

Attualmente in commercio è possibile trovare due diverse tipologie principali di drone appartenenti alla categoria Tactic:

- *Multi-rotore*: dedicato ad applicazioni su porzioni limitate, ma dotati di elevata precisione
- *Ala fissa*: dedicato ad applicazioni ad ampio raggio, con perdita in termini di precisione ma per raggiungere quote più elevate.



Figura 48 - Esempio di *UAV* multirottore (a sinistra) e *UAV* ad ala fissa (a destra)

In campo architettonico le sottocategorie maggiormente utilizzate sono quelle *Micro* e *Mini*, con capacità di volo inferiore ai 10km, fino ad una quota massima consentita di 300m, ed in genere hanno un'autonomia massima di volo di circa 1 ora e mezza. Il peso è variabile a seconda del modello e della tipologia di applicazione, ma normalmente è al di sotto dei 20kg: quelli di categoria media si aggirano intorno ai 4kg.

Tendenzialmente il mezzo *UAV* con cui effettuare il rilievo viene scelto in base a diverse considerazioni, a partire da quella economica o in funzione della qualità del lavoro da effettuare. In generale risultano essere strumenti economicamente accessibili, dalle dimensioni contenute ed in grado di operare a bassa quota, in aree poco accessibili e a distanze ravvicinate.

Alcune limitazioni degli *UAV* sono legate alle condizioni meteo, che potrebbero interferire con le fasi di acquisizione.

5. L'acquisizione dei dati

5.1 Gli strumenti utilizzati

Per l'acquisizione dei dati sono state applicate le tecniche precedentemente indicate.

Come già accennato, per ottenere un rilievo metrico dettagliato del Complesso di Nazareth si è deciso di utilizzare una combinazione di più strumenti, destinati alla realizzazione di diverse tipologie di acquisizioni dati.

Per le acquisizioni topografiche abbiamo utilizzato prettamente la tecnica tradizionale, adoperando una stazione totale combinata a dei prismi topografici, ottenendo così l'acquisizione delle misure relative alla rete topografica di base. Nel nostro caso, ci siamo serviti della stazione totale *Leica Nova Scan Station*, in combinazione con due tipologie di prismi ottici.

Per quanto riguarda la rete di dettaglio interna ed esterna si è utilizzato il *laser scanner Cam 2* prodotto dall'azienda *Faro*, mentre le porzioni mancanti dalle scansioni laser e le coperture sono state acquisite tramite fotogrammetria aerea da UAV, utilizzando il *Phantom 4 PRO*, commercializzato dal marchio *DJI*.

Di seguito verranno riportate alcune caratteristiche e delle specifiche delle strumentazioni e, successivamente, le procedure effettuate per l'acquisizione del rilievo.

5.1.1 Stazione totale Leica Nova Scan Station

Nova è una stazione totale prodotta dall'azienda Leica, leader nel settore degli strumenti topografici e di misurazione.

La Nova serie MS50 da noi utilizzata, appartiene alle ultime serie di stazioni totali prodotte da questo marchio, ed ha la peculiarità di essere uno strumento molto versatile, adattabile automaticamente ed in molte condizioni operative, nonché è dotata di un *software* interno all'avanguardia capace di un'elaborazione interna dei punti 3D appena acquisiti.

Questo strumento inoltre è in grado di bloccare il puntamento su un bersaglio mobile e seguirlo in piccoli spostamenti automatici.⁷⁰ L'utilizzo di questa stazione totale inoltre è molto facilitato dalla presenza di uno schermo *touch-screen* di 5" sul quale è possibile visualizzare e manipolare i dati in tempo reale.



Figura 49 - Stazione totale *Leica Nova Scan Station* serie MS50 utilizzata durante la fase di rilievo. Foto: A. Ursini

70 - Fonte: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/multistation/leica-nova-ms60>

Assieme all'utilizzo della stazione totale, è necessaria la presenza di un elemento target, in stazione sul secondo punto da collimare al fine di misurarne gli angoli zenitali e azimutali e la distanza, annotando anche l'altezza verticale strumentale.

Questo elemento viene definito *prisma* ed è caratterizzato da una superficie riflettente in grado di riflettere l'impulso in arrivo dalla stazione totale. Nel nostro caso sono state utilizzate due tipologie diverse di prismi riflettenti:

- Prisma piatto *Leica GPR111*: adoperato, su treppiede, per il rilievo dei vertici trigonometrici;
- Prisma *Leica 360°*: utilizzato, su palina, per il rilievo dei *marker* fotografici posizionati a terra.



Figura 50 - Prisma GPR111 su treppiede (a destra) e prisma 360° su palina regolabile (a sinistra). Foto: A. Ursini.

5.1.2 Laser scanner FARO CAM 2 Focus 3D

Il CAM2 Focus 3D è uno scanner tridimensionale ad alta velocità, ideale per le misurazioni e le documentazioni 3D dettagliate prodotto dall'azienda FARO. Focus 3D si avvale di una tecnologia tale da produrre nell'arco di pochi minuti precise immagini tridimensionali di geometrie complesse dell'ambiente circostante. Questo laser scanner è dotato di un *display touchscreen* attraverso cui è possibile controllare le numerose funzioni di scansione. L'immagine risultante sarà costituita da un insieme di milioni di punti di misura 3D, a colori con risoluzione fino a 70 *megapixel*, costituenti un'esatta riproduzione digitalizzata dell'ambiente in condizioni reali. È caratterizzato da dimensioni notevolmente contenute, peso ridotto e facilità di utilizzo.⁷¹



Figura 51 - Laser scanner Faro CAM 2 Focus 3D in fase di rilievo.

Foto: A. Ursini.

71 - Fonte: <https://www.infobuild.it/prodotti/cam2-laser-scanner-focus-3d/#>

L'adozione di questo strumento, quindi, presenta i seguenti vantaggi:

- Efficienza, precisione di misurazione e documentazione;
- Dimensioni compatte;
- Semplicità di gestione dei dati tramite scheda SD;
- Utilizzo *stand-alone* (senza ausilio di PC portatile)
- Fotocamera a colori integrata.

Di seguito sono riportate alcune specifiche dello strumento [Tabella 4]

Tabella 4 - Specifiche del *laser scanner FARO CAM2 Focus 3D*

Specifiche FARO CAM2 Focus 3D	
Range Focus 3D x 130	0.6 – 130 [m]
Velocità di misurazione	Fino a 976.000 punti/s
Errore di linearità	± 2 mm
Macchina fotografica a colori integrata	Fino a 70 milioni di pixel
Classe laser	<i>Laser classe 1</i>
Peso	5.2kg
Multi-Sensor	<i>GPS</i> , bussola, sensore di altezza, compensatore biassiale.
Dimensioni	240 x 200 x 100 mm
Controllo dello scanner	Tramite <i>display touchscreen</i> e <i>WLAN</i>

5.1.3 UAV – DJI Phantom 4 PRO

Per il rilievo fotogrammetrico aereo tramite UAV è stato utilizzato il modello *Phantom 4 PRO*, prodotto dalla compagnia tecnologica cinese *DJI*. Questo modello è tra i più compatti presenti sul mercato, ma si avvale di una notevole composizione tecnologica. È dotato di una telecamera stabilizzata su tre assi da 20 megapixel, con sensore ottico da 1 pollice in grado di acquisire foto e video con risoluzione 4 K a 60 fps (*frame per secondo*).

Il Phantom 4 PRO è dotato del sistema *FlightAutonomy*, ossia un sistema di volo autonomo, che include sensori visivi ed infrarossi a 360 gradi con sistema integrato di protezione dagli ostacoli e mantenimento della posizione. Il radio comando ha una portata massima di 3.5 km (omologato CE) e permette la visualizzazione in tempo reale dei dati e delle immagini di volo tramite *smartphone* o *tablet*.⁷²

Il telaio, realizzato in magnesio e titanio, è molto resistente ma leggero, conferendo una notevole maneggevolezza al mezzo, indispensabile per eseguire le operazioni di acquisizione fotografica in un contesto pieno di ostacoli naturali come il nostro.



Figura 52 - Il multirottore *Phantom 4 PRO* a terra, in fase di preparazione per l'acquisizione delle immagini. Foto: A. Ursini

72 - Fonte: <http://www.dji.com/it/droni-dji/dji-phantom-4-pro-detail>

Di seguito sono riportate alcune delle specifiche del velivolo [Tabella5].⁷³

Tabella 5 - Specifiche principali del DJI Phantom 4 PRO

Drone DJI Phantom 4 PRO	
Peso (batteria ed eliche incluse)	1388 grammi
Dimensione diagonale (eliche escluse)	350 mm
Velocità massima orizzontale	72 km/h in S-mode 58 km/h in A-mode 50 km/h in P-mode
Velocità massima di salita	6 m/s (22 km/h) in S-mode 5 m/s (18 km/h) in P-mode
Velocità massima di discesa	4 m/s (14 km/h) in S-mode 3 m/s (11 km/h) in P-mode
Precisione di Volo	Verticale: ± 10 cm (sensori) oppure ± 50 cm (GPS) Orizzontale: ± 30 cm (sensori) oppure ± 150 (GPS)
Altitudine massima	6000 m

73 - Fonte: <https://www.dji.com/it/phantom-4-pro/info>

Fotocamera	
Sensore	CMOS 1" 20 <i>Megapixel</i> effettivi
Obiettivo	FOV 84° 8.8mm/24mm (equivalente 35mm) f2/8 – f/11 messa a fuoco automatica
Intervallo ISO	Video: 100-3200 (automatico) 100 - 6400 (manuale) Foto: 100 - 3200 (automatico) 100- 12800 (manuale)
Velocità otturatore meccanico	8 - 1/2000 s
Velocità otturatore elettronico	8 - 1/8000 s
Formato foto	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG
Formato video	MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)

5.1.4 *I marker o target artificiali*

Sono dei supporti artificiali fondamentali per il rilievo di un qualsiasi oggetto nello spazio. Sono elementi fisici indispensabili per il processo di orientamento e georeferenziazione delle nuvole di punti generate con le varie tecniche sopra esposte, in quanto costituiscono, oltre ai vertici topografici, gli unici punti materializzati nello spazio aventi coordinate e georeferenziazione nota tramite rilievo diretto.

Sono fondamentalmente degli elementi piatti, colorati o in bianco-nero, e sono generalmente elementi quadrati che sono applicati sulle superfici caratteristiche di un elemento da rilevare.

I target devono avere due caratteristiche fondamentali per svolgere la propria funzione:

- Alta visibilità: devono essere ben visibili e distinguibili in fase di acquisizione tramite *laser scanner* o fotogrammetria aerea;
- Facile individuazione del loro centro: è fondamentale per attribuirvi con precisione, in fase di post-produzione, le coordinate rilevate.

Per consentire una più agevole acquisizione nelle fasi di rilievo, è opportuno che i target siano anche:

- Trasportabili facilmente in sito;
- Posizionabili agilmente a terra o sulle superfici;
- Rimovibili al termine delle operazioni;
- Leggeri;
- Adattabili alle caratteristiche del terreno.

Nel nostro caso sono stati utilizzate due diversi formati di target, entrambi quadrati, ma aventi dimensioni e colorazioni diverse:

- Target bianco-nero dimensioni 10x10 cm: applicato sulle superfici caratteristiche del Complesso di Nazareth;
- Target multicolore dimensioni 50x50 cm: utilizzato come *marker* fotografico per le acquisizioni fotogrammetriche aeree.



Figura 53 - *Marker* superficiali 10x10 (a sinistra); target fotografici 50x50 (a destra).

Foto: A. Ursini.

5.2 Il rilievo

La campagna di rilievo ed acquisizione dati del Complesso di Nazareth nel Sacro Monte di Varallo è stata condotta in due momenti diversi. La prima fase ha portato, dopo la preparazione del progetto di rilievo, all'acquisizione della quasi totalità dei dati tramite diverse operazioni in simultanea, effettuate nell'arco della giornata. Sono state eseguite le seguenti attività:

- Individuazione di due vertici trigonometrici delle precedenti campagne di rilievo (effettuate per la Tesi Magistrale dello studente Francesco Coniglione);
- Materializzazione dei nuovi vertici trigonometrici;
- Posizionamento dei *marker* a terra (per il rilievo con *UAV*);
- Posizionamento dei *marker* superficiali (per il rilievo topografico e *LiDAR*);
- Rilievo celerimetrico dei *marker* con stazione totale;

- Triangolazione con prisma dei *marker* a terra;
- Redazione delle monografie dei vertici trigonometrici;
- Redazione degli eidotipi per i *marker* superficiali;
- Scansioni tramite *laser scanner*;
- Acquisizione immagini aeree tramite *UAV*.

In contemporanea sono state effettuate anche delle acquisizioni fotografiche di supporto alla documentazione e alla successiva fase di elaborazione.

Non potendo accedere, nella prima fase di rilievo, in tutti i locali del Complesso di Nazareth per diverse motivazioni, è stato necessario pianificare, assieme al Prof. Marco Zerbinatti, un secondo sopralluogo, il 15 maggio 2018, nel quale è stato possibile ispezionare il vano sottotetto della Cappella 4 con la supervisione di uno dei tecnici dell'Ente di Gestione dei Sacri Monti.

In questa seconda fase è stato possibile acquisire materiale fotografico di supporto per l'identificazione di patologie di degrado, oltre all'individuazione di dettagli utili alla comprensione dell'evoluzione storica del Complesso di Nazareth, compreso il riconoscimento delle porzioni interessate dalla manutenzione straordinaria e sostituzione delle coperture nella cappella 4.

Vista la difficoltà di accesso e la mancata autorizzazione, il rilievo e l'ispezione dei locali interni non sono stati previsti per le porzioni di edificio occupate dalle statue, che risultano essere inaccessibili al personale non autorizzato dall'Ente del Sacro Monte.

Nei successivi paragrafi verranno descritte le operazioni eseguite durante la fase di acquisizione dati.

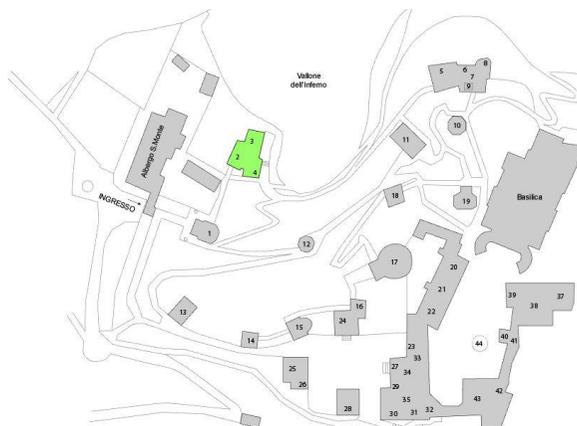


Figura 54 - Planimetria del Sacro Monte di Varallo con evidenziazione delle Cappelle oggetto di rilievo. Rielaborazione a cura di A. Ursini.

5.3 Rete topografica e di raffittimento

Per la determinazione della rete principale di inquadramento, di supporto al rilievo di dettaglio delle superfici del Complesso di Nazareth, sono stati scelti due dei vertici già utilizzati e materializzati nei precedenti rilievi: per l'esattezza sono stati utilizzati i due vertici 23200 e 23300 appartenenti alla campagna di rilievo effettuata per l'elaborazione della Tesi Magistrale dello studente Francesco Coniglione; successivamente si è andati ad interpolare i nuovi vertici tramite procedura convenzionale con stazione totale e prisma [Figura 55].



Figura 55 - Fase di collimazione ottica tra stazione totale e prisma.

Foto: A. Ursini.

Per ottenere una buona maglia topografica, si è proseguito con la materializzazione di altri quattro vertici, seguendo il criterio di intervisibilità reciproca codificandoli con una numerazione crescente (24000, 24100, 24200, 24300, 24600, in nero).

Date le pendenze del vallone, e la presenza di numerosi ostacoli visivi naturali ed artificiali, non è stato possibile garantire un'intervisibilità omogenea per coprire tutta l'area circostante il complesso.



Figura 56 - Fase di collimazione tra la stazione totale sul vertice 24400 e prisma piatto in stazionamento sul treppiede posizionato sul vertice 24200 (sullo sfondo).

Foto: A. Ursini

Per questo motivo sono stati definiti due vertici di raffittimento, 24400 e 24500 (in blu), misurati con la tecnica topografica classica tramite letture effettuate da una stazione totale ad un prisma [Figura 56].

In questo modo è stato possibile generare una rete topografica di appoggio molto solida, in grado di fungere da base per le successive misurazioni di raffittimento interne ed esterne, ottenendo lo schema riportato in figura 57.

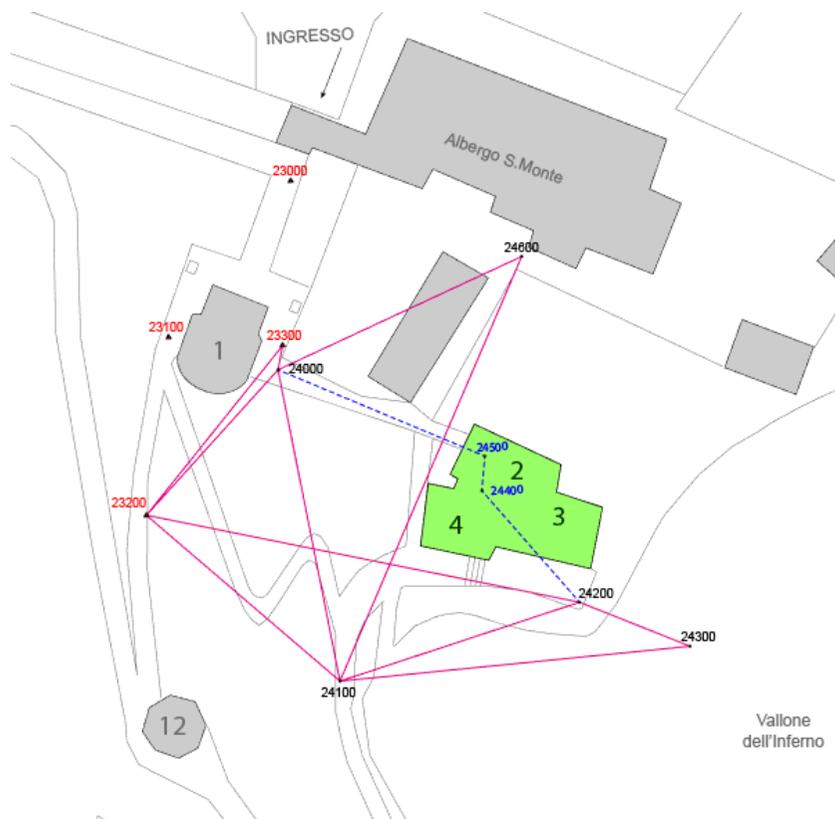


Figura 57 - Schema esplicativo della rete di inquadramento topografico del Complesso di Nazareth. Elaborazione: A. Ursini.

Ogni vertice misurato è stato catalogato attraverso delle monografie [Figura 58] riportate nella sezione “Allegati” della presente Tesi.

INDAGINI GEOMATICHE - I SACRI MONTI DELLA REGIONE PREALPINA	
Sacro Monte di Varallo Complesso di Nazareth	
Data: 5 Dicembre 2017	
Codice Monografia: SMV_Nazareth_02	
Vertice: 24000	
Operatori: Giorgia Nobile, Andrea Ursini	
	
MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO	
	
TIPO DI MATERIALIZZAZIONE: CHIODO	
ACQUISIZIONE FOTO (DISPOSITIVO E PROPRIETARIO): NIKON D3100, ANDREA URSINI	
STRUMENTO DI RILIEVO: STAZIONE	
ALTEZZA STRUMENTALE: 1,645m	STRUMENTO DI MISURA: METRO RIGIDO
TIPO DI ANTENNA:	
DATA: 5/12/2017	
ORA INIZIO ACQUISIZIONE:	OPERATORE: ANDREA MARIA LINGUA
ORA FINE ACQUISIZIONE:	OPERATORE: ANDREA MARIA LINGUA
PROBLEMI EVENTUALI:	
NOTE:	

Figura 58 - Schema rappresentativo delle monografie eseguite sui vertici topografici.

5.4 Rete di dettaglio

5.4.1 Misurazione dei marker

La celerimensura, o rilievo metrico di dettaglio, costituisce l'ultima fase dell'esecuzione di un rilievo metrico. In questa fase sono registrati i punti significativi della struttura, posizionando la stazione totale su un vertice trigonometrico noto, orientando lo strumento verso il punto materializzato da acquisire.

In questa fase, i punti da acquisire sono stati materializzati tramite il posizionamento dei *marker* sulle pareti, o sulle superfici rilevanti della struttura e del terreno circostante.



Figura 59 - Vista esplicitiva dell'applicazione dei *marker* 10x10 sulle superfici interne del passaggio tra la Cappella 2 e la Cappella 3. Foto: A. Ursini.



Figura 60 - In questa immagine è possibile notare la traccia lasciata dall'impulso laser emessa dalla stazione totale durante la fase di acquisizione delle coordinate del centro di uno dei *marker* interni alla struttura. Foto: A. Ursini.

In contemporanea alle fasi di acquisizione dei *marker* sono stati redatti degli eidotipi contenenti i codici di ciascun *marker* o punto registrato. Per la codifica dei *marker* sono stati attribuiti i pedici “*m*” ai *marker* superficiali, e “*f*” ai *target* fotografici a terra.

I dati raccolti sono salvati in formati diversi formati di testo, con estensione *.COR* e *.DAT*, formati utilizzabili nel programma “*Star*net V.7*”, *software* proprietario della stazione totale *Leica* adoperata in questa fase. Di seguito sono riportati due *screenshot* del file ottenuto dalle misurazioni.

```

rete varallo 12 2017.dat - Blocco note
File Modifica Formata Visualizza ?
# Microsurvey STAR*NET V7
#
# This first data file in a new project is created using the customizable
# STAR*NET template data file. You can edit or delete the template, it is
# found in the following (default) location:
#
# Windows XP:
# C:\Documents and Settings\All Users\Application Data\Microsurvey\StarNet\V7\template.dat
#
# Windows Vista/7:
# C:\ProgramData\Microsurvey\StarNet\V7\template.dat
#
# As a quick exercise you can increment and process the following sample data
# to identify and remove any blunders in the network.
#
,DATA OFF
,SD
,ORIGL All romio
C 1 1000.00 1000.00 11 'CONTROL
U 1-2 0 1
D 1 2 100.01
M 1-2-3 90-00-00 100.00
M 2 1 4 90 00 00 95.08
M 3-1-2 45-00-00 191.52
M 4 2 2 90 00 00 100.02
M 4-1-1 45-00-00 161.62
,DATA ON
C 20000 442177.061 5072100.410 500.133 111
C 21000 442205.420 5074212.146 509.898 111
C 22000 442227.405 5072109.815 501.514 111
C 23000 442214.320 5074218.200 501.041 111
C 23100 442191.915 5074262.329 502.033 111
C 23200 442212.405 5074208.737 502.908 111
C 23300 442196.628 5072245.268 504.630 111
DB 23200
DN 24100 117.90235 1.6/-1.665
DN 24000 104.97495 1.6/-1.64
DN 23200 118.1436 1.6/-7.346
DN 23100 114.2858 1.6/-7.131
DN 23000 118.7634 1.6/-8.565
DN 23000 111.1215 1.6/-6.529
DN 23000 118.6765 1.6/-9.872
DN 23200 111.8639 1.6/-4.086
DN m0100 341.8834
DN m0103 348.936
DN m0104 358.5885
DN m0108 92.6283
DN m0109 165.6158
DN F0006 2 338.0099
DN F0001 2 290.1399
DN F0002 285.7772
DN F0100 318.5306

```

```

rete varallo 12 2017.dat - Blocco note
File Modifica Formata Visualizza ?
D 23200-24100 28.84575 1.6/1.665
D 23200-24000 21.374 1.6/1.64
D 23200-m0100 31.818 1.6/-7.346
D 23200-m0102 35.185 1.6/-2.831
D 23200-m0107 39.239 1.6/-7.131
D 23200-F0008 34.993 1.6/-8.565
D 23200-F0012 46.773 1.6/-6.529
D 23200-F0009 39.671 1.6/-9.872
D 23200-F0006 30.688 1.6/-4.086
D 23200-F0001 44.285 1.6/-3.364
V 23200-24100 117.90235 1.6/1.665
V 23200-24000 104.97495 1.6/1.64
V 23200-m0106 118.1436 1.6/7.346
V 23200-m0102 108.0381 1.6/-2.831
V 23200-m0107 114.2858 1.6/-7.131
V 23200-F0008 118.7634 1.6/-8.565
V 23200-F0012 111.1215 1.6/-6.529
V 23200-F0009 118.6765 1.6/-9.872
V 23200-F0006 111.8639 1.6/-4.086
V 23200-F0001 104.5531 1.6/-3.364
DB 24000
DN 24100 399.47575
DN 23200 59.1445
DN 24500 337.0773
DN m0101 332.3615
DN m0102 2 341.8834
DN m0103 348.936
DN m0104 358.5885
DN m0108 92.6283
DN m0109 165.6158
DN F0006 2 338.0099
DN F0001 2 290.1399
DN F0002 285.7772
DN F0100 318.5306

```

Figura 61 - File dell'elaborazione della rete dopo l'acquisizione dei punti (a sinistra). È possibile leggere (a destra) il vertice da cui sono state condotte alcune delle misurazioni ed i vertici o *marker* rilevati con il corrispettivo pedice, assieme ai valori delle distanze e delle ampiezze angolari.

5.4.2 *Acquisizione delle scansioni laser*

Per quanto riguarda l'acquisizione dati tramite *laser scanner* e l'ottenimento di un buon rilievo, occorre effettuare più scansioni⁷⁴ da diverse posizioni, cercando di acquisire più *marker* o *target* possibili, indispensabili per la determinazione delle corrispondenze tra le diverse scansioni.

Nonostante il processo di acquisizione tramite *laser scanner* ha la capacità di immagazzinare in tempi molto brevi una quantità molto elevata di coordinate spaziali, è stato necessario individuare delle posizioni adeguate in cui far stazionare lo strumento.

Il processo di acquisizione è molto semplice ed intuitivo. Lo strumento *FARO CAM2* viene inizialmente posizionato sull'apposito treppiede, dopo di che l'operatore Paolo Maschio ha settato le impostazioni idonee relative alla risoluzione ed alla qualità delle scansioni.

Definiti questi due parametri, lo strumento restituisce su schermo la durata prevista per l'acquisizione. Una volta avviata la scansione, non è più necessaria la presenza dell'operatore in quanto la fase di acquisizione è del tutto automatica. In questa fase è estremamente importante non sostare o passare nel campo di azione dello strumento in quanto potrebbero generarsi aree con lacune o possibili errori di acquisizione; a tal proposito lo strumento emette segnali sonori intermittenti per indicare il suo funzionamento.

74 - Nel caso in cui non siano presenti punti di controllo, è opportuno che le scansioni siano sovrapposte tra loro almeno del 30% affinché il procedimento di registrazione fornisca risultati accettabili dal punto di vista geometrico e statistico.

Fonte: RINAUDO R., *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in SACERDOTE F., TUCCI G. (a cura di), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice, Firenze 2007, p. 27.



Figura 62 – Gli operatori Paolo Maschio e Francesca Matrone eseguono la procedura di messa in stazione del *laser scanner*, e settaggio delle impostazioni di acquisizione per la prima scansione. Foto: A. Ursini.



Figura 63 - Schema dei punti di acquisizione delle scansioni laser.

Nel nostro caso sono state eseguite 24 scansioni da punti diversi ben distribuiti attorno al Complesso di Nazareth.

Erroneamente i *file* di acquisizione non sono stati rinominati in sede di rilievo. Per questo motivo la nomenclatura dei dati acquisiti è stata generata in automatico attribuendo numerazione crescente alla dicitura impostata in una campagna precedente, denominata "Frana_20_".

Il *firmware* interno allo *scanner* ha successivamente numerato in ordine crescente ognuna delle nuove acquisizioni a partire dal 10014. A lato è riportato uno *screenshot* delle cartelle di acquisizione ottenute. [Figura 64].

Ogni cartella generata contiene diverse tipologie di *file*, tra cui *file* relativi all'acquisizione dei dati RGB (*Bitmaps*), ai parametri di distanze ed angoli (Scans) e al *file* principale con estensione .FLS. Tutti questi elementi saranno automaticamente decodificati nella fase di elaborazione tramite l'importazione nel *software* proprietario *FARO SCENE*, i cui passaggi verranno analizzati nel capitolo seguente.

- Frana_20_10014.flis
- Frana_20_10015.flis
- Frana_20_10016.flis
- Frana_20_10017.flis
- Frana_20_10018.flis
- Frana_20_10019.flis
- Frana_20_10020.flis
- Frana_20_10021.flis
- Frana_20_10022.flis
- Frana_20_10023.flis
- Frana_20_10024.flis
- Frana_20_10025.flis
- Frana_20_10026.flis
- Frana_20_10027.flis
- Frana_20_10028.flis
- Frana_20_10029.flis
- Frana_20_10030.flis
- Frana_20_10031.flis
- Frana_20_10032.flis
- Frana_20_10033.flis
- Frana_20_10034.flis
- Frana_20_10035.flis
- Frana_20_10036.flis
- Frana_20_10037.flis
- Frana_20_10038.flis

Figura 64 - *File* generati dall'acquisizione tramite *laser scanner*.

5.5 Acquisizione fotogrammetrica aerea

La fase di acquisizione fotografica tramite *UAV* è avvenuta grazie al drone multirottore *Phantom 4 Pro*, equipaggiato con una camera da 20 *megapixel* e sensore in grado di acquisire video in 4 K a 60 fps.

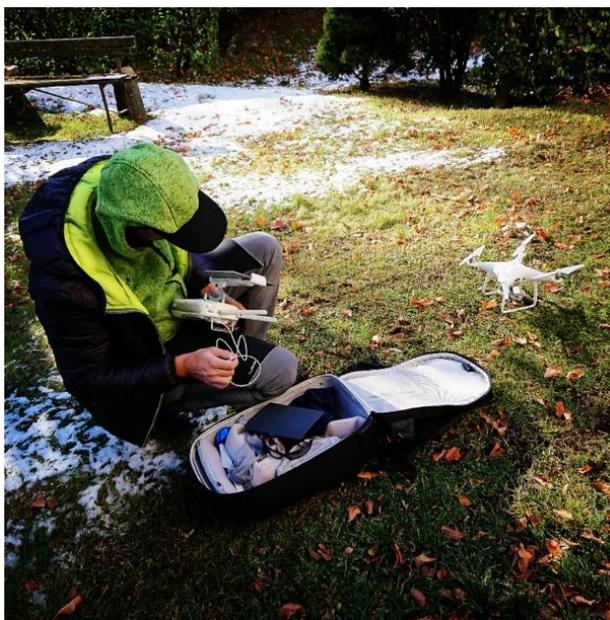


Figura 65 - L'operatore Paolo Maschio in fase di preparazione della strumentazione del drone Phantom 4 PRO. Foto: A. Ursini.

L'acquisizione delle immagini per l'aero-fotogrammetria non ha richiesto la realizzazione di un piano di volo a causa dell'area di interesse abbastanza ridotta e caratterizzata dalla presenza di vegetazione ad alto fusto, che avrebbe potuto influire negativamente sul segna *GPS/GNSS*.

Per questo motivo, l'operatore Paolo Maschio ha eseguito tale operazione in modalità manuale, eseguendo un volo con passaggi rettilinei ad una quota di circa 25m da terra. Con più passaggi sono stati acquisiti in totale 137 fotogrammi in formato .JPG, di cui 59 acquisite con la fotocamera in posizione nadirale, 72 in posizione obliqua a 45°, e le restanti 7 inquadrando il fianco laterale esterno della cappella 2.



Figura 66 - Esempio di immagine nadirale acquisita tramite Phantom 4 PRO.

In questa maniera, è stato possibile acquisire le immagini riguardanti le superfici di copertura delle 3 cappelle, comprensive delle porzioni mancanti delle murature ostacolate dalla vegetazione.

6. L'elaborazione dei dati

Dopo la fase di acquisizione in campagna di rilievo, i dati immagazzinati hanno richiesto una notevole fase di elaborazione attraverso l'impiego di molteplici *software* in grado di manipolare le informazioni provenienti dalle tecniche adottate in campagna.

L'obiettivo finale delle seguenti procedure adottate è quello di generare una nuvola di punti che rientri nell'ordine dei 10 millimetri di precisione rispetto ai 2 centimetri di tolleranza imposta; questa nuvola di punti successivamente sarà preparata per la successiva fase di modellazione in ambiente *BIM*, tramite il *software Autodesk Revit*.

Nei paragrafi di questo capitolo verranno presentati i *software* impiegati, correlati dei relativi passaggi eseguiti e dei parametri inseriti al fine della produzione della nuvola di punti adottata come base della modellazione, seguendo lo schema rappresentativo esposto nella seguente figura.



Figura 67 - Schema rappresentativo del processo di elaborazione dei dati eseguito.

6.1 Compensazione rete

Il primo passo che è stato eseguito, costituisce la cosiddetta compensazione della rete topografica, ossia un procedimento in grado di ridistribuire gli errori di acquisizione, ottenendo un miglioramento generale del rilievo ma non un miglioramento di precisione delle misure. L'operazione di compensazione non è stata svolta in prima persona, e per tale motivo non possono essere riportati con esattezza i passaggi eseguiti. A livello teorico l'operazione di compensazione costituisce un'operazione di conversione delle coordinate, da quote altimetriche ed ellissoidiche nel sistema di riferimento *WGS84*, acquisite dalle strumentazioni topografiche, a quote ortometriche con riferimento all'altezza dei singoli punti rispetto al livello del mare. Il *file* risultante da quest'operazione è un *file* contenente le coordinate dei singoli punti topografici rilevati convertite nel sistema di coordinate locali X_0, Y_0, Z_0 .⁷⁵

Tramite l'elaborazione nel *software* *STAR*NET* è possibile effettuare la vera e propria correzione delle coordinate tenendo conto della propagazione degli errori [Figura 68]. I *file* ottenuti, in formato

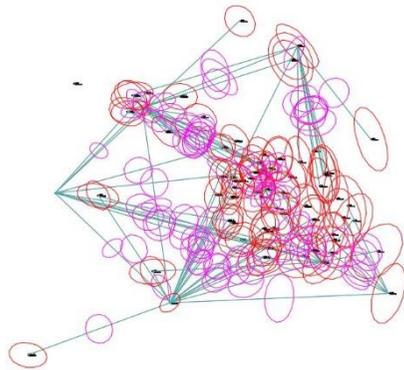


Figura 68 - File .DXF risultante dall'operazione di compensazione tramite software *STAR*NET*. Le ellissi in rosso e rosa rappresentano le dispersioni dei punti acquisiti.

75 - Salvatore Sanna, *Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, pp. 73-74

.COR e .DXF, racchiudono le coordinate spaziali di tutti i punti convertiti nel sistema di riferimento locale. Questo *file* è stato utilizzato all'interno dei successivi *software* al fine di consentire la georeferenziazione automatica delle diverse nuvole di punti, sia da fotogrammetria che da *laser scanner*.

6.2 Laser scanner

Una volta conclusa la fase di compensazione delle misure topografiche, il lavoro si è spostato sull'elaborazione delle 24 scansioni *laser* attorno al Complesso di Nazareth. Dopo una prima analisi le scansioni "Frana_20_10025" e "Frana_20_10026" sono state immediatamente scartate in quanto riguardavano delle scansioni interne in esubero, con settaggi errati dello strumento *Faro Cam2*.

Le restanti 22 scansioni, quindi, sono state manipolate ed elaborate tramite *software SCENE* dell'azienda *FARO*, produttrice dello *scanner* da noi impiegato.

6.2.1 FARO SCENE 7.1.1.81

Il *software* SCENE è stato ideato specificatamente per tutti i *laser scanner* della serie Focus, Freestyle e di terze parti.

Questo *software* elabora e gestisce i dati di scansione in modo semplice e intuitivo, utilizzando un procedimento di riconoscimento automatico dell'oggetto, della registrazione della scansione e del suo relativo posizionamento.



Figura 69 -
Logo FARO
SCENE.

È in grado inoltre di generare dati di elevata risoluzione e qualità a colori, incorporando e combinando le immagini dal posizionamento automatico delle scansioni eseguite con o senza *target*.⁷⁶

Oltre al processo di colorazione delle scansioni, questo *software* è in grado di esportare il *file* elaborato in diversi formati, rendendolo molto versatile allo scambio di dati con altri programmi.

Un'altra funzionalità riguarda la generazione automatica di superfici *mesh* a partire dalla nuvola di punti, funzionalità però non adoperata in questo caso di studio.

6.2.2 *Metodi di elaborazione*

L'elaborazione delle scansioni laser è un'operazione che richiede una successione di passaggi ben definiti, costituenti un flusso di lavoro ben schematizzato e standardizzato.

Le operazioni effettuate nel programma possono essere racchiuse in 8 passaggi, sintetizzati nel seguente ordine:⁷⁷

- Importazione dei dati;
- Collocazione preliminare delle scansioni;
- Registrazione dei *marker*;
- Georeferenziazione e collocazione delle scansioni;

76 - Fonte: <https://www.faro.com/it-it/prodotti/costruzione-bim-cim/faro-scene/>

77 - Francesco Coniglione, *Gestione del patrimonio storico architettonico con metodologia HBIM: il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, pp. 79.

- Gestione degli errori di calibrazione;
- Verifica delle tensioni dei target;
- Colorazione delle scansioni;
- Esportazione della nuvola di punti.

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le diverse fasi, riportando annessi *screenshot* del *software* in maniera da agevolare la comprensione delle operazioni.

6.2.3 Importazione e caricamento dei dati

Dopo aver avviato il *software* ed aver avviato un “Nuovo progetto” tramite il menu a tendina del tasto *File*, la prima fase di importazione dei dati .FLS provenienti dalle scansioni laser. Questo passaggio si effettua eseguendo un *drag & drop* all’interno della finestra bianca a sinistra, definita *Workspace*. I *file* verranno ordinati in maniera crescente all’interno di uno schema ad albero, al di sotto dell’icona *ScanManager*. A questo punto i *file* appena inseriti verranno preceduti da un’icona a forma di nuvola. [Figura 70].



Figura 70 - Importazione delle scansioni laser.

L'effettivo caricamento dei dati avviene cliccando col tasto destro sulla *ScanManager* ed eseguendo il comando *Carica tutte le scansioni* dal menu a tendina che si aprirà.

Dopo l'operazione di caricamento, la corretta riuscita sarà visualizzata attraverso un quadratino celeste posto a lato della precedente icona a forma di nuvola [Figura 71].

Prima di proseguire alle successive fasi di elaborazione, è opportuno eseguire il salvataggio con nome del *file*.

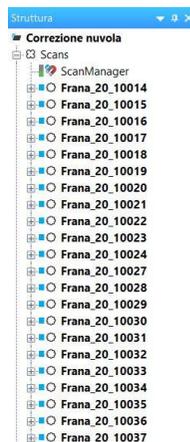


Figura 71 - Operazione di caricamento eseguita correttamente.

6.2.4 Collocazione preliminare

Eseguita la procedura di caricamento dei dati, si prosegue con la collocazione preliminare delle scansioni, ovvero si effettua uno spostamento manuale nello spazio di lavoro delle diverse scansioni. Questa operazione facilita le operazioni di sovrapposizione ed allineamento automatiche fornite dal *software*, e scongiura eventuali allineamenti non conformi. In questa operazione è opportuno sfruttare il comando *Vista corrispondenza*, per farlo è sufficiente cliccare col tasto destro sull'icona *Scans* e posizionare il cursore su *Visualizza*, per poi selezionare il comando.

Selezionando singolarmente ogni scansione, comparirà sul video una freccia bianca con cerchio blu esterno, che rappresenta il cursore di trascinamento nel piano e rotazione a 360° della nuvola selezionata [Figura 72].

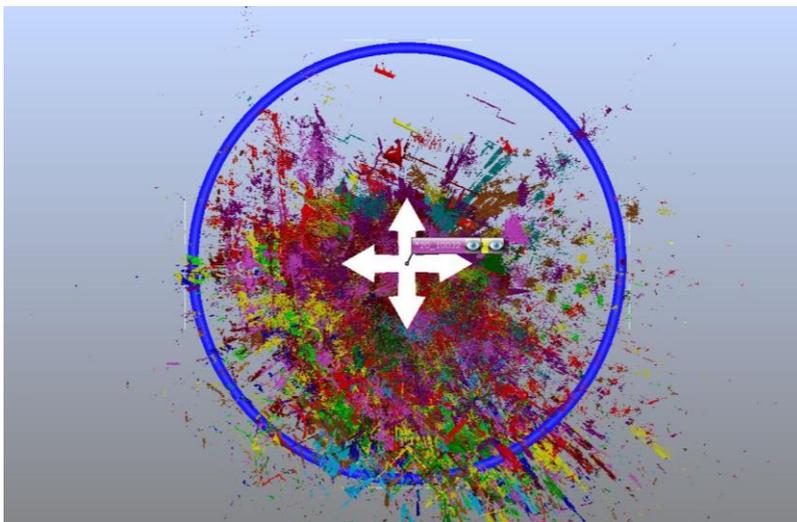


Figura 72 - Vista corrispondenza dello spazio di lavoro con scansione numero 20_10032 selezionata.

Per effettuare questa operazione è conveniente mantenere attive le scansioni contigue a piccoli gruppi. Ciò è possibile selezionando le scansioni da nascondere a sinistra tenendo premuto il tasto *Ctrl* + tasto sinistro del *mouse*. Una volta selezionate le scansioni, basta cliccare col tasto destro e su *Visualizza* nel menu a tendina.

Nascoste le nuvole, si prosegue con l'allineamento preliminare manuale trascinando la nuvola nel piano [Figura 73]. Per effettuare un buon allineamento preliminare bisogna effettuare il posizionamento sia nella vista *Dell'Alto* che in una delle viste laterali.

Le viste in piano sono selezionabili dalla barra grigia in basso, cliccando col tasto sinistro sull'icona con cubo e freccetta nera.

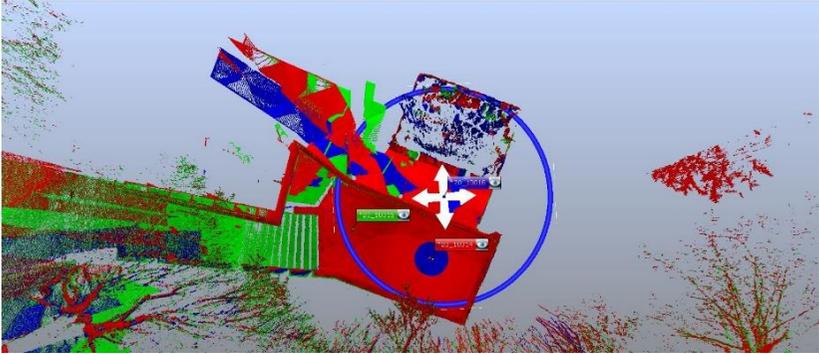


Figura 73 - Collocazione preliminare della scansione 20_10016 in relazione alle scansioni 20_10014 e 20_10015.

L'allineamento preliminare manuale è stato eseguito per ogni singola scansione, ottenendo il seguente risultato [Figura 74].



Figura 74 - Vista dall'alto della procedura di allineamento preliminare terminata.

Terminata questa procedura, si prosegue cliccando col tasto destro sull'icona *Scans*, selezionando *Operazioni*, *Registrazione*, *Colloca scansioni* e selezionando la modalità di collocazione *Da nuvola a nuvola*, impostando i parametri come mostrato nell'immagine a lato [Figura 75]. Allineando in questa maniera le scansioni, si facilitano le operazioni di elaborazione automatica da parte del *software*.

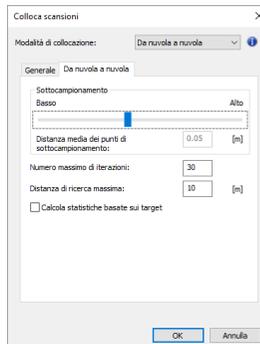


Figura 75 - Impostazione della modalità di collocazione *Da nuvola a nuvola*.

6.2.5 La registrazione dei marker

Prima di procedere con la fase di georeferenziazione, bisogna prima effettuare l'elaborazione dei *marker* selezionando l'apposita scheda nella barra di comando in alto. [Figura 76]

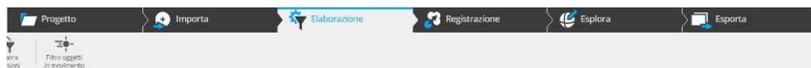


Figura 76 - Selezione della scheda dedicata all'elaborazione delle scansioni.

La fase precedente alla registrazione consiste nell'individuazione di ogni singolo *marker* visibile all'interno delle scansioni, andando ad assegnare in codice assegnato in fase di rilievo al punto registrato dalla stazione totale; nella fase successiva si effettuerà, in automatico, l'assegnazione delle coordinate.

Al fine di effettuare una buona registrazione, bisogna individuare in ogni singola scansione almeno 3 *marker*, e nel caso questi non siano presenti o ben visibili, il *software* concede l'individuazione di elementi fisici quali spigoli, o

superfici, in modo tale da garantire il riconoscimento e forzare l'allineamento delle diverse nuvole di punti delle altre scansioni.

La registrazione va effettuata visualizzando ogni singola scansione nel *Workspace* attraverso la modalità *Vista planare*, attivabile cliccando col tasto destro del *mouse* sulla scansione interessata, cliccando *Visualizza, Vista Planare* dal menu a tendina visualizzato. [Figura 77]

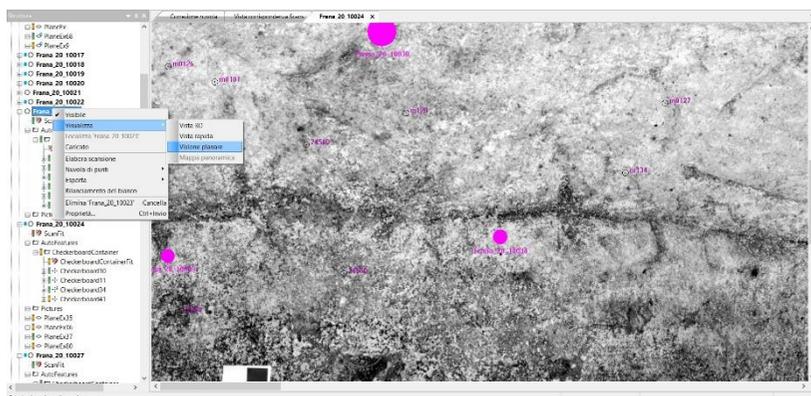


Figura 77 - Esempio di Vista Planare.

Per quest'operazione bisogna sottolineare che il programma non codifica i target in maniera automatica, ma è l'operazione che attribuisce la nomenclatura seguendo due possibili approcci, in alcuni casi complementari tra loro:

- *approccio manuale*: attivando lo strumento selettore rettangolare dalla barra di comando in alto è possibile definire, in giallo l'area, di interesse. Cliccando col *tasto destro del mouse*, *Crea oggetti, Punto medio per contrasto* il *software*, tramite algoritmo interno che

analizza i valori di riflettanza del target, ne individua il punto medio [Figura 78].

- **Approccio semi-automatico:** attivando la ricerca tramite selezione della scansione, *tasto destro del mouse*, *Operazioni*, *Trova oggetti* ed impostando la tipologia del target usata durante la campagna di rilievo (“*Scacchiere*, *Sfere*, *Punti d'angolo*, *Piani*, *Rettangoli*, *Linee*”). L'individuazione con questa tecnica risulta essere sì automatica e precisa, ma tendenzialmente incompleta; per questo motivo l'operazione va integrata tramite la procedura precedente.

Nelle nostre scansioni quindi sono stati integrati i due approcci, andando a definire, soprattutto per alcune scansioni interne, degli elementi naturali ben visibili come spigoli sulle porte o delle superfici ben visibili nelle scansioni contigue.



Figura 78 - Procedura manuale per l'individuazione del punto medio del target.

Il *software*, in automatico, attribuirà ai punti individuati un codice identificativo preceduto dal nome *CheckerboardXY*, dove *XY* costituiscono una numerazione progressiva. Può capitare che il *software* riconosca come scacchiera un elemento che in realtà non lo sia, per tanto è possibile editare, rinominare o eliminare gli elementi individuati cliccando sull'icona "+" a lato del nome della scansione in riferimento e selezionando il comando dal menu a tendina dopo aver cliccato col tasto destro sul punto interessato [Figura 79].

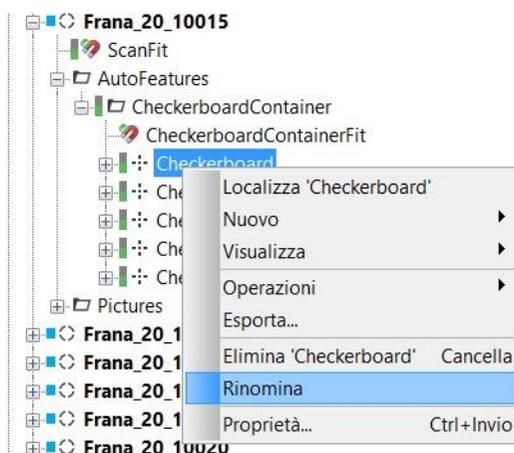


Figura 79 - Operazione *Rinomina* dei *Checkerboard* generati.

Nell'elenco all'interno della scansione, sul lato sinistro del video, verranno visualizzati in ordine tutti gli elementi target e gli oggetti generati o individuati in automatico. Una volta attribuiti a tutti i *marker* nelle scansioni i codici attribuiti in fase di rilievo, il processo di registrazione è ultimato. Come è stato citato in precedenza, nel nostro caso sono state utilizzate anche delle superfici di riferimento (come ad esempio la soglia della porta di accesso alla grotta) per facilitare l'allineamento delle scansioni interne con meno di 3 *marker* rispetto

alle scansioni esterne contigue. Queste superfici sono state definite e nominate con la stessa codifica in maniera da esser riconosciute in automatico dal *software* e generare una corrispondenza univoca [Figura 80].

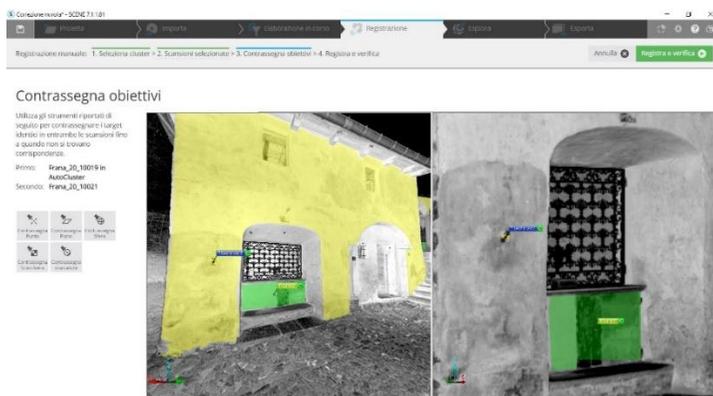


Figura 80 - Esempio di correlazione tra due scansioni contigue di piani notevoli utilizzati come riferimento.

Cosa di fondamentale importanza in questa operazione è verificare che l'icona a forma di semaforo, posta a lato dell'oggetto *target*, sia verde: questa è un'icona attiva che indica la qualità del criterio di individuazione utilizzato. Il colore visualizzato è in relazione ai punti di scansione nella selezione utilizzata: sarà verde se il numero di punti per l'ottimizzazione è >80, giallo è compreso tra 20 e 80, altrimenti rosso se è <20 punti [Figura 81].

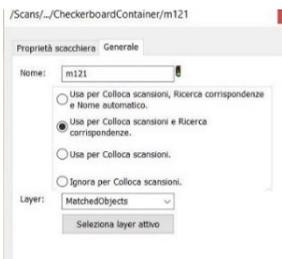


Figura 81 - Esempio di controllo nelle proprietà del *target* individuato, nell'immagine è riportato il check per il *marker* m121 appartenente alla scansione Frana_20_10015.

Per effettuare una corretta registrazione e collocazione delle scansioni, bisogna riporre particolare attenzione all'individuazione dei punti notevoli di riferimento, quali *marker* o dettagli naturali nelle varie scansioni. Prima di procedere allo *step* successivo, perciò bisogna controllare che in ogni scansione sia stata individuata almeno una terna di punti notevoli. Così facendo il *software* effettuerà una rototraslazione delle nuvole di punti, andando ad assegnare ai *marker*, in maniera univoca, le coordinate rilevate in fase di campagna, andando a correggere anche le coordinate di tutti i punti di scansione.



Figura 82 - Esempio di identificazione dei punti notevoli tra le scansioni Frana_20_10036 e Frana_20_10037, nelle quali non è stato possibile usare la sola l'individuazione dei *marker*.

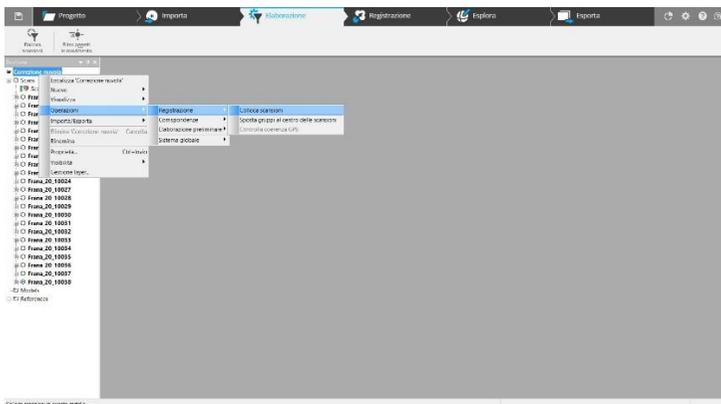


Figura 84 - Colloca scansioni dalla finestra Elaborazione

- Dall'apposita casella di lavoro *Registrazione*, seguendo i passaggi e le modalità indicate dal *software*, per selezionare la metodologia di registrazione.

Nel nostro caso è stato eseguito questo secondo approccio, eseguendo una registrazione manuale, in 4 *step*, *Basata sui target*.

Con questo secondo approccio, bisogna selezionare il Cluster per il quale effettuare la registrazione, ossia, nel nostro caso, l'*AutoCluster* generato in automatico [Figura 85].



Figura 85 - Selezione del Cluster per la Registrazione

Successivamente bisogna selezionare la metodologia di registrazione *Manuale*, che impone la selezione di due scansioni contigue per volta, da due colonne di selezione: *Selezione 1* a sinistra, e *Selezione 2* a destra [Figura 86].

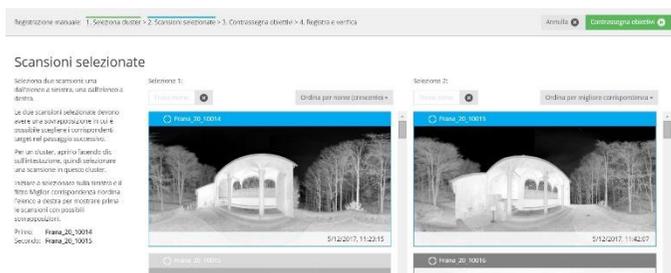


Figura 86 - Selezione della prima coppia di Scansioni da registrare

Il passaggio successivo è quello di controllo degli *obiettivi* o *marker* contrassegnati nel paragrafo precedente. Il *software* propone una vista affiancata delle due scansioni selezionate e contrassegna gli obiettivi omologhi nelle due scansioni con gli stessi colori.

Qualora un *marker* o *obiettivo* non venga riconosciuto in entrambe le viste, è possibile aggiungerne altri tramite gli appositi comandi posti sulla sinistra [Figura 87].

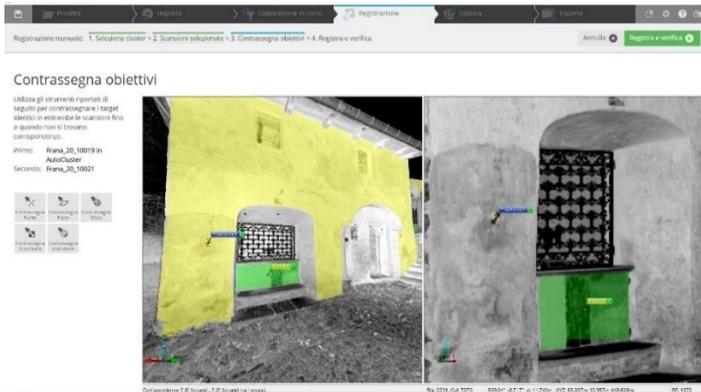


Figura 87 - Processo di contrassegnazione degli obiettivi tra la scansione Frana_20_10019 e Frana_20_10021.

Una volta effettuata la registrazione manuale si prosegue con il comando “*Registra e Verifica*”. Questo processo va effettuato per tutte le coppie di scansioni proposte dal *software*, andando a registrare così, due per volta, tutte le scansioni impostando le modalità di registrazione come indicato nell’immagine seguente [Figura 88]:



Figura 88 - Impostazione della *Verifica dei Target* con metodo *Basato sui target*

Ultimato il caricamento della *Registrazione*, il *software* propone la visualizzazione dell'ultimo *step* del processo, proponendo in vista in corrispondenza le scansioni allineate.

Dopo aver effettuato un check visivo della nuvola così ottenuta, si richiede la risposta alla domanda "*Tutte le scansioni sono registrate correttamente?*". Essendo, nel nostro caso, la nuvola di punti allineata in maniera corretta, si seleziona la risposta affermativa e si termina il processo di registrazione [Figura 89].

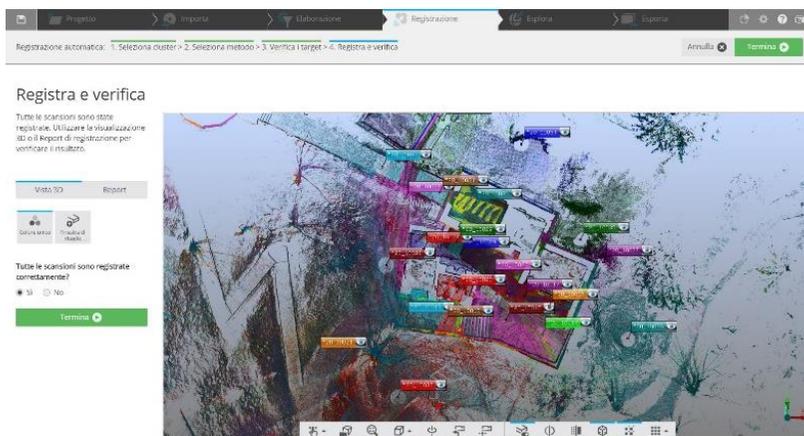


Figura 89 - Registrazione e Verifica della nuvola di punti georeferita.

Accedendo alla successiva casella di lavoro, denominata *Esplora*, è possibile controllare la bontà della registrazione effettuata andando ad analizzare lo *ScanManager*.

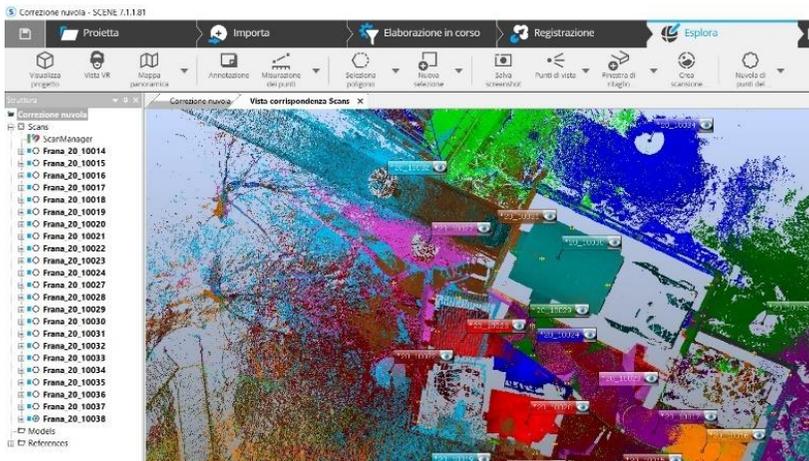


Figura 90 - Controllo dello ScanManager

Com'è possibile vedere dall'immagine [Figura 90], l'icona a forma di semaforo è di colore verde, il che sta ad indicare che il processo è avvenuto correttamente. In caso contrario sarebbe stato necessario eseguire nuovamente la procedura di registrazione, apportando modifiche o correzioni all'individuazione dei *target*.

6.2.7 La tensione dei target

Terminato il processo di registrazione e rototraslazione delle scansioni, si procede alla verifica della cosiddetta *tensione dei target*. Essa rappresenta la

discrepanza nel sistema di coordinate complessivo tra la posizione e l'orientamento dei due oggetti di riferimento corrispondenti nelle scansioni.⁷⁸

Considerando una scala di rappresentazione architettonica finale 1:50, si può definire, tramite relazione matematica, la *precisione* di riferimento entro la quale il valore massimo di tensione deve rimanere. Il valore di *precisione* è definito come:

$$\text{Scala 1:50} \rightarrow 50 \times 0.02\text{cm (valore fisso in cartografia)} = 1[\text{cm}]$$

Per tale motivo la precisione di riferimento è pari a 10mm, ossia alla metà della tolleranza. I risultati possono essere visualizzati per ogni singola scansione cliccando col tasto destro del *mouse* su *ScanFit* ed aprendo la voce *Proprietà* [Figura 91].

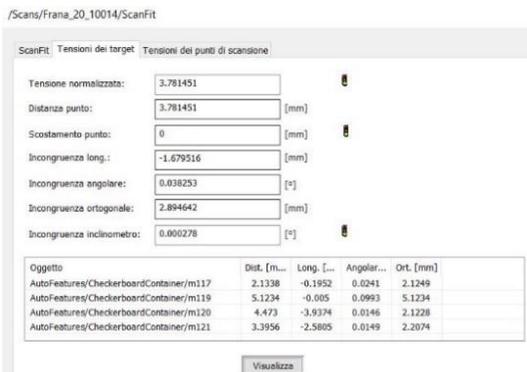


Figura 91 - Esempio delle proprietà dello ScanFit per la scansione Frana_20_10014

⁷⁸ Francesca 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, Politecnico di Torino, 2016, p.76.

Come si può notare, ogni icona a forma di semaforo riporta il colore verde, ed i valori in termini di distanza (*Dist. [mm]*) rientrano perfettamente nella precisione definita precedentemente.

I valori complessivi relativi alla tensione dei *target* possono essere controllati in maniera globale andando a visualizzare le proprietà dello *ScanManager* [Figura 92].

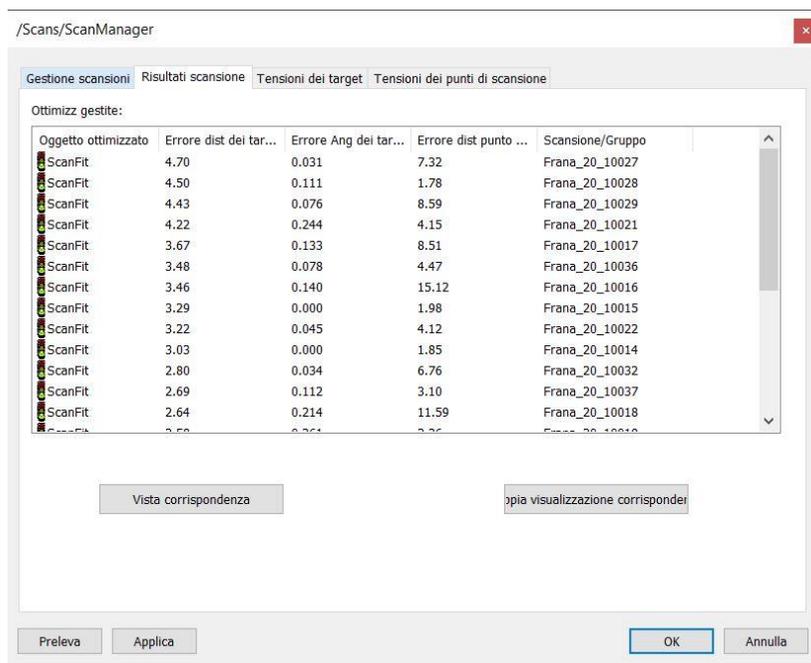


Figura 92 - Proprietà dello ScanManager con vista dei Risultati scansione

Nell'immagine precedente è possibile vedere la raccolta dei singoli *ScanFit* di ogni scansione ordinati in maniera decrescente secondo l'errore di distanza

dei *target* medi. È possibile notare che il valore peggiore dell'errore di distanza media dei *target* appartiene alla scansione Frana_20_10027, riportando un valore comunque accettabile di soli 4.70mm.

Visualizzando invece il menu a tendina “*Tensione dei target*” è possibile osservare così quali sono i *marker* e gli oggetti obiettivi aventi le tensioni maggiori [Figura 93].

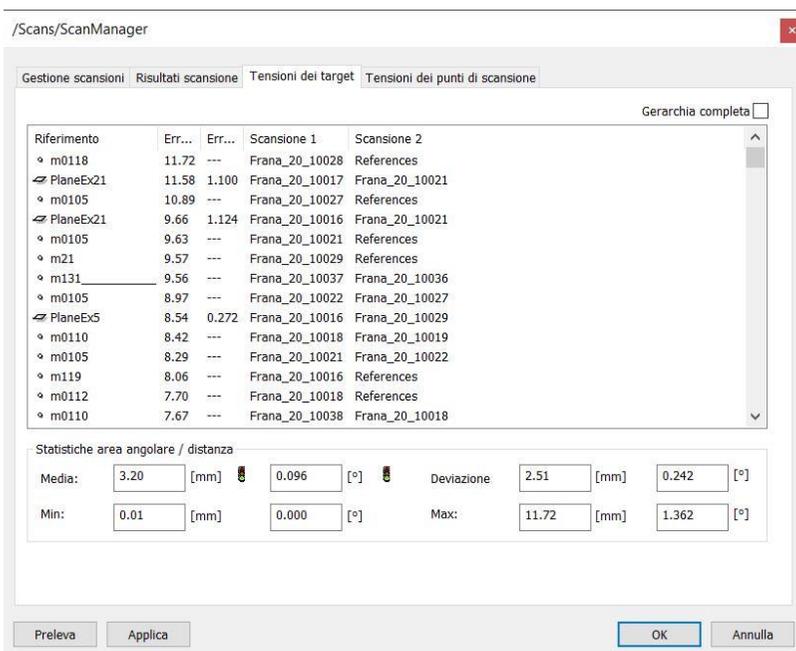


Figura 93 - Proprietà dello ScanManager con vista globale della tensione dei *target*.

Non essendo possibile realizzare un singolo *screenshot* di tutti gli elementi riportati, alcuni dei valori ottenuti sono stati riportati in ordine decrescente

nella seguente tabella [Tabella 6], la totalità dei dati ottenuti è riportata in allegato.

Tabella 6 – Estratto delle tensioni dei *target* ottenute.

Riferimento	Errore dist. [mm]	Errore Ang. [°]	Scansione 1	Scansione 2
m0118	11,720	0,000	10028	References
PlaneEx21	11,580	1,100	10017	10021
m0105	10,890	0,000	10027	References
PlaneEx21	9,660	1,124	10016	10021
m0105	9,630	0,000	10021	References
m21	9,570	0,000	10029	References
m131__	9,560	0,000	10037	10036
m0105	8,970	0,000	10022	10027
PlaneEx5	8,540	0,272	10016	10029
m0110	8,420	0,000	10018	10019
m0105	8,290	0,000	10022	10021
m119	8,060	0,000	10016	References
m0112	7,700	0,000	10018	References
m0110	7,670	0,000	10038	10018
m119	7,580	0,000	10017	References

Come si può notare, su una totalità di 201 elementi tra *target*, piani significativi ed elementi *target*, solamente 3 oggetti superano il valore della precisione di riferimento individuata in precedenza, ottenendo valori compresi tra i 10.890 mm e 11.720 mm, ma comunque abbondantemente al disotto della tolleranza. La causa di questo errore è difficilmente individuabile.

6.2.8 *La colorazione delle scansioni*

Il processo di colorazione consiste nell'ulteriore sovrapposizione delle immagini digitali acquisite dal *laser scanner* ai punti rilevati.

Quest'operazione è realizzabile in quanto, in fase di rilievo, nello strumento è stata attivata l'opzione *Colore*, ossia una funzione propria dello strumento che concede l'acquisizione delle informazioni *RGB* dei singoli punti acquisiti tramite la generazione di fotogrammi digitali.

L'operazione di attribuzione del colore alle scansioni è molto semplice: bisogna cliccare col tasto destro del *mouse* su ogni singola scansione, quindi scegliere *Operazioni*, *Colore/Immagini*, *Applica immagini*, oppure in questa versione del *software* è possibile attivare la colorazione automatica delle scansioni dalla finestra *Elaborazione*, applicando la spunta *Colora scansioni* al di sotto del menù *Generale* [Figura 94].



Figura 94 - Colorazione automatica delle scansioni tramite la finestra Elaborazione

Con questa operazione vengono nuovamente ricaricati i dati di scansione e le rispettive immagini, in seguito, in maniera del tutto automatica vengono eliminate eventuali distorsioni e subito dopo attribuite le informazioni *RGB* ai punti di scansione [Figura 95].



Figura 95 - Vista planare della scansione Frana_20_10015 con colorazione applicata.

Una volta terminata la procedura di colorazione, se è eseguito il salvataggio del *file* all'esportazione delle viste sotto riportate, utilizzando l'apposito strumento nella barra dei comandi *Crea Vista 3D*.

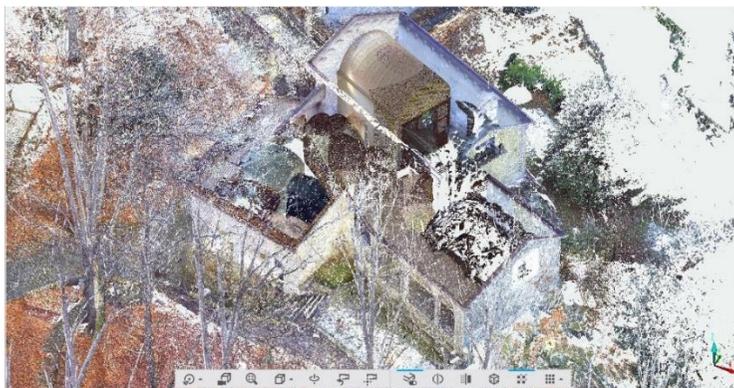


Figura 96 - Risultato finale dell'elaborazione delle nuvole ottenute tramite *laser scanner*.

6.2.9 *Esportazione della nuvola di punti*

Il *file* appena salvato non può essere ulteriormente elaborato o utilizzato in altri *software* esterni a *FARO Scene*. Per questo motivo è richiesta l'esportazione della nuvola di punti in un formato compatibile con i successivi *software* da utilizzare.

Ciò è reso possibile tramite il comando *Esporta*, *Esporta nuvola di punti* visibile dopo aver cliccato col tasto destro sulla singola scansione. Per l'esportazione si è adoperato il formato *.E57*, abbreviativo del "formato di *file 3D ASTM E57*, ossia un formato *standard* non proprietario⁷⁹ che contiene la combinazione di dati binari ed *XML (Extensible Markup Language)* ed è in grado di

79 - Ci sono alcuni formati di file, a differenza dell'.E57, che sono direttamente creati dai *software* di scansione, come ad esempio il formato *.ptz* in formato binario generato dal *software Leica Cyclone*.

essere ben supportato dai successivi *software* senza essere eccessivamente pesante.



Figura 97 - Impostazioni adottate per l'esportazione delle singole nuvole in formato .E57.

6.3 MicMac

MicMac è uno strumento molto versatile per l'*image matching* che integra diverse innovazioni recenti ottenute dalla comunità scientifica ed è stato sviluppato all'interno dell'*IGN (National Geographic Institute)* in Francia.

Si configura come uno strumento molto generico, non inseribile in un contesto di applicazione ben specifico, ma è proprio questa generalità e versatilità a costituire uno dei suoi punti di forza.



Figura 98- MicMac logo. Fonte: <http://logiciels.ign.fr/?-Mic-mac,3->

Negli ultimi anni è stato applicato a diversi contesti come ad esempio:

- Modelli digitali dei terreni in contesti rurali ottenuti da coppie (o più) di immagini satellitari, con orientamento esatto o approssimativo;
- Modelli di elevazione digitali in contesto urbano da immagini multi-stereoscopiche ad alta risoluzione;
- Strumento di rilevamento di movimenti del terreno;
- Modellazione 3D di oggetti (maggiormente sculture) o scene interne ed esterne;
- Corrispondenza multispettrale di immagini registrate.

Questa versatilità e generalità però ha un risvolto della medaglia, ossia le elaborazioni richieste ottengono una elevata parametrizzazione dei dati in ingresso, che a volte potrebbero rendere l'operazione abbastanza complessa. Nel corso degli ultimi decenni il *software* ha visto un grande sviluppo, introducendo ad esempio strumenti interni per la calibrazione automatica delle immagini, oppure, dal 2008, strumenti in grado di generare ortofoto oppure una demosaicizzazione della stessa.

A livello ufficiale, dal 2007 MicMac è un *software open source*⁸⁰ con licenza CeCILL-B (ossia un adattamento alla legge francese della licenza L-GPL) e per tale motivo ogni eventuale implementazione, estensione o evoluzione di MicMac farà riferimento alla suddetta licenza.

80 - Si definisce *Open Source* un *software* di cui l'utente finale, che può liberamente accedere al *file* sorgente, è in grado di modificare a suo piacimento il funzionamento, correggere eventuali errori, ridistribuire a sua volta la versione da lui elaborata. Un esempio noto è il sistema operativo *Linux*.
Fonte: <http://www.treccani.it/enciclopedia/open-source/>

6.3.1 Il linguaggio e l'interfaccia

MicMac è uno strumento sì versatile e dalle diverse applicazioni, ma la gestione ed applicazione degli strumenti forniti è strettamente legata ad alcune conoscenze di base di linguaggio pratico informatico. La maggior parte degli strumenti, dei comandi e dell'*editing* di lavoro è eseguito in linguaggio C++.⁸¹ Generalmente i *software* possono esser definiti da tre tipi di interfacce grafiche:

- Interfaccia grafica user-friendly, provvista di menu e finestra intuitivi, ecc. Il vantaggio di questa tipologia è che potrebbe essere utilizzata da tutte le tipologie di utenti finali, lo svantaggio è il costo richiesto per lo sviluppatore;
- Interfaccia di programmazione API o applicazione. Questo livello di interfaccia ha lo svantaggio di richiedere l'utilizzo del linguaggio di programmazione API nonché un'elevata documentazione;
- Interfaccia costituita da un insieme di piccoli programmi che è possibile avviare tramite una riga di comando, con parametri aggiunti su una linea di comando oppure incluso in un *file*.

MicMac rientra in questa terza categoria di interfaccia, in quanto ogni comando o strumento può esser visto come un singolo programma eseguibile

81 - Linguaggio di programmazione orientato agli oggetti inventato da Bjarne Stroustrup, ricercatore dei Bell Labs, nei primi anni Ottanta e commercializzato nel 1985 da AT&T. Oggi il linguaggio non è proprietario ed è implementabile senza pagamento di royalties. Inizialmente concepito come estensione alle classi del linguaggio C (da cui il primo nome di 'C con classi'), fu poi arricchito con altre caratteristiche aggiuntive (funzioni virtuali, ereditarietà multipla, overloading degli operatori, riferimenti, template). Fonte: http://www.treccani.it/enciclopedia/linguaggio-c_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/

tramite una stringa di comando in linguaggio C++ inserita nel cosiddetto *Prompt di Comando* (in ambiente Windows).

Inizialmente il *software* era costituito esclusivamente da stringhe in linguaggio informatico, subito prima del lancio e della relativa distribuzione online sono state aggiunte alcune interfacce grafiche user-friendly in maniera da aiutare ed agevolare la maggior parte degli utenti con l'impostazione dei parametri.

Dopo aver installato il *software*, scaricabile gratuitamente dal sito ufficiale <https://micmac.ensg.eu/index.php/Accueil>, l'avvio di MicMac avviene tramite l'apertura del *Prompt dei comandi*.

Dal desktop iniziale bisogna cliccare sul menu *Start* ed inserire nella barra di ricerca il comando *cmd*, automaticamente Windows vi suggerirà il Prompt dei comandi come corrispondenza migliore [Figura 99].

Una volta aperta la finestra di comando è possibile verificare la corretta installazione del *software* digitando il comando di avvio di MicMac: *mm3d*. Automaticamente sarà visualizzata una serie di voci che costituiscono una breve descrizione iniziale del programma e dai ringraziamenti ai collaboratori, seguiti da un fitto elenco dei comandi eseguibili ed accettati dal *software* (colonna di sinistra) correlati di una sintetica descrizione della loro funzione (colonna di destra).

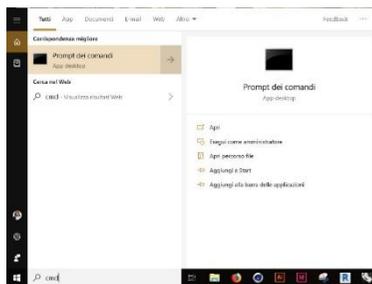


Figura 99- Apertura del Prompt dei comandi in ambiente Windows.

Di seguito è riportata, tramite una serie di *screenshot*, la finestra iniziale visualizzata dal *software* dopo la corretta installazione.

ca. Prompt dei comandi

```
C:\Users\andrea>mm3d

*****
**
** MicMac: a free open source project for photogrammetry **
** hosted at Ecole Nationale des Sciences Geographiques **
** in Marne-la-Vallee, for IGN-France **
**
**
** The project is funded by : **
**
** - Institut National de l'Information Geographique et Forestiere **
** (IGN main funder since 2003) **
** - the french FUI Project "Culture 3D Cloud" **
** - the french ANR Project "MONUMENTUM" **
**
** Research also currently supported by : **
** - CNES (French Space Agency) - via TOSCA Committee **
** - Compagnie Nationale du Rhone **
** - Vinci-Construction-Terrassement **
** - ERC Advanced Grant A.Kaeaeab "ICEMASS" (University of Oslo) **
**
** Current Team: MP Deseilligny, D Jouin, J Belvaux, G Maillet, **
** L Girod, E Rupnik, JM Muller, M Daakir, TG Nguyen **
**
** Contact for participating : Marc.Pierrot-Deseilligny@ensg.eu **
**
** Hope you enjoy, todo list in case of any problem using MicMac : **
** (0) Take a Pastis **
** (1) Switch your computer off and on again **
** (2) Install it on Gnu-Linux (work better on) **
** (3) See the wiki at http://micmac.ensg.eu/ **
** (4) Contact the forum http://forum-micmac.forumprod.com/ **
**
*****
mm3d : Allowed commands
AllDev Force development of all tif/xif file
Ann matches points of interest of two images
AperiCloud Visualization of camera in ply file
Apero Compute external and internal orientations
Apero2Meshlab Convert Orientation from Apero-Micmac workflow to a meshlab-compatible format
Apero2NMV Matthieu Moneyrond's convertor to VSFM, MVE, SURE, MeshRecon
Apero2PMVS Convert Orientation from Apero-Micmac workflow to PMVS format
AperoChmSecMM Select secondary images for MicMac
Arsenic IN DEV : Radiometric equalization from tie points
Aspro Init External orientation of calibrated camera from GCP
Bascule Generate orientations coherent with some physical information on the scene
BatchFDC Tool for batching a set of commands
Blinis Block Initialisation
C3DC Automatic Matching from Culture 3D Cloud project
Campari Interface to Apero, for compensation of heterogeneous measures
CASA Analytic Surface Estimation
CenterBascule Relative to absolute using embedded GPS
ChantierClip Clip Chantier
CheckDependencies check dependencies to third-party tools
ChgSysCo Change coordinate system of orientation
ClipIm Clip Chantier
CmpCalib Compare two calibrations
CmpIm Basic tool for images comparison
CmpOri Compare two sets of orientation
cod Do some stuff
CoherEpiP Test coherence between conjugate epipolar depth-map
ContrastFilter Some contrast filtering
Convert2GenBundle Import RPC or other to MicMac format, for adjustment, matching ...
ConvertCalib Conversion of calibration from one model 2 the other
ConvertIm Tool for conversion inside tiff-format
CreateEpiP Create epipolar images
Dequant Tool for dequantifying an image
```

```

Devlop Do some stuff
Digeo In development- Will compute tie points
DIV Videos development (require ffmpeg)
Donuts Cyl to Torus (Donuts like)
Drunk Images distortion removing tool
Eldcrow Do some stuff
ExtractAppui3D Extract points from a 3D appui points xml file
ExtractMeasure2D Extract points from a 2D measures xml file
FFWKugelhupf Version of Kugelhupf using FFT, expected faster when it works (if ever ...)
FieldDep3d To export results of matching as 3D shifting
GCPBascule Relative to absolute using GCP
GCPConvert Convert GCP from Txt 2 XML
GCPCtrl Control accuracy with GCP
GCPVisib Print a list of GCP visibility in images
GenCode Do some stuff
Genepi Generate 3D/2d synthetical points from orientation
Genere_Header_TiffFile Generate Header for internal tiling format
genmail Do some stuff
GenXML2Cpp Do some stuff
GraphHom Compute XML-Visibility graph from approximate orientation
GridBin Do some stuff
GrShade Compute shading from depth image
HomolFilterMasq Tool for filter homologous points according to masq
HomolMergePDVUnik Tool for merge homologous point from unik point of view
Im2XYZ tool to transform a 2D point (text file) to their 3D cloud homologous
ImWire For generation of some synthetic calibration image
Impaint Basic Impainting
ImRandGray Generate Random Gray Textured Images
InitIP Init Internal & External from GCP using 11-parameters algo
InitOriLinear Initialize orientation for linear acquisition
Kugelhupf Semi-automatic fiducial points determination
Liquor Orientation specialized for linear acquisition
LumMas Compute image mixing with raking light
MakeGrid Generate orientations in a grid format
Malt Simplified matching (interface to MicMac)
MapCmd Transforms a command working on a single file in a command working on a set of files
Martini New orientation Initialisation (uncomplete, still in dev...)
MartiniGin New orientation Initialisation (uncomplete, still in dev...)
MergeDepthMap Merging of individual, stackable, depth maps
MergeHomol Merge Homol dir
MergePly Merge ply files
MICMAC Computes image matching from oriented images
MIMP Matching One Pair of images
MW2DDosSism Simplified interface for post 2D post sismic deformation
MWByP Matching By Pair of images
MWCalcSizeCor Compute Image of Size of correlation windows (Atomic tool, for adaptive window in geom image)
MWHomCorOri Tool to compute homologues for correcting orientation in epip matching
MWInitialModel Initial Model for MicMac
MWMergeCloud Merging of low resol cloud, in preparation 2 MicMac
MWPyram Computes pyram for micmac (internal use)
MWTestAllAuto Full automatic version for 1 view point, test mode
MWTestOrient Tool for testing quality of orientation
MWxmlXif Generate Xml from Xif (internal use mainly)
mxv Interface to xv (due to problem in tiff lib)
Morito Merge set of Orientations with common values
Mpdcrow Interface to dcrow
MyRename File renaming using posix regular expression
NewTapas Replace OldTapas - now same as Tapas
Nuage2Ply Convert depth map into point cloud
NuageBascule To Change geometry of depth map
OldTapas Interface to Apero to compute external and internal orientations
Ori2Xml Convert "historical" Matis'Ori format to xml
OriConvert Convert Orientation from Txt 2 XML
OriExport Export orientation from XML to XML or TXT with specified convention
OriRedIleP Tie points filtering, using Martini results
Panelm Tool for creating a panel of images
Pasta Compute external calibration and radial basic internal calibration
PastDevlop Do some stuff
Pastis Tie points detection

```

Figura 100 - Screenshot rappresentativi del corretto avvio del software MicMac, è possibile notare nell'immagine a pg. 162 il riquadro di benvenuto introduttivo (in alto) seguito dalla serie di comandi eseguibili

Bisogna notare che il *software* opera all'interno del disco e della cartella di lavoro indicata nella porzione di codice antecedente la voce *mm3d*, generando o manipolando i *file* al suo interno; per tale motivo, in fase di elaborazione, è necessario introdurre inizialmente il percorso della cartella di lavoro e solo poi avviare il *software*.

Per ogni singolo comando è possibile studiarne nei dettagli il funzionamento e la modalità di calcolo nell'apposita sezione del sito dedicata ai *MicMac tools*⁸². Nella finestra del *Prompt dei comandi* invece è possibile visualizzare informazioni sintetiche legate ai dati inseribili nel comando in fase di *input*. Per far ciò è necessario digitare il comando con la seguente formula:

```
(Disco):\ (Cartella di lavoro)>mm3d (comando) -help
```

A titolo dimostrativo e di chiarimento della sintassi impiegata nel *software*, è riportata la richiesta di informazioni del comando *Tapioca*, uno dei comandi utilizzati per la fase di elaborazione per l'individuazione dei punti di legame (o *Tie Points*) tra le varie immagini.

Dallo *screenshot* riportato si può osservare che il *software* è stato avviato nel disco *C:* e nella cartella con percorso *Users\andrea* [Figura 100]:

82 Fonte: https://micmac.ensg.eu/index.php/MicMac_tools

```
C:\ Prompt dei comandi
C:\Users\andrea>mm3d Tapioca -help
Allowed commands are :
    MulScale
    All
    Line
    File
    Graph
for details :
    Tapioca MulScale -help
    Tapioca All -help
    ...

C:\Users\andrea>
```

Figura 101 - Risposta del programma alla richiesta di informazioni per il comando *Tapioca*

È possibile notare come al comando *Tapioca* siano correlate altre 5 varianti di esecuzione (*MulScale*, *All*, *Line*, *File*, *Graph*), e per ognuna di queste varianti è possibile nuovamente richiedere informazioni sui dati da fornire in fase di inserimento per la corretta esecuzione del comando.

Ad esempio, viene qui riportata la richiesta di aiuto per il comando *Tapioca* in variante *MulScale*, ossia una variabile di comando in grado di ridurre il tempo di analisi in un ampio set di immagini di partenza.

In questa modalità, viene eseguito un primo calcolo dei tie points per tutte le coppie di immagini, a bassa risoluzione, rendendo l'operazione molto veloce. Le immagini sono definite dall'utente tramite l'introduzione della directory o dell'estensione o delle dimensioni di riferimento.

Inserendo altri criteri al comando, il calcolo viene rieseguito usando l'alta risoluzione solo per le coppie che hanno un numero di punti di collegamento superiore ad una soglia inserita tramite il comando *NbMinPt=XY* (dove *XY* rappresenta il numero minimo di punti di riferimento individuato) [Figura 102]:

```
C:\Users\andrea>mm3d Tapioca MulScale -help
*****
* Help for Elise Arg main *
*****
Mandatory unnamed args :
* string :: {Full Name (Dir+Pat)}
* INT :: {Size of Low Resolution Images}
* INT :: {Size of High Resolution Images}
Named args :
* [Name=ExpTxt] INT :: {Export files in text format (Def=false means binary)}
* [Name=ByP] INT :: {By process}
* [Name=PostFix] string :: {Add postfix in directory}
* [Name=NbMinPt] INT :: {Minimum number of points}
* [Name=DLR] INT :: {Do Low Resolution}
* [Name=Pat2] string :: {Second pattern}
* [Name=Detect] string
* [Name=Match] string
* [Name=NoMax] bool
* [Name=NoMin] bool
* [Name=NoUnknown] bool
C:\Users\andrea>
```

Figura 102 - Riposta del programma alla richiesta di informazioni per il comando *Tapioca MulScale*

Si può osservare che nella variante *Tapioca MulScale* possono essere inserite 4 voci per la definizione dell'analisi da effettuare sui *file*:

- **string :: (Full Name (Dir + Pat))** : ossia i parametri legati ai nomi del *file* in termini di posizione (*Dir - Directory*) o nome-estensione (*Pattern - Pat*);
- **INT :: (Size of Low Resolution Images)** : ossia il valore della risoluzione minima di elaborazione delle immagini;

- *INT :: (Size of High Resolution Images)* :ossia il valore della risoluzione massima di calcolo delle immagini;
- *Named args : [Name=NbMinPt]* : definisce il valore minimo di tie points individuati nelle immagini a bassa scala sotto il quale non effettuare il calcolo con le immagini ad alta risoluzione.

Di conseguenza la sintassi, nel caso esempio qui riportato, può prender la seguente forma:

```
(Disco):\\(Cartella di lavoro)>mm3d Tapioca MulScale
      ".*JPG" 500 2000 NbMinPt=10
```

Com'è possibile comprendere da questo piccolo esempio, l'utilizzo di MicMac è fortemente legato alla comprensione della sintassi per l'esecuzione di un qualsiasi comando.

Per questo motivo, e soprattutto per il contesto di applicazione, successivamente verranno indicati e brevemente spiegati i vari comandi utilizzati per la generazione della nuvola di punti delle coperture.

Per utilizzi o elaborazioni diverse dalla casistica presentata di seguito, o per eventuali chiarimenti sui comandi, si consiglia la lettura del sito di riferimento nel quale è possibile trovare esempi e spiegazioni esaurienti su tutta la serie dei comandi disponibili, raccolti in ordine alfabetico.

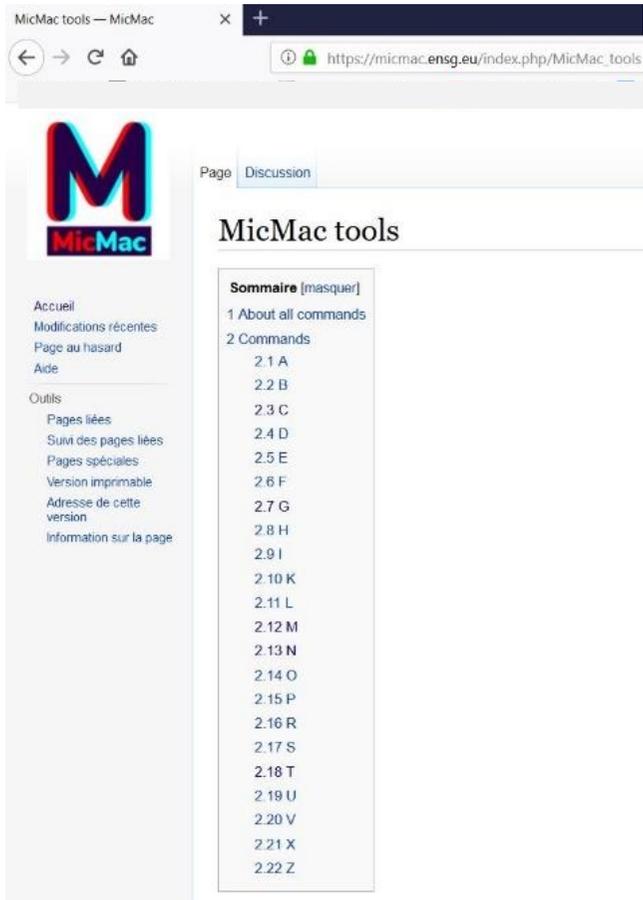


Figura 103 - Screenshot della lista dei comandi disponibile al link https://micmac.ensg.eu/index.php/MicMac_tools

6.3.2 *Workflow impiegato*

L'obiettivo del *workflow* proposto è quello di ottenere come elaborato finale un *file* contenente la nuvola dei punti ed un'ortofoto relativa alle coperture del Complesso di Nazareth.

Per fare ciò è necessario orientare ed elaborare le immagini acquisite tramite *UAV Phantom 4 Pro*, opportunamente raccolte in un'unica cartella utilizzata come riferimento per l'esecuzione del *software*.

Le immagini verranno orientate in base al sistema di riferimento definito dai punti di controllo posti a terra, individuati con i *marker* fotografici.

A tal proposito, dopo l'apertura del prompt dei comandi, sarà incollato il percorso della cartella in questione, seguito dal comando di avvio di MicMac *>mm3d*.

L'insieme dei comandi utilizzati può essere discretizzato nei seguenti tre gruppi di operazioni:

- Orientamento relativo delle immagini;
- Orientamento delle immagini nel sistema locale;
- Ortofoto e nuvola finale delle coperture.

6.3.3 *Orientamento relativo delle immagini*

Com'è possibile intuire, per ottenere un corretto orientamento relativo delle immagini il primo passaggio fondamentale prevede l'estrazione dei *punti omologhi* attraverso il comando *Tapioca*.

Tapioca esegue, come riportato nell'esempio del paragrafo precedente, l'estrazione dei *tie point* attraverso le successive tre fasi:

1. Nella prima fase vengono utilizzate le immagini a bassa risoluzione (500 pixel); i punti omologhi verranno individuati in tutte i possibili accoppiamenti;
2. Le coppie di immagini sono selezionate in base al numero di punti definito da *NbMinPt*
3. Il secondo passaggio estrae i punti omologhi solamente nelle immagini considerate adiacenti, utilizzando una risoluzione più elevata a 2000pixel.

Il primo comando eseguito pertanto sarà:

```
>mm3d Tapioca MulScale ".JPG" 500 2000 NbMinPt=10
```

Al termine dell'esecuzione del comando sarà visualizzata la seguente schermata [Figura 104].

```

Cple Init = 328IN 328 OUT 0
Apres Rm Dup, 259
OK GLOB 1 ./Homol/JPfIasEtI
sDJI_0137.JPG/DJI_0129.JPG.dat
Apres Hom 259
Apres Rot 259
Cple Init = 171IN 171 OUT 0
Apres Rm Dup, 146
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0130.JPG.dat
Apres Hom 146
Apres Rot 146
Cple Init = 197IN 197 OUT 0
Apres Rm Dup, 167
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0131.JPG.dat
Apres Hom 167
Apres Rot 167
Cple Init = 2357IN 2357 OUT 0
Apres Rm Dup, 1762
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0132.JPG.dat
Apres Hom 1762
Apres Rot 1762
Cple Init = 4150IN 4150 OUT 0
Apres Rm Dup, 3132
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0133.JPG.dat
Apres Hom 3132
Apres Rot 3132
Cple Init = 9289IN 9289 OUT 0
Apres Rm Dup, 6764
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0134.JPG.dat
Apres Hom 6764
Apres Rot 6764
Cple Init = 17338IN 17338 OUT 0
Apres Rm Dup, 11979
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0135.JPG.dat
Apres Hom 11979
Apres Rot 11979
Cple Init = 21607IN 21607 OUT 0
Apres Rm Dup, 14472
OK GLOB 1 ./Homol/PastisDJI_0137.JPG/DJI_0136.JPG.dat
Apres Hom 14472
Apres Rot 14472
*****
**
** MicMac: a free open source project for photogrammetry **
** hosted at Ecole Nationale des Sciences Geographiques **
** in Marne-la-Vallée, for IGN-France **
** **
** The project is funded by : **
** **
** - Institut National de l'Information Geographique et Forestiere **
** (IGN main funder since 2003) **
** - the french RUI Project "Culture 3D Cloud" **
** - the french AHR Project "MONUMENTUM" **
** **
** Research also currently supported by : **
** - CNES (French Space Agency) - via TOSCA Committee **
** - Compagnie Nationale du Rhone **
** - Vinci-Construction-Terrassement **
** - ERC Advanced Grant A.Kaeeb "ICEVSS" (University of Oslo) **
** **
** Current Team: NP Deseilligny, D Jouin, J Belvaux, G Maillet, **
** L Girod, E Rupnik, JM Muller, M Daakir, TG Nguyen **
** **
** Contact for participating : Marc.Pierrot-Deseilligny@ensg.eu **
** **
** Hope you enjoy, todo list in case of any problem using MicMac : **

```

Figura 104 - Schermata visualizzata al termine del comando *Tapioca MuScale*.

Dopo aver effettuato l'estrazione dei punti omologhi viene eseguito il primo orientamento relativo fra le immagini, sfruttando l'auto-calibrazione disponibile nell'algoritmo del *software* con il comando *Tapas*.

Nel nostro caso viene utilizzato il modello *Radial Standard (RadialStd)* che concede la memorizzazione solamente dei parametri radiali e la posizione del punto principale.

Il secondo comando da eseguire pertanto sarà:

```
>mm3d Tapas RadialStd ".*JPG" Out=Rel
```

I risultati di questa operazione verranno salvati nella cartella Ori-Rel (abbreviativo di Orientamento Relativo – Orientation Relative) generata in automatico da MicMac all'interno della cartella di lavoro contenente le immagini.

Al termine del calcolo questo comando mostra a video il risultato del primo orientamento relativo, definito nel codice visualizzato con i termini *Residual*, *Moy* e *Max*, come visualizzato nell'immagine seguente [Figura 105].

```
RES:DDT_0137.JPG[C] E82 0.438321 Nm 99.9798 Of 35941 Nul 21743 Nul-Nl 21739 Time 1.171
RES:DDT_0137.JPG[C] F82 0.414776 Nm 95.6826 Of 33429 Nul 18955 Nul-Nl 17488 Time 1.124
Residual = 0.536455 ;; Eviol, Moy=5.55347e-007 ,Max=0.000138665
Worst, Res 0.780116 for D11_0895.JPG, Parc 95.6826 for D11_0137.JPG
Cond , Avar 12.1838 Max 76.7781 Prop:100 0
Value = -2.91838e-010
--- End Iter 10 ETAPE 3

*****
* A-erotriangulation *
* P-hotogrammetrique *
* E-xperimentale *
* R-elativement *
* O-perationelle *
*****

*****
* T-ool for *
* A-erotriangulation *
* P-hotogrammetric with *
* A-pere *
* S-implified (hopefully...) *
*****
```

Figura 105 - Vista finale del comando *Tapas*, con gli errori residui.

Come si può vedere l'errore residuo generico è nell'ordine dei decimali, il che indica un ottimo risultato e quindi un orientamento relativo iniziale molto accurato.

All'interno della cartella *Ori-Rel* viene automaticamente generato un file *.XML* nel quale sono riportati i dati di errori residui (*Residual*) e percentuale corretta in termini di sovrapposizione (*PercOK*) per ogni singola immagine [Figura 106].

```

<?xml version="1.0" ?>
<XmlSauvExportAperoGlob>
  <Iters>
    <OneIm>
      <Name>DJI_0024.JPG</Name>
      <Residual>0.59258338210803685</Residual>
      <PercOk>45.738322912835599</PercOk>
      <NbPts>43504</NbPts>
      <NbPtsMul>0</NbPtsMul>
    </OneIm>
    <OneIm>
      <Name>DJI_0025.JPG</Name>
      <Residual>0.59343012014197571</Residual>
      <PercOk>46.50464483438116</PercOk>
      <NbPts>42628</NbPts>
      <NbPtsMul>0</NbPtsMul>
    </OneIm>
  </Iters>
  <AverageResidual>0.071912649844544818</AverageResidual>
  <NumIter>0</NumIter>
  <NumEtape>0</NumEtape>
</Iters>
<Iters>
  <OneIm>
    <Name>DJI_0013.JPG</Name>
    <Residual>0.67646755675754056</Residual>
    <PercOk>78.511484098939931</PercOk>
    <NbPts>40752</NbPts>
    <NbPtsMul>19468</NbPtsMul>
  </OneIm>
  <OneIm>
    <Name>DJI_0014.JPG</Name>
    <Residual>0.64269320405553154</Residual>
    <PercOk>86.867689503265993</PercOk>
    <NbPts>39498</NbPts>
    <NbPtsMul>20506</NbPtsMul>
  </OneIm>
</Iters>

```

Figura 106 - Estratto del file contenente gli errori residui di orientamento relativo ottenuto col comando *Tapas*.

Arrivati a questo punto è possibile generare un *file* con estensione *.PLY* utilizzando il comando *AperiCloud*. Questo comando ha la capacità di combinare tutti *file* con estensione *.*JPG*, ricavati dall'acquisizione tramite *UAV*, con gli orientamenti ottenuti dal passaggio precedente e raccolti nella cartella di orientamento *Ori-Rel*. Il comando in questione sarà:

```
>mm3d AperiCloud “.*JPG” Re1
```

Il risultato di questo primo orientamento è possibile visualizzarlo attraverso il *software CloudCompare* (che analizzeremo meglio nei paragrafi successivi) aprendo il *file AperiCloud.ply* generato all'interno della cartella nella quale è stato processato l'intero set di immagini [Figura 107- 108].



Figura 107 - Screenshot ricavato dal *software CloudCompare* con la vista d'insieme del primo orientamento ottenuto nel *file AperiCloud.ply*



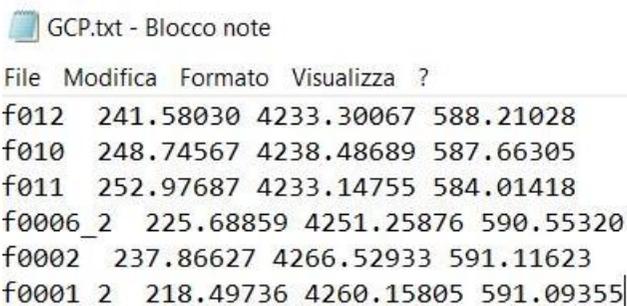
Figura 108 - Dettaglio della copertura ottenuto dall'orientamento relativo preliminare nel file *AperiCloud.ply*

6.3.4 Orientamento delle immagini nel sistema locale

Dopo aver ottenuto l'orientamento relativo preliminare, con un sistema di riferimento generico ed in riferimento al punto di presa, le immagini possono essere orientate e scalate nel sistema locale tramite l'uso dei punti di appoggio a terra, definiti come *Ground Control Points (GCP)*.

Per fare ciò, occorre per prima cosa eseguire un processo di conversione della lista di *marker fotografici* ottenuti dal precedente processo di compensazione della rete in formato *.XML*, unico formato di testo leggibile dal software MicMac. Per eseguire questo passaggio, è stato necessario generare anticipatamente un nuovo *file* di testo tramite lo strumento *Blocco Note* fornito

da Windows, salvando il *file* in formato *.TXT* all'interno della cartella di elaborazione e contenente le sole coordinate relative ai *marker* fotografici [Figura 109].



File	Modifica	Formato	Visualizza	?
f012	241.58030	4233.30067	588.21028	
f010	248.74567	4238.48689	587.66305	
f011	252.97687	4233.14755	584.01418	
f0006_2	225.68859	4251.25876	590.55320	
f0002	237.86627	4266.52933	591.11623	
f0001_2	218.49736	4260.15805	591.09355	

Figura 109 - Lista dei Ground Control Points utilizzati come punti di riferimento terrestri per l'elaborazione finale.

Bisogna specificare che questa non è la lista completa di tutti i *marker* fotografici posizionati in campo, ma è una selezione dei *marker* che hanno portato ad un'accettabile elaborazione finale. Dopo aver eseguito numerose volte l'intero processo di elaborazione delle nuvole per le coperture con risultati scadenti, fortemente imprecisi o inaccettabili perché incompleti, si è notato che l'utilizzo dell'intera lista di *marker* fotografici generava una forzatura dell'orientamento delle immagini. Per tanto, dopo una serie di tentativi non riportati in questo elaborato, si è optato per ridurre la lista dei *marker* fotografici a soli 6 elementi ben distribuiti sull'area di rilievo.

La conversione di questo *file .TXT* ad un *file* con estensione *.XML* avviene tramite il comando *GCPCConvert* attraverso la seguente riga di comando:

```
>mm3d GCPCConvert "#F=N_X_Y_Z" GCP.txt Out=GCP.xml
```

All'interno della stringa di comando, la voce "#F=N_X_Y_Z" rappresenta il formato in cui sono registrati i punti nel *file* di testo, ossia: nome del punto (N), e coordinate lungo gli assi (X_Y_Z). Al termine del calcolo, viene generato in *output* il *file* GCP.xml utilizzabile per i passaggi successivi.

Per ogni punto d'appoggio, alle coordinate nello spazio devono essere associate delle coordinate nelle immagini. Per questo motivo il passaggio successivo prevede l'utilizzo del comando *SaisieAppuisInit*, digitando nel prompt dei comandi la seguente riga:

```
>mm3d SaisieAppuisInit ".*JPG" Re1 NamePointInit.txt
      MeasureInit.xml SzW=[700,500]
```

Con questo comando si caricheranno le immagini dell'intero set all'interno di un'interfaccia grafica [Figura 110].



Figura 110 - Interfaccia grafica del comando *SaisieAppuisInit* attraverso il quale eseguire la validazione dei *marker* a terra.

A questo punto sarà possibile eseguire la misura dei *marker* a terra associando manualmente a ciascun punto le rispettive coordinate, in generale è sufficiente un minimo di 3 punti per immagine. Nella stringa di comando la voce "NamePointInit.txt" è un *file* di lavoro del comando, mentre "MeasureInit.xml" indica il nome dei *file* in *output* (ossia MeasureInit-S2D.xml e MeasureInit-S3D.xml) nel quale verranno memorizzate le coordinate dei punti collimati manualmente.

Per questo processo di collimazione tramite interfaccia grafica, il *software* elabora le foto a multipli di due, in questo caso 4 per volta. Partendo da una delle immagini proposte, è sufficiente zoommare con la rotella del *mouse* per individuare un *marker* fotografico; poi bisogna cliccare col tasto sinistro del *mouse* sopra il punto desiderato per generare un punto generico, successivamente è necessario rinominare il punto generato in modo da associare il corrispettivo presente nella lista delle coordinate e concedere l'associazione al comando. Una volta creato il punto nella prima foto, il comando genera automaticamente il corrispettivo nelle restanti immagini, e nella lista presente sul lato destro visualizzandola con fondo arancione.

Solitamente i punti generati in automatico non sono posizionati correttamente sul *marker* e per tal motivo è necessario selezionarli e trascinarli in posizione tenendo premuto il tasto sinistro del *mouse*. Una volta in posizione, bisogna cliccare col tasto destro e selezionare la voce *Valida*: il *marker* sulla seconda immagine sarà visualizzato in colore verde e, una volta validato lo stesso punto nelle restanti immagini, la rispettiva riga del *marker*, nella barra di comando a destra, cambierà colore passando da arancione a nero. Nel caso in cui un *marker* non sia visibile nelle foto contigue, oppure la posizione è incerta, dopo aver cliccato col tasto destro su di esso è possibile *rifiutare* il

marker o ritenere la posizione *dubbia*. Così facendo, il *software* elaborerà solamente le immagini contenenti punti validi, ignorando quelli dubbi o rifiutati.

Tale processo va eseguito per tutti i *marker* utilizzati, e per ogni singola fotografia. Al termine della procedura, se tutto è stato eseguito in maniera corretta, la lista dei *marker* a destra si presenterà con l'intero fondale nero, e la lista delle fotografie avrà fondale verde, come nella figura successiva [Figura 111].



Figura 111 - Screenshot della procedura di collimazione manuale del comando Sai-sieAppuisnit effettuata correttamente.

Arrivati a questo punto, è sufficiente cliccare su *File*, *Salvare* e chiudere l'interfaccia. Ora, tramite il comando *GCPBascule*, potrà essere eseguito un primo orientamento assoluto dell'intero blocco processato sino ad ora, partendo dai primi punti orientati. Il comando da eseguire sarà:

```
>mm3d GCPBascule .*JPG Re1 Re12 GCP.xml MeasureInit-  
S2D.xml
```

Nel comando è possibile leggere le voci "Re1" e "Re12", esse rappresentano i due orientamenti prima e dopo l'esecuzione della rototraslazione, mentre "GCP.xml" e "MeasureInit-S2D.xml" sono *file* generati nei passaggi precedenti.

Arrivati a questo punto, gli altri punti a terra potranno essere aggiunti in maniera semi-automatica attraverso il comando *SaisieAppuisPredic*, digitando:

```
>mm3d SaisieAppuisPredic ".*JPG" Re12 GCP.xml MeasureFi-  
nale.xml SzW=[700,500]
```

Nella stringa di comando, la voce *SzW* definisce la dimensione delle immagini, mentre *MeasureFinale.xml* definisce i nuovi punti di controllo; gli altri argomenti della stringa di comando, invece, sono quelli ottenuti precedentemente.

Arrivati a questo punto, potrà essere nuovamente determinato l'orientamento delle immagini utilizzando tutti i punti a terra, usando nuovamente il comando *GCPBacule* variando il comando nella seguente maniera:

```
>mm3d GCPBascule .*JPG Re12 Absolute GCP.xml MeasureFi-  
nale-S2D.xml
```

Nonostante la sintassi dei comandi fino a questo punto risulti difficilmente comprensibile, all'atto pratico è stata semplicemente eseguita una rotazione con conseguente variazione di scala del blocco ottenuto in precedenza. Arrivati a questo *step* però è indispensabile eseguire una vera e propria

compensazione andando ad integrare i punti di controllo nel processo di *Bundle Block Adjustment*⁸³.

Questo processo è eseguito in maniera del tutto automatica da MicMac attraverso il comando *Campari*, digitando la seguente riga di comando:

```
>mm3d Campari ".*JPG" Absolute Absolute-final  
GCP=[GCP.xml,0.01,MesureFinale-S2D.xml,0.5]
```

Dove 0.01 indica l'incertezza sui punti di appoggio (in metri, ossia 1 centimetro) definita inizialmente nel paragrafo 6.2.7 in relazione alla tensione dei *target*, mentre 0.5 (in *pixel*) indica l'incertezza sui punti collimati nelle immagini.

Come si può intuire, quindi, il comando *Campari* è uno strumento molto potente, in grado di eseguire una compensazione di misure eterogenee. Esso elabora non solo i *tie points* ed i punti di controllo a terra ma anche dati *GPS*. In caso di georeferenziazione diretta, appositamente per acquisizioni tramite *UAV*, come nel nostro caso, lo strumento fa riferimento anche al vettore che separa il centro di fase dell'antenna *GPS* ed il centro ottico della fotocamera integrata sul velivolo: questo vettore è definito *leva-braccio*. Avviando lo strumento *Campari* con questa stringa di comando, sarà eseguita tutta la

83 - Dato un insieme di immagini che descrivono un numero di punti 3D da diversi punti di vista, la regolazione del fascio può essere definita come il problema di rifinire simultaneamente le coordinate 3D che descrivono la geometria della scena, i parametri del movimento relativo e le caratteristiche ottiche della telecamera impiegata per acquisire le immagini, secondo un criterio di "ottimalità" che coinvolge le corrispondenti proiezioni di immagine di tutti i punti. La regolazione del fascio viene quasi sempre utilizzata come ultimo passaggio di ogni algoritmo di ricostruzione 3D basato sulle funzionalità. Si tratta di un problema di ottimizzazione della struttura 3D e dei parametri di visualizzazione (vale a dire, posa della telecamera e possibilmente calibrazione intrinseca e distorsione radiale), per ottenere una ricostruzione ottimale sotto certe ipotesi riguardanti il rumore relativo alle caratteristiche dell'immagine osservate. Fonte: B. TRIGGS; P. MCLAUCHLAN; R. HARTLEY; A. FITZGIBBON (1999). *Bundle Adjustment — A Modern Synthesis*. ICCV '99: *Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms*. Springer-Verlag. pp. 298–372

compensazione della suddetta mole di dati e riporterà i risultati nella cartella *Ori-Absolute-final* automaticamente generata. Al suo interno è possibile analizzare il file nominato *Residus.xml* contenente tutti i risultati e gli errori residui per ogni singola immagine. Nella figura successiva vi è un piccolo estratto del file, nel quale si nota l'ordine di grandezza dei residui in relazione ai 6 marker di riferimento risultando accettabili in termini di precisione e tolleranza definiti in precedenza [Figura 112].

```
<XmlSauvExportAperoGlob>
  <Iters>
    <OneAppui>
      <Name>F0001_2</Name>
      <EcartFaiscTerrain>0.010690107520588299 0.0064369144301963388 -0.010266963571552878</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.016159294760694297</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>0.69815060201632173</EcartImMoy>
      <EcartImMax>1.5333389086387244</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0088.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
    <OneAppui>
      <Name>F0002</Name>
      <EcartFaiscTerrain>-0.020477533460052655 -0.0072266175084223505 0.0031284405988571962</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.02193947396363893</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>1.1206594127657605</EcartImMoy>
      <EcartImMax>2.4432036374363943</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0023.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
    <OneAppui>
      <Name>F0006_2</Name>
      <EcartFaiscTerrain>-0.0045141584794805567 0.0079847739943943452 0.017593429473436117</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.019840942597472357</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>0.94474844598491892</EcartImMoy>
      <EcartImMax>6.3708490347748672</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0137.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
    <OneAppui>
      <Name>F010</Name>
      <EcartFaiscTerrain>0.0056835832326669333 -0.0066702396807158948 -0.013138671269985025</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.01579303322676108</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>0.9515737419871293</EcartImMoy>
      <EcartImMax>4.2763675918748145</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0133.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
    <OneAppui>
      <Name>F011</Name>
      <EcartFaiscTerrain>0.0018507619355148108 -0.013054451741481898 0.0086187155254719983</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.015752024864176744</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>1.5183184237227152</EcartImMoy>
      <EcartImMax>8.5644559476858788</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0133.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
    <OneAppui>
      <Name>F012</Name>
      <EcartFaiscTerrain>0.00676723924181033 0.012529620536042785 -0.005934950781011139</EcartFaiscTerrain>
      <DistFaiscTerrain>0.015427590819896263</DistFaiscTerrain>
      <EcartImMoy>0.83993482214345327</EcartImMoy>
      <EcartImMax>1.3561064529652729</EcartImMax>
      <NameImMax>DJI_0066.JPG</NameImMax>
    </OneAppui>
  </OneIm>
</Iters>
</XmlSauvExportAperoGlob>
```

Figura 112 - Screenshot dei residui ottenuti attraverso il comando Campari in relazione ai marker fotografici adoperati per l'elaborazione.

Nella seguente immagine, invece, è possibile notare un estratto esplicativo di come i fotogrammi abbiano degli errori residui molto ridotti, nell'ordine di grandezza dei decimali, e percentuali di sovrapposizione molto elevate, prossime al 100% [Figura 113].

```
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0004.JPG</Name>
  <Residual>0.46829953506590904</Residual>
  <PercOk>99.663721482262957</PercOk>
  <NbPts>30332</NbPts>
  <NbPtsMul>22408</NbPtsMul>
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0005.JPG</Name>
  <Residual>0.45816699469437933</Residual>
  <PercOk>99.823738179739422</PercOk>
  <NbPts>41983</NbPts>
  <NbPtsMul>31050</NbPtsMul>
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0006.JPG</Name>
  <Residual>0.4380860145135993</Residual>
  <PercOk>99.836313532105336</PercOk>
  <NbPts>48263</NbPts>
  <NbPtsMul>36524</NbPtsMul>
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0007.JPG</Name>
  <Residual>0.4323606414653155</Residual>
  <PercOk>99.83019357931957</PercOk>
  <NbPts>50057</NbPts>
  <NbPtsMul>35034</NbPtsMul>
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0008.JPG</Name>
  <Residual>0.43484216144178689</Residual>
  <PercOk>99.840222944728282</PercOk>
  <NbPts>53825</NbPts>
  <NbPtsMul>38096</NbPtsMul>
</OneIm>
<OneIm>
  <Name>DJI_0009.JPG</Name>
  <Residual>0.44042629432863062</Residual>
  <PercOk>99.785464186686639</PercOk>
  <NbPts>49409</NbPts>
```

Figura 113 - Screenshot dei residui ottenuti attraverso il comando Campari in relazione ad alcuni fotogrammi adoperati in fase di elaborazione.

6.3.5 Ortofoto e nuvola finale delle coperture

Giunti a questo punto, il blocco elaborato risulta essere scalato e ruotato, per tanto è possibile applicare il comando *Tarama* al fine di ottenere un'immagine mosaicata dell'area su cui eseguire il matching con la relativa ortofoto. Ovviamente la generazione del mosaico avverrà rispetto all'orientamento del nuovo sistema di riferimento, ossia quello definito in precedenza come *Absolute-final*. Il comando sarà avviato digitando:

```
>mm3d Tarama ".*JPG" Absolute-final
```

Questo comando genererà in automatico una nuova cartella all'interno di quella di lavoro, chiamandola *TA*. Al suo interno sarà possibile trovare il file *TA_LeChantier.tif* relativo al mosaico del set fotografico in esame [Figura 114].



Figura 114 - Porzione del mosaico ottenuto attraverso il comando Tarama

Questo mosaico è indispensabile per definire l'area entro la quale eseguire il matching e la creazione dell'ortofoto. Per effettuare questo passaggio il comando utilizzato è *SaisieMasq*:

>mm3d SaisieMasq TA/TA_LeChantier.tif

Sarà visualizzata un'interfaccia grafica che mostra il precedente mosaico, su di essa è possibile definire l'area di lavoro entro cui realizzare il matching ed i successivi passaggi per la realizzazione dell'ortofoto. Per creare il poligono che definisce la maschera di ritaglio, in verde, è sufficiente cliccare col tasto sinistro del *mouse* [Figura 115].

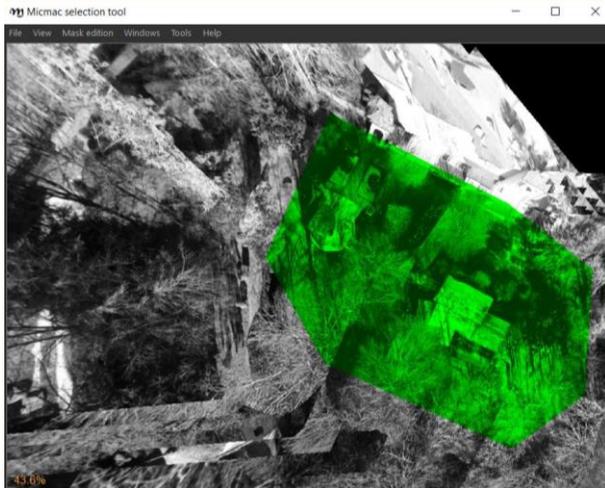


Figura 115 - Strumento di selezione della maschera di ritaglio.

Una volta ultimata la selezione dell'area di interesse, si procede cliccando su *File*, *Salva* e successivamente chiudendo l'interfaccia.

Una volta identificata la maschera di ritaglio, può essere lanciato il comando *Malt* che, partendo dalle immagini in *input* e dagli orientamenti presenti nella cartella genererà il matching denso.

Bisogna notare che questo comando eseguirà l'operazione di matching solo ed esclusivamente nella zona definita dalla maschera identificata nel comando *Tarama*, che sarà caricata automaticamente.

Al termine del calcolo, *Malt* genererà una serie di *file* in preparazione di un DSM⁸⁴ con risoluzione pari ad un punto ogni 4 pixels.

Come mostrato nella seguente figura, verranno generati tutta una serie di *file* con estensioni *.TIF*, che verranno salvata all'interno della cartella *MEC-Malt*, come ad esempio il *file Correl_STD-Malt_Num8* in formato *.TIF* [Figura 116].

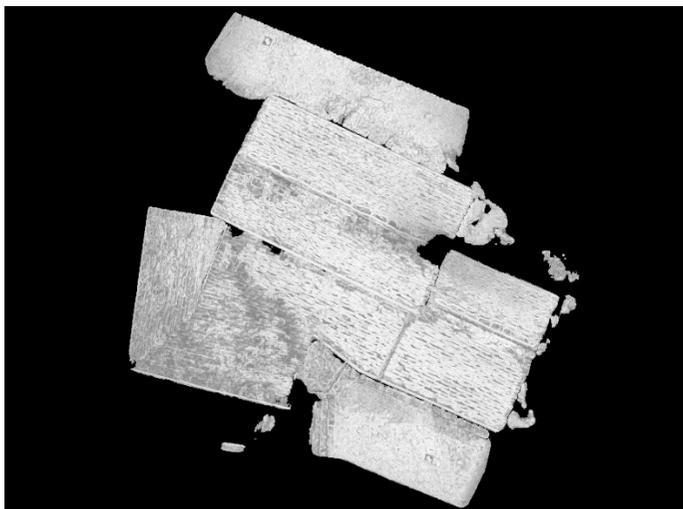


Figura 116 – Esempio di elaborazione ottenuta tramite il comando *Malt*.

84 - *DSM: Digital Surface Model*. Con *DSM* si intende un *file* digitale contenente la rappresentazione della superficie terrestre comprensiva di tutti gli elementi ed oggetti che vi si trovano sopra: edifici, alberi o altri manufatti.

Oltre alla base del *DSM*, verranno anche generate le porzioni di ortofoto ed i relativi *file* riguardanti le occlusioni attraverso il comando *Malt Ortho*:

```
>mm3d Malt Ortho ".*JPG" Absolute-final
```

Tutti i risultati di questo comando verranno automaticamente salvati nella cartella appositamente generata da MicMac all'interno del folder di lavoro, nominata *Ortho-MEC-Malt*.

L'ortofoto vera e propria sarà generata nel passaggio successivo, utilizzando il comando *Tawny*.

Fondamentalmente è un comando relativamente semplice che presuppone la corretta preparazione dei dati precedenti, organizzati durante il processo di matching.

In pratica è un comando strettamente connesso all'utilizzo del precedente comando *Malt* che, impiegato in modalità *Ortho*, ha creato tutta una serie di ortofoto associate a maschere di ritaglio ed immagini di incidenza all'interno della directory *Ortho-MEC-Malt*.

Essenzialmente *Tawny* ha il compito di unire questi dati ed eventualmente effettuare alcune equalizzazioni radiometriche.

Il comando sarà avviato digitando:

```
>mm3d Tawny Ortho-MEC-Malt/
```

Al termine dell'esecuzione, accedendo nella cartella *Ortho-MEC-Malt*, è possibile individuare un *file* in estensione *.TIF* nominato *Orthophotomosaic* che rappresenterà la vera e proprio ortofoto del nostro sito [Figura 117].

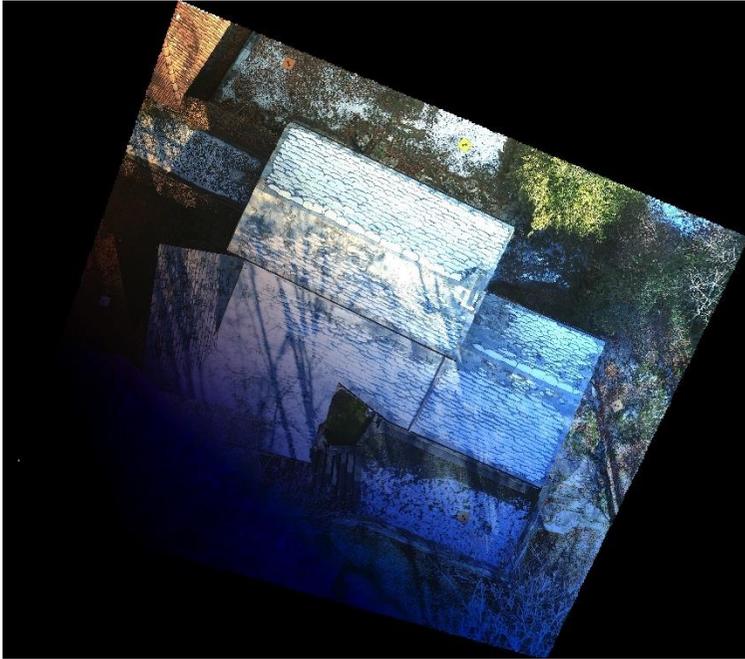


Figura 117 - Ortofoto prodotta dal *software* MicMac dal *set* di immagini di partenza.

Per quanto riguarda il DSM, esso potrà essere generato definitivamente e visualizzato in modalità *shaded relief*⁸⁵ applicando il seguente comando

85 - Shaded Relief: è una modalità di visualizzazione associata, in generale, all'ombreggiatura vera e propria del rilievo, ovvero un'illuminazione simulata che schiarisce i pendii inclinati verso la fonte di luce e scurisce quelli opposti. Questo utilizzo permette un'ottimale percezione del rilievo. Fonte: <http://www.alspergis.altervista.org/lezione/22.html>

nominato *GrShade*. La sintassi da digitare questa volta sarà leggermente più complessa e sarà:

```
>mm3d GrShade MEC-Malt/Z_Num9_DeZoom2_STD-MALT.tif Mode-  
Ombre=IgnE Out=Varallo.tif Mask=MEC-Malt/AutoMask_STD-  
MALT_Num_8.tif
```

Il suddetto comando è applicato per computare l'ombreggiamento da valori di profondità o eventualmente partendo da un DEM quando è applicabile. Nella sintassi del comando è possibile leggere, dopo il nome del comando (*GrShade*), il percorso del DEM di riferimento (*Z_Num9_DeZoom2_STD-MALT.tif*), all'interno della cartella *MEC-Malt* [Figura 118].

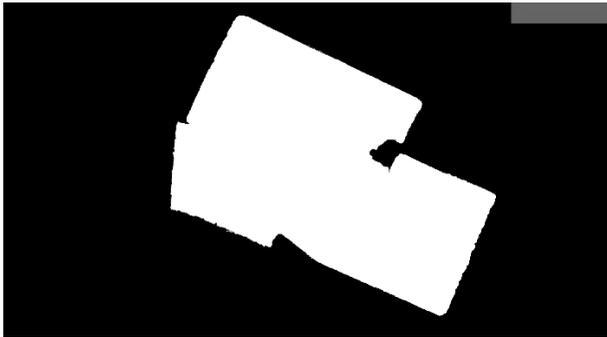


Figura 118 - Immagine impiegato, *Z_Num9_DeZoom2_STD-MALT.tif*

L'elemento successivo nella sintassi costituisce la modalità di ombreggiamento (*ModeOmbre=IgnE*); l'ultimo elemento costituisce il percorso definito per la maschera di ritaglio (*MEC-Malt/AutoMask_STD-MALT_Num_8.tif*) [Figura 119].



Figura 119 - Maschera di ritaglio impiegata.

Nel mezzo della riga di comando troviamo il nome da attribuire al *file* in *output* dal processo (*Out=Varallo.tif*) che sarà generato all'interno della *directory* di elaborazione iniziale. Esso costituirà il vero e proprio DSM ottenuto dall'intero processo [Figura 120].

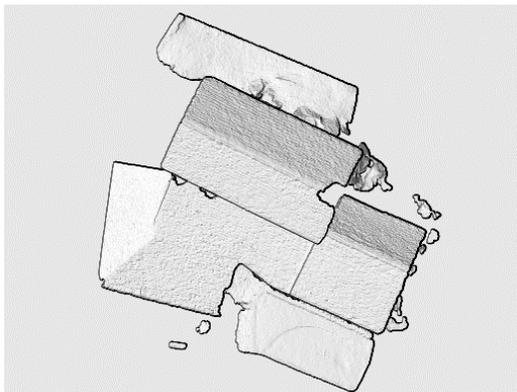


Figura 120 - DSM generato in visualizzazione shaded relief

Arrivati a questo punto, però, non disponiamo a conti fatti di un file contenente una vera e propria nuvola di punti, correttamente orientata ed utilizzabile per la successiva fase di modellazione.

Per tanto sarà necessario applicare il comando *Nuage2Ply*, strumento in grado di convertire una mappa di profondità, o del *DEM* come nel nostro caso, in una nuvola di punti in forma *.PLY*; con questo strumento è possibile applicare anche informazioni relative al colore in *RGB* attraverso l'opzione *Attr*. La sintassi di base del comando prevede il seguente ordine:

```
mm3d Nuage2Ply XMLFile NamedArgs
```

Come *file XML* andremo ad attribuirvi quello ottenuto dal comando *Malt-Ortho*, mentre alla componente *NamedArgs* andremmo ad apporre l'ortofoto generata attraverso il comando *Tawny* all'interno della cartella *Ortho-MEC-Malt*, inoltre aggiungeremo il nome da attribuire al *file* generato, inserendo il prefisso *Out*. A questo punto il comando effettivo da introdurre sarà:

```
>mm3d Nuage2Ply "MEC-Malt/NuageImProf_STD-  
MALT_Etape_9.xml" Attr="Ortho-MEC-Malt/Orthophotomo-  
saic.tif" Out=VaralloSurfaceModel.ply
```

Al termine del processo sarà generato il *file* in formato *.PLY* all'interno della directory di lavoro.

Utilizzando nuovamente il *software CloudCompare* è possibile visualizzare il risultato ottenuto, come mostrato nei seguenti *screenshot*:

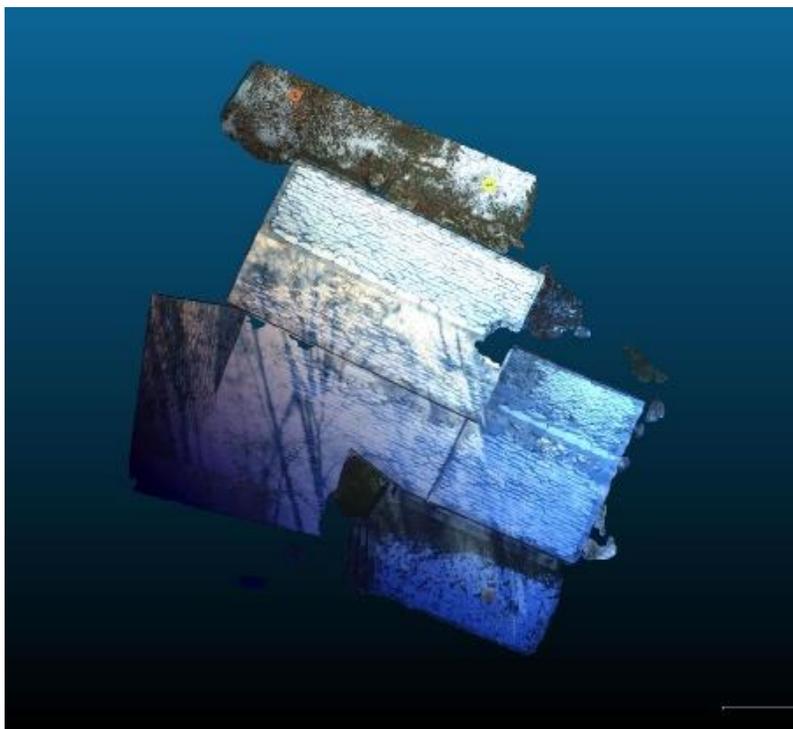


Figura 121 - Vista superiore della nuvola di punti ottenuta in relazione al set di immagini delle coperture.

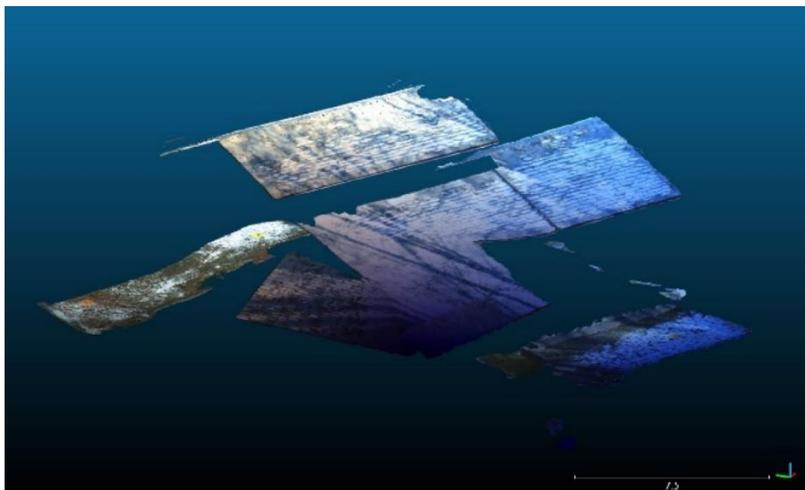


Figura 122 - Vista assonometrica della nuvola di punti.

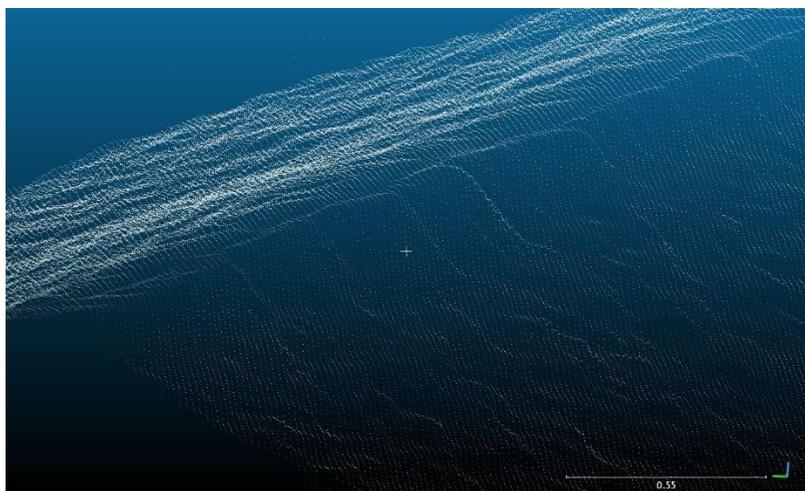


Figura 123 - Vista di dettaglio della nuvola di punti ottenuta.

7. Elaborazione delle nuvole di punti

Allo stato attuale abbiamo creato due distinte nuvole di punti: una relativa alle superfici terrestri e verticali ottenute a partire dall'elaborazione dei dati acquisiti tramite *laser scanner*, ed un'altra relativa alle coperture ottenute attraverso il processamento delle immagini ottenute tramite il volo *UAV*.

Per proseguire con la realizzazione di un vero e proprio modello 3D è necessario ora unirle ed effettuare alcune elaborazioni su di esse. Per far ciò sono stati utilizzati due *software* indispensabili per compiere le operazioni di elaborazione, pulizia e taglio delle nuvole al fine di ottenere dei *file* ottimizzati in termini di peso e suddivisi in sottocategorie ottimali per la successiva fase di modellazione in *Autodesk Revit Architecture*.

Di seguito verranno descritte le operazioni eseguite per ottenere la nuvola di punti idonea all'elaborazione del modello 3D.

7.1 Il software CloudCompare

CloudCompare è un *software open source* di elaborazione 3D delle nuvole di punti e/o di *mesh* triangolare creato durante le fasi di collaborazione tra le aziende *Telecom ParisTech* e la divisione I+S dell'*Electricité de France*.

Originariamente è stato progettato per eseguire operazioni di confronto tra due diverse nuvole dense di

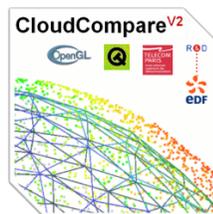


Figura 124 - Logo del *software* Cloud-Compare.

punti, come per esempio quelle ottenute da acquisizione *laser scanner*, oppure confronti tra una nuvola di punti e superfici *mesh* triangolari. Per far ciò il *software* è provvisto di un'apposita struttura ad *octree*⁸⁶ appositamente dedicata.

Nel tempo il *software* è stato esteso e implementato a programma più generico di elaborazione di nuvole di punti, inserendo algoritmi più avanzati dedicati alla registrazione, ricampionamento, gestione dei campi colore, calcolo di eventuali statistiche, gestione dei sensori, ecc.⁸⁷

Essendo stato configurato come *software open source*, quindi sviluppabile in maniera libera, vi è la possibilità ulteriore di implementare le potenzialità con l'aggiunta di eventuali *plug-ins* specifici, potenzialità che non è stata impiegata nelle nostre fasi di elaborazione. Nel nostro caso, infatti, il *software* è stato impiegato unicamente per le seguenti operazioni:

- Pulizia dalle porzioni superflue;
- Filtraggio delle nuvole;
- Unione delle nuvole.

Nei paragrafi seguenti saranno riportate le fasi di elaborazione eseguite.

86 - Un *octree* è una struttura di dati ad albero in cui ogni nodo interno ha esattamente otto figli generalmente impiegati nella grafica 3D o nei motori di gioco 3D. Gli *octree* sono spesso utilizzati per partizionare uno spazio tridimensionale suddividendolo ricorsivamente in otto ottanti e si configurano come il corrispettivo tridimensionale dei quadranti. Il nome è formato da Oct + Tree, ma generalmente viene abbreviato con il nome *octree*. Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree>

87 - Fonte: <https://www.danielgm.net/cc/>

7.1.1 La pulizia delle nuvole

Per quanto riguarda l'elaborazione ottenuta con il *software FARO SCENE* (paragrafo 6.2.1), le nuvole esportate in formato *.E57* da ogni scansione sono costituite da un insieme elevatissimo di punti, talvolta superiori alla decina di miliardi, difficilmente gestibili anche solo in fase di visualizzazione.

Ciò è possibile notarlo immediatamente dopo l'operazione di *drag&drop* della singola scansione all'interno della finestra di elaborazione di *CloudCompare*, dopo aver confermato l'importazione cliccando su *Apply All* nella finestra che si aprirà appena dopo il rilascio del *file*, come mostrato successivamente [Figura 125].



Figura 125 - Vista superiore in *CloudCompare* della scansione *Frana_20_10014*.

Com'è possibile osservare nell'immagine precedente, la nuvola comprende la restituzione di una serie di elementi, quali alberature e porzioni di ambiente circostante, superflui per le successive fasi di modellazione architettonica. Per questo motivo il primo passaggio da eseguire è quello di effettuare, per ogni singola scansione, un'operazione di pulizia.

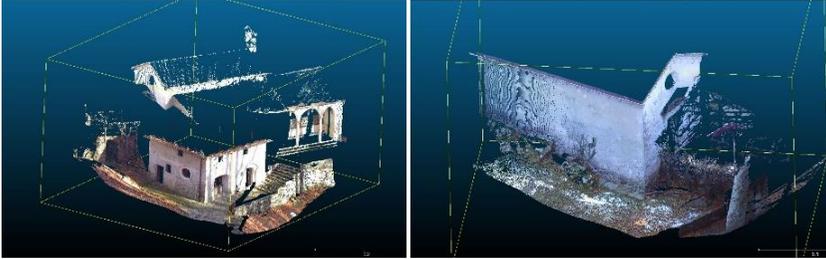


Figura 129 - Frana_20_10021 pulita.

Figura 128 - Frana_20_10033 pulita.

Si proseguirà con la successiva fase dopo aver pulito tutte le nuvole di punti, inclusa quella relativa alle coperture.

7.1.2 Il filtraggio del numero di punti

Dopo aver ultimato l'operazione di pulizia è necessario ridurre il numero di punti, nonostante le porzioni superflue siano già state eliminate. Questa operazione consente di ridurre di circa il 90% le dimensioni complessive dei singoli *file*, comportandone un notevole miglioramento in termini di utilizzo e fruibilità del *file*.

Il comando impiegato è chiamato *Subsample* ed è attivato, dopo aver selezionato il *file* della scansione nella barra dei livelli sulla sinistra, attraverso la finestra *Edit* nella barra dei comandi in alto, come mostrato nella seguente figura [Figura 130].

Sarà visualizzata una finestra, nominata *Cloud sub sampling* nel quale è possibile inserire il criterio di filtraggio del *file*.

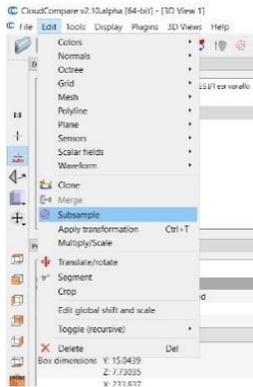


Figura 130 - Attivazione del comando *Subsample*

Nel nostro caso, al di sotto del campo parametri di campionatura, sono state selezionate la metodologia *Space* ed è stato inserito il valore di 0.02 metri, pari alla tolleranza stabilita, come valore minimo di spazio fra i punti [Figura 131].

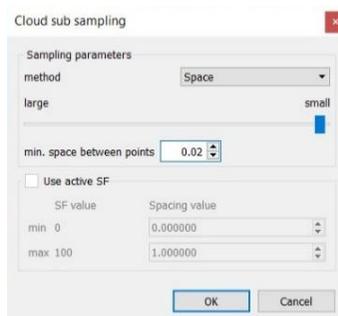


Figura 131 - Inserimento del criterio di campionatura.

Di seguito viene riportato a titolo di esempio il risultato ottenuto con l'operazione di filtraggio [Figura 132].

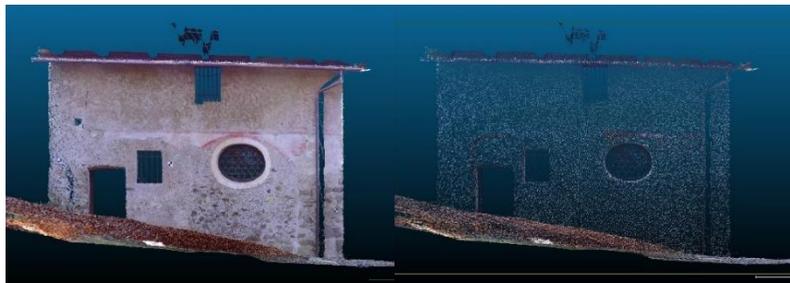


Figura 132 – Confronto tra una porzione di scansione senza (a sinistra) e con l'operazione di filtraggio (a destra)

Ogni scansione, quindi, sarà nuovamente salvata in funzione della successiva fase di unione.

7.1.3 L'unione delle nuvole

La fase di unione delle nuvole è probabilmente la più semplice da eseguire all'interno di *CloudCompare*, anche se costituisce la vera prova del nove di tutte le operazioni precedentemente compiute.

Qualora queste siano state eseguite correttamente, le nuvole si disporranno in posizione senza la necessità di effettuare nessuna particolare operazione, se non quella di importazione, controllo visivo e successiva esportazione.

L'unione avviene, all'interno di *CloudCompare*, effettuando un *drag&drop* di tutti i *file* relativi alle scansioni *laser* e della nuvola di punti relativa alla copertura.

Per ragioni pratiche e di comodità, si è optato di fare due successive operazioni di unione, generando dapprima un unico *file* contenente le sole nuvole pulite e filtrate derivanti dalle acquisizioni *laser* [Figura 133], che successivamente sarà integrato anche le porzioni di copertura [Figura 134].



Figura 133 - *File* generato dall'unione delle nuvole derivanti dall'acquisizione tramite *laser scanner*.

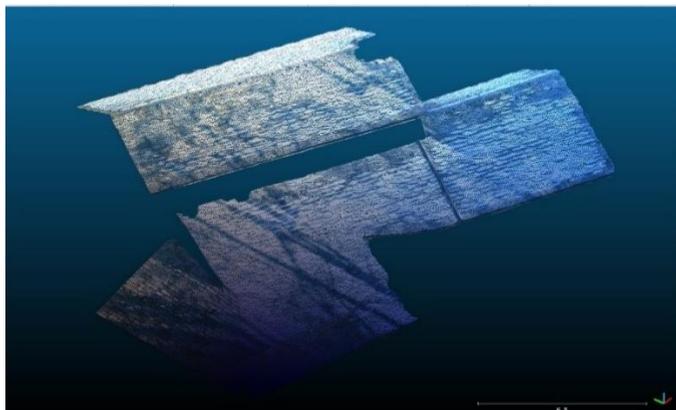


Figura 134 - *File* relativo alle porzioni di copertura ottenuto dalle fasi di pulizia e filtraggio.

Dopo l'operazione di unione dei due *file*, il risultato ottenuto sarà quello mostrato nelle seguenti immagini.

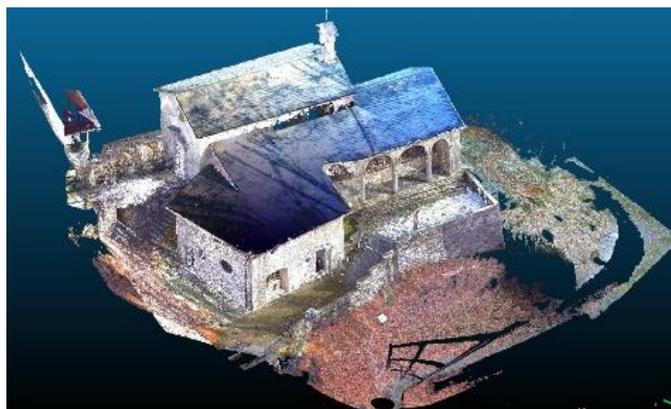


Figura 135 - Vista complessiva della nuvola di punti completa ottenuta.



Figura 136 - Vista di dettaglio della copertura relativa alla cappella 3.



Figura 137 - Vista frontale di dettaglio relativa alla facciata della cappella 2.

Si può notare dalle immagini precedenti come la nuvola di copertura vada a posizionarsi esattamente in posizione, senza mostrare nessun problema di georeferenziazione o allineamento. Per questo motivo si può ritenere che le operazioni precedenti siano state eseguite in maniera corretta e, quindi, è possibile passare alla successiva fase di discretizzazione delle nuvole salvando il *file* unito in formato *.E57*.

7.2 Preparazione alla modellazione

La nuvola di punti così ottenuta non può ancora essere utilizzata all'interno dello spazio di modellazione di *Revit* perché non concede un'agevole visualizzazione delle porzioni più nascoste dell'edificio. Per questo motivo l'ultimo passaggio necessario prima di proseguire alla vera fase di modellazione è l'idonea conversione dell'intero *file* in sottoregioni, esportate in un formato leggibile dal *software BIM*.

A questo scopo si è adoperato il programma *ReCap360 PRO* distribuito dall'azienda *Autodesk* anche con licenza per studenti.

7.2.1 Il software *ReCap360*

Il *software ReCap360*, abbreviativo di *Reality Capture 360°*, è un *software* prodotto dalla nota azienda *Autodesk* e destinato alla creazione o manipolazione e *editing* di modelli 3D di nuvole di punti ricavate da fotogrammetria o *laser scanner*, in grado di ottenere come prodotto finale delle nuvole, o *mesh*, pronte all'utilizzo



Figura 138 - Logo di ReCap360 PRO

immediato nei *tool CAD e BIM* distribuiti dalla stessa azienda. Considerando che la maggior parte delle operazioni di ritaglio e pulitura delle nuvole è avvenuta all'interno di *CloudCompare*, in questa fase ci si è limitati alle seguenti operazioni:

- Importazione del modello;
- Discretizzazione in sottoregioni;
- Esportazione delle sotto regioni

Nei successivi paragrafi verranno riportate in breve le operazioni eseguite.

7.2.2 L'importazione

Per eseguire l'importazione delle nuvole di punti, il programma richiede necessariamente l'inizializzazione di un nuovo progetto [Figura 139].



Figura 139 - Barra dei comandi di ReCap360 PRO con icona per la generazione di un nuovo progetto.

Successivamente sarà richiesta l'introduzione del nome di riferimento del progetto e successiva selezione dei *file* di interesse, eseguibile tramite selezione da cartella oppure tramite *drag&drop* [Figura 140].

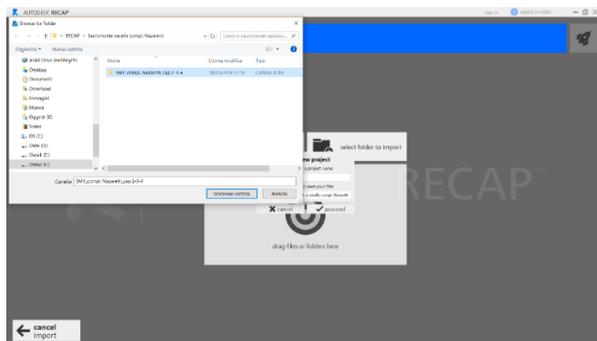


Figura 140 - Selezione del *file* contenente la nuvola di punti completa e filtrata.

Avviando la procedura il *file* provvederà al caricamento dei dati contenuti nei *file* mostrando la seguente schermata di caricamento [Figura 141] al termine del quale sarà possibile accedere alla finestra di lavoro vera e propria.

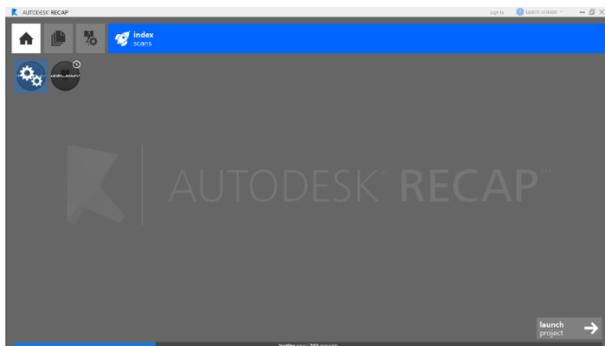


Figura 141 - Finestra di caricamento dei *file* relativi alla nuvola di punti.

Una volta arrivati nella finestra di lavoro sarà visualizzato il modello precedentemente ottenuto e sarà possibile agevolmente orbitare attraverso l'apposito *tool* a forma di cubo posto in alto a destra.

Attraverso la rotella del *mouse* invece sarà possibile effettuare lo zoom per osservare maggiormente nel dettaglio il modello.

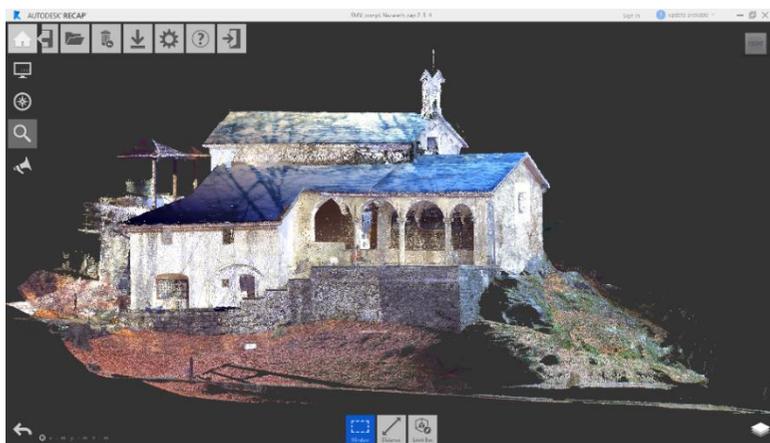


Figura 142 - Vista frontale del modello importato.

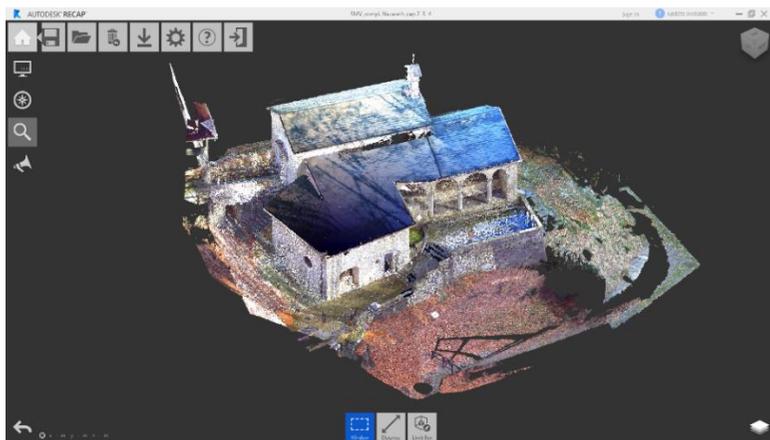


Figura 143 - Vista assonometrica del modello importato.

7.2.3 Discretizzazione in sottoregioni

A questo punto è possibile proseguire con l'*editing* del *file*, effettuando una discretizzazione della nuvola di punti dividendolo in opportune sotto regioni, in modo da agevolare la successiva fase di modellazione in *Revit*.

A titolo di esempio sarà mostrata la procedura effettuata per generare la prima sottoregione, ossia quella costituente la superficie topografica e, più in generale, dell'ambiente circostante.

Prima di eseguire la selezione, è necessario accedere al *Navigatore di progetto* tramite l'apposita icona in basso a sinistra, e creare una nuova regione cliccando sull'icona a forma di “+” posta a lato della voce *Regioni* [Figura 144].

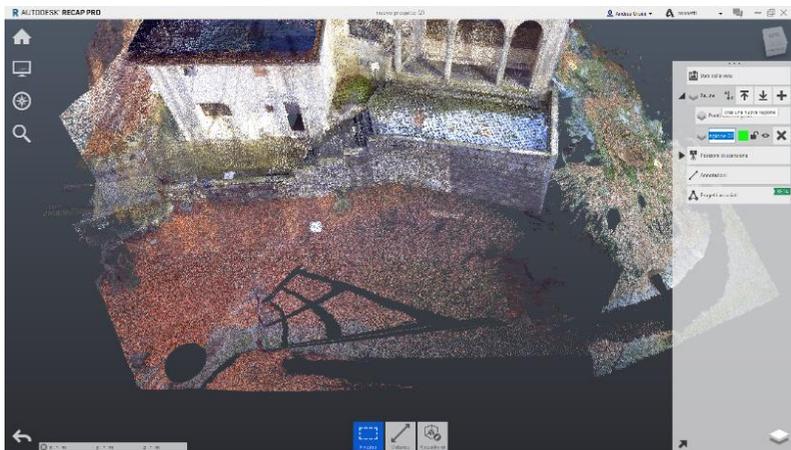


Figura 144 - Creazione della regione.

Posizionato il modello in una vista idonea, si prosegue con la selezione del comando *Delimitatore* come mostrato in figura:

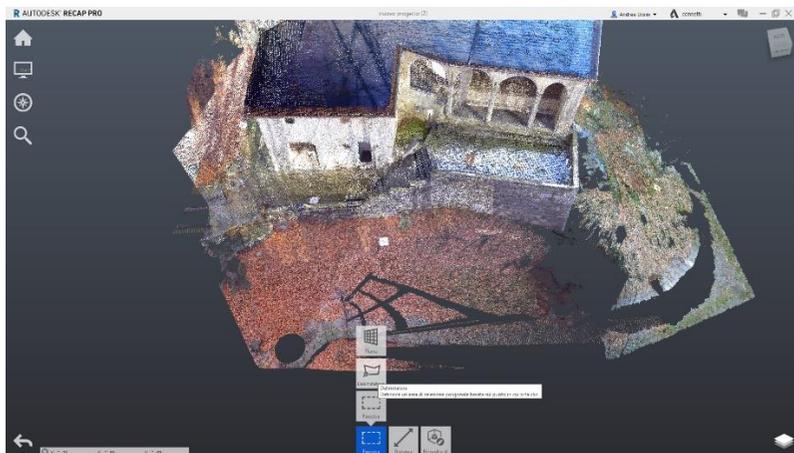


Figura 145 - Selezione del comando Delimitatore

Il comando dà la possibilità di selezionare i punti generando una polilinea che sarà creata cliccandone i vertici attraverso il tasto sinistro del *mouse*.

Essendo il modello articolato e tridimensionale, difficilmente è possibile definire la regione attraverso una singola polilinea di selezione. Per questo motivo occorre effettuare più selezioni orbitando il *file* di volta in volta e attribuendo ai punti evidenziati l'appartenenza alla regione appena creata selezionandola attraverso l'apposita icona posta nella barra strumenti in basso, come mostrato in figura [Figura 146].

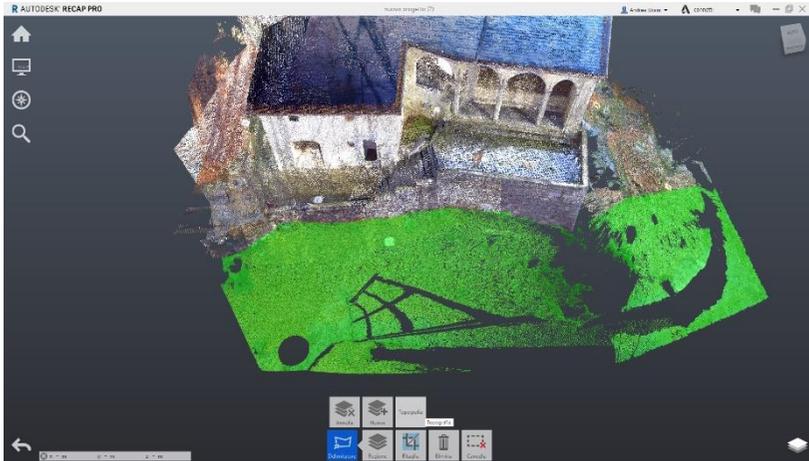


Figura 146 - Attribuzione della regione di appartenenza ai punti selezionati.

La selezione dei punti sarà visualizzata con lo stesso colore della regione creata nel *Navigatore di progetto*.

Attraverso lo stesso menù, si consiglia di nascondere la regione in fase di creazione, attraverso le apposite icone a forma di occhio e di lucchetto, mostrate nella Figura 147.

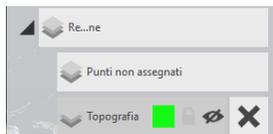


Figura 147 - Icone utili a nascondere i punti appartenenti alla regione d'interesse.

Andando ad attribuire i punti selezionati a una regione che, pur esistente nel modello, è bloccata e non visualizzata, si ha la possibilità di non effettuare una doppia selezione o di incorrere in eventuali errori di selezione.

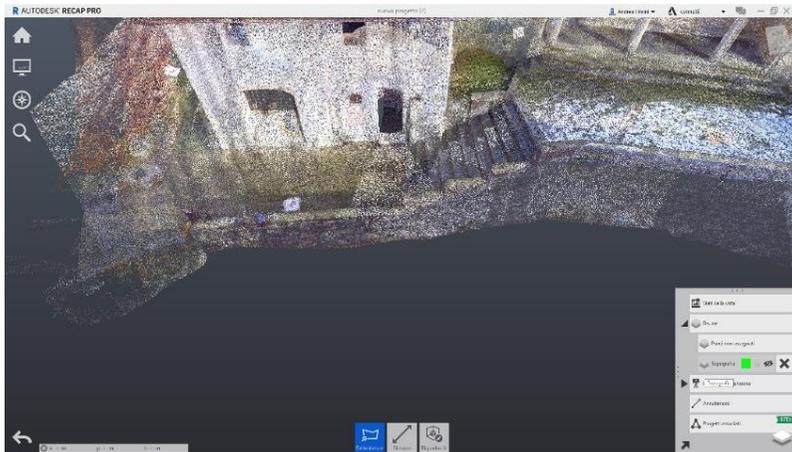


Figura 148 - Modello con la regione "Topografia" nascosta.

Per tanto i punti saranno nascosti, e quindi si potrà proseguire con la creazione di nuove regioni e selezioni.

In questa fase è possibile identificare dei punti superflui, sfuggiti nella precedente operazione di pulizia in *CloudCompare* e, per questo motivo, è necessario selezionarli ed eliminarli, dato che nei prossimi *step* di elaborazione le nuvole non saranno più editate o modificate.

7.2.4 L'esportazione

L'operazione di esportazione è molto semplice e intuitiva, ed è eseguita attraverso l'apposito comando posto sotto la voce *Regioni* nel menù *Navigatore di progetto* cliccando sull'icona a forma di freccia con trattino rivolta verso l'alto.

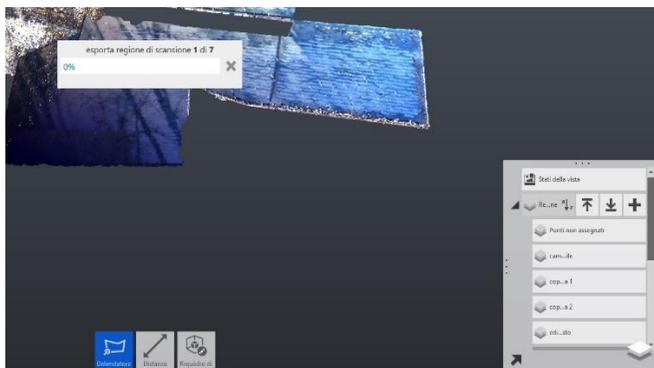


Figura 149 - Procedura di esportazione delle regioni

Il salvataggio in formato *.RCS* sarà effettuato ogni qualvolta che una regione viene creata e non a lista ultimata. È preferibile esportare le regioni singolarmente o, al massimo, a piccoli gruppi, perché sono stati riscontrati errori in fase di elaborazione che hanno comportato la chiusura inaspettata del *software Recap360 PRO* con l'inevitabile perdita delle operazioni effettuate e non salvate.

In totale sono state esportate ben 26 sotto regioni, secondo il seguente criterio:

- Contesto:
 - Topografia
 - Vialeto + gradini + muri di contenimento del terreno
 - Ponte di collegamento
 - Edificio adiacente

- Cappella 2:
 - Muri
 - Pavimento

- Volta
- Campanile
- Copertura
- Corridoio di collegamento:
 - Muri
 - Pavimento
 - Gradini
 - Volte
- Cappella 3:
 - Muri
 - Pavimento
 - Volte
 - Coperture
- Cappella 4:
 - Muri
 - Pavimenti
 - Volte
 - Sottotetto
- Colonne:
 - Colonne cappella 3
 - Colonna cappella 4
- Grotta:
 - Muri
 - Pavimento
 - Volte

Ognuna di queste regioni costituirà la base di riferimento per la modellazione di ogni singolo elemento costituente l'edificio tramite i comandi disponibili in *Revit Architecture*.

8. Il modello tridimensionale

8.1 La metodologia BIM

Il termine *BIM* nasce come acronimo del concetto di *Building Information Modeling* (o *Building Information Model*), metodologia operativa dedicata alla progettazione e alla gestione degli edifici attraverso particolari formati digitali in grado di combinare assieme analisi e controllo di diversi parametri. Tutto ciò conferendo una maggior efficienza rispetto ai processi operativi *CAD* di tipo tradizionale.

L'elemento principale che contraddistingue la progettazione in *BIM* è la realizzazione del modello tridimensionale che, al contrario di quello *standard*, non si limita a contenere le sole informazioni di tipo geometrico o grafico. Nel modello, infatti, agli elementi vengono associati dati di tipo tecnico, analitico o documentale, al fine di ottenere oggetti *smart* di natura parametrica.

La modellazione del progetto e, quindi, dei singoli elementi, risulta essere di molto facilitata perché univoca: ogni modifica apportata al singolo oggetto in una qualsiasi vista viene infatti automaticamente riportata in ogni elaborato allegato, sia esso un disegno 2D o 3D, oppure contenente dati associati ad abachi.

Durante la modellazione, inoltre, è possibile verificare in tempo reale eventuali interferenze involontarie tra i singoli elementi, anche di diversa natura o funzione: ciò permette di ridurre significativamente gli errori, consentendo un notevole risparmio di tempo e risorse.

Un modello *BIM* rappresenta perciò la coesistenza dell'insieme dei processi attuati per consentire la realizzazione, la gestione e, allo stesso tempo, ricavare informazioni tra i diversi soggetti⁸⁸ attori del processo edilizio, non focalizzandosi sulla sola rappresentazione digitale.

In questa tipologia di *software* infatti, vengono inclusi tutti i settori legati al mondo delle costruzioni non solo in termini tipologici (edifici, strade, ferrovie), ma anche come fasi (pianificazione, progettazione, realizzazione e gestione)⁸⁹.

8.1.1 I concetti di interoperabilità ed utilizzazione

L'approccio *BIM* ha la prerogativa di svilupparsi attorno al concetto di *interoperabilità* inteso come possibilità di interazione delle diverse figure professionali operanti nel settore AEC (Architettura – Edilizia – Costruzioni), attraverso

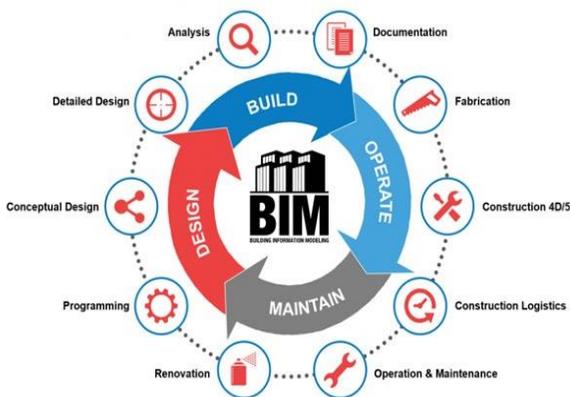


Figura 150 Schema rappresentativo della logica *BIM*.

Fonte: <https://tubi.net/progetti-bim/progetti-bim-3/>

88 - OSELLO, A., *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, Dario Flaccovio Editore, Torino, 2012, p.33

89 - BARBERO, A., *BIM 4D – Pianificazione e gestione della manutenzione: il caso studio dello Juventus Stadium*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria Edile, A.A. 2015/2016, p.13

l'integrazione in contemporanea di tutte le informazioni utili e necessarie alla costituzione di un vero e proprio *file-database*.

L'*interoperabilità* è però definita come "capacità di due o più sistemi [...] di scambiare informazioni tra loro e di essere poi in grado di utilizzarle"⁹⁰. Proprio questo secondo concetto di *utilizzazione*, però, va a scontrarsi con il mondo razionale e pratico, caratterizzato dalla sempre più crescente diversità di sistemi applicativi complessi, sia di natura privata o pubblica.

Ciò si traduce nell'attuazione di forti cambiamenti nell'industria delle costruzioni, che si trova inevitabilmente costretta a imporre importanti cambiamenti al fine di consentire una fluida interazione tra i diversi attori del processo edilizio.

Allo stato attuale non esiste ancora un'applicazione o un *software* in grado di gestire autonomamente tutte le attività richieste in edilizia. Per questo motivo, oggigiorno, alle aziende di *software* è richiesto uno sforzo enorme per rinnovare ed attuare degli *standard* tecnici che agevolino l'interazione delle diverse figure professionali e dei vari prodotti del loro operato.

Questo comporta un costante sviluppo ed aggiornamento del *formato dei file*, che parallelamente devono garantire il trasferimento idoneo della totalità dei dati contenuti all'interno dei *database* o dei modelli, codificandoli in base a *standard* internazionali ufficiali e a normative sempre più articolate e specifiche.

90 - Fonte: http://www.treccani.it/enciclopedia/interoperabilita_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/

8.1.2 Il formato IFC

Un esempio del frutto di questa evoluzione tecnologica e dei concetti espressi nel precedente paragrafo è il cosiddetto *file* in formato *IFC*.



L'*IFC* è una tipologia di estensione di *file*, derivante dall'acronimo di *Industry Foundation Classes*, che ha lo scopo finale di descrivere, codificare, e scambiare i dati

Figura 151 - Logo del formato IFC.

legati al mondo dell'edilizia e delle costruzioni. Si presenta come un formato *file* neutrale e aperto, e la sua distribuzione non viene controllata da un singolo fornitore o da uno specifico gruppo.

Un *file IFC* si costituisce come un formato basato su un modello di dati sviluppato da *buildingSMART*, organizzazione formalmente legata all'*International Alliance for Interoperability* (IAI) fondata con l'intento di facilitare l'interoperabilità tra le discipline di architettura, ingegneria e costruzione nell'industria dell'edilizia⁹¹.

Questa tipologia di *file* è stata sviluppata ad iniziare dal 1994, quando un consorzio industriale investì per lo sviluppo di un insieme di classi in C++ capaci di supportare lo sviluppo di ulteriori applicazioni integrate. Al consorzio IAI inizialmente aderirono 12 società statunitensi ma, dal settembre 1995, essa si aprì a tutte le parti interessate. Nel 1997 fu ricostituita come organizzazione *non-profit*, avente l'obiettivo di promuovere lo *standard* neutro *IFC* come

91 - Fonte: <http://www.ibimi.it/ifc-cose-e-come-e-fatto/>

prodotto utile all'integrazione dell'ambiente *BIM*, introdotto dall'azienda *Autodesk*.⁹²

Nonostante le specifiche del modello di dati siano riconosciute e registrate ufficialmente come norma internazionale ISO 16739:2013⁹³, l'architettura di un *file* in *standard IFC* risulta tutt'oggi essere molto articolata.

Pur essendo un'enorme risorsa costantemente aggiornata ed implementata, e pur essendo supportata da numerosi *software* prodotti dalle aziende del settore edilizio, il *file* non è sempre facilmente interpretabile e decodificabile dai diversi programmi. In alcuni casi, come quello proposto in questo elaborato, il formato *IFC* infatti risulta essere non del tutto utilizzabile o addirittura un vero e proprio ostacolo da aggirare per il conseguimento di una determinata elaborazione.

8.2 L'H-BIM

All'interno del settore del *Facility Management* applicata al patrimonio edilizio esistente, le azioni di controllo, simulazione e gestione rivestono un ruolo predominante nella definizione delle metodologie di coordinamento tra figure di natura tecnica e operativa.

Nonostante la metodologia *BIM* oggi sia rivolta principalmente alla progettazione *ex-novo* degli edifici, su scala mondiale vengono prodotti sempre più

92 - Drogemuller, R., *Can B.I.M. be civil?*, Queensland Roads (7), pp. 47-55.

93 - Fonte: <https://www.iso.org/standard/51622.html>

studi sulla sperimentazione di tale metodologia applicandola al patrimonio storico architettonico.

Queste ricerche e, quindi, lo sviluppo di un *workflow* chiaro ed univoco, risultano di fondamentale importanza in un contesto come quello Italiano, nel quale la maggior parte del patrimonio edilizio richiede azioni di rinnovamento e controllo dell'esistente rispetto a una sempre minor richiesta di edifici di nuova costruzione.

All'interno di questo scenario, la metodologia *BIM* si configura come uno strumento molto potente per rispondere alle esigenze di mercato, concedendo la possibilità di fornire un sistema idoneo tramite l'elaborazione di soluzioni specifiche per una corretta programmazione di interventi, anche di varia natura.

Da questi concetti è coniato l'acronimo *HBIM*, che al termine *BIM* aggiunge il prefisso "H" ad indicare il valore di *Heritage* (patrimonio) o *Historic* (storico).

La caratteristica distintiva di questa nuova tipologia di modello parametrico è l'implementazione dei parametri geometrici (intesi come coordinate), topologici o fotometrici (caratteristiche visive) con informazioni di tipo documentale legate alla composizione interna, datazioni, interventi precedenti di restauro, o dati di archivio generici, ecc.

Facendo riferimento a organismi edilizi esistenti, una corretta modellazione *HBIM* si basa inevitabilmente su un solido rilievo geometrico, come ad esempio le nuvole di punti ottenute dalla campagna di rilievo. Queste permettono un'agevole rappresentazione grafica 3D delle geometrie, modellandole in alcuni casi attraverso elementi parametrici.

A partire dalle prime fasi di modellazione, però, si riscontra la prima problematica: una realistica e veritiera modellazione di oggetti univoci richiede la realizzazione di librerie, o *famiglie*, *ad hoc* che difficilmente si rispecchiano nella natura standardizzata dei *software* dedicati prettamente alla progettazione dei manufatti odierni. Dall'altro lato però, questi programmi sono gli unici in grado, oggi, di gestire e racchiudere un'elevata mole di dati eterogeni in un unico formato di *file*, pertanto la loro scelta diviene quasi imposta.

Nei paragrafi successivi sarà mostrato com'è stato impiegato un *software BIM* per la realizzazione di un modello 3D "intelligente" che rispecchi l'unicità del manufatto oggetto di questo elaborato.

8.3 L'elaborazione in Revit Architecture

Dopo aver definito il *BIM* come un vero e proprio "contenitore" di informazioni, vi è la necessità di trovare uno strumento capace di gestirle in maniera oculata: uno tra i *software leader* nel campo del *Building Information Modeling* è indubbiamente il programma *Revit* distribuito dall'azienda *Autodesk* a partire dal 2002.

Questo *software* concede di effettuare progettazioni e modellazioni direttamente in 3D e gestirne le fasi di gestione o costruzione dei possibili organismi architettonici, concedendone la partecipazione anche a utenti multipli all'interno di un unico *file*, assegnandone la responsabilità, per esempio, della propria area di competenza.



Figura 152 -
Logo del *software Revit 2017*

Revit è noto anche per la peculiare capacità di modellare da zero un oggetto parametrico attraverso l'apposita sezione di generazione delle *famiglie*: tramite comandi simili a quelli dei *software* CAD è possibile generare forme geometriche, volumi o assiemi di oggetti, definendone in contemporanea relazioni interne o parametri e caratteristiche. Al termine della modellazione, a essi sarà associata una classe di appartenenza, attribuendola ad elementi tipologici presenti comunemente in architettura (muri, pilastri, travi, arredo, impianti, ecc.).

Nel nostro caso di analisi *Revit* è stato impiegato per la generazione di un modello *BIM strutturale* georeferito e in grado di essere aggiunto, tramite *link*, al modello federato creato a partire dal 2015 dai precedenti tesisti Valeria Uffredi, Salvatore Sanna, Francesca Matrone, Giorgia Nobile.

Si cercherà di sfruttare gli automatismi offerti dal *software* al fine di ottenere un modello semplificato per la simulazione del comportamento strutturale del complesso di Nazareth, partendo dalla modellazione architettonica in 3D basata sulle nuvole di punti ottenute in precedenza.

Di seguito saranno mostrate le operazioni principali compiute per la realizzazione di un modello non dettagliato, e le problematiche riscontrate nelle fasi operative.

Per ragioni di praticità non saranno mostrati i singoli passaggi che ha portato alla costituzione del modello nella sua complessità, ma saranno riportati solamente gli *step* principali ed i comandi impiegati per la generazione degli elementi tipologici principali costituenti.

8.3.1 L'importazione della nuvola

Dopo aver aperto il software viene selezionata l'apertura di un *nuovo modello strutturale*.



Figura 153 - Selezione del Modello strutturale

Dalla vista principale, in pianta, viene eseguito lo spostamento del *punto base di progetto* come indicato nel paragrafo 6.4.3 dell'elaborato di Tesi Magistrale dello studente Francesco Coniglione. Lo studente è andato a definire le coordinate esatte del punto base con il quale è possibile georeferire in maniera univoca i modelli esterni delle cappelle del Sacro Monte di Varallo all'interno del *file* federato⁹⁴. Il punto in questione avrà coordinate pari a:

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

Attraverso il comando di selezione, si evidenzia il *punto base di progetto* e si inseriscono le coordinate sopra riportate. Al termine il punto si orienterà

94 - Coniglione, F., *Gestione del patrimonio storico architettonico con metodologia HBIM: il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, pp. 122-123

nello spazio e sarà opportunamente bloccato attraverso l'apposita icona a forma di *clip* posta a lato [Figura 154].

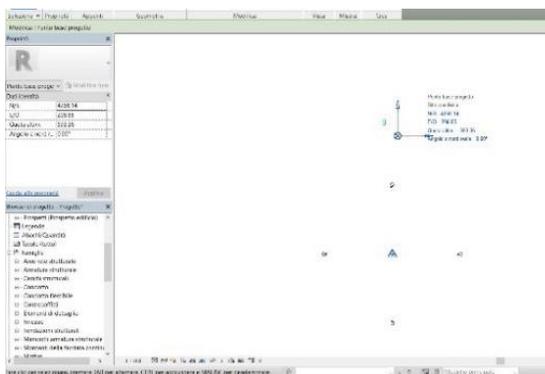


Figura 154 - Coordinate del punto base di progetto del *file* appena creato.

A questo punto dalla finestra di comando *Inserisci* si seleziona la voce *Nuvola di punti* nella barra in alto [Figura 155].

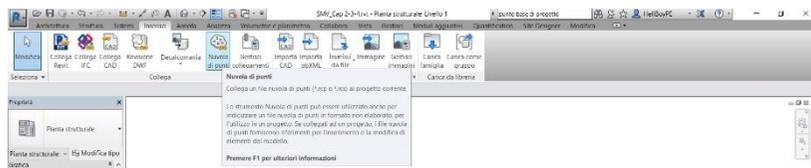


Figura 155 - Comando di Inserimento delle nuvole di punti.

Sarà visualizzata la finestra dal quale è possibile selezionare le nuvole in formato *.RCS ottenute dalla precedente elaborazione in *Recap360*, compatibili con l'ambiente *Revit* [Figura 156].

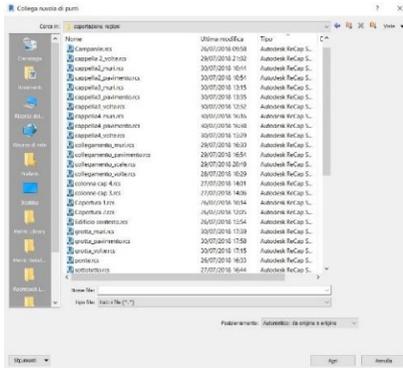


Figura 156 - Finestra di selezione delle nuvole di punti.

In questa fase è di fondamentale importanza selezionare nella casella *Posizionamento* la voce *Automatico: da origine a origine*. Al termine dell'operazione, nella vista *Planimetria* è possibile vedere le nuvole importate nel seguente modo [Figura 157].

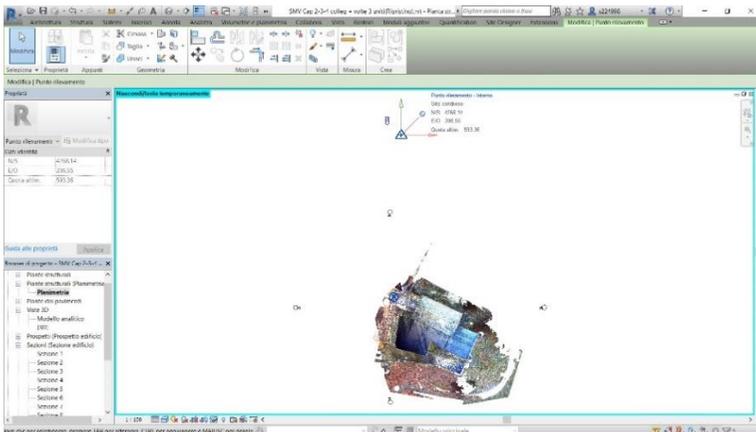


Figura 157 - Visualizzazione in pianta delle nuvole di punti appena importate.

8.3.2 La giacitura dei livelli di riferimento

Una volta importata la base per la nostra modellazione, costituita dalle nuvole di punti, il successivo passo è quello di andare a definire le quote di riferimento alle giaciture dei maschi murari.

Prima di generare un qualsiasi elemento, però, è di fondamentale importanza spostarsi nelle viste di prospetto laterali per la creazione dei livelli principali di riferimento.

Tramite i comandi, *sposta*, *copia* e *incolla* vengono riposizionati e editati i livelli presenti di *default*. I vari livelli, rappresentati da una linea tratteggiata, vengono posizionati in corrispondenza di quei punti notevoli e alle quote caratterizzanti i pavimenti o le linee di attacco tra elementi orizzontali e verticali, come mostrato nelle seguenti immagini.

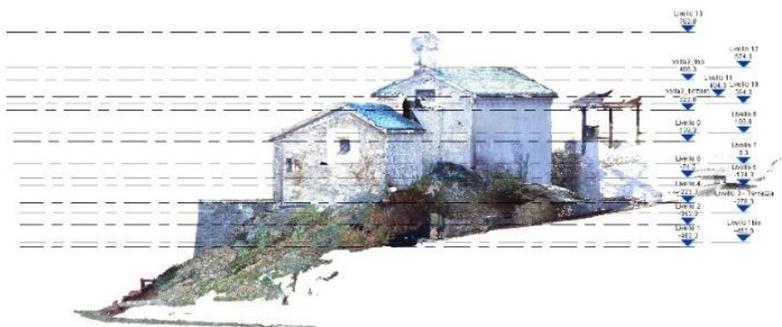


Figura 158 - Vista dei livelli posizionati nella vista prospettica ad Est.



Figura 159 - Vista dei livelli posizionati nella vista prospettica a Sud.

8.3.3 Le piante di riferimento

Una volta individuata la giacitura dei livelli di riferimenti, lo *step* successivo è quello di generare automaticamente le viste in pianta.

Il *software* autonomamente eseguirà una serie di sezioni orizzontali dell'oggetto 3D, associandovi una vista in pianta editabile nelle sue proprietà di visualizzazione. Per crearle è sufficiente spostarsi nella scheda di comando in alto *Vista*, e selezionare l'opzione *Viste di pianta* [Figura 160].

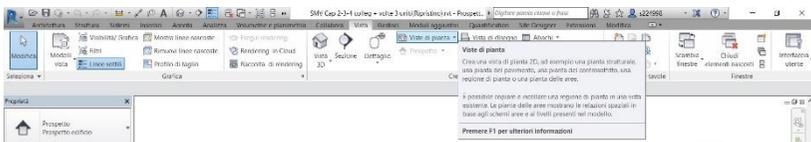


Figura 160 - Selezione del comando Viste di pianta.

Una volta selezionato il comando, il *software* offrirà la scelta di creazione di diverse tipologie di piante, distinte in base all'utilizzo finale [Figura 161].

Nel nostro caso il comando sarà impiegato sia per la creazione di *Piante dei pavimenti* che di *Piante strutturali*.

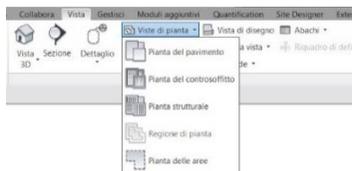


Figura 161 - Selezione della tipologia di pianta.

A questo punto il *software* aprirà in automatico una nuova finestra di dialogo attraverso cui selezionare per quale dei livelli generati nel paragrafo 8.3.2 far passare le diverse piante [Figura 162].

Nel nostro caso saranno selezionati tutti, indistintamente, in modo da avere più punti di vista e agevolare le fasi successive di modellazione.



Figura 162 - Finestra di dialogo per la selezione dei livelli di interesse.

In questo modo saranno generate tutte le viste in pianta appena impostate, e saranno visualizzate all'interno dell'albero dei livelli nel *Browser di progetto* nel lato destro della schermata principale.

8.3.4 Viste in sezione

Essendo il complesso costituito dalla successione e incastro di ambienti irregolari è di fondamentale importanza avere delle sezioni verticali da poter utilizzare in fase di modellazione.

Per generarle, a partire da una vista planimetrica idonea, è sufficiente accedere alla schermata di comando *Vista* e selezionare l'apposito comando *Sezione* [Figura 163].

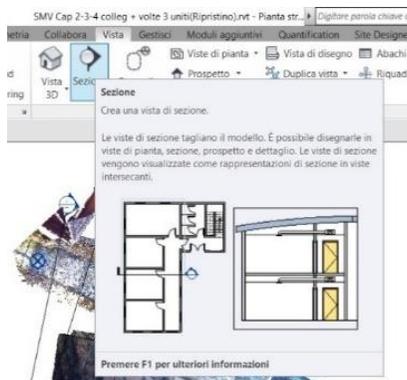


Figura 163 - Strumento Sezione nella finestra di comando Vista.

Nella vista in pianta ora è possibile cliccare col tasto sinistro del *mouse* nei due punti per il quale far passare la vista di sezione, e regolarne la profondità di taglio tramite l'apposito riquadro.

La vista generata, come quella in Figura 164, sarà di fondamentale importanza per definire le quote degli elementi da modellare, soprattutto quelli interni.

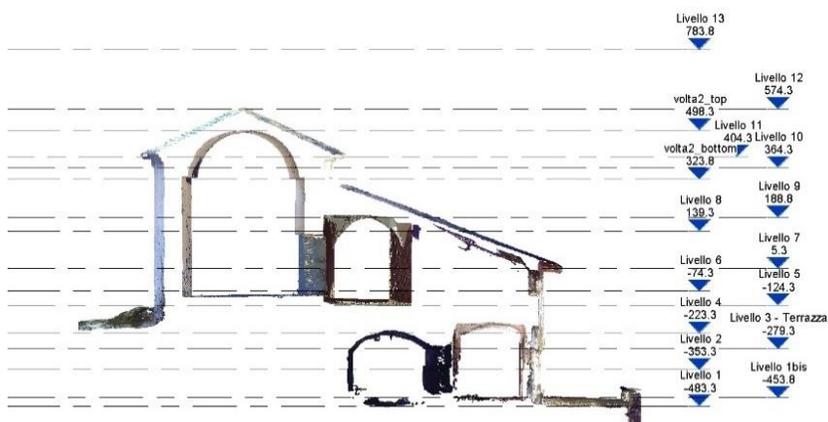


Figura 164 - Esempio di vista in sezione impiegata per il controllo delle quote interne.

8.4 Modellazione degli elementi strutturali

8.4.1 Murature strutturali

A differenza delle altre Tesi precedenti, in questo elaborato non si sfrutterà il *plug-in PointSense* in quanto per la generazione di un modello 3D a fini delle simulazioni strutturali non è di fondamentale importanza riprodurre più

fedelmente possibile le asperità delle murature o eventuali leggere distorsioni lungo la verticale.

Il fine ultimo, infatti, è quello di realizzare un modello semplificato, discretizzando gli elementi esistenti con elementi geometrici quanto più regolari e rappresentativi dello stato di fatto. Pertanto, le caratteristiche fondamentali dei maschi murari riguarderanno grandezze quali lo spessore e lo sviluppo lineare e verticale che, combinati con parametri fisici legati alla tipologia di materiale costituente, concederà all'algoritmo interno di definirne il peso proprio e i relativi parametri di resistenza e moduli elastici.

Per questo motivo una modellazione di dettaglio non risulterebbe idonea allo scopo, al contrario comporterebbe la generazione di una complessità di informazioni non influenti ai fini statici e dinamici.

In questi termini il *software* concede l'*editing* dei parametri geometrici degli elementi murari nelle viste di supporto generate in precedenza come in quelle di tipo tridimensionale. Per la definizione delle *Proprietà* si possono effettuare modifiche attraverso l'apposita finestra al di sopra del *Browser di progetto*.

A tale scopo il comando impiegato per la generazione degli elementi murari è il comando *Muro strutturale* che è possibile selezionare nell'apposita scheda di comando *Strutture*, come mostrato in figura [Figura 165].

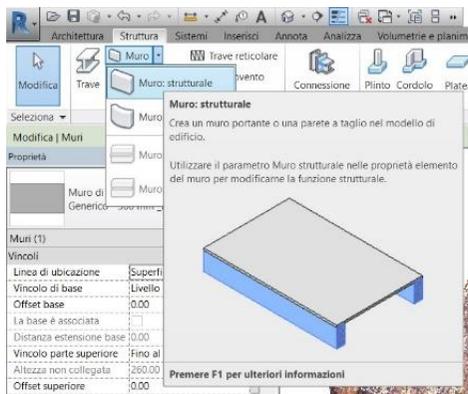


Figura 165 - Selezione del comando Muro strutturale.

La selezione di tale tipologia di muro è fondamentale perché quando si utilizza lo strumento *Muro* generico, in *Revit* si presuppone la realizzazione di elementi divisorii, impiegati prettamente nella modellazione architettonica.

Al nostro scopo invece è importante attribuire la valenza strutturale dei setti perché si sta simulando una struttura in muratura portante e, quindi, è indispensabile specificare, all'interno delle proprietà, il valore di *Utilizzo strutturale* come *Portante*.

Selezionato lo strumento *Muro strutturale*, si prosegue con l'*editing* del muro generico proposto di *default*, attraverso il comando *Modifica Tipo* nella finestra delle *Proprietà* [Figura 166].

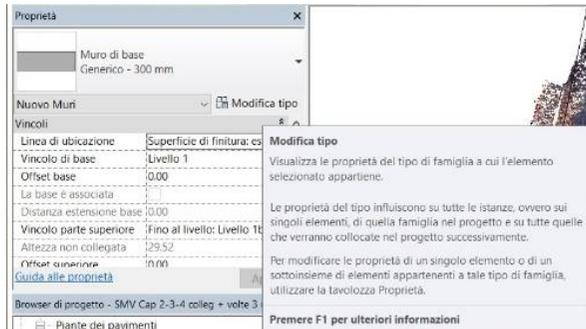


Figura 166 - Selezione del comando Modifica Tipo.

Questo comando è fondamentale per la generazione di tutte le tipologie di setti presenti nel nostro Edificio. Da esso infatti è possibile editare le *Proprietà del tipo*, ossia le caratteristiche intrinseche del muro da rappresentare, sia in termini di spessori che in termini di stratigrafia o materiali costituenti [Figura 167].

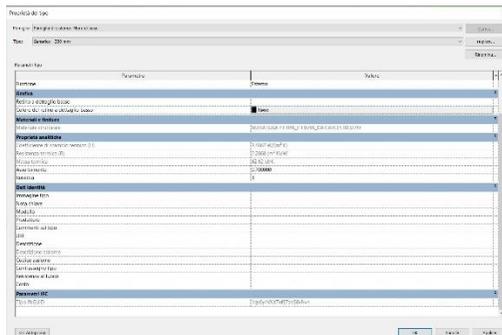


Figura 167 - Finestra di Proprietà del tipo.

Tramite i comandi proposti e in mancanza di informazioni esatte relative alla stratigrafia interna, si è provveduto a duplicare il muro generico di partenza, rinominandolo in maniera da evidenziarne lo spessore, definendone i vari nomi come “*Generico – XYZ mm*” dove i termini XYZ rappresentano la dimensione dello spessore in millimetri. Sempre all’interno della stessa finestra di dialogo si è provveduto a editare le proprietà di *Struttura*, al di sotto della casella *Costruzione* [Figura 168].

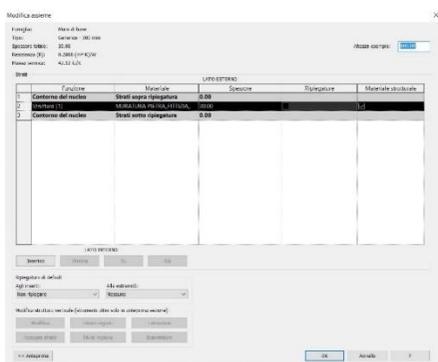


Figura 168 - Finestra di modifica della Struttura.

All’interno di questa finestra di dialogo è possibile comporre la stratigrafia della muratura, ma non avendo a disposizione le caratteristiche esatte si è provveduto ad attribuire a tutte le murature un unico strato con valenza strutturale, costituito da un materiale in *muratura fittizia* realizzato duplicando e editando il materiale generico *calcestruzzo* presente di *default*, e contenente i parametri fisici e meccanici utili ai fini strutturali [Figura 169].

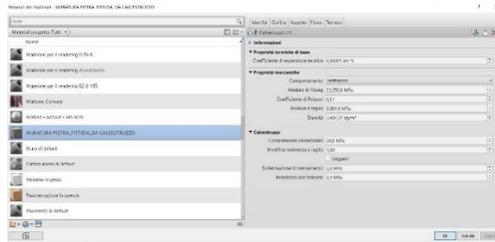


Figura 169 - Impostazione del materiale costituente le murature.

Tramite questi comandi, perciò, è stato possibile realizzare una serie di elementi murari portanti, di spessore variabile tra i 300 mm ed i 1100 mm. Questi elementi sono successivamente stati posizionati grazie all'ausilio delle precedenti viste di supporto e poi definiti, in termini di sviluppo verticale ed eventuali forature, tramite gli appositi comandi del *software* e facendo riferimento ai vuoti generati dalle nuvole di punti delle superfici interne ed esterne.

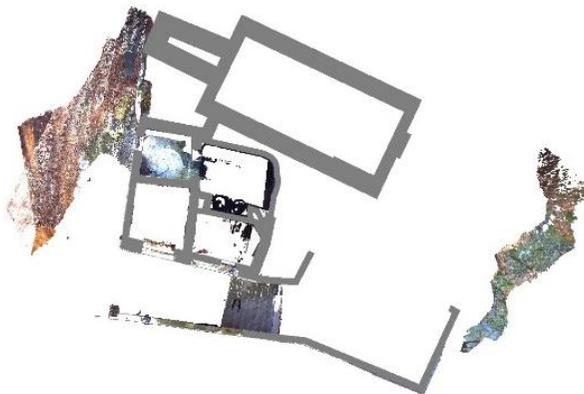


Figura 170 - Esempio della generazione delle murature nella Pianta dei pavimenti al livello 1. (Porzione inferiore della cappella 4)

Tramite i comandi disponibili, quindi, è possibile associare ai muri quali sono i rispettivi vincoli di base o superiore, oppure ricavare aperture sui singoli maschi murari, in corrispondenza delle bucaure delle finestre o dei passaggi tra gli ambienti. Il risultato ottenuto è quello mostrato nella successiva figura.

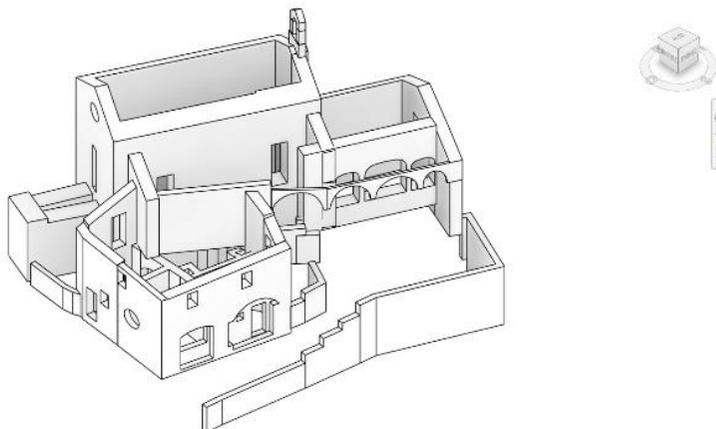


Figura 171 - Vista assometrica d'insieme dei soli maschi murari realizzati.

8.4.2 I pavimenti

Il *software Revit* concede la realizzazione di tutti gli elementi tipologici architettonici, tra cui le superfici di pavimentazione.

Analogamente a quanto indicato per i paramenti murari, si è provveduto alla modellazione dei pavimenti impiegando il comando *Pavimenti strutturali* posto all'interno della scheda di comando *Struttura*.

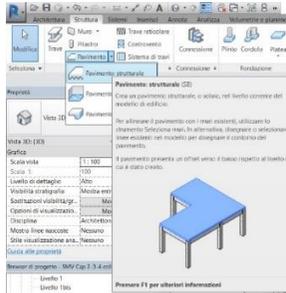


Figura 172 - Comando Pavimento strutturale

Nella stessa maniera delle murature, i parametri caratteristici degli elementi di pavimentazione sono editabili in termini geometrici e delle proprietà fisiche.

Nel nostro caso di analisi tramite lo strumento *Pavimento strutturale* sono stati realizzate le superfici calpestabili della cappella 2, del passaggio di collegamento con la cappella 3 ed il solaio di interpiano tra la cappella 4 e il sottotetto, come anche i vialetti esterni, tutti evidenziati in azzurro nella vista in pianta seguente.

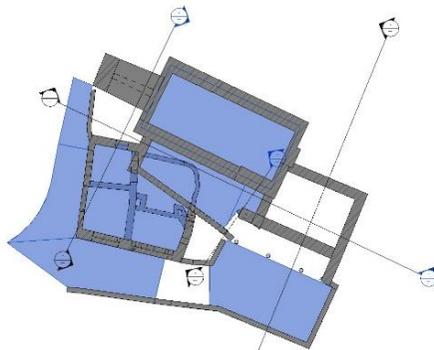


Figura 173 - Vista in pianta con i pavimenti evidenziati.

Per quanto riguarda la superficie di calpestio della cappella 3 e dei locali al pian terreno della cappella 4 ho ritenuto più corretto utilizzare lo strumento *Platea*, presente sempre nella scheda di comando *Struttura*, in quanto assimilabili come veri e propri elementi di fondazione tra l'edificio e il terreno [Figura 174].

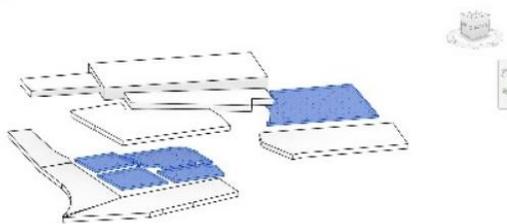


Figura 174 - Vista assometrica con gli oggetti Platea evidenziati in azzurro.

8.4.3 Travi e colonne

Arrivati a questo punto è possibile eseguire la modellazione di tutti quegli elementi lineari quali travi e colonne.

Anche per questi elementi tipologici sono stati sfruttati i comandi *Trave* e *Pilastro* presenti all'interno della scheda *Struttura*, come mostrato nella seguente figura [Figura 175].

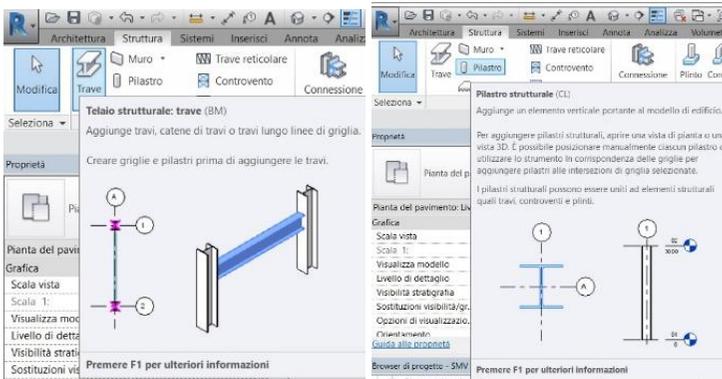


Figura 175 - Comando trave strutturale (a sinistra) e comando pilastro strutturale (a destra)

Analogamente a quanto eseguito per il comando *Muro strutturale*, sono state editate le dimensioni di questi elementi variando le sezioni tramite i parametri disponibili all'interno della finestra *Proprietà del Tipo*.

Così facendo sono state realizzate le colonne presenti nel porticato adiacente alla cappella 3, la colonna di appoggio in facciata nel blocco 4 e la struttura portante della copertura nel sottotetto, ottenendo il seguente risultato.

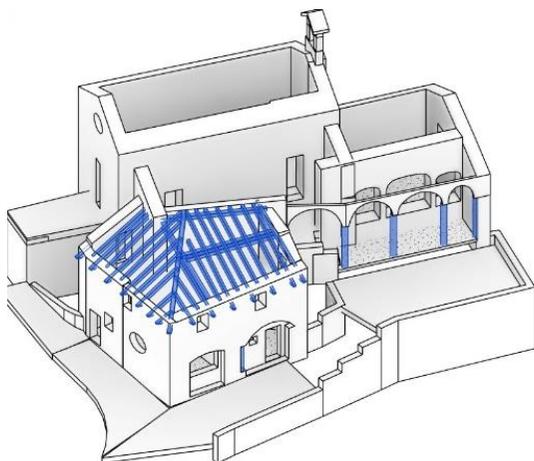


Figura 176 - Elementi generati con gli strumenti travi e pilastri strutturali.

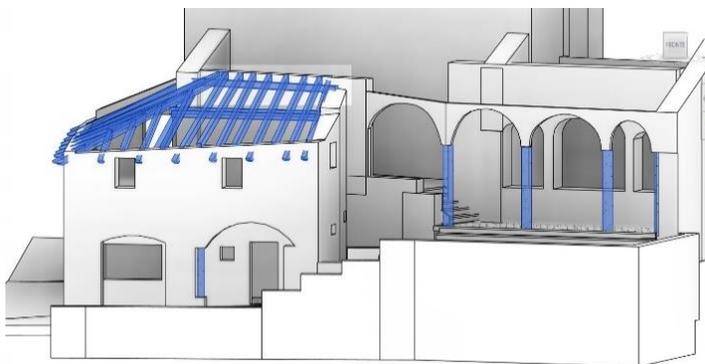


Figura 177 - Travi e pilastri strutturali in vista frontale.

8.4.4 Gradini

Altri elementi architettonici presenti nel nostro complesso di cappelle, e facilmente modellabili, sono le gradinate presenti con funzione di collegamento dei vari interpiani. Nell'edificio in analisi le gradinate non hanno valenza strutturale, pertanto è possibile sfruttare il comando *Scala da disegno* presente nella scheda di comando *Architettura*.

Tramite questo comando è stato possibile riprodurre in maniera precisa l'andamento delle scalinate, editando in maniera puntuale l'andamento delle rampe, il passo dei gradini. Il comando impiegato è mostrato nella seguente figura.

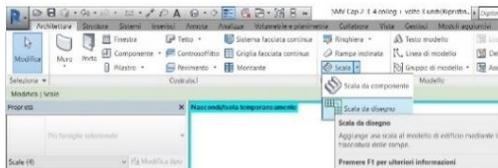


Figura 178 - Comando Scala da disegno.

Tracciando nelle rispettive viste in pianta le proiezioni di rampe e gradini è stato possibile realizzare le quattro gradinate presenti nel complesso. Esse sono riportate nella seguente immagine evidenziandole in azzurro.

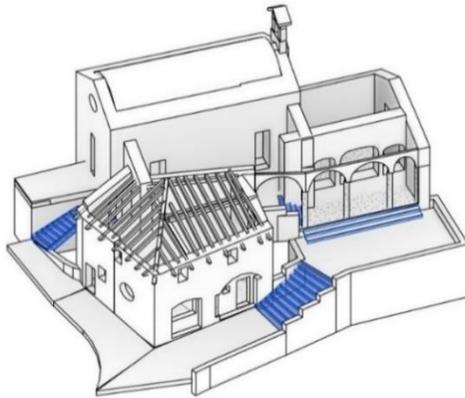


Figura 179 – Gradinate (in blu) create nel modello attraverso il comando
Scala da disegno

8.4.5 Superficie topografica

Il software Revit concede anche l'agevole realizzazione di elementi topografici di contesto. Per far ciò all'interno della scheda *Volumetrie e planimetria* selezioniamo il comando *Superficie topografica* [Figura 180].

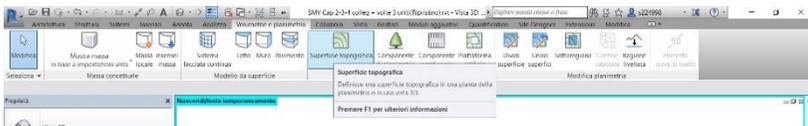


Figura 180 - Selezione del comando Superficie topografica.

Una volta selezionato il comando, la barra in alto cambierà in automatico e saranno visualizzati una nuova serie di comandi dedicati all'*editing* delle superfici topografiche. Nel nostro caso, basandoci su un rilievo tramite *laser*

scanner, abbiamo la possibilità di utilizzare i medesimi punti della nuvola ottenuti per la topografia tramite il comando *Crea da importazione*, *Specifica file dei punti*. A questo punto è possibile selezionare il file in formato CSV precedentemente esportata dal software *CloudCompare*.

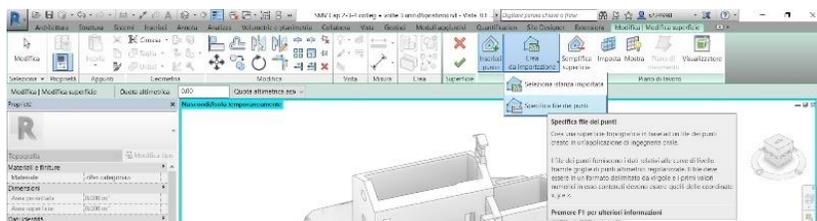


Figura 181 - Selezione del comando *Specifica file dei punti*.

Così facendo sarà generata la superficie topografica che risulterà perfettamente posizionata ed orientata in quanto manterrà le caratteristiche di georeferenziazione precedentemente impostate.

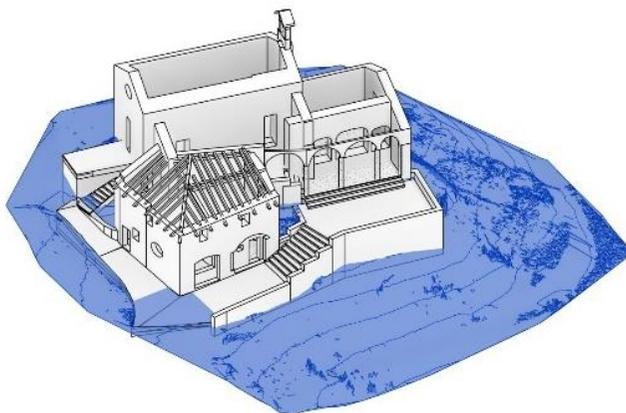


Figura 182 - Superficie topografica correttamente generata.

8.5 Problematiche riscontrate – 1ª parte

All'atto pratico, in queste fasi, è stato dato maggiormente peso alla corretta definizione degli spessori e della valenza geometrica degli elementi più che al corretto inserimento dei parametri fisici dei materiali.

Attraverso dei *test* eseguiti in precedenza su altri modelli non riguardanti la stesura di questo elaborato, infatti, sono state riscontrate delle problematiche relative alla modellazione di alcuni elementi e alle analisi strutturali tramite i comandi disponibili in *Revit*.

8.5.1 Modellazione degli elementi

Le funzioni di modellazione di alcuni elementi sono risultate poco idonee allo scopo prefissato, in quanto gli strumenti risultano essere inevitabilmente poco flessibili e meno agevoli rispetto ai classici modellatori di tipo CAD.

Nell'edificio in analisi sono presenti degli elementi tipologici unici, come per esempio le superfici voltate, che ovviamente riprendono dei canoni classici dell'architettura storica ma che difficilmente riescono ad essere rappresentati attraverso comandi e strumenti volti principalmente a elementi standardizzati utilizzati nell'architettura contemporanea.

I grossi limiti che hanno inficiato la corretta modellazione in ambiente *BIM*, sono stati riscontrati principalmente in corrispondenza delle volte e delle superfici di copertura.

Per la realizzazione di elementi di questo genere, le uniche possibilità sono

- *realizzare famiglie parametriche* adattabili, difficilmente realizzabili nel nostro caso vista l'elevata irregolarità geometrica degli elementi presenti;
- impiegare lo strumento *muro/pavimento da superficie* basandosi su un elemento *massa* appositamente modellato;
- importare direttamente nel modello un elemento geometrico modellato in *software* esterno.

Nel nostro caso sono state effettuate diverse prove testando tutte le varie possibilità.

La prima delle opzioni ha evidenziato il grande limite del non poter riprodurre fedelmente l'andamento irregolare le volte presenti: richiedendo inevitabilmente la discretizzazione delle famiglie adattive modellandole tramite elementi geometrici regolari, come archi a tutto sesto o ribassati e linee rette, che non avrebbero reso correttamente la forte irregolarità delle volte, ma avrebbero portato alla rappresentazione di uno stato di fatto non verosimile.

Il comando che più si avvicina a tale scopo di modellazione, è quello *Muro/Pavimento da superficie*. Uno dei primi aspetti che va sottolineato è l'incapacità del *software* di gestire un elemento "volta" come elemento tipologico a sé stante, ossia un elemento totalmente diverso da un elemento "muro" o "pavimento", che per loro definizione hanno uno sviluppo rispettivamente lungo piani verticali o orizzontali, o quanto meno riconducibile ad essi.

Essendo invece la volta un elemento tridimensionale avente funzione strutturale e di collegamento tra piani orizzontali e verticali, il *software* non ne riesce a concepirne l'essenza, benché sia diffusamente utilizzata nell'architettura storica, poiché il software non è stato adeguatamente predisposto allo scopo.

Per tale motivo, *Revit* concede la sola possibilità di assimilare tale tipologia di oggetti a un elemento banalmente costituito da muratura o pavimentazione, definizione ovviamente non del tutto esatta e non funzionale alle diverse analisi.

Nonostante queste considerazioni, è stato possibile mettere in pratica la modellazione di un elemento *massa* che seguisse quanto più possibile, ma non in maniera esatta, l'andamento delle nuvole di punti importate e, successivamente, sfruttare il comando *Muro da superficie* come mostrato in figura [Figura 183].

L'applicazione di tale comando, usando elementi di *massa locale* appositamente modellati con gli strumenti dedicati [Figura 184], ha generato non pochi problemi in quanto lo sviluppo geometrico dello stato di fatto non è di immediata concezione e richiede l'impostazione di piani di lavoro non facilmente gestibili.

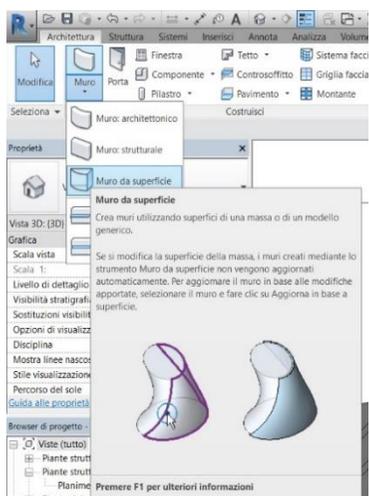


Figura 183 - Comando Muro da superficie.

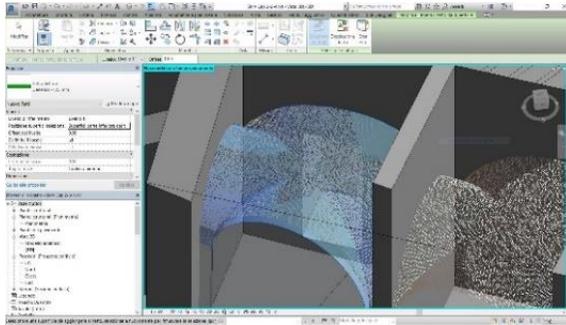


Figura 184 - Esempio di massa locale realizzata per la prova di modellazione.

Nonostante la massa rispecchi in maniera esaustiva la porzione di volta realmente rilevata tramite *laser scanner*, il *software* non riesce ad applicare l'elemento *Muro da superficie*, mostrando a video l'errore di generazione e impedendone l'effettiva generazione [Figura 185].

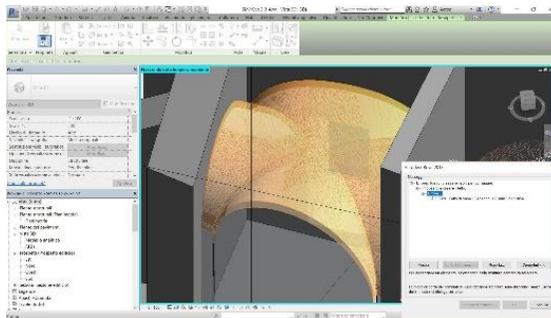


Figura 185 - Errore di generazione della porzione di superficie voltata nell'ambiente di collegamento tra cappella 2 e cappella 3.

Non avendo avuto successo con questo tentativo, si è cercato di modificare l'elemento *massa* di supporto generandone una che racchiudesse una superficie modellata con un *software* CAD esterno, e che fosse scomposta nelle singole *vele* costituenti. [Figura 186].



Figura 186 - Massa generata attraverso l'importazione di superfici modellate in ambiente CAD.

In questo caso le superfici sono correttamente lette da *Revit*, ma come nel precedente, il *software* non riesce ad applicare l'elemento *Muro/Pavimento* su di esse rilevando un errore, anche riducendone lo spessore degli strati a uno fittizio.

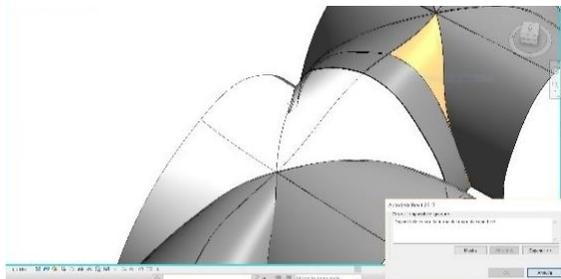


Figura 187 - Secondo errore di modellazione tramite Muro/Pavimento da superficie.

Non riuscendo a trovare un compromesso tra l'adeguata rappresentazione dello stato di fatto e la realizzazione di elementi parametrici, ho optato per la

semplice importazione nel modello esterno, costituito da elementi 3D generati con il *software Rhinoceros 5*. In questo modo è stato possibile completare il modello architettonico, inserendo tutte gli elementi voltati e le superfici di copertura mancanti.

8.6 Il software Rhinoceros

Il *software Rhinoceros* è un programma commerciale per la modellazione 3D normalmente impiegato in ambito industriale, architettonico e, più in generale, come strumento CAD/CAM per la prototipazione rapida.



Realizzato da *Rober McNeel & Associates*, questo potente strumento ha la capacità di modellare tutte quelle entità geometriche mediante oggetti *NURBS* (acronimo di *Non Uniform Rational B-Splines*), ossia una rappresentazione matematica attraverso la quale è possibile definire in maniera accurata tutte quelle entità geometriche a forma libera o complessa ⁹⁵. Nel nostro caso risulta essere lo strumento più idoneo alla rappresentazione geometrica di tutti gli elementi mancanti nel modello *Revit* di riferimento.

Figura 188 - Logo
del software
Rhinoceros 5.

Per ragioni pratiche, nei seguenti paragrafi non saranno esposti i singoli passaggi con i relativi comandi che hanno portato alla realizzazione delle singole entità geometriche, ma verranno presentati solo i passaggi chiave del workflow impiegato.

⁹⁵ Fonte: <https://www.rhino3d.com/it/>

8.6.1 Le superfici voltate

Le superfici voltate sono le entità geometriche che hanno richiesto la maggior attenzione in fase di modellazione.

Qui di seguito sarà riportato il workflow che ha portato alla costituzione delle geometrie che successivamente verranno importate all'interno del modello in *Revit*. A titolo di esempio sarà riportato il caso relativo alle volte esistenti nella porzione di collegamento tra le cappelle 2 e 3, ma il procedimento riportato è lo stesso impiegato per tutti gli altri elementi voltati.

Come anche per la rappresentazione in ambiente *BIM*, si è provveduto all'importazione delle nuvole di punti ottenute dalle fasi di rilievo, che anche in questo caso sono perfettamente georeferite nello spazio.

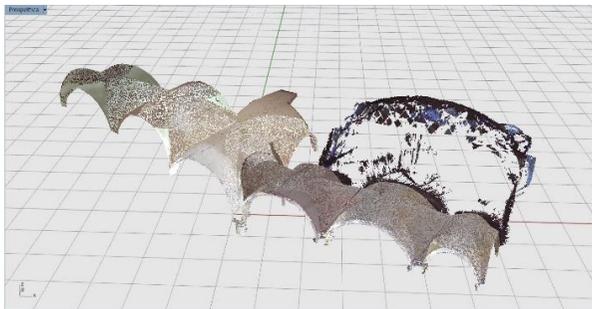


Figura 189 - Importazione della nuvola di punti.

Le nuvole di punti, essendo state sezionate in corrispondenza della linea attacco con i muri perimetrali, sono costituite da un profilo chiaro e nitido, perfettamente utilizzabile come base di “ricalco” dei profili rilevati delle arcate di imposta della successione di volte. Per questo motivo, tramite il comando *Linea per punti*, sono stati riprodotti tutti i profili notevoli e utili alla definizione

geometrica dell'intradosso delle volte, con i relativi spigoli generati dall'intersezione delle porzioni unghiate, ottenendo il risultato ripotato nella seguente figura [Figura 190].

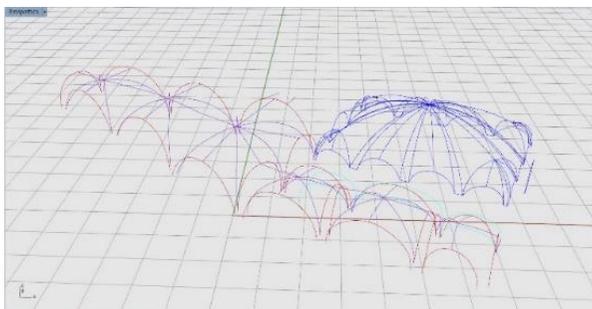


Figura 190 - Individuazione dei profili notevoli costituenti le volte.

Avendo tracciato i profili è possibile generare delle superfici *nurbs* passanti perfettamente attraverso le polilinee generate, ottenendo così il seguente gruppo di elementi [Figura 191].



Figura 191 - Superfici nurbs ottenute.

Così facendo è stato possibile riprodurre in maniera fedele ed esaustiva l'andamento delle superfici di intradosso delle porzioni voltate, com'è possibile notare nel successivo *screenshot* di dettaglio [Figura 192].



Figura 192 - Dettaglio rappresentativo dell'andamento delle superfici nurbs in relazione alle nuvole di punti.

Arrivati a questo punto è possibile conferire spessore alle superfici generate, operando un'estrusione verticale dell'intero gruppo di *nurbs* ottenendo così un elemento geometrico perfettamente rappresentativo degli elementi tipologici voltati.

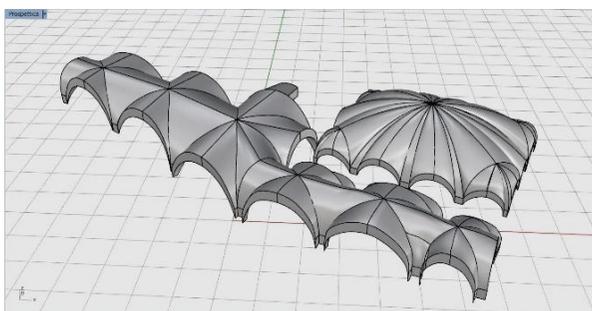


Figura 193 - Estrusione effettuata per ottenere il solido geometrico.

Dopo aver effettuato lo stesso procedimento di modellazione per tutte le componenti voltate, il successivo e ultimo passaggio, fondamentale per l'integrazione degli oggetti nel modello *BIM*, è quello di esportazione dei *file* in formato *.SAT*, facilmente gestibile in *Revit*.

8.6.2 L'importazione in Revit

Ritornando quindi nella finestra di modellazione di *Revit*, è possibile importare una ad una le volte generate attraverso il *software Rhinoceros*.

Per far ciò è sufficiente aprire la scheda di comando *Inserisci*, selezionare il comando *Importa CAD* e specificare il *file* in formato *.SAT* all'interno dell'apposito menù, come mostrato in figura 194.

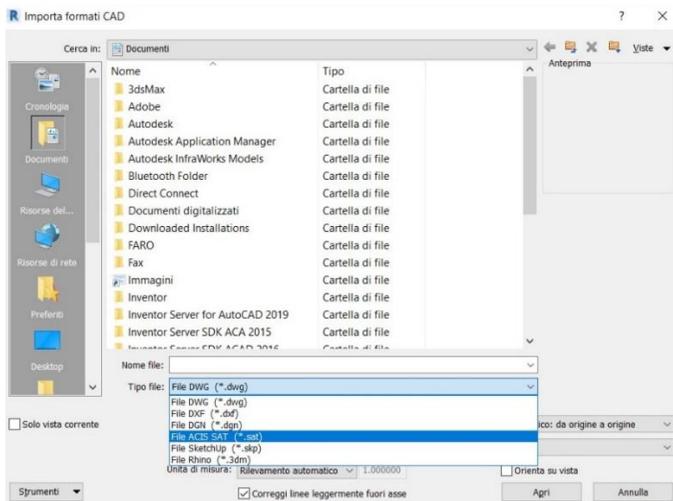


Figura 194 - Importazione dei file in formato *.SAT*

Una volta selezionati i *file* dall'apposita cartella, è sufficiente confermare il comando per completare l'operazione.

Se il tutto è stato eseguito correttamente, i modelli geometrici tridimensionali saranno automaticamente visualizzati nella corretta posizione.

La successiva immagine [Figura 195] mostra il risultato ottenuto, dopo aver opportunamente nascosto alcuni elementi per agevolare una corretta visualizzazione.

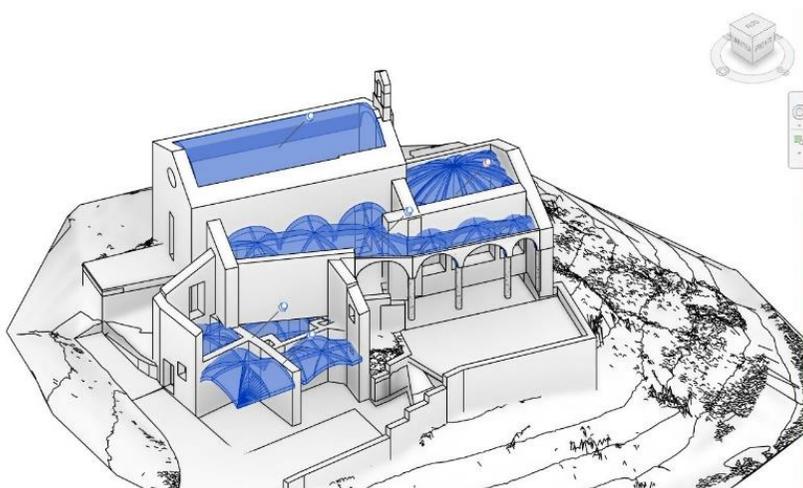


Figura 195 - Risultato ottenuto dopo l'importazione delle superfici voltate.

8.6.3 Le coperture

La modellazione delle superfici di copertura ha richiesto un procedimento analogo a quello precedentemente indicato.

A differenza delle superfici voltate, però, questa strategia non è stata impiegata per tutte le porzioni di copertura, ma solo per una parte di esse.

Le falde appartenenti alla cappella 2 e i piccoli spioventi del campanile, infatti, sono stati agevolmente generati attraverso l'apposito comando *Tetto da perimetro* nella scheda di comando *Architettura*, attribuendo un'apposita stratigrafia generata *ad hoc* in maniera da riprodurre gli spessori di una copertura tradizione in beole.

Così facendo è stata modellata la prima porzione riguardante le coperture, ottenendo il seguente risultato in figura 197.

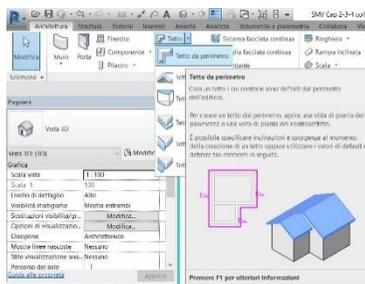


Figura 196 - Comando Tetto da perimetro.

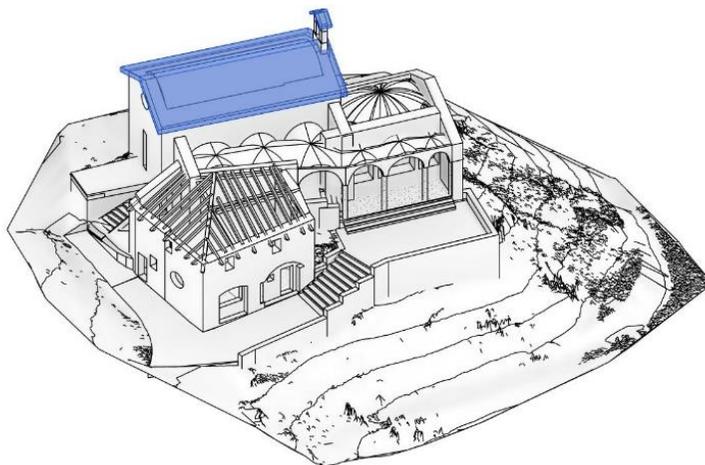


Figura 197 - Generazione della copertura della Cappella 2 e del campanile.

Per quanto riguarda invece la restante porzione di copertura, i comandi di *editing* disponibili in *Revit* si sono dimostrati non abbastanza idonei a una modellazione agevole di superfici fortemente irregolari e frammentate come quella presente nello stato di fatto dell'edificio in analisi.

Per questo motivo ho deciso nuovamente di avvalermi di una modellazione esterna in *Rhinoceros* al fine di ottenere una superficie *nurbs* di supporto.

Analogamente a quanto mostrato nel precedente paragrafo, ho provveduto a importare in *Rhinoceros* la nuvola di punti relativa a questa porzione di copertura. Attraverso i comandi di modellazione, poi, ho proseguito con l'individuazione del perimetro e dei profili caratteristici definiti dalle falde nello stato di fatto. Infine, tramite queste polilinee, sono state modellate le superfici di interesse e successivamente importate in *Revit*, in formato *CAD*, definendole come massa locale ed ottenendo il risultato seguente.



Figura 198 - Importazione della superficie di copertura.

In questo modo è stato possibile ottenere un'esauriente superficie di supporto per l'utilizzo dell'apposito comando *Tetto da superficie*. Tramite questo comando, analogamente al comando *Muro da superficie*, si andrà ad applicare la stratigrafia di copertura sulla superficie appena importata per poi raggrupparle in un unico *assieme*.



Figura 199 - Creazione tetto da superficie.

8.7 Il modello ottenuto

Con la creazione degli elementi di copertura è stata a tutti gli effetti ultimata la modellazione architettonica in *Revit Architecture*. I passaggi precedentemente riportati hanno portato all'ottenimento in parallelo sia di un modello architettonico (figure seguenti) sia di uno strutturale semplificato.

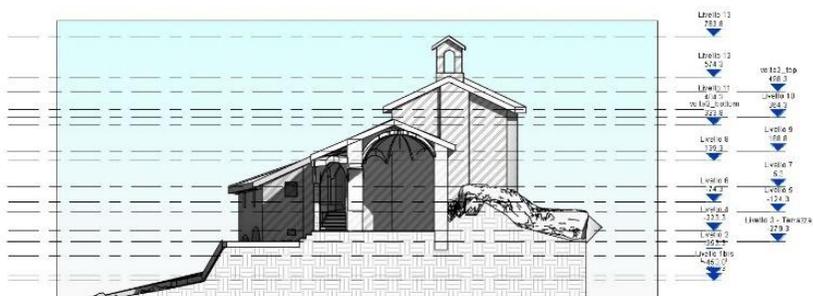


Figura 200 - Esempio di vista in sezione del modello architettonico

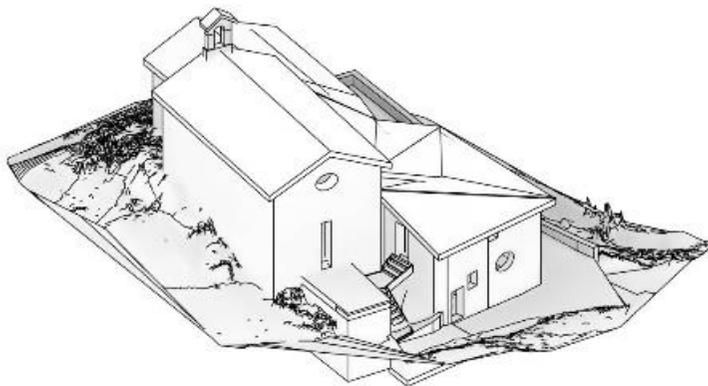


Figura 201 - Vista assometrica del modello 3D

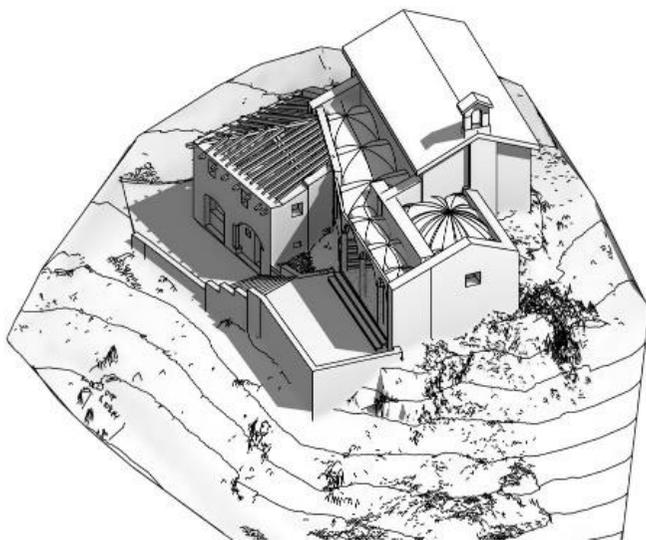


Figura 202 - Vista assonometrica senza porzione di copertura.

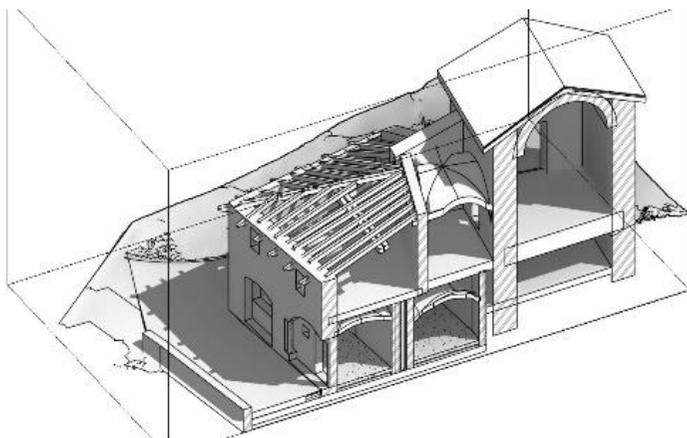


Figura 203 – Vista 3D con riquadro di sezione.

8.7.1 Il modello analitico

Avendo selezionato nelle fasi iniziali la tipologia di modello strutturale, *Revit* permette di visualizzare, regolare e gestire in automatico il modello analitico semplificato generato durante lo sviluppo del modello di edificio fisico.

Il modello analitico strutturale generato corrisponde ad una rappresentazione 3D semplificata della descrizione tecnica completa del modello fisico generato attraverso le schede di comando *Architettura* e *Struttura*.

Questo modello è costituito da componenti strutturali che racchiudono al proprio interno tutte le proprietà di materiali, carichi, geometrie definite di volta in volta e costituenti l'organismo edilizio.⁹⁶

Solitamente questo modello si presenta come un insieme di superfici planari bidimensionali, mentre oggetti come travi, pilastri e colonne sono rappresentati come elementi monodimensionali, perfettamente allineati con l'asse centrale dell'elemento architettonico.

Per poter editare il modello analitico, è sufficiente aprire l'apposita vista dal *browser* di progetto.

Di conseguenza sarà aperta una nuova finestra nel quale è possibile editare o controllare

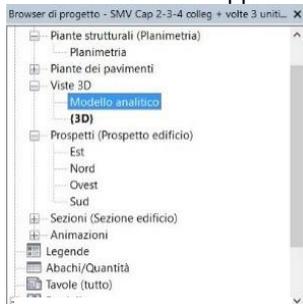


Figura 204 - Apertura del modello analitico.

⁹⁶ Fonte: <https://knowledge.autodesk.com/it/support/revit-products/learn-explore/caas/Cloud-Help/cloudhelp/2018/ITA/Revit-Analyze/files/GUID-264F079B-0134-4C34-A753-B4561C30F300-htm.html>

il modello generato. Nel nostro caso è il modello ottenuto è riportato nelle seguenti figure.

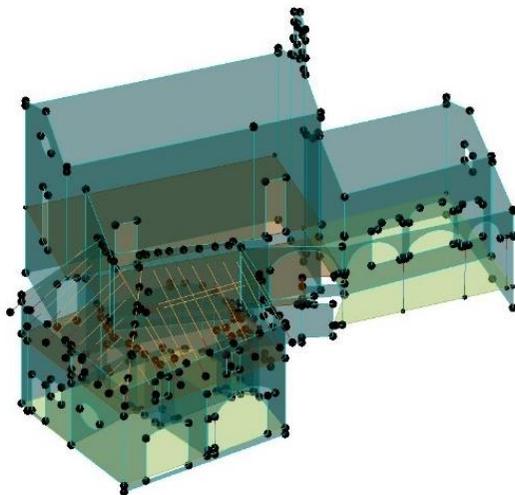


Figura 205 - Il modello analitico generato in automatico.

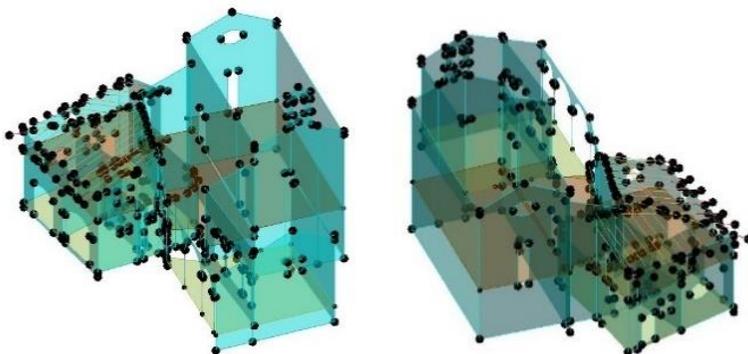


Figura 206 - Viste assometriche del modello analitico generato in automatico.

8.8 Problematiche riscontrate – 2ª parte

Com'è possibile notare nelle Figure 205 e 206, il modello risulta essere fortemente incompleto e non rappresentativo dello stato di fatto.

Ciò dimostra che, essendo il *software* dedicato alla progettazione di elementi *ex-novo* o comunque relativa a strutture più moderne del genere “a telaio”, costituite appunto da elementi monodirezionali o al massimo bidimensionali in muratura portante, *Revit* risulta essere uno strumento fortemente limitato nel discretizzare automaticamente strutture geometricamente più complesse.

Trattandosi la nostra di una struttura in muratura storica, ed essendo presenti componenti strutturali di tipo tridimensionale e fuori piano (volte) con sviluppo molto articolato, il *software* non riesce a concepire una geometria analitica rappresentativa del modello fisico.

Da questa limitazione intrinseca al *software*, se ne deduce che esistono alcune configurazioni strutturali che non possono essere in alcun modo rappresentate direttamente in automatico, né effettuare analisi statiche o dinamiche attraverso i comandi presenti.

Questo comporta inevitabilmente un ulteriore adattamento del modello geometrico semplificato al fine del suo impiego per fini analitici o di simulazione.

Andando ad analizzare il modello analitico in maniera più accurata, inoltre, sono stati riscontrati ulteriori problemi che verranno esposti nei seguenti paragrafi.

8.8.1 Imprecisione degli elementi generati

Gli elementi planari del modello analitico, rappresentativi dei setti murari, sono identificati agli estremi da nodi. Questi nodi, soprattutto in corrispondenza delle giunzioni tra diversi setti murari, risultano non essere esattamente allineati, come mostrato in figura 207.

Altro esempio di allineamento non corretto è stato riscontrato in corrispondenza del setto murario della cappella 4 contenente l'apertura di accesso al vano sottotetto.

Nonostante esso sia stato correttamente modellato nel modello fisico e allineato alla nuvola di punti di rilievo, nel modello architettonico la superficie non viene generata parallelamente allo sviluppo del nucleo interno del setto [Figura 208].

Attraverso i comandi di *editing*, all'interno della scheda di comando *Modifica | Muri analitici* è possibile procedere con l'allineamento degli elementi, ma dopo alcuni tentativi di correzione si nota che, nel modello fisico architettonico, il setto subisce uno spostamento rispetto alla posizione originale, perdendo l'allineamento con la nuvola di punti di base e quindi alterando le dimensioni architettoniche del modello.

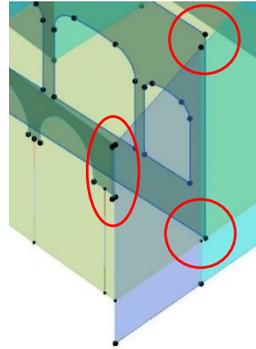


Figura 207 - Dettaglio di esempio di nodi non allineati.

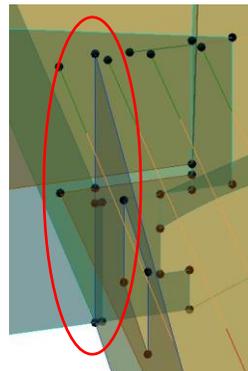


Figura 208 - Disallineamento tra setto, trave e superficie di pavimento.

8.8.2 Mancato calcolo di alcuni elementi

Ritornando a osservare le figure 205 e 206, la cosa che cattura immediatamente l'attenzione è l'assenza di alcune porzioni presenti nel modello fisico architettonico, nella fattispecie le superfici voltate non sono riprodotte.

Come già indicato in precedenza, questa grossa lacuna è dovuta al fatto che il motore di elaborazione strutturale di *Revit* riesce a computare solo ed esclusivamente elementi planari, quindi setti murari e pavimenti, oppure elementi monodirezionali come travi e pilastri/colonne.

Questo risulta essere una forte limitazione quando si opera in ambito *HBIM*, soprattutto ai fini strutturali, in quanto qualsiasi tipologia di volta esistente nell'architettura storica costituisce al contempo sia un elemento architettonico sia un elemento strutturale con funzione di collegamento e trasferimento dei carichi dalle superfici orizzontali ai setti o alle colonne portanti.

L'assenza di questi elementi pertanto rende inutilizzabile il modello analitico ottenuto in automatico perché comporterebbe il rischio di effettuare analisi dinamiche con carichi non veritieri e con configurazioni statiche non rappresentative dello stato di fatto.

Per questo motivo è stato necessario impiegare una soluzione diversa dall'idea iniziale di eseguire l'analisi all'interno dello stesso *software Revit*.

8.9 L'esportazione e la correzione

Dopo aver riscontrato i precedenti problemi e le rispettive carenze degli strumenti forniti da *Revit*, ho deciso di eseguire l'esportazione del modello

analitico così com'è stato generato. La soluzione ipotizzata è quella di effettuare una corretta implementazione al fine di utilizzarlo in un altro *software FEM* di impiego strutturale, nella fattispecie ho ipotizzato l'utilizzo di *Pro_Sap RY2018*, come indicato nei prossimi capitoli.

Pro_Sap ha a disposizione un *tool* in grado di importare al suo interno *file* in formato *IFC* (vedi paragrafo 8.1.2) molto utile per l'interscambio di informazioni con *software* di natura *BIM*. Nel nostro caso, però, questo strumento è risultato inutilizzabile per via di alcuni problemi di codifica del *file IFC* esportato da *Revit*.

Dopo aver esportato il modello fisico architettonico in formato *IFC 2x3*, il più stabile e utilizzato, per sicurezza ho provveduto al controllo del file ottenuto attraverso un visualizzatore gratuito di *file BIM*, ossia il *software BIM Vision*, al fine di controllare eventuali lacune [Figura 209].

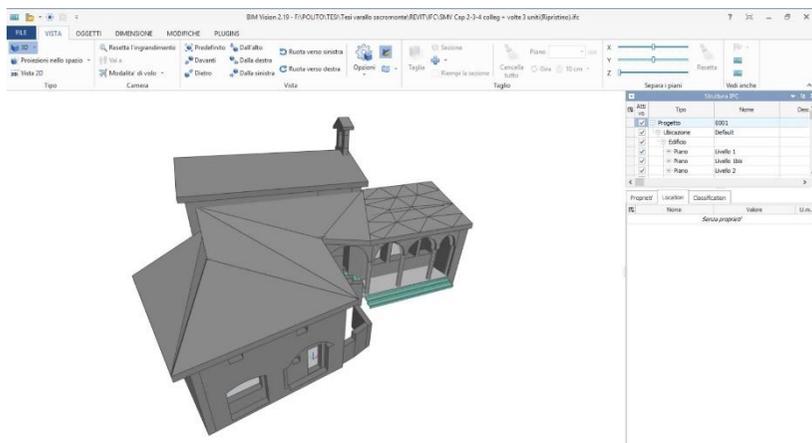


Figura 209 - Controllo del *file IFC* ottenuto attraverso *BIM Vision*.

Il *file*, in *BIM Vision*, viene visualizzato correttamente e contiene al suo interno tutti gli elementi tipologici del modello fisico architettonico di *Revit*, da ciò se ne deduce che il *file IFC* ottenuto sia corretto e completo.

Effettuando però un tentativo di interscambio con *Pro_Sap* attraverso gli appositi strumenti, sono stati riscontrati nuovamente altri problemi in quanto il *file* non viene del tutto decodificato correttamente, ottenendo così un modello fortemente frammentato, lacunoso e per nulla paragonabile a quello fisico architettonico generato in *Revit*, e quindi nuovamente inutilizzabile [Figura 210].

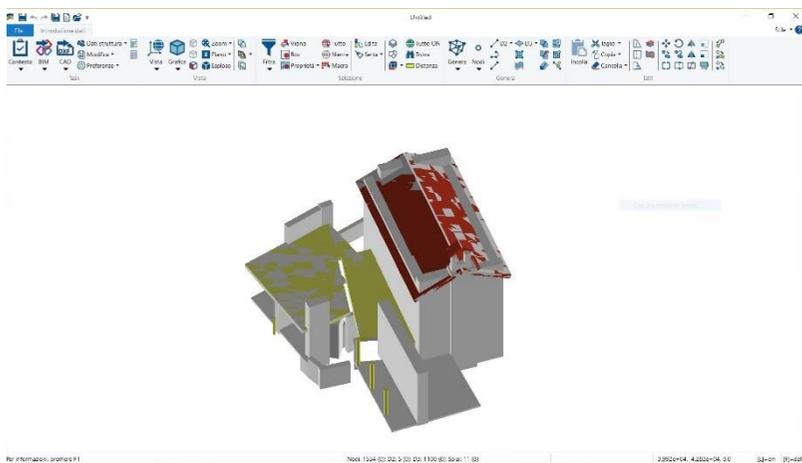


Figura 210 - *File IFC* importato all'interno di *Pro_Sap RY2018*.

Per questo motivo è stato necessario effettuare un passo indietro, ritornando al modello analitico strutturale ottenuto in *Revit* che è stato esportato in formato *DXF*, importato in *Rhinoceros* e integrato con le volte modellate in precedenza con lo stesso *software*.

8.9.1 L'implementazione del modello analitico in Rhinoceros

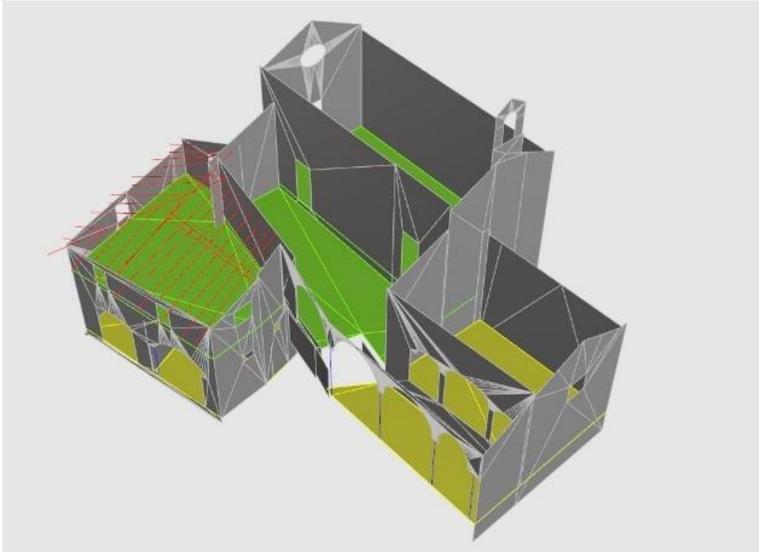


Figura 211 - Modello analitico importato in *Rhinoceros*.

Ottenuto il *file DXF* del modello analitico [Figura 211], il *workflow* è proseguito andando a editare il *file* al fine di ottenere il vero e proprio modello discretizzato della struttura fisica architettonica precedentemente modellata in *Revit*.

Come si può notare, il *file* ottenuto è costituito da superfici di tipo *mesh*, e non *nurbs*, il che non costituisce affatto un problema in quanto *Pro_Sap* opera e si interfaccia perfettamente con questo tipo di entità.

Lo *step* successivo, dopo aver diviso il modello in opportuni *layer* per agevolare la modellazione, è quello di importare al suo interno le superfici delle componenti voltate, anch'esse in *mesh*.

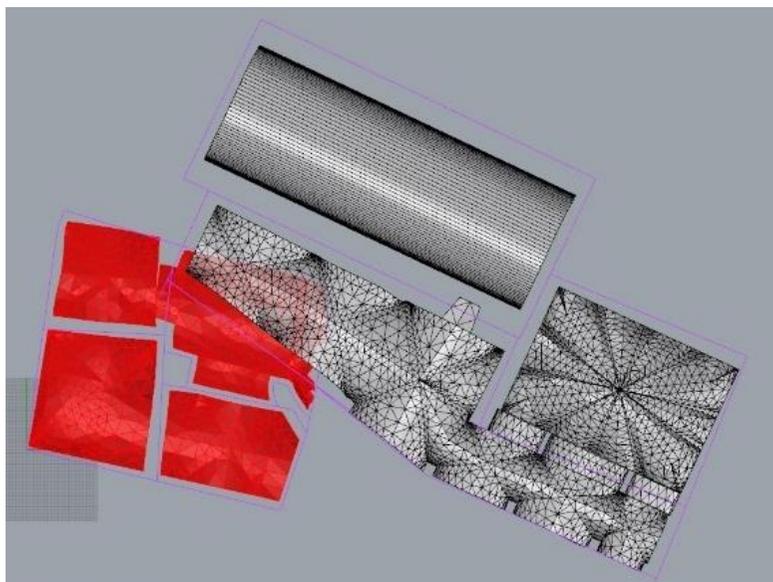


Figura 212 - Importazione preliminare delle volte all'interno del modello analitico.

Dalla figura 212 è possibile notare che le volte non entrano in aderenza con le murature analitiche, in quanto queste ultime sono posizionate nella mezzeria del setto di riferimento, mentre le volte, facendo riferimento alla nuvola di punti del rilievo, sono modellate fino alla superficie esterna delle murature in aderenza.

Per questo motivo le volte sono state nuovamente editate, proiettando la loro sagoma perimetrale sulle superfici delle murature, in modo da poter efficacemente collegare e ammorzare i nodi delle volte con i nodi delle murature.

8.9.2 L'editing delle mesh nel modello DXF

Di pari passo all'integrazione del modello in *DXF* è stata effettuata una modifica al *pattern* della *mesh* delle volte. Per questa modifica è stato necessario l'impiego di un *tool* esterno dedicato all'*editing* delle *mesh*, ossia *GiD 14.1.2d*⁹⁷, un programma universale, adattivo ed *user-friendly* dedicata alla pre e post-produzione per le simulazioni numeriche in campo ingegneristico.

Questo *software* è stato progettato per sopperire alle comuni esigenze nell'ambito delle simulazioni numeriche a elementi finiti e, nel nostro caso, è stato impiegato per la sua capacità di *editing* semplificata nel campo della generazione delle *mesh*, ed è stato di fondamentale importanza per l'agevole correzione del *pattern* generato sulle superfici delle volte. Il suo impiego è stato necessario perché, convertendo le superfici *nurbs* delle volte in *mesh*, attraverso il comando *NurbToMesh* di *Rhino*, il risultato non era idoneo né sufficientemente regolare. Pertanto, in *GiD* sono state importate le superfici *nurbs* delle volte, attraverso l'apposito comando di importazione [Figura 213].

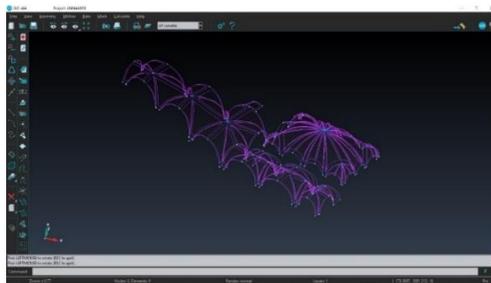


Figura 213 - Esempio di importazione delle volte della cappella 3 all'interno di *GiD*.

⁹⁷ Fonte: <https://www.gidhome.com/>

Attraverso il comando *Generate mesh*, o comando rapido Ctrl+g, sono state generate le *mesh*, specificando nell'apposita finestra di dialogo la dimensione minima di 15 cm di lato e poi confermare con OK l'operazione. Tale dimensione minima è abbastanza piccola per ottenere una trama rappresentativa, ma sufficientemente grande da non generare probabili errori in fase di analisi *FEM* [Figura 214].

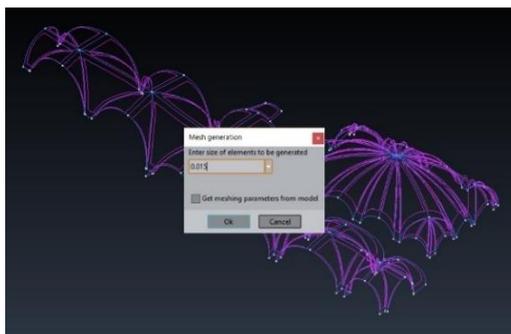


Figura 214 - Impostazione delle dimensioni minime.

Al termine dell'elaborazione viene visualizzata la *mesh* appena generata, come mostrato nella seguente figura.



Figura 215 - *Mesh* ottenuta tramite il *software* GiD.

Una volta controllato il risultato, gli oggetti sono stati esportati attraverso il comando *File, Export, Using template (only mesh), DXFSAP200* e reinseriti in posizione all'interno del modello *Rhinoceros* e collegati con le pareti.

Di seguito è possibile apprezzare un confronto tra le due tipologie di *mesh* al fine apprezzare la miglior qualità del risultato ottenuto (a destra) dove è possibile vedere che i nodi tra una porzione ed un'altra sono perfettamente coincidenti e univoci e la trama è molto più fitta in corrispondenza dei punti a maggior curvatura.

Lo *step* successivo riguarda invece l'*editing* delle superfici verticali e orizzontali, ricostruendo le *mesh* dei vari setti e della pavimentazione attraverso l'apposito comando *RicostruisciMesh* di *Rhinoceros*.

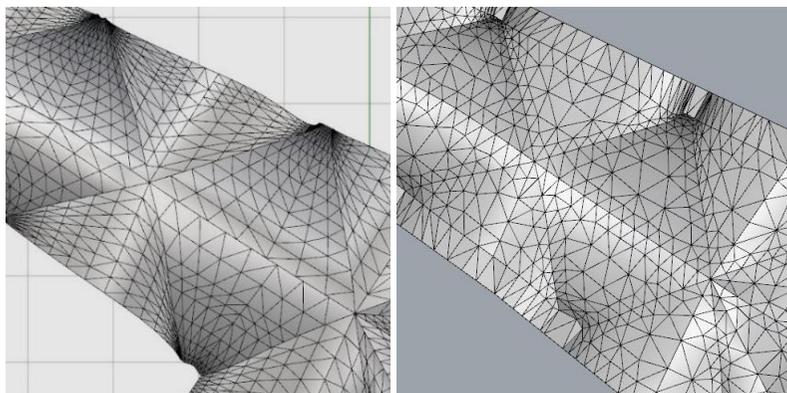


Figura 216 - A sinistra è possibile osservare la *mesh* ottenuta in automatico da *Rhinoceros*, mentre a destra è riportata la trama ottenuta tramite il software *GiD*.

La ricostruzione è stata effettuata considerando le caratteristiche finali che il modello analitico deve assolutamente avere per ottenere un'esauriente analisi *FEM*: i nodi presenti nella *mesh* devono essere tutti coincidenti in maniera univoca, soprattutto nei punti di intersezione tra i diversi elementi, e le superfici planari devono essere costituite da elementi quadrangolari di lato compreso tra i 50 e gli 80 cm, mentre per le superfici curve o nelle porzioni curvilinee si è mantenuto il lato di 15 cm come dimensione minima di triangolazione.

Nella seguente immagine è riportato uno *screenshot* della fase di *editing* di una porzione di muratura nel quale è possibile osservare i parametri inseriti.

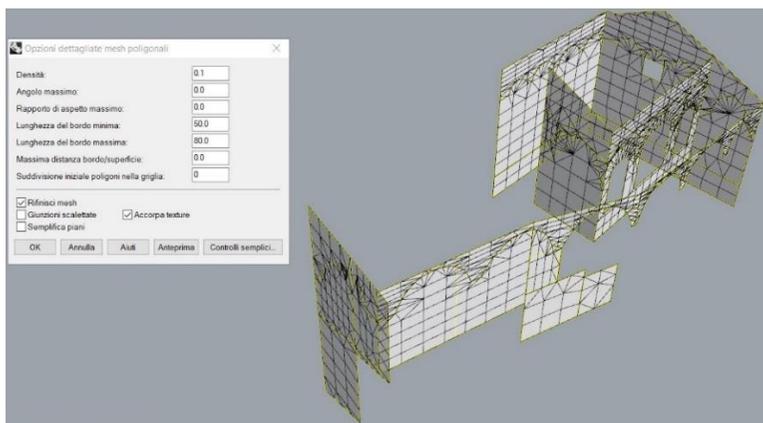


Figura 217 - Esempio di *editing* delle *mesh* sulle superfici verticali.

Dopo aver completato le modifiche del *pattern* della *mesh*, ed effettuato il controllo dell'intersezione dei singoli nodi, il modello è stato nuovamente diviso in opportuni *layer* e preparato all'ultima esportazione in formato *DXF*. Di seguito sono riportate alcune immagini del modello ottenuto.

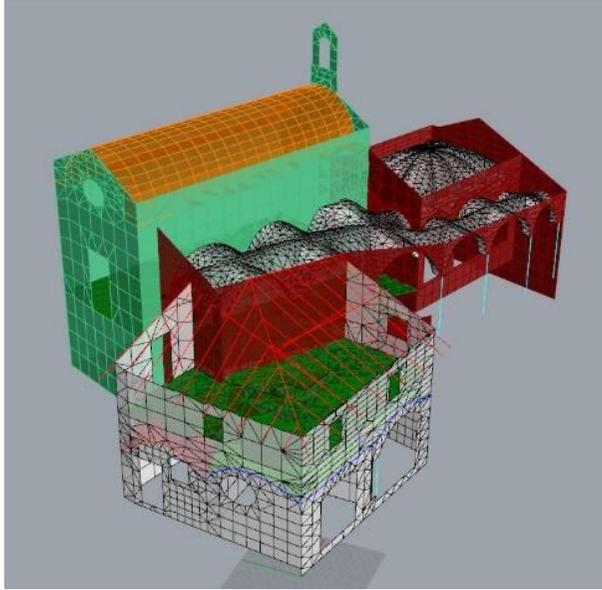


Figura 218 - Vista assometrica del modello analitico 3D ultimato.



Figura 219 - Vista prospettica della porzione corrispondente alla cappella 3.

9. La simulazione strutturale FEM

Avendo come obiettivo finale l'esecuzione delle simulazioni strutturali del nostro complesso di edifici, con l'obiettivo di anticiparne il comportamento sotto le diverse modalità di sollecitazioni teoricamente possibili e previste dalla normativa, non potendole effettuare direttamente in "ambiente *BIM*" attraverso il *software Revit*, la soluzione più immediata è stata quella di modificare il modello in vista di una simulazione con *metodologia agli elementi finiti*.

Per analisi a elementi finiti, detta anche *F.E.A.* (dall'inglese *Finite Element Analysis*) oppure *F.E.M. (Finite Element Method)* si intende una serie di strumenti, o *software*, che consentono di effettuare delle simulazioni di natura ingegneristica, attraverso metodologie di calcolo basate sulla discretizzazione della materia.

A differenza dell'analisi differenziale, che considera i corpi analizzati composti da "elementi infinitesimi" e ne studia il comportamento tramite funzioni che ne schematizzano le azioni e le risposte, il *F.E.M.* identifica i corpi da analizzare attraverso il *pattern* definito dalla *mesh*. Il lavoro di correzione e modifica esposto nel paragrafo 8.9 è stato svolto appunto con l'obiettivo di creare degli elementi geometrici lineari, planari o tridimensionali (*bricks* o *shell*) di dimensioni ridotte ma finite, ed i cui vertici convergono in nodi comuni a due o più elementi finiti in maniera univoca.

Tramite la verifica dell'equilibrio delle forze interne ed esterne ai nodi e imponendo la congruenza delle deformazioni dei singoli elementi finiti, il *software* fornisce la risposta delle strutture alle azioni esterne, risolvendo in maniera

agevole sistemi con numerosissime incognite ⁹⁸ dimostrandosi uno strumento molto valido per l'analisi di ogni tipo di componente strutturale, dai telai complessi architettonici a componenti meccaniche di discrete dimensioni.

9.1 Il software Pro_Sap RY2018

Pro_Sap RY2018 è uno dei *software* leader nel campo dell'ingegneria strutturale e geotecnica sviluppato e distribuito dall'azienda italiana 2SI.

Quest'azienda, nel tempo, ha sviluppato *software* sempre più validi e versatili con potenzialità sempre maggiori anche in virtù delle molteplici collaborazioni con istituti universitari o enti qualificati nel campo della sismica, come per esempio l'EUCENTRE, e organismi deputati alla verifica dell'affidabilità nelle analisi *FEM*, quali *NAFEMS*.⁹⁹

Nella fattispecie, il *software Pro_Sap* presenta notevoli caratteristiche di versatilità ed intuitività in termini di progettazione e computo di vari materiali da costruzione, come cemento armato, muratura ordinaria e armata, legno, XLAM, travi reticolari miste, rinforzi in FRP per muratura o C.A., versatilità indispensabile per le necessità di questo elaborato di Tesi.

Il *software* è inoltre in grado di effettuare in maniera automatica, nella *release* RY2018, le verifiche strutturali secondo gli *standard* e le prescrizioni previste

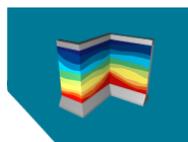


Figura 220 - Logo del software Pro_Sap RY2018

98 Fonte: <http://www.wikitecnica.com/elementi-finiti/>

99 Fonte: [https://www.2si.it/software/documenti/PRO_SAP%20Brochure%202018%20\(Video\).pdf](https://www.2si.it/software/documenti/PRO_SAP%20Brochure%202018%20(Video).pdf)

dalla NTC 2018, dalle precedenti normative italiano o dagli Eurocodici, applicandole a strutture sia di nuova costruzione che esistenti, simulando e verificando eventualmente il comportamento di isolatori sismici presenti nel modello o valutare l'interazione tra terreno e struttura.

I calcoli e le verifiche vengono effettuati grazie ad un'esaustiva gestione di elementi elastoplastici, con eventuali non linearità di natura geometrica, valutandone la stabilità dell'equilibrio sia nelle fasi costruttive, che di esercizio oppure in caso di analisi pushover.

Altre funzionalità *Pro_Sap*, non impiegate per la stesura di questa Tesi, riguardano il disegno in automatico di esecutivi per le strutture analizzate, oltre alla capacità di redigere relazioni di calcolo o geotecniche, corredate di computi completi ed eventuali piani di manutenzione programmata.

Pro_Sap RY2018 ha anche comandi in grado di dialogare, attraverso la tecnologia *IFC*, con i *software* e gli attori presenti nella filiera *BIM*, come visto nei paragrafi precedenti queste funzioni non sono state in grado di soddisfare l'interscambio del modello tra *Revit* e *Pro_Sap* stesso, mostrando notevoli carenze di codifica del *file IFC* esportato dal *software* di casa *Autodesk*.

Per questo mancato interscambio di informazioni, il modello di riferimento impiegato per la modellazione strutturale è quello definito dai passaggi espressi nel capitolo 8.9.2 e mostrato in figura 218 e 219, ottenuto tramite *software Rhinoceros*.

9.2 La modellazione

Per effettuare le verifiche è stato necessario realizzare un nuovo modello analitico strutturale, ottenuto tramite importazione e conversione del modello dell'intero Complesso di Nazareth in formato *.DXF*.

Nei paragrafi seguenti saranno brevemente esposte le azioni che hanno portato all'ottenimento della verifica e simulazione del comportamento delle componenti murarie sotto analisi dinamica.

9.2.1 Importazione del modello

Facendo riferimento ad un *file* esterno al formato proprietario di *Pro_Sap*, il primo inevitabile *step* da eseguire è quello dell'importazione. Il *file* di riferimento ottenuto tramite *Rhinoceros* è stato importato nello spazio di modellazione un *layer* per volta, in modo da poter controllare in maniera capillare ogni singolo elemento importato al fine di evitare, o comunque ridurre al minimo, qualsiasi tipo di errore di modellazione geometrica.

L'operazione di importazione è davvero molto intuitiva, ed è agevolata dai semplici comandi dei *Pro_Sap*. Una volta avviato il programma, è possibile trovare l'icona "*DXF*" nella barra di comando. Cliccando su di esso è possibile accedere al comando *Importa DXF*.

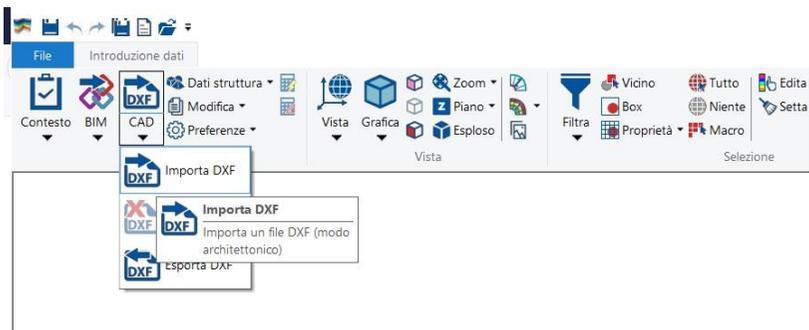


Figura 221 - Individuazione del comando "Importa DXF"

Una volta eseguito il comando, verrà aperta una finestra di selezione, tramite il quale è possibile identificare il *file* da importare. Confermata la selezione, *Pro_Sap* restituisce in automatico una nuova finestra attraverso il quale è possibile selezionare i singoli *layer* precedentemente impostati nel *file DXF*.

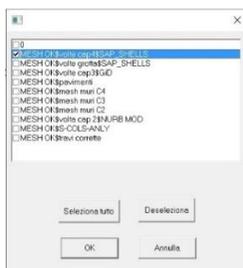


Figura 222 - Selezione del *layer* di interesse.

Nel nostro caso sarà eseguito questo passaggio di apertura e selezione per ogni singolo livello presente nel *file* di origine, in modo da editare una singola classe di elementi per volta.

Com'è possibile osservare nell'immagine seguente, a titolo di esempio verranno esposti i passaggi di *editing* relativi alle volte appartenenti alla cappella 4 e al vano di servizio contiguo, ma il procedimento esposto è lo stesso applicato per tutte le componenti architettoniche.

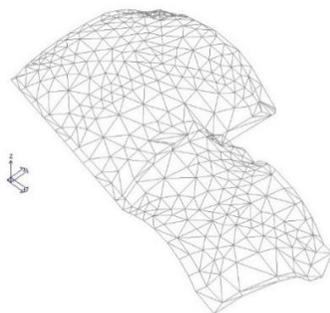


Figura 223 - Importazione del *layer* relativo alla volta della cappella 4 e del vano contiguo.

Dalla figura 223 è possibile notare che la *mesh* viene visualizzata con trama grigio chiaro in quanto la geometria appena importata non risulta essere editabile direttamente o modificabile in posizione e dimensione, ma viene decodificata come geometria di riferimento costituita da nodi di intersezione e lati.

9.2.2 Applicazione di sezioni e materiali

Una volta importato il disegno di base, è necessario impostare le caratteristiche degli elementi D3¹⁰⁰ che andranno a costituire il nostro modello. Per far ciò è necessario cliccare sul comando *Setta riferimento D3*, come mostrato nella seguente figura [Figura 224].

Agendo attraverso i vari menu a tendina, presenti per ogni voce, è possibile definire le caratteristiche peculiari di ogni elemento D3 e nella fattispecie di ogni stratigrafia presente nel manufatto edilizio.



Figura 224 - Selezione del comando Setta Riferimento D3.

100 - Gli elementi D3 sono uno degli elementi geometrici, assieme agli elementi *Nodi* e *D2* utili per la definizione dei modelli strutturali in Pro_Sap. Gli elementi D3 sono elementi planari, definiti da 3 o 4 nodi di riferimento, e sono divisi in due tipi: *Shell* e *Membrana*. Gli elementi D3 di tipo membrana sono definiti al massimo tre gradi di libertà traslazionali; Sono definite solo le rigidzze appartenenti al piano dell'elemento e conseguentemente sono ammissibili solo stati piani di sollecitazione (membranali). I materiali possono avere comportamento anisotropo dipendente dalla temperatura. La formulazione prevede anche modi incompatibili. I risultati in termini di sollecitazione sono riportati ai nodi di definizione. All'elemento è assegnato uno spessore uniforme. Possono essere applicate variazioni termiche, carichi inerziali e carichi laterali. Gli elementi D3 di tipo shell sono definiti cinque gradi di libertà, tre traslazioni e due rotazioni nel piano dell'elemento. Sono definite le rigidzze nel piano (membranali) e fuori dal piano (flessionali). Possono essere applicate variazioni termiche, carichi inerziali e carichi di pressione. Il programma provvede automaticamente alla definizione ed all'orientamento del sistema. Gli assi 1 e 2 sono contenuti nel piano dell'elemento, l'asse 3 è ortogonale all'elemento. Il programma di norma dispone il sistema in modo che l'asse 3 sia diretto secondo l'asse globale Z positivo per gli elementi non verticali, e secondo l'asse globale X o Y positivo per gli elementi verticali. Il posizionamento dell'elemento viene corretto fornendo un codice di filo fisso all'elemento. Il programma segnala come avvertimento la presenza di nodi intermedi tra i nodi dell'elemento. Il programma segnala come errore la coincidenza di due o più elementi D3.

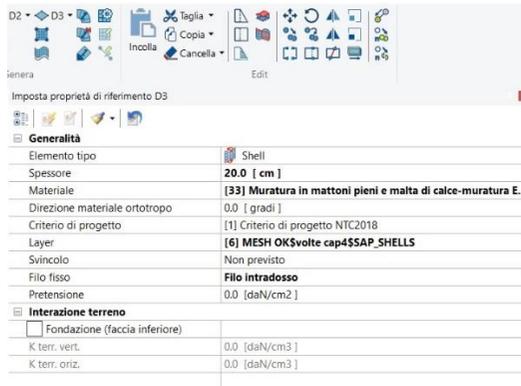


Figura 225 - Finestra di impostazione delle proprietà dell'elemento D3 di riferimento per le volte appartenenti alla cappella 4.

Le caratteristiche fondamentali da definire sono:

- l'elemento tipo,
- lo spessore,
- il materiale,
- il criterio di verifica (criterio di progetto),
- il *layer* di appartenenza,
- svincolo (se eventualmente presente),
- il filo fisso.

Nel nostro caso, per tutte le componenti planari D3 sono stati impiegati solamente elementi di tipo *Shell*. Per quanto riguarda lo spessore, sono stati riportati gli spessori individuati dalla fase di rilievo, variando la dimensione in base alle caratteristiche dell'elemento da creare, alla stessa maniera di com'è stato variato il materiale.

Per quanto riguarda i materiali, sono stati impiegati solamente materiali presenti di *default* nel *database* originale di *Pro_Sap* e non creandone di nuovi in riferimento a quelli presenti nello stato di fatto, perciò si è proseguito selezionando materiali che potessero avere delle caratteristiche fisiche verosimili alla realtà.

Per effettuare correttamente le verifiche strutturali è necessario che a ogni singolo elemento del modello sia associato un criterio di progetto, in maniera tale che il *software* applichi gli opportuni criteri di verifica, previa impostazione, a ogni singolo elemento D3 che va a costituire i paramenti murari. Nel nostro modello sono stati impostati due criteri di verifica, uno di tipo *standard* ed uno apposito per le fasce, applicato alle porzioni superiori ed inferiori delle bucatore in corrispondenza di finestre e portali.

I *layer* sono stati creati seguendo lo stesso criterio applicato nella modellazione in *Rhinoceros* e nelle fasi di importazione del *DXF*; per quanto riguarda invece gli svincoli geometrici sono stati applicati solo ed esclusivamente negli elementi D3 inferiori delle murature, in corrispondenza dei punti di aderenza col terreno. Gli svincoli applicati sono di tipo lineare e sono necessari a conferire un grado libertà in rotazione fuori piano delle murature, in modo da simulare in fase di analisi tutti i fenomeni di ribaltamento dei setti murari.

Il filo fisso invece è il criterio fondamentale per rappresentare correttamente la struttura in termini geometrici, ossia definisce il piano di riferimento attraverso il quale estrarre l'elemento D3 in relazione allo spessore impostato. Per quanto riguarda tutti gli elementi voltati è stato considerato il piano di riferimento in *DXF* come filo fisso di riferimento all'intradosso; per le componenti in muratura, invece, i piani *DXF* importati sono stati considerati come filo fisso in asse, ossia come piano mediano della muratura.

Una volta impostato le proprietà di riferimento degli elementi D3 da generare, *Pro_Sap* concede la generazione automatica dei componenti partendo da superfici *DXF* di riferimento. Il comando, quindi, da impiegare è *D3 da 3Dface DXF*, come mostrato in figura seguente.



Figura 226 - Selezione del comando D3 da 3Dface *DXF*.

Attraverso questo comando, in maniera del tutto automatica, il *software* applica le proprietà precedentemente impostate a tutte le facce costituenti la *mesh*, ricalcando perfettamente le geometrie precedentemente importate.

Una volta eseguito il comando, la geometria sarà visualizzata in colore rosso, indicando la corretta esecuzione del comando.

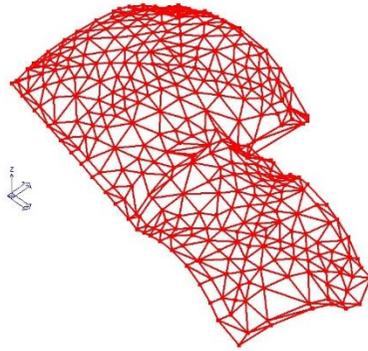


Figura 227 - Proprietà degli elementi D3 correttamente applicati alla superficie importata in formato *DXF*.

A questo punto, al fine di evitare confusione con i *layer* importati, è consigliabile eliminare il *DXF* importato attraverso l'apposito comando, in modo da controllare la corretta realizzazione dell'elemento geometrico. Successivamente è possibile visualizzare e controllare l'elemento generato attivando la grafica in modalità *Linea Nascosta*, in modo da visualizzare la geometria in 3D.



Figura 228- Visualizzazione della volta della cappella 4 con grafica in modalità *Linea Nascosta*.

Con la stessa identica tecnica, e applicando i criteri esposti precedentemente, sono stati importati tutti i livelli costituenti il *file DXF* ed impiegando elementi D2 per colonne e travi, riproducendo in maniera del tutto fedele le geometrie del complesso di Nazareth in tutte le sue componenti.

Il risultato finale di questa fase di importazione del modello analitico strutturale è osservabile nella seguente immagine.

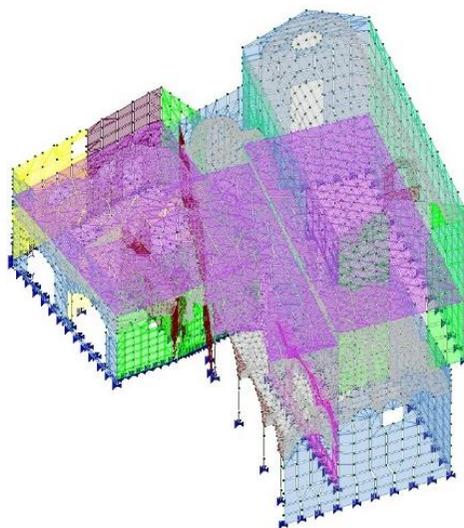


Figura 229 - Vista assonometrica del modello analitico strutturale correttamente importato ed impostato.

9.2.3 Check dati struttura

Una volta ultimata l'importazione di tutti i *layer* dal file *DXF*, ed una volta impostate tutte le caratteristiche fisiche degli elementi D2 (travi e colonne) e D3 (elementi planari costituenti la *mesh* strutturale), il *software* richiede l'esecuzione del cosiddetto *Check dati struttura*.

Al termine dell'introduzione dei dati e dei parametri, infatti, per poter passare al contesto successivo di *Assegnazione dei carichi* è necessario eseguire un *Check dati struttura* dei parametri geometrici e non.

Attraverso l'esecuzione di questo controllo, il programma esegue una scansione totale della struttura modellata assegnando la numerazione agli elementi costituenti, raggruppandoli in macroelementi (setti murari), e cercando la presenza di eventuali errori di modellazione. Nel caso in cui il programma individui problemi o errori, sarà segnalata la necessità di effettuare ulteriori controlli, selezionando automaticamente in rosso tutti gli elementi interessati.

Nel nostro caso, avendo importato una trama *mesh* da un *software* esterno, il programma ha riscontrato la presenza di elementi D3 aventi *Elevato rapporto di distorsione* [Figura 231], ossia elementi aventi un lato di dimensione molto maggiore rispetto agli altri.

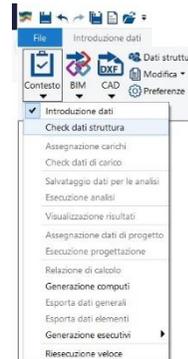


Figura 230 - Selezione del comando Check dati struttura.

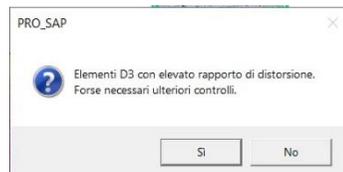


Figura 231- Warning del primo check dati struttura con individuazione di elementi ad elevato rapporto di distorsione.

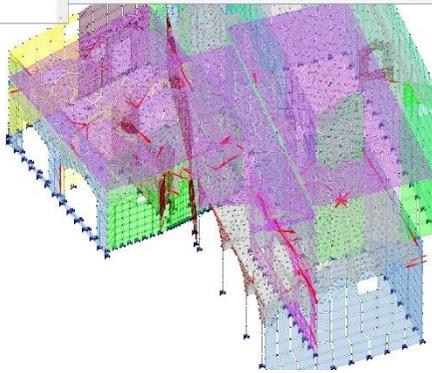


Figura 232 - Il *software* seleziona in automatico gli elementi interessati dal problema riscontrato.

Una volta isolati i *layer* contenenti gli elementi D3 problematici, è possibile editarli attraverso gli appositi strumenti di modifica andando ad eseguire la correzione in maniera capillare su ogni singolo elemento. In questa fase è opportuno correggere la presenza di eventuali elementi sovrapposti o elementi aventi distorsione elevata.

Effettuate le opportune modifiche, eseguendo nuovamente il check dati struttura il risultato del report è il seguente [Figura 233].

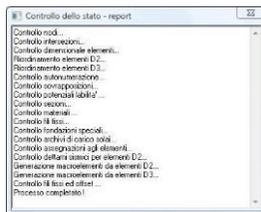


Figura 233 - Check dati struttura superato correttamente.

9.3 Parametri da normativa di riferimento

Come già esposto in precedenza, l'argomento di fondo di questa Tesi Magistrale è lo studio e l'applicazione di nuove tecnologie per l'analisi strutturale di edifici appartenenti al nostro patrimonio storico culturale, ma la tecnologia avanzata, in questo scenario, si configura come vero e proprio strumento di attuazione delle prescrizioni previste dalla normativa vigente.

La normativa italiana ha attuato, dal 22 marzo 2018, le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni 2018, apportando non una rivoluzione della normativa precedente ma sancendo per lo più variazioni alle precedenti NTC '08 senza alterare il metodo progettuale ma applicando nuovi coefficienti che rendano le condizioni di verifica delle murature molto più severe, soprattutto in termini di analisi statica non lineare.

All'interno delle nuove Norme Tecniche, viene definitivamente eliminato il metodo delle tensioni ammissibili, non concedendo più la possibilità di farvi riferimento, espressa invece nelle precedenti NTC '08.

Una delle principali innovazioni apportate dalla norma del 2018 riguarda l'adeguamento antisismico degli edifici esistenti: gli interventi previsti per il patrimonio costruito dovranno rispettare requisiti meno stringenti rispetto agli edifici di nuova costruzione. L'obiettivo infatti è quello di incentivare la realizzazione di messa in sicurezza degli immobili già presenti, rendendo le operazioni più accessibili in termini di costi e di progettazione.

All'interno del testo delle NTC 2018 inoltre sono stati inseriti nuovi paragrafi sui requisiti di robustezza e durabilità in caso di incendio, oltre alla modifica

della classificazione dei sovraccarichi variabili, implementando l'analisi delle azioni del vento, della neve, ed azioni termiche e sismiche.

9.3.1 Carichi e sovraccarichi strutturali

Dopo aver effettuato la modellazione preliminare della struttura, ed aver controllato la corretta impostazione della stessa attraverso il *Check dati struttura*, il *software* apre una nuova scheda di elaborazione nella barra in alto degli strumenti.

Questa scheda prende il nome di *Assegnazione dei carichi* e concede l'inserimento e la gestione dei parametri relativi alle *Azioni sulle costruzioni* (par. 2.5 e capitolo 3 NTC 2018) permettendo la classificazione e caratterizzazione delle stesse sia in termini di azioni statiche che dinamiche, siano essi di natura permanenti, variabili, eccezionali oppure di natura sismica, sfruttando degli automatismi che conducono alla definizione di queste tipologie di carico senza la necessità di intervento da parte dell'utilizzatore.

Il *software*, infatti, gestisce in maniera autonoma le prescrizioni della normativa interpolandole con le caratteristiche fisiche degli elementi definite in fase di modellazione, il tutto facendo riferimento a degli archivi di carico di tipologia omogenea derivanti dalla natura geometrica e dai materiali creati.

Accedendo al comando *Casi di carico*, il *software* richiede al progettista se vuole sfruttare gli automatismi attraverso una sequenza di finestre di dialogo, chiedendo esplicitamente se effettuare l'inserimento dei casi di carico sismici in automatico, o utilizzare l'analisi dinamica per il calcolo delle azioni sismiche, oppure effettuare il controllo e la validità dei criteri di progetto in uso. Una

volta risposto a queste tre domande, si aprirà l'archivio dei casi di carico che il programma ha automaticamente definito, riportando le seguenti tipologie di carico:

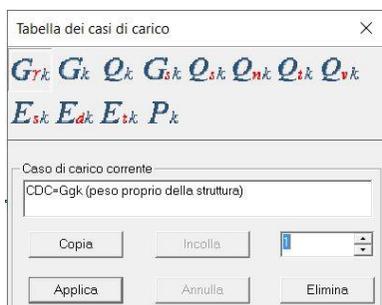


Figura 234 - Finestra di dialogo contenente le tipologie di carico definite in maniera automatica.

Per quanto riguarda il *Peso proprio della struttura* il *software* definisce automaticamente l'entità del carico in base alle caratteristiche dei materiali assegnati agli elementi strutturali.

Per i *Permanenti solai-coperture*, *Variabile solai e Carico da neve* il carico è automaticamente applicato agli elementi strutturali sulla base in quanto è definito nell'archivio *Solai e Coperture*, ma per la definizione dei loro valori è necessario impostare i parametri ambientali relativi al contesto di Varallo Sesia.

Dopo aver selezionato il comando sarà visualizzata una finestra di comando attraverso il quale è possibile impostare i parametri di localizzazione ed il

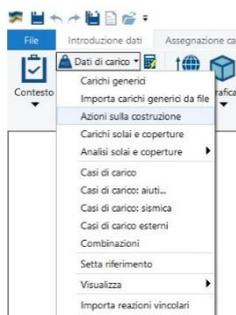


Figura 235 - Selezione del comando Azioni sulla costruzione.

valore dell'altitudine di progetto. Il *software* in automatico definirà, interpolando i parametri del D.M. 17/01/2018 (nuove NTC) definendo automaticamente i seguenti parametri di zona di pertinenza, e quindi la relativa definizione della zona di pertinenza [Figura 236]:

- Neve: Zona 1 – Alpina
- Vento: Zona 1
- Temperatura esterna: Zona 1; $A_s = 450$ m s.l.m.;

$$T_{\min} = -16.80 \text{ C} ; T_{\max} = 39.30 \text{ C}$$

Carichi neve, vento e temperatura esterna

Localizzazione	
Ricerca località	Aiuto per ricerca località
Regione	PIEMONTE
Provincia	VERCELLI
Località	VARALLO
Altitudine s.l.m. (m)	450.0

Parametri e impostazioni di calcolo	
Normativo di riferimento	D.M. 17/01/2018 (Nuove N.T.C.)
Zona vento	1 - Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino A.A., Veneto, Friuli Venezia C.
Neve (dati da inserire)	Impostazione parametri di calcolo neve
Vento (dati da inserire)	Impostazione parametri di calcolo vento
Unità di misura	dalN m

Neve	Zona: I - Alpina
Vento	Zona: 1
Temperatura esterna	Zona: I, $A_s = 450.0$ m s.l.m. $T_{\min} = -16.80$, $T_{\max} = 39.30$
Relazione carichi	
Chiudi	

Figura 236 - Finestra di definizione dei carichi dovuti a neve, vento e temperatura esterna.

9.3.2 Parametri di carico sismico

Dopo aver definito le azioni di carico generiche dovute al peso proprio G , carichi accidentali Q e alle componenti variabili dovute al *Vento*, alla *Neve* e alle *Variazioni di temperatura*, lo *step* successivo è quello di definire i parametri dinamici per la simulazione delle azioni sismiche sull'edificio.

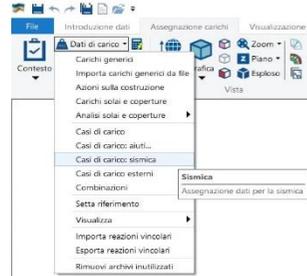


Figura 237 - Attivazione del comando *Casi di carico: sismica*.

Pro_Sap impiega una successione di finestre attive divise in cinque passi, caratterizzate da un'interfaccia molto intuitiva e semplificata. Attraverso questa procedura semplificata è possibile indicare tutti i parametri necessari alla definizione dello spettro di progetto secondo le prescrizioni imposte dal D.M. vigente, attraverso, il comando *Casi di carico: sismica*, come mostrato in Figura 237.

Sarà così attivata la prima finestra di dialogo, definita *Passo 1*, attraverso la quale è possibile definire la *classe d'uso* della struttura, la località di progetto e, trattandosi di una struttura esistente, il *livello di conoscenza*: nel nostro caso, l'edificio è stato definito come *classe d'uso III*, ossia "edifici importanti in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso" considerando la valenza storica del Complesso di Nazareth; non avendo inoltre effettuato analisi approfondite sulle murature e sulle strutture, è stato definito un livello di conoscenza limitata *LC1* con fattore di confidenza $FC = 1.35$ [Figura 238].

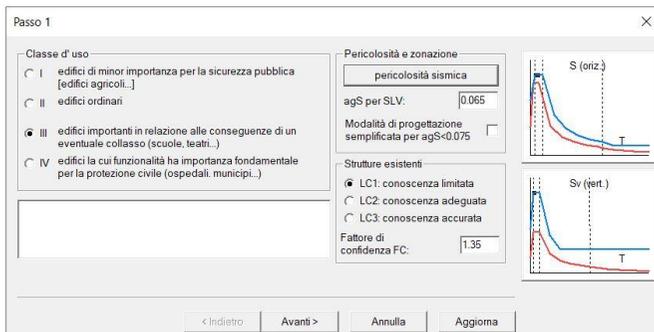


Figura 238 - Passo 1 per la definizione dei carichi sismici.

Attraverso il pulsante *Pericolosità sismica* si possono andare a definire i parametri relativi ai luoghi, specificando la località in termini di latitudine e longitudine, nonché i parametri di vita nominale (50 anni), coefficiente d'uso (1.5) e livello di sicurezza (100), grazie al quale il *software* definisce in maniera automatica i parametri destinati alla definizione delle forme spettrali.

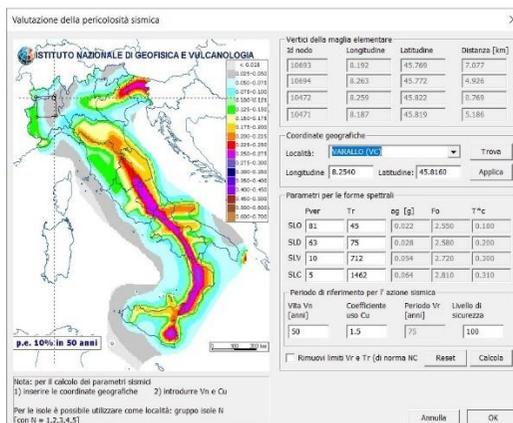


Figura 239 - Definizione dei parametri di valutazione di pericolosità sismica.

Proseguendo col passo 2 è necessario specificare la categoria di suolo di fondazione e relativa categoria topografica. Essendo il nostro edificio posto alla sommità di un pendio di rocce affioranti, sono state selezionate la categoria di suolo A, con categoria topografica T2.

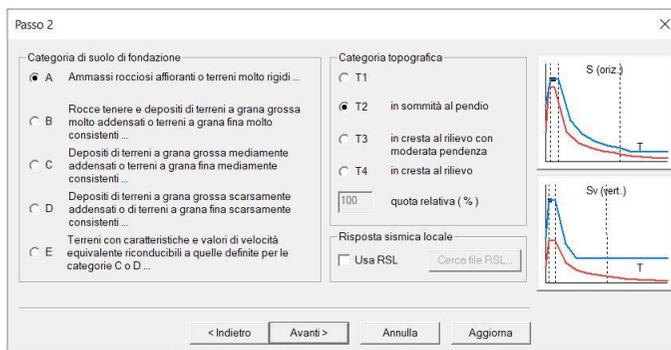


Figura 240 - Passo 2 per la definizione di categoria di suolo e categoria topografica.

Giunti al passo 3 viene fornito un riepilogo dei parametri e dei fattori dello spettro di progetto, con tutti i parametri richiesti dalla normativa definiti in maniera del tutto automatica.

Nella stessa finestra è possibile indicare la classe di duttilità, nel nostro caso di classe media B, ed eventualmente indicare le caratteristiche di regolarità in pianta o in altezza, caratteristiche non presenti nel nostro edificio in quanto fortemente irregolari.

Com'è possibile vedere dalla Figura 241, la finestra richiede la definizione dei parametri η relativo allo stato limite di operatività (SLO) e dei fattori di struttura q .

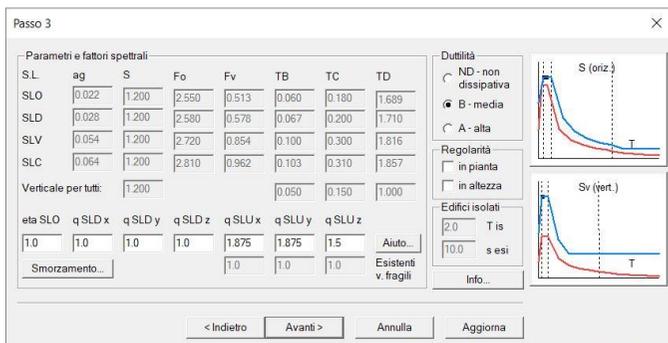


Figura 241 - Passo 3 di definizione dei fattori spettrali, classe di duttilità e regolarità dell'edificio.

Questi ultimi devono essere definiti in base ai dettami previsti dalle NTC 2018 nel capitolo 8.7.1.2 relativo all'Azione sismica:

C.8.7.1.2 Azione sismica

Per lo Stato limite di salvaguardia della vita e lo Stato limite di esercizio l'azione sismica è definita al § 3.2 delle NTC, tenuto conto del periodo di riferimento definito al § 2.4 delle NTC.

Per la verifica di edifici con analisi lineare ed impiego del fattore q , il valore da utilizzare per quest'ultimo è pari a:

- $q = 2,0 \alpha_w / \alpha_1$ per edifici regolari in elevazione
- $q = 1,5 \alpha_w / \alpha_1$ negli altri casi

in cui α_w e α_1 sono definiti al § 7.8.1.3 delle NTC. In assenza di più precise valutazioni, potrà essere assunto un rapporto α_w / α_1 pari a 1,5. La definizione di regolarità per un edificio esistente in muratura è quella indicata al § 7.2.2 delle NTC, in cui il requisito d) è sostituito da: i solai sono ben collegati alle pareti e dotati di una sufficiente rigidità e resistenza nel loro piano.

Figura 242 - Estratto del capitolo 8.7.1.2 dalle NTC 2018.

Per la definizione dei fattori q relativi ai vari stati limite, il *software* agevola il processo di definizione attraverso l'apposito comando *Aiuto* con il quale, all'interno di una nuova finestra di selezione, sono definite le opzioni di calcolo

del fattore di comportamento. Nella seguente immagine è possibile vedere quali opzioni sono state selezionate.

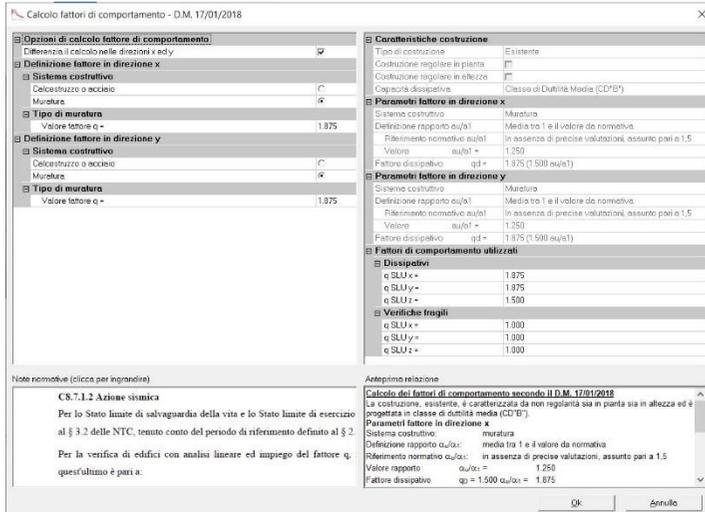


Figura 243 - Finestra di selezione delle opzioni di calcolo dei fattori di comportamento.

Arrivati a questo punto è opportuno definire i parametri relativi ai valori di smorzamento. Seguendo anche qui le prescrizioni da normativa ed effettuando alcune considerazioni in relazione alle condizioni di verifica, si è optato per attribuire un valore di 5% a tutti i valori di smorzamento sia per il terreno che per gli stati limite di vita e di collasso.

Ultimato anche questo passaggio, si prosegue l'impostazione dei parametri dinamici

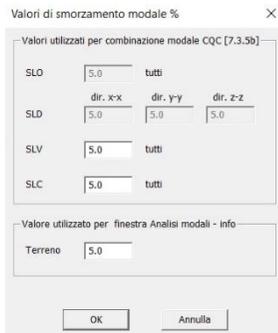


Figura 244 - Valori di smorzamento modale in percent

accedendo al passo 4. In questa sezione è possibile impostare i dati per le analisi di qualsiasi tipo: com'è possibile vedere è presente un riquadro in alto a sinistra dove sono presenti i dati comuni validi per tutte analisi. La finestra subito in basso è quella di nostro interesse in quanto sarà eseguita un'analisi dinamica lineare, di conseguenza è necessario impostare nell'apposita casella il numero di modi di vibrare da calcolare, nel nostro caso è stato impostato un valore di 18. Nel riquadro centrale invece sono presenti le caselle attraverso il quale è possibile impostare i valori per le analisi statiche lineari e non lineari: in questo caso è stato inserito il valore di 1253.283 cm in riferimento all'altezza dell'edificio, ed un fattore *lambda* di calcolo pari a 0.85. Il resto dei coefficienti in relazione al periodo proprio della struttura T1 nelle diverse direzioni X, Y e Z viene calcolato attraverso il comando *Calcola periodo T1*. Nonostante non sia stata effettuata alcuna pushover, si è optato di attivare l'utilizzo degli spostamenti medi di piano e la distribuzione triangolare del carico, come consigliato dal *software*.

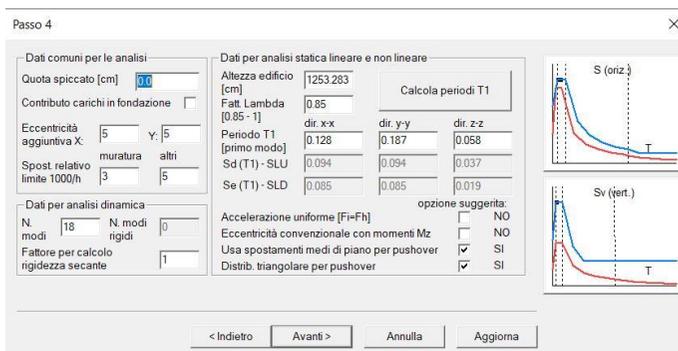


Figura 245 - Passo 4, impostazione dei dati inerenti alle analisi da effettuare.

L'ultimo passaggio necessario all'impostazione dei parametri dinamici è il Passo 5.

In quest'ultima finestra sono definite le masse sismiche attraverso l'apposito comando di *Definizione masse automatica*: il programma applicherà automaticamente i coefficienti necessari considerando un peso unitario per i carichi permanenti ed il coefficiente ψ_2 per i carichi variabili dei solai e per il carico da neve in copertura.

Passo 5

C.D.C. sismico Nodo cont. 0 (**)

C.D.C.

Analisi modale di riferimento Sfoggia... Modo rifer. 0 (**)

Sisma	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4 (*)	LC 5 (*)
LC U 6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC U 7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC U 8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC U 9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC D 10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC D 11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LC D 12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

NOTA: (*) coefficienti per carichi variabili Q
cdc Qk: utilizzare ψ_2
cdc Qsk/Qnk: utilizzare di regola 1 (ψ_2 da archivio carico)

(**) 0 per default in pushover

Definizione masse automatica

< Indietro Fine Annulla Stampa spettri

Figura 246 - Passo 5 per la definizione automatica delle masse sismiche.

Da questa finestra è possibile esportare, attraverso il comando *Stampa spettri*, tutti i tabulati e le immagini relative agli spettri di progetto.

I primi verranno estratti in formato *TXT*, mentre gli spettri di progetto verranno salvati in formato *JPG*, come mostrato nelle seguenti figure.

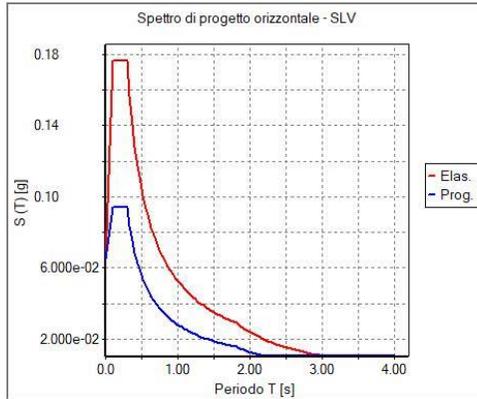


Figura 247 - Spettri di progetto orizzontali – SLV

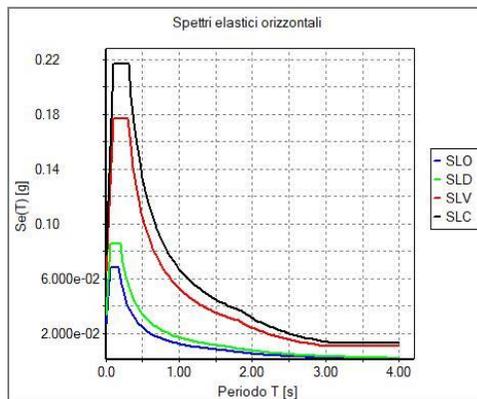


Figura 248 - Spettri elastici di progetto nei vari stati limite.

9.3.3 Combinazione delle azioni

Una volta definite le azioni agenti sulla struttura nelle diverse componenti di peso proprio, carichi variabili, azioni di neve, vento e sismica, bisogna impostare le diverse combinazioni.

Le NTC 2018 definiscono le varie combinazioni da applicare in fase di verifica nel capitolo 2.5.3, definendo le relazioni da imporre ai fini delle verifiche agli stati limite [Figura 249].

2.5.3. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
- Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

Nelle combinazioni si intende che vengano omissi i carichi Q_{kj} che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi G_2 .

Figura 249 - Estratto dalle NTC 2018 del paragrafo 2.5.3 per la combinazione delle azioni.

All'interno di queste relazioni il simbolo “+” è da intendersi come “combinato con” e non come somma matematica, per tanto, nel caso di una verifica annuale, bisognerebbe valutare di volta in volta le azioni da considerare. Bisogna porre inoltre attenzione ai coefficienti ψ ed ai coefficienti parziali di sicurezza γ , che variano di volta in volta in base alle condizioni di verifica.

Per quanto riguarda i coefficienti ψ essi sono scelti in base alla categoria dell'edificio di interesse ed in base alla tipologia di azione presa in considerazione, e sono definiti nella tabella 2.5.1 delle NTC [Figura 250].

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	ψ_{01}	ψ_{11}	ψ_{21}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E - Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)	da valutarsi caso per caso		
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Figura 250 - Estratto della tabella 2.5.1 della NTC 2018 per la definizione dei coefficienti di combinazione.

Per i coefficienti parziali di sicurezza γ , la norma da maggiori definizioni nel capitolo 2.6 riguardante le azioni nelle verifiche agli stati limite, nel quale viene sancita la necessità di eseguirle per tutte le più gravose condizioni di carico agenti sulla struttura. Per questi motivi la scelta dei coefficienti è ridotta ai valori presenti nella Tabella 2.6.1 della norma [Figura 251].

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLLI

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		γ_F			
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Nella Tab. 2.6.I il significato dei simboli è il seguente:

- γ_{G1} coefficiente parziale dei carichi permanenti G_1 ;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei carichi permanenti non strutturali G_2 ;
- γ_{Q1} coefficiente parziale delle azioni variabili Q.

Figura 251 - Estratto della tabella 2.6.1 delle NTC 2018.

Come si può notare dall'immagine superiore, ad esclusione dei valori presenti nella colonna *EQU* dedicati alla verifica allo stato limite di equilibrio come corpo rigido, i valori sono scelti in base a due diversi approcci definiti nelle NTC 2018 con i seguenti criteri:

- Approccio 1 (A1): le verifiche si conducono con due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (γ_F), per la resistenza dei materiali (γ_M) e, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (γ_R). Nella *Combinazione 1* dell'*Approccio 1*, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 della Tabella 2.6.I. Nella *Combinazione 2* dell'*Approccio 1*, si impiegano invece i coefficienti γ_F riportati nella colonna A2. In tutti i casi, sia nei confronti del dimensionamento strutturale, sia per quello geotecnico, si deve utilizzare la combinazione più gravosa fra le due precedenti.

- Approccio 2 (A2): si impiega un'unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali definiti per le Azioni (γ_F), per la resistenza dei materiali (γ_M) e, eventualmente, per la resistenza globale (γ_R). In tale approccio, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1. ¹⁰¹

Nel software *Pro_Sap* l'impostazione delle combinazioni delle azioni di carico risulta avviene attraverso il comando *Combinazioni*. Il software restituisce una finestra di comando attraverso la quale è possibile impostare tutti i parametri richiesti dai capitoli 2.5.3, con i relativi coefficienti di riferimento della tabella 2.6.1.

Nel nostro caso è stato sufficiente selezionare le condizioni ambientali *ordinarie* per le verifiche agli stati limite di esercizio, e nel menu *Generazione automatica* è stato selezionato lo stato limite ultimo strutturale, quello sismico e le combinazioni per gli stati limite di esercizio in condizione rara; inoltre è stato impiegato l'*Approccio 2* per la selezione dei coefficienti parziali di sicurezza.

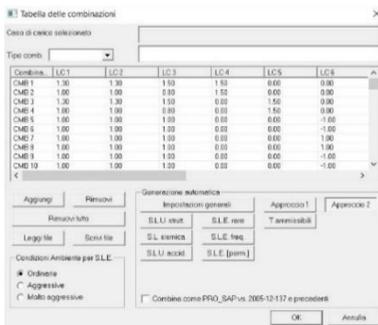


Figura 252 - Tabella di impostazione delle combinazioni di carico.

101 Fonte: Norme tecniche delle costruzioni 2018, cap. 2.6.1 Stati limite ultimi.

9.4 L'analisi strutturale

9.4.1 NTC 2018 e metodi di analisi

In relazione alla teoria di analisi e alla normativa tecnica vigente, la soluzione più idonea e sempre valida è l'applicazione dell'analisi dinamica lineare con spettro di risposta al fine di studiare il comportamento e la risposta sismica dell'edificio in analisi.

Per quanto riguarda la progettazione per azioni sismiche, le due normative di riferimento, ossia le NTC 2018 e l'Euro Codice 8, prevedono quattro metodi possibili di analisi strutturali in campo sismico:

- Analisi lineari statiche
- Analisi dinamiche
- Analisi non lineari statiche
- Analisi lineari dinamiche

Le condizioni di applicabilità delle analisi lineari statiche sono descritte al paragrafo 7.3.3.2 all'interno delle NTC 2018 e il metodo

[...]“consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze d'inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino i requisiti specifici esposti nella norma, a condizione che il periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame”[...] ¹⁰² non superi un determinato range di valori e che la costruzione sia regolare in altezza. Data la

102 Fonte: par. 7.3.3.2 DM 17/01/2018, Norme Tecniche delle Costruzioni 2018

mancanza di questa condizione di regolarità in altezza, il metodo dell'analisi statica lineare non risulta idoneo alla nostra condizione.

Al paragrafo 7.3.4.2 invece sono esposte le condizioni necessarie per l'applicazione di analisi non lineari statiche: essa richiede innanzitutto che

“il sistema strutturale reale sia associato un sistema strutturale equivalente non lineare”[...].¹⁰³

Anche in questo caso si farà riferimento a forze orizzontali proporzionali alle forze d'inerzia: questo metodo prevede però l'applicazione di due gruppi di forze separati.

Il primo gruppo consente di applicare forze proporzionali a quelle statiche equivalenti solo in presenza di un modo di vibrare principale con massa partecipante superiore al 75%; alternativamente è prevista l'applicazione di forze proporzionali a quelle risultanti da un'analisi dinamica lineare con massa complessiva non inferiore all'85%, in entrambe i casi opportunamente scalate in modo da ottenere uno spostamento orizzontale di punti di controllo coincidenti con il centro di massa dell'ultimo livello. Altra condizione necessaria per l'applicazione di questo metodo è nuovamente la regolarità in altezza, condizione che nuovamente non è presente.

Le analisi lineari dinamiche sono invece sempre applicabili, eccezion fatta per strutture con sistema di isolamento alla base non rappresentabile mediante un modello lineare equivalente (par. 7.3.4.1 delle NTC 2018): in questo caso, è infatti obbligatoria l'applicazione di analisi non lineari dinamiche, per le quali

103 Fonte: par. 7.3.4.2 DM 17/01/2018, Norme Tecniche delle Costruzioni 2018

è comunque prescritto un confronto con i risultati di un'analisi lineare dinamica.

Dopo aver pertanto individuato nell'analisi dinamica lineare il miglior modo per ottenere risultati attendibili, si procede con l'esecuzione della stessa attraverso il *software Pro_Sap*.

9.4.2 Esecuzione dell'analisi

L'esecuzione dell'analisi nel *software* strutturale sopraccitato è il passaggio conseguente all'impostazione nel passo 4 nel setting dei carichi sismici. È proprio in questo passaggio che vengono impostate le caratteristiche delle analisi da elaborare in tale *software*.



Figura 253 - Icona per il lancio delle analisi.

Le simulazioni e le corrispettive analisi verranno eseguite attraverso l'apposito comando raffigurante una calcolatrice con un fulmine sopra [Figura 253].

Al termine del comando sarà reso disponibile un report [Figura 254] all'interno del quale sono riportati i modi di vibrare determinati dal programma e sono indicati eventuali problemi o errori nel calcolo, che nel nostro caso non sono stati rilevati. In questa finestra, ad esempio, può essere

```
Controllo dello stato - report
Controllo caso di carico 13
Controllo risultati modo n. 1
Controllo risultati modo n. 2
Controllo risultati modo n. 3
Controllo risultati modo n. 4
Controllo risultati modo n. 5
Controllo risultati modo n. 6
Controllo risultati modo n. 7
Controllo risultati modo n. 8
Controllo risultati modo n. 9
Controllo risultati modo n. 10
Controllo risultati modo n. 11
Controllo risultati modo n. 12
Controllo risultati modo n. 13
Controllo risultati modo n. 14
Controllo risultati modo n. 15
Controllo risultati modo n. 16
Controllo risultati modo n. 17
Controllo risultati modo n. 18
Frequenza modo 1 = 5.300351e+00 Hertz
Frequenza modo 2 = 7.783031e+00 Hertz
Frequenza modo 3 = 8.257735e+00 Hertz
Frequenza modo 4 = 8.777668e+00 Hertz
Frequenza modo 5 = 9.4911912e+00 Hertz
Frequenza modo 6 = 1.003651e+01 Hertz
Frequenza modo 7 = 1.100840e+01 Hertz
Frequenza modo 8 = 1.227333e+01 Hertz
Frequenza modo 9 = 1.358138e+01 Hertz
Frequenza modo 10 = 1.391897e+01 Hertz
Frequenza modo 11 = 1.730951e+01 Hertz
Frequenza modo 12 = 1.802728e+01 Hertz
Frequenza modo 13 = 1.931289e+01 Hertz
Frequenza modo 14 = 2.285189e+01 Hertz
Frequenza modo 15 = 2.423148e+01 Hertz
Frequenza modo 16 = 4.090087e+01 Hertz
Frequenza modo 17 = 4.198362e+01 Hertz
Frequenza modo 18 = 4.748907e+01 Hertz
Massa Eccitata X*Y = 1.182e+06 pari al 94.62 per cento
Massa Eccitata Y*Y = 1.182e+06 pari al 94.63 per cento
Massa Eccitata Z*Z = 1.129e+06 pari al 90.36 per cento
Tempo di calcolo = 6.022e+04
Risultati archiviati
```

Figura 254 - Report dell'analisi.

- 
 - *Vedi dinamica*: fa visualizzare i risultati relativi all'analisi dinamica;
- 
 - *Movimento dei nodi*: fa visualizzare spostamenti e rotazioni nodali;
- 
 - *Azioni sulle fondazioni*: fa visualizzare i risultati in termini di pressioni sul terreno e azioni sui pali;
- 
 - *Azioni elementi D2*: fa visualizzare i risultati in termini di tensioni sugli elementi D2;
- 
 - *Tensioni D3*: fa visualizzare i risultati in termini di tensioni agenti sugli elementi D3;
- 
 - *Azioni D3*: fa visualizzare i risultati in termini di azioni agenti sugli elementi D3;
- 
 - *Tensione solidi*: fa visualizzare i risultati negli elementi solidi;
- 
 - *Deformazioni*: fa visualizzare i risultati in termini di deformazioni;
- 
 - *Massimo*: fa visualizzare la combinazione che riporta il valore massimo del risultato corrente;
- 
 - *Minimo*: fa visualizzare la combinazione che riporta il valore minimo del risultato corrente

Nelle pagine seguenti verranno riportati una serie di *screenshot* che mostrano i risultati più significativi delle analisi effettuate espressi in gradazione cromatica dal valore minimo (blu) al valore massimo (rosso).

- **Sforzi assiali principali**

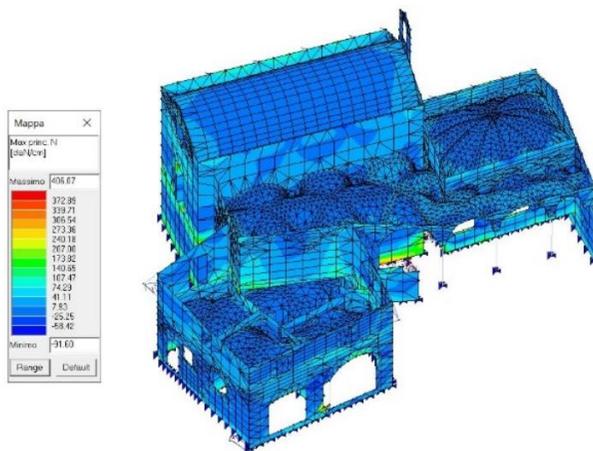


Figura 256 - Risultante delle tensioni massime assiali principali nella combinazione più gravosa SLU A1 3, vista anteriore.

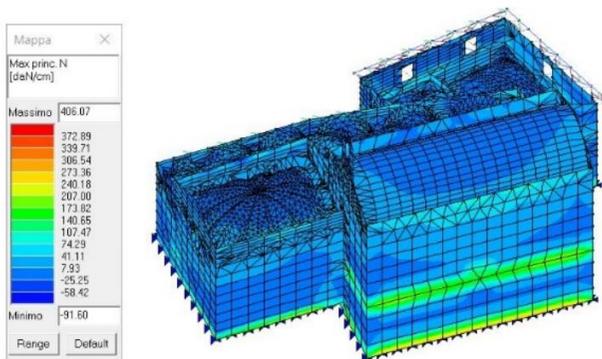


Figura 257 - Risultante delle tensioni massime assiali principali nella combinazione più gravosa SLU A1 3, vista anteriore.

- **Momento flettente principale**

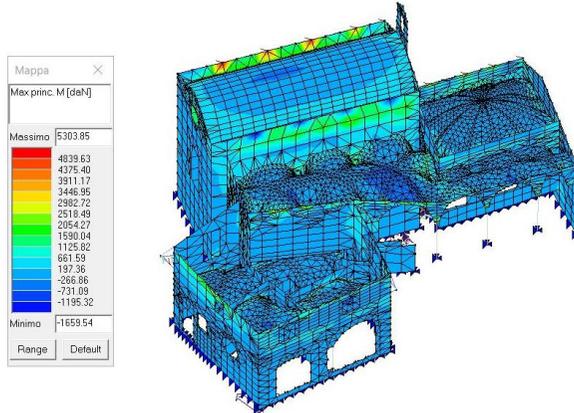


Figura 258 - Risultante delle tensioni massimi in termini di momenti principali nella combinazione più gravosa SLU A1 3, vista anteriore.

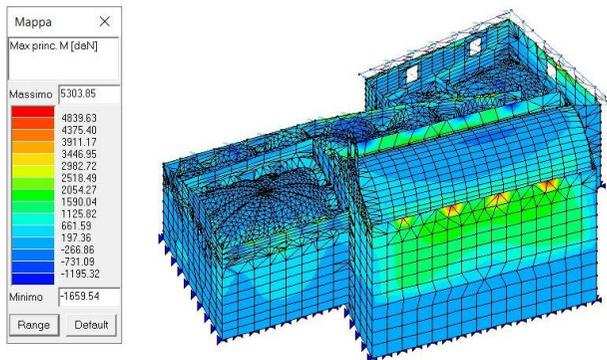


Figura 259 - Risultante delle tensioni massimi in termini di momenti principali nella combinazione più gravosa SLU A1 3, vista posteriore.

- **Deformata**

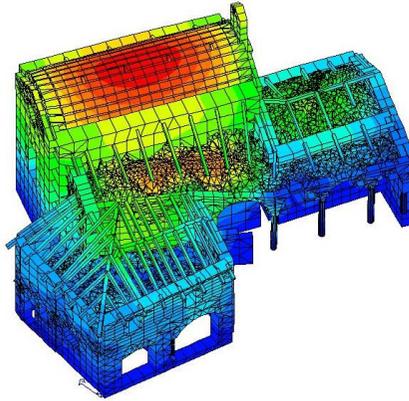
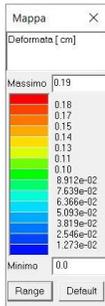


Figura 260 - Deformata con caso di carico pari al Peso Proprio, valore di deformazione massima= 0.19cm

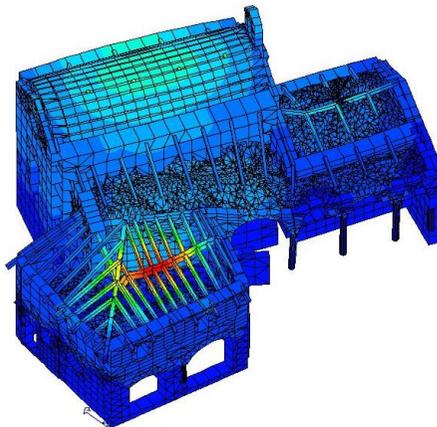
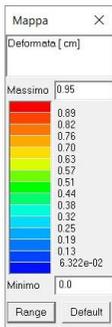


Figura 261 - Deformata massima in combinazione SLU A1 3, valore di deformazione massima= 0.95cm

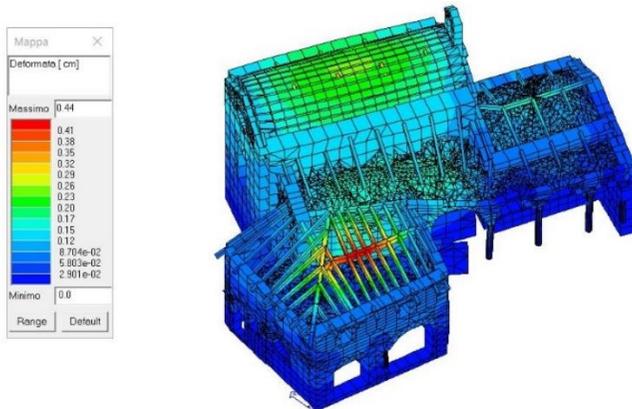


Figura 262 - Deformata massima in Stato Limite di Esercizio in combinazione rara.

Deformazione massima= 0.44cm

- **Deformata analisi dinamica**

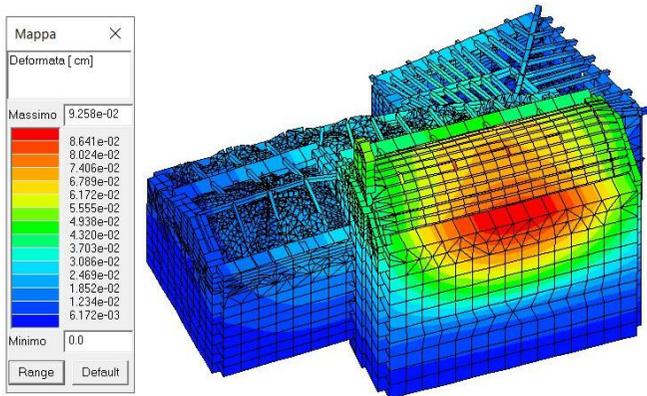


Figura 263 - Deformata dinamica 6, Modo 1; frequenza= 5.36Hz, periodo T= 0.19 s.

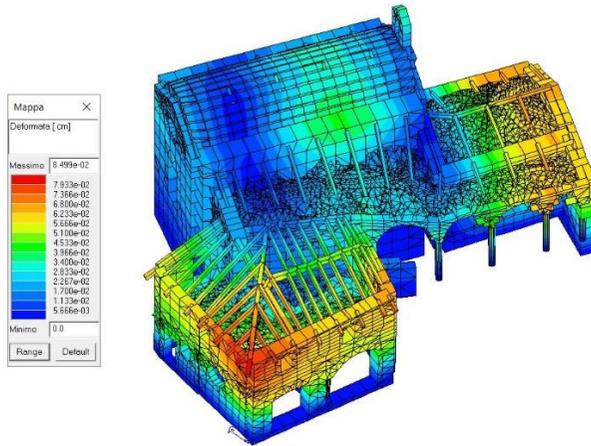


Figura 264 - Deformata dinamica 6, Modo 7; frequenza= 11.19Hz,
periodo T=8.936e-02 s

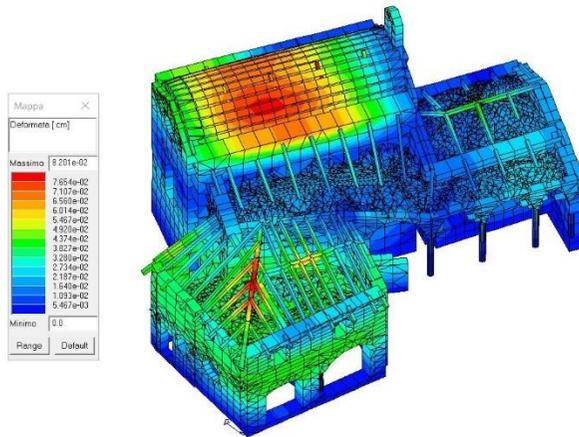


Figura 265 - Deformata dinamica 6, Modo 9; frequenza= 13.54Hz,
periodo T=7.385e-02 s

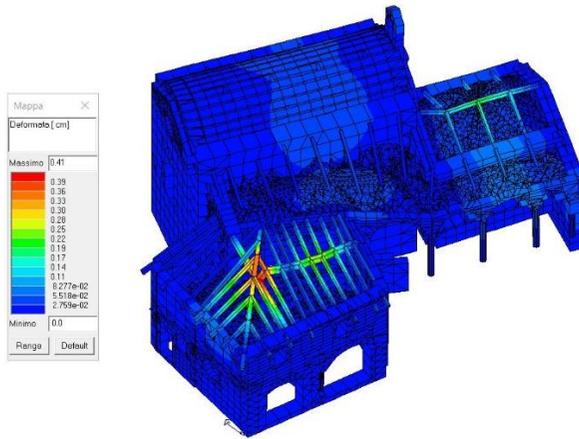


Figura 266 - Deformata dinamica 6, Modo 10; frequenza= 13.95 Hz, periodo
 $T=7.169e-02$ s

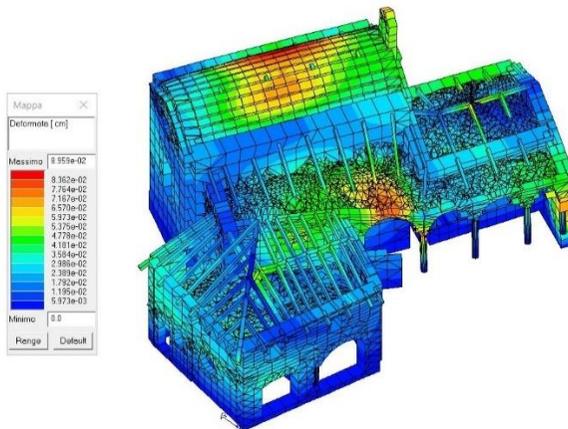


Figura 267 - Deformata dinamica 6, Modo 12; frequenza= 18.09Hz, periodo $T=$
 $5.527e-02$ s

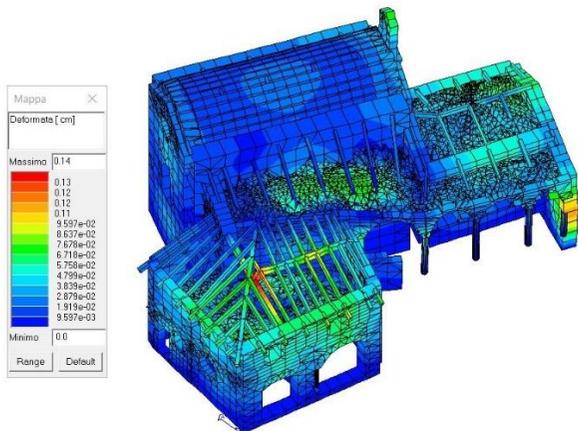


Figura 268 - Deformata dinamica 6, Modo 15; frequenza= 24.30Hz, periodo T= 4.115e-02 s

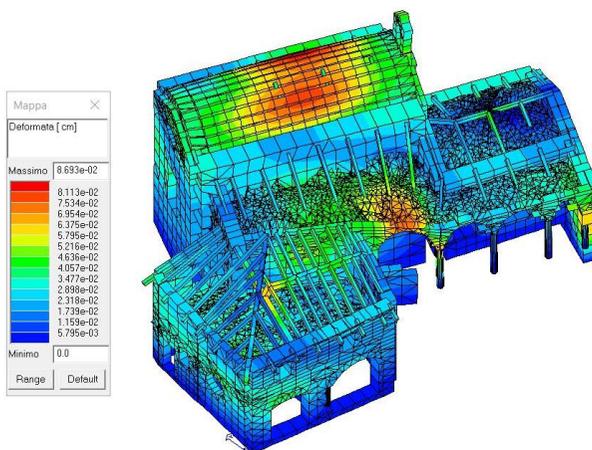


Figura 269 - Deformata dinamica 7, Modo 12; frequenza= 18.06Hz, periodo T= 5.537e-02 s

Come si evince facilmente dalle immagini precedenti, il modello si comporta in maniera del tutto plausibile e riproduce degli accumuli di tensione negli stessi identici punti in cui la struttura reale presenta dei segni di crisi strutturale.

Per quanto riguarda le tensioni, siano esse in termini di sforzo assiale o di momento nelle direzioni principali, le aree più sollecitate sono in corrispondenza degli attacchi del solai sia di copertura che di calpestio, sia alla base dei maschi murari principali, sia nelle porzioni giunzione con le superfici voltate: ciò lascia dedurre che le condizioni di vincolo imposte alla base dei setti e, più in generale, nell'intero modello restituiscono un comportamento verosimile della struttura scatolare formata dall'intero complesso, restituendo accumuli di tensione proprio nei punti attesi.

Osservando invece i risultati ottenuti in termini di deformata, a partire dalla figura 256 alla figura 269, si può notare che in nessuno dei casi riportati il valore di deformazione supera l'ordine di grandezza del centimetro, rilevando un valore di deformazione massima in corrispondenza delle travi di copertura dei vani della cappella 4 pari a 0.95 cm in combinazione Stato limite ultimo A1 3. Il risultato può essere considerato verosimile, in quanto il materiale "legno" assegnato alle travi di copertura ha, ovviamente, caratteristiche elastiche maggiori rispetto alle murature presenti, e considerando il sovraccarico generato dalla terza originale, avente un solo incastro nella muratura ed essendo ammorsata ai travetti secondari, va a costituire un sovraccarico gravoso all'intero telaio di copertura. In questa porzione di edificio, e con questa configurazione strutturale, sono stati stimati i valori massimi globali di deformazione, richiamando inevitabilmente la necessità di un intervento di riparazione preventivo (vedi pagina 80 Figure 34 - 37).

Proseguendo con l'analisi dei risultati, va evidenziato il comportamento dinamico delle volte: nella quasi totalità degli *screenshot* delle deformate, si notano evidenti porzioni delle *mesh* contraddistinte da valori di deformazione di range medio alto, pur rimanendo nell'ordine di grandezza del decimo di centimetro.

La volta a botte della cappella due, infatti, tendenzialmente va in crisi nella porzione centrale, sia nelle condizioni statiche e sia in condizioni dinamiche con lo spettro di progetto. In queste considerazioni di possibili criticità, si potrebbero ipotizzare le ragioni che hanno portato alle opere di rifacimento della volta stessa, opere effettuate in epoca recente che impediscono una lettura dei segnali di crisi della volta probabilmente presenti prima del rifacimento.

Rimanendo sul confronto tra la simulazione e lo stato di fatto dell'edificio è importante far notare come, ad eccezione della volta della cappella 2 recentemente rifatta, il modello restituisce le aree a maggior grado di deformazione proprio negli stessi identici punti in cui la struttura reale presenta cricche superficiali e crepe. Nel primo modo di vibrare infatti [Figura 263] la parte più sollecitata risulta essere il maschio murario esterno della cappella due, ed infatti nella realtà nella stessa identica posizione sono state individuate lesioni uscenti dalla linea di gronda con andamento verticale.

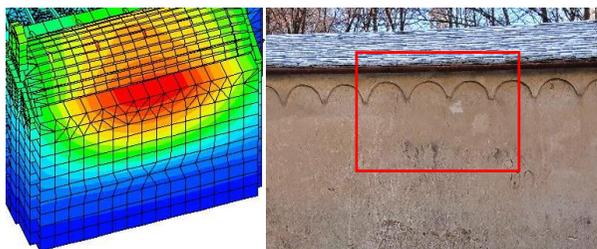


Figura 270 - Confronto fra restituzione delle deformazioni della Figura 263 e lesioni esterne sul maschio murario della cappella 2.

Queste lesioni potrebbero indicare, sotto sollecitazione sismica, un possibile fenomeno di espulsione degli strati più esterni della muratura portante nella porzione centrale dell'edificio stesso.

Altra porzione dell'edificio nel quale è possibile notare corrispondenza tra il modello analitico e lo stato di fatto è la porzione voltata al margine destro della cappella 3. Al di sotto del passaggio di collegamento tra la cappella ed il terrazzamento, infatti, è possibile scorgere una lesione della volta, con andamento parallelo al maschio murario più esterno che prosegue all'interno della cappella 3: ciò potrebbe stare ad indicare un possibile fenomeno di ribaltamento verso l'esterno del setto in caso di sollecitazione sismica, con conseguente rotazione del maschio verso il Vallone dell'Inferno e possibile collasso delle superfici voltate interne ed esterne [Figura 271].

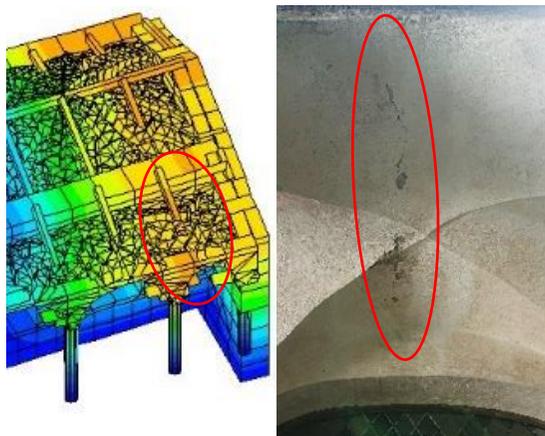


Figura 271 - Confronto fra restituzione delle deformazioni della figura 264 e lesione corrispondente nello stato di fatto

Altro punto che è interessato da un'ottima corrispondenza fra modello analitico e realtà è la porzione voltata al di sopra delle scale nel passaggio fra le cappelle 2 e 3, superficie voltata che attualmente interessata dalla presenza di un'ampia cricca superficiale, attualmente monitorata con dei punti di controllo per fessurimetri, che parte esattamente nel punto individuato in arancione [figura 272] dal modello analitico e che si propaga longitudinalmente risalendo lungo la volta.

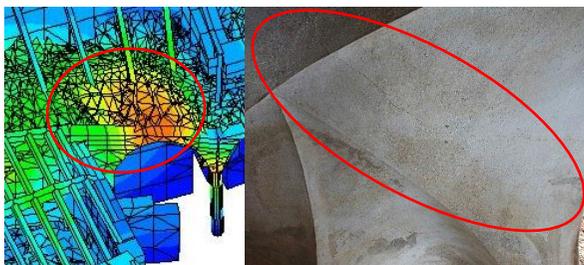


Figura 272 - Confronto fra restituzione delle deformazioni della figura 267 e lesione corrispondente nello stato di fatto.

Tutti questi punti di corrispondenza fra il modello analitico della simulazione e le corrispettive lesioni visibili nella realtà danno modo di pensare alla buona riuscita dello stesso e alla veridicità dei dati ottenuti, in termini di risultati numerici che in termini di previsioni sul comportamento strutturale.

9.5 Le verifiche

Ultimato il controllo dei risultati ottenuti dalle analisi statiche e dinamiche, si prosegue valutando le prestazioni del modello analitico, e quindi dell'intero

edificio simulato, in relazione alle caratteristiche di resistenza ed efficienza richieste dalla normativa vigente.

Nelle NTC 2018, in generale, la valutazione delle caratteristiche di sicurezza dell'edificio consiste nell'identificazione delle criticità nei confronti delle azioni considerate, sia non sismiche, ossia pesi propri, sovraccarichi e azioni climatiche, sia sismiche. La verifica sotto il solo effetto dell'azione sismica, quindi, non è sufficiente, ma è fondamentale assicurarsi un adeguato livello di sicurezza anche nei confronti delle azioni non sismiche.

Per edifici esistenti in muratura, come nel nostro caso, la valutazione della sicurezza complessiva deve essere effettuata in relazione ai meccanismi di collasso, sia in termini locali che globali quando questi ultimi siano significativi; la verifica dei meccanismi globali generalmente diviene però significativa solo dopo che siano stati individuati gli interventi per eliminare i meccanismi di collasso locale.

Nel nostro caso quindi la verifica sarà condotta facendo riferimento ai dati globali ottenuti attraverso l'analisi dinamica lineare e pertanto non facendo riferimento al paragrafo C8.7.1.2 delle NTC2018 nel quale sono affrontate le metodologie di analisi dei meccanismi locali di collasso.

L'inserimento, inoltre, di materiali verosimili, con prestazioni meccaniche rappresentative dello stato di fatto, riveste un ruolo fondamentale per la buona riuscita della simulazione e quindi delle verifiche.

La qualità della tessitura muraria, anche in termini di ingranamento nello spessore, le caratteristiche degli ammorsamenti tra le pareti e delle connessioni tra pareti ed orizzontamenti, la presenza inoltre di catene o altri elementi strutturali in grado di assorbire spinte ed interazioni fra le componenti, sono

tutti fattori che incidono sulla buona riuscita della simulazione e, di conseguenza, delle verifiche.

La qualità della tessitura muraria, ad esempio, risulta essere fondamentale perché una muratura di bassa qualità potrebbe subire fenomeni di disgregazione anticipata rispetto all'attivazione dei cinematismi locali ottenuti da simulazioni computerizzate.

È per questo motivo che è molto importante, in fase di modellazione, attribuire ai materiali prescelti la caratteristica di “materiale esistente” all'interno della finestra delle proprietà, al fine di eseguire le analisi nella maniera più verosimile possibile, e concedere la verifica strutturale dell'edificio seguendo i criteri delle NTC 2018 riguardanti gli edifici esistenti.

Anche in questo caso *Pro_Sap* offre degli automatismi per effettuare la verifica del modello. È sufficiente accedere nella finestra di comando *Assegnazione dati di progetto* ed aprire il menu a tendina sotto la voce *Contesto*. Scorrendo sulla voce *Esecuzione progettazione* è sufficiente selezionare il comando *Verifica edificio esistente* [Figura 273].

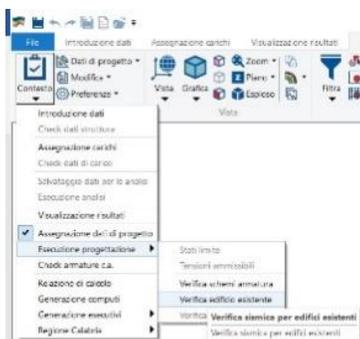


Figura 273 - Esecuzione del comando Verifica edificio esistente.

Una volta completato il calcolo, è possibile accedere attraverso la barra dei comandi dedicata ai risultati delle verifiche relativi ai vari elementi strutturali.

Per visualizzare ad esempio il risultato della verifica relativa alle murature, è sufficiente attivare il comando *Stato verifiche (esistenti)* come mostrato nella seguente figura [Figura 274].



Figura 274 - Selezione del comando *Stato verifiche (esistenti)*.

I risultati vengono visualizzati attraverso una grafica molto semplice ed intuitiva espressa con una variazione cromatica:

- **Blu**: elementi verificati con altro criterio;
- **Giallo**: elementi non progettati;
- **Ciano**: elementi verificati;
- **Rosso**: elementi non verificati.

Di seguito sono riportate 4 viste assometriche da diverse angolazioni che mostrano i risultati delle verifiche effettuate con il metodo precedentemente esposto.

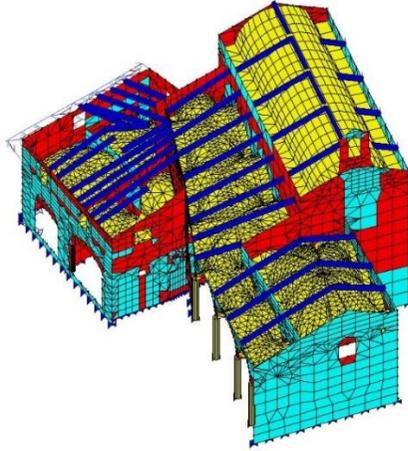


Figura 275 - Vista assonometrica 1 dei risultati della verifica secondo NTC 2018 al 10% di ground acceleration.

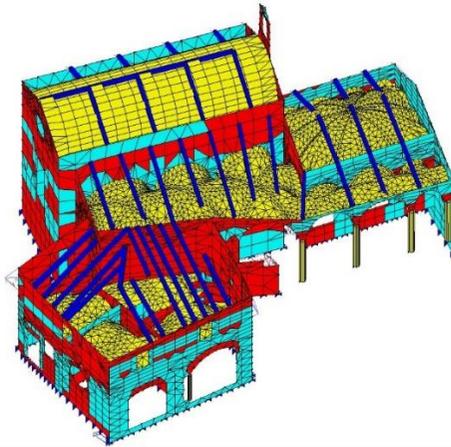


Figura 276 - Vista assonometrica 2 dei risultati della verifica secondo NTC 2018 al 10% di ground acceleration.

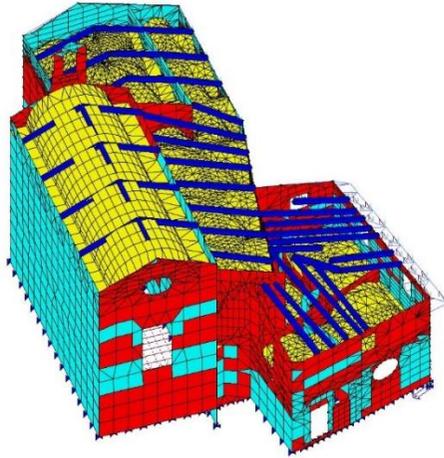


Figura 277 - Vista assonometrica 3 dei risultati della verifica secondo NTC 2018 al 10% di ground acceleration.

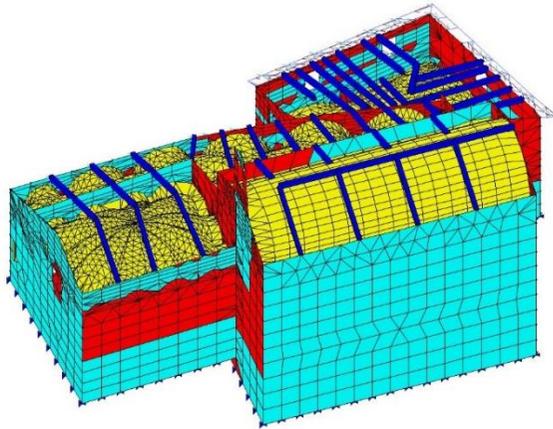


Figura 278 - Vista assonometrica 4 dei risultati della verifica secondo NTC 2018 al 10% di ground acceleration.

Dopo aver eseguito le verifiche secondo NTC 2018, analizzando le precedenti immagini è possibile notare che la struttura presenta elevate e diffuse criticità, mostrando numerose inefficienze dei setti già con un valore di accelerazione al suolo pari al 10% di quello di progetto.

Altro aspetto fondamentale da sottolineare è che nessuna delle superfici volate, nonostante siano state modellate con cura e sia stato assegnato un materiale rappresentativo di quello presente in sito, non sono calcolate nelle operazioni di verifica. La verifica delle stesse non può essere infatti eseguita in automatico dal *software* in quanto né all'interno delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 né all'interno degli Eurocodici sono riportate delle prescrizioni che ne consentano l'effettivo controllo, evidenziando così una grossa lacuna a livello normativo che complica inevitabilmente la questione del controllo e del miglioramento statico e dinamico di tutti gli edifici storici esistenti presenti sul suolo nazionale.

Secondo la simulazione appena effettuata inoltre ogni singola cappella subirebbe, come ci si aspetterebbe da una struttura di questa datazione storica, danni verosimilmente gravi, presentando una concentrazione di elementi non verificati soprattutto nelle porzioni di edificio con forte discontinuità geometrica ed in presenza delle fasce superiori ed inferiori delle bucaure: la cappella 4 è quella che, secondo la simulazione effettuata, subirebbe più danni locali, mostrando carenze strutturali sia nelle murature interne divisorie che in quelle esterne; in queste ultime sono state rilevate criticità soprattutto in prossimità dell'attacco con la copertura, componente architettonica che evidentemente comporta un'azione spingente fuori piano delle murature stesse.

Altri ambienti che non hanno mostrato un comportamento soddisfacente in fase di verifica sono la cappella 2 e l'annesso passaggio verso la cappella 3:

la prima mostra elevate criticità soprattutto nella muratura di facciata, dov'è posto il portale di ingresso, riportando un esito negativo alla verifica nel timpano, suggerendo possibili fenomeni di rottura o ribaltamento in questa porzione, oltre a richiamare possibili fessurazioni a taglio nelle porzioni laterali del portale di ingresso. Il paramento murario subito opposto, ossia la parete costituente il fondale della cappella 2, presenta invece delle porzioni di *mesh* non verificata che suggeriscono un possibile fenomeno fessurativo diagonale con probabile distacco dalla parete laterale ad essa ammorsata .

Tornando ad osservare le precedenti immagini, senza ombra di dubbio la porzione di edificio che presenta più elevato grado di criticità è il passaggio di collegamento tra la cappella 2 e la cappella 3.

Dalla verifica effettuata emerge che tutte le componenti murarie che lo definiscono non superano le condizioni di verifica imposte dalle NTC 2018. Se ne deduce quindi che in caso di sollecitazione sismica quest'ambiente non risponderà in maniera adeguata allo stress meccanico. Il rischio, essendo questo un ambiente di collegamento e frapposto tra le tre cappelle, è quello di comprometterne irrimediabilmente la loro essenza e quindi di generare gravi danni strutturali con la possibile ed irrimediabilmente lesione degli affreschi interni di inestimabile valore storico.

Più in generale, l'esito positivo di questa verifica è quello di confermare e consolidare l'utilità di un metodo procedurale attraverso il quale andare ad individuare e circoscrivere in maniera sufficientemente precisa gli elementi architettonici e strutturali che, in ambito di una futura manutenzione straordinaria, dovranno essere controllati e sicuramente migliorati a livello di prestazione statica e meccanica.

9.5.1 *Eventuali interventi strutturali futuri*

Arrivati a questo punto è possibile senza alcun dubbio riconoscere la necessità di intervenire a livello antisismico e strutturale in maniera preventiva, al fine di scongiurare un'eventuale crisi nelle componenti portanti e salvaguardare il valore storico e artistico del Complesso di Nazareth.

Quando si intraprende il discorso dell'intervento strutturale o, più nello specifico, di intervento antisismico molto spesso i termini "adeguamento" e "miglioramento" vengono impropriamente applicati come veri e propri sinonimi. Tutta via l'impiego di un termine o dell'altro vuol dire far riferimento a due tipologie di intervento ben distinte ed inequivocabili che richiamano prescrizioni normative altrettanto differenti.¹⁰⁴

Le nuove Norme Tecniche delle Costruzioni appone una chiara diversificazione delle tipologie di intervento all'interno del paragrafo 8.4 relativo appunto alla "Classificazione degli interventi".

Nel paragrafo vengono ricalcate le precedenti prescrizioni del D.M. 16/01/1996 al punto C9, del D.M. 14/09/2005 al capitolo 9 e del D.M. 14/01/2008 al capitolo 8, apportando comunque qualche piccola ma significativa variazione; nello specifico gli interventi possibili su un edificio storico come il Complesso di Nazareth vengono classificati in tre diverse categorie:

- Interventi di riparazione o locali: sono interventi che interessano singoli elementi strutturali e che non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti;

104 Fonte: <http://biblus.acca.it/focus/adeguamento-sismico-e-miglioramento-sismico/>

- Interventi di miglioramento: sono interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza fissati dalla norma per edifici *ex-novo*;
- Interventi di adeguamento: sono interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, raggiungendo gli stessi livelli di sicurezza previsti dalla norma per edifici di nuova costruzione.

Alla luce di queste definizioni ne consegue che le operazioni di manutenzione programmata e straordinaria future non possano essere volte ad operazioni di adeguamento sismico, ma al massimo ad interventi locali e di miglioramento complessivo.

Gli interventi da eseguire dovranno essere opportunamente studiati e progettati, visto anche il valore storico culturale dell'edificio ed i relativi vincoli prescritti dalla Soprintendenza al fine di garantirne l'unicità riconosciuta dall'Unesco.

Per questi motivi, prima di qualsiasi pianificazione di un intervento, si richiede inevitabilmente il miglioramento del *livello di confidenza*. Operando analisi locali e ed indagini puntuali nell'edificio, al fine di caratterizzarne con maggior grado di precisione le caratteristiche dei materiali presenti nonché le prestazioni meccaniche che la struttura può offrire, è possibile ridurre il *fattore di confidenza* di 1,35 impiegato. Questo valore, indubbiamente alto, è stato definito dall'impossibilità di basarsi sui dati derivanti da una opportuna campagna diagnostica sulle strutture murarie ed ha penalizzato le resistenze meccaniche considerate all'interno del modello. Una più approfondita conoscenza della tessitura muraria avrebbe permesso di inserire valori di resistenza sicuramente superiori ai minimi previsti dalla normativa, derivanti dal caso del livello base di conoscenza LC1 ed applicati all'interno di questa Tesi.

Solo successivamente a questa fase di caratterizzazione materica sarà possibile effettuare una progettazione concreta ed efficace che miri alla riparazione o all'intervento locale delle componenti presenti.

Gli interventi richiesti non dovranno stravolgere significativamente l'aspetto ed il comportamento globale della costruzione, alterandone i canoni storici ed artistici, ma dovranno esser posti in essere al fine di:

- Ripristinare la configurazione iniziale degli elementi o delle parti danneggiate, come ad esempio sarebbe necessario risolvere la componente di sovraccarico dovuta alla trave originale "appesa" al nuovo telaio di copertura studiando una modalità di posa in opera dei nuovi elementi sostitutivi che vada a scongiurare l'effetto spingente delle stesse;
- Pianificare un intervento mirato alla risoluzione della criticità posta in essere con le operazioni di restauro delle coperture del 2014-2015 nella cappella 4: il futuro intervento dovrà inevitabilmente prevedere o la rimozione della terza originale, che essendo sospesa costituisce un carico aggiunto all'intero telaio, oppure la rimozione della nuova trave affiancata, andando quindi a ripristinare i vincoli statici della trave originale, consolidando l'incastro nella muratura e apponendo un nuovo semi-incastro o incastro alla trave diagonale, scongiurando in entrambi i casi un possibile collasso della copertura che danneggerebbe irrimediabilmente le volte sottostanti;
- Migliorare le caratteristiche di resistenza e/o duttilità degli elementi o di quelle parti che non superano le condizioni di verifica, ad esempio compiendo operazioni di iniezione nelle murature di miscele di malta e calce opportunamente calibrate al fine di migliorarne le

- prestazioni, oppure studiando opportune tecniche di miglioramento locale che non vadano a ledere le superfici affrescate;
- Impedire meccanismi di collasso locale, come ad esempio andare ad operare in termini di consolidazione sulle volte che, allo stato attuale, presentano cricche superficiali sinonimo di fenomeni di assetamento, andando ad esempio ad apporre un nuovo sistema di catene in acciaio e studiando l'efficienza di quello già presente in corrispondenza della cappella 3;
 - Modificare un elemento o una porzione limitata della struttura, dove necessario, al fine di garantirne la salvaguardia complessiva. Questa opzione probabilmente risulterà essere difficilmente applicabile viste le limitazioni poste dalle imposizioni di salvaguardia apposte dalla Sovrintendenza.

Quelli citati sono alcuni dei possibili interventi da porre in opera, ma le scelte opportune di un progetto e della sua valutazione di sicurezza dovranno inevitabilmente essere correlate da una maggior documentazione sulle carenze strutturali riscontrate.

La documentazione dovrà andare a giustificare le operazioni attraverso un confronto diretto fra la condizione presente allo stato di fatto in relazione ai danni, al degrado ed alle configurazioni strutturali presenti, confrontandole con le prestazioni attese in termini di incremento del livello di sicurezza locale e delle prestazioni meccaniche globali.

Gli interventi di miglioramento sismico da effettuare sul Complesso di Nazareth, trattandosi di un edificio esistente di classe III, come prescritto dalle Norme Tecniche delle Costruzioni del 2018 dovranno garantire il miglioramento almeno di un valore pari a 0,1 del coefficiente di sicurezza ζ_E . Ciò vuol

dire migliorare del 10% questo coefficiente, espresso con un valore compreso fra 0 ed 1, che indica il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di nuova costruzione.

10. Considerazioni conclusive

In questa Tesi Magistrale ho cercato di applicare ed analizzare un insieme di tecniche innovative in grado di agevolare il lavoro di tutti quei professionisti che operano nelle fasi di studio, progettazione e conservazione dei beni storici esistenti. Nello specifico ho cercato di applicare il maggior numero di processi e tecniche innovative volte, non solo al rilievo nel contesto dei beni architettonici, ma anche alle modalità più avanzate di rappresentazione tridimensionale e simulazione analitica ai fini applicativi strutturali.

Fin dall'acquisizione dei dati geometrici e topografici, avvenuti durante la campagna di rilievo ed eseguiti tramite strumentazioni di precisione all'avanguardia, come mezzi aerei a pilotaggio remoto (*UAV*) e strumentazione *laser scanner*, sono stati impiegati diversi *software* sia di natura commerciale, come *FARO SCENE*, che *open-source*, come *Mic-Mac*. Le elaborazioni ottenute insieme alla compatibilità del formato dei *file*, hanno portato alla generazione di una nuvola densa di punti la quale ha poi costituito la vera e propria base solida di riferimento dell'intero processo di modellazione.

Attraverso operazioni di selezione, conversione ed interscambio di informazioni tra i *software* impiegati per l'acquisizione e la modellazione, è stato possibile generare un modello architettonico 3D di natura parametrica sfruttando le tecnologie di modellazione *BIM* con il *software Autodesk Revit Architecture*. In questo modo è stato possibile coniugare tutte le informazioni di natura geometrica, acquisite ad alto livello di precisione, con tutte le caratteristiche materiche e tipologiche rilevate in maniera visiva e speditiva nelle fasi di sopralluogo. L'intersezione di questi aspetti ha consentito la riproduzione in ambiente virtuale dell'edificio oggetto di analisi, portando ad un risultato molto

soddisfacente, versatile e spendibile in tutte le future operazioni di intervento, grazie alla quantità di informazioni che un modello di natura *BIM* è in grado di contenere e gestire.

Attraverso precisi passaggi di conversione, l'oggetto tridimensionale elaborato *BIM* è stato convertito in un modello analitico semplificato al fine di poter essere studiato nel campo strutturale, tramite il *software* di analisi *Pro_Sap RY2018*. Con quest'ultimo programma è stato possibile confrontare la natura materica, geometrica e quindi strutturale dell'edificio oggetto di analisi, con l'ambito analitico definito dalle prescrizioni imposte dalle *Norme Tecniche delle Costruzioni 2018* nel D.M. 17/01/2018. Attraverso queste analisi è infine stato possibile dedurre le caratteristiche prestazionali esistenti utili ad impostare le basi per eventuali interventi di consolidamento o miglioramento strutturale in vista di una più idonea salvaguardia del bene architettonico stesso, con conseguente aumento dei canoni di sicurezza più elevati del complesso stesso.

Nonostante la forte innovazione tecnologica e considerando la crescente necessità professionale di condivisione dei dati, vista la pluralità degli attori nell'intero processo, sono state riscontrate alcune problematiche all'interno del *workflow* impiegato.

Queste criticità vertono attorno a tre principali aspetti:

- Tempi di elaborazione molto lunghi rispetto a tempi di acquisizione dati relativamente brevi;
- Carenza di precisione in alcune delle operazioni di modellazione in ambiente *BIM*;

- Lacune ed imprecisioni nelle fasi di interscambio tra *software BIM* e *software* strutturali, quindi mancato interscambio tramite *file IFC*.

Una delle prime criticità riscontrate nel workflow riguarda, come già detto, i tempi di elaborazione: a tempi di acquisizione dati relativamente brevi nella fase di campagna di rilievo, sono corrisposti tempi di elaborazione e trattamento dati notevolmente maggiori. Tale differenza è dovuta principalmente alla mole di informazioni che le strumentazioni odierne e all'avanguardia sono in grado di acquisire in un tempo davvero ridotto. Tale velocità operativa però si scontra con la necessità di maggior tempo richiesto dell'operatore nelle fasi di elaborazione e discretizzazione dei dati stessi.

Le operazioni di allineamento delle due nuvole di punti ottenute tramite *laser scanner* e fotogrammetria inoltre hanno richiesto numerosi tentativi: dalla nuvola di punti relativa alle coperture non si riusciva ad ottenere un buon compromesso tra resa finale e precisione di georeferenziazione; attribuendo infatti la totalità delle coordinate ai *marker* fotografici visibili a terra, il *software Mic-Mac* non riusciva ad elaborare una nuvola di punti completa, restituendo lacune e distorsioni evidenti. Per tanto, la generazione delle nuvole di copertura ha richiesto un numero consistente di tentativi al fine di individuare i *marker* fotografici con miglior distribuzione al suolo ed affetti da minor errore di rilevamento. Attraverso questo processo iterativo, con relative lunghe tempistiche di elaborazione, è stato però possibile ottenere un allineamento finale delle coperture soddisfacente e che rientrasse a pieno nelle tolleranze definite nelle fasi iniziali.

Nonostante l'impiego di *software* commerciali, dalle ormai ben note potenzialità, sono state riscontrate anche carenze in termini di versatilità di impiego. In questi termini è doveroso richiamare la difficoltà di utilizzo del *software*

Revit per la modellazione di elementi non standardizzati e dalla connotazione geometrica del tutto singolare, come ad esempio nel caso del passaggio con volte a crociera irregolari tra la cappella 2 e 3. I comandi forniti dal *software*, infatti, per quanto avanzati ed innovativi, non concedono una versatilità e libertà di impiego pari ai *software* di natura CAD concorrenti. Per questi motivi è stato necessario l'impiego di un *software* di modellazione pura come *Rhinoceros* al fine di colmare questa carenza ed ottenere un oggetto tridimensionale interamente modellato in ambiente parametrico.

Quest'ultimo *software*, CAD, è stato nuovamente utile per colmare le lacune riscontrate in termini di modellazione analitica strutturale automatica offerta da *Revit* che, nonostante sia un *software* dalla notevole versatilità, in questo caso non è né riuscito a mantenere né garantire un buon livello di precisione nelle fasi di conversione automatica da modello architettonico e modello analitico strutturale.

Com'è stato evidenziato nel Capitolo 8.8, il modello analitico strutturale ottenuto risulta essere non sufficientemente accurato o comunque difficilmente impiegabile con *software* prodotti da case esterne alla *Autodesk*. Il trasferimento di informazioni attraverso formato *IFC* dall'ambiente *BIM* ai *software* esterni è risultato essere fallimentare per questo caso specifico. Ciò probabilmente perché il formato di *file* è standardizzato con elementi tipologici architettonici in riferimento ad organismi architettonici di connotazione moderna, caratteristiche e funzionalità che quindi difficilmente si sposano con gli elementi unici e singolari delle architetture storiche.

Per questo motivo il modello strutturale semplificato è stato necessariamente impiegato solamente come base, dal quale è stato possibile elaborare un

terzo modello, in formato tradizionale *DXF*, attraverso una modellazione più accurata in *Rhinceros*.

Riuscendo così a colmare e migliorare la natura del modello analitico stesso, è stato possibile ottenere un *file* di supporto alla modellazione delle geometrie all'interno del *software* di analisi strutturale *Pro_Sap*. Una volta ricreato lo scheletro strutturale ed impostate le proprietà materiche dell'edificio, è stato possibile analizzare le prestazioni del Complesso di Nazareth simulando le condizioni di carico prescritte dalla norma nelle componenti permanenti, eccezionali e sismiche.

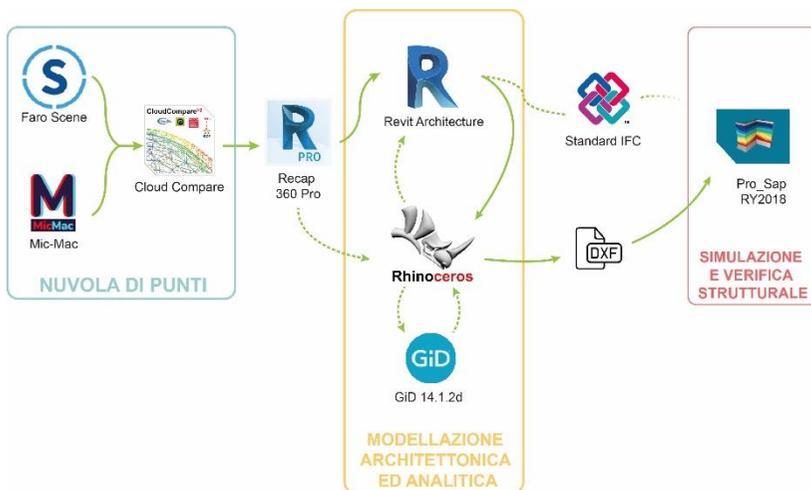


Figura 279 - Schema rappresentativo del workflow e dei relativi *software* impiegati nelle fasi di elaborazione.

Nonostante l'impiego di numerosi *software* dalla diversa natura e funzionalità, e nonostante alcune criticità individuate nel processo, è stato possibile

dimostrare come, a partire da una nuvola di punti impiegata come base metrica di riferimento, è stato possibile ricreare un modello tridimensionale simile e del tutto rappresentativo dello stato di fatto in cui versa il Complesso di Nazareth. Attraverso le enormi potenzialità raggiunte dalla tecnologia odierna è stato possibile riprodurre in maniera del tutto fedele quelle geometrie complesse, quali volte e coperture, che costituiscono la vera e propria criticità delle tecniche rappresentative tridimensionali moderne.

Avvalendosi delle forti caratteristiche di elaborazione offerte dai *software* e dai computer odierni, è stato possibile conferire e valutare la natura dinamica e meccanica dei materiali costituenti i veri elementi geometrici rappresentati con i *software* di modellazione. Il tutto è stato reso possibile attraverso programmi in grado di applicare quelle prescrizioni e quelle teorie analitiche imposte dalle norme tecniche vigenti sul suolo nazionale, ottenendo risultati molto attendibili e precisi, garantendo un elevato grado di interscambio delle informazioni all'interno di tutto il processo.

In conclusione, è possibile affermare che il workflow qui impiegato e proposto offre un punto di partenza a degli spunti applicativi interessanti, non solo strettamente riguardanti l'ambito strutturale, ma anche e soprattutto la gestione del patrimonio storico esistente attraverso metodologie derivanti dall'*HBIM* e finalizzate ad operazioni di mantenimento, conservazione, progettazione o manutenzione programmata.

FONTI

BIBLIOGRAFIA (ordine alfabetico)

ALESSI, G., *Libro dei Misteri*, Arnoldo Forni Editore, Bologna, 1974.

ASSANDRI G., “*La legge della Regione Piemonte n. 19 del 29/06/2009, con riferimento alla nuova organizzazione dei Sacri Monti*”, in S. MINISALE (a cura di), *Metodologia di organizzazione...*, op. cit., p.47.

BARBERO A., GRECO G., GIRARDI O., MINISALE S., RACCHELLI L., SILVESTRI C., *Sacri Monti*, 2007

BARBERO, A., *BIM 4D – Pianificazione e gestione della manutenzione: il caso studio dello Juventus Stadium*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria Edile, A.A. 2015/2016, p.13

BETELLI G., *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali*, in “Atti 6a Conferenza Nazionale ASITA”, 2002, p.3

BREU S. (lavoro individuale di approfondimento...), *Tetti in piode (beole) – Un’arte infinita...*, Muratori 3c, Scuola professionale Mendrisio, a.a. 2006-2007.

CARPINTERI A., *Il patrimonio pittorico murale dei Sacri Monti, La crescita biologica sui materiali lapidei di alcune cappelle del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Aracne Editore, 2017

CHIABRANDO F.; LINGUA A.; MASCHIO P.; RINAUDO F.; SPANO A., *Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico*, in “Una giornata informale per i 70 anni del Prof. Carlo Monti, 3 maggio 2012”, (2012), p.1.

COMETTI VALLE M. (a cura di), *Iconografia del Sacro Monte di Varallo Iconografia del Sacro Monte di Varallo. Disegni, dipinti e incisioni dal XVI al XX secolo*, Biblioteca civica Farinone Centa, Borgosesia, op. cit., pp. 40 e 43.

COMETTI VALLE M. (a cura di), *Iconografia del Sacro Monte di Varallo. Disegni, dipinti e incisioni dal XVI al XX secolo*, Biblioteca civica Farinone Centa, Borgosesia 1984, p. 70.

DROGEMULLER, R., *Can B.I.M. be civil?*, Queensland Roads (7), pp. 47-55.

DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009, p. 155.

DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2009, p. 26.

DE FILIPPIS E., *Guida al Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, 2009, p.14.

DE FILIPPIS E., *Guida del Sacro Monte di Varallo*, Tipolitografia di Borgosesia, 2009, op. cit., p. 25

MASSONE E. (a cura di), *Sacri Monti in Piemonte, Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994, p.133

MASSONE E. (a cura di), *Sacri Monti in Piemonte, Itinerari nelle aree protette di Belmonte, Crea, Domodossola, Ghiffa, Orta, Varallo*, Kosmos edizione, Torino, 1994, op. cit., pp. 135-136.

MASSONE E., *“Il gruppo di lavoro sul Piano Unitario di Gestione: Presentazione delle attività in corso”*, in S. MINISSALE (a cura di), *Metodologia di organizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia*, Atti del Seminario tecnico, Domodossola 24 novembre 2009, Tipografia Press Grafica, Verbania 2010, pp. 40-41

MASSONE E., *“Il gruppo di lavoro sul Piano Unitario di Gestione: Presentazione delle attività in corso”*, in S. MINISSALE (a cura di), *Metodologia di organizzazione dei Sacri Monti del Piemonte e della Lombardia*, Atti del Seminario tecnico, Domodossola 24 novembre 2009, Tipografia Press Grafica, Verbania 2010”, op.cit, pp. 43-45

ALESSI G., *Libro dei Misteri*, Arnoldo Forni Editore, Bologna, 1974, p. 43.

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

FRIEDT J.-M, *Photogrammetric 3D structure reconstruction using Micmac*, 5 September 2014

LOMBARDI S., *Umidità nelle murature: diagnosi e recupero*. 2005.

LONGO, P.G.; ZARDIN, D. (a cura di), *I Sacri Monti, Bibliografia italiana*, Atlas, Ponzano Monferrato, 2010, p. 18.

LOWE DAVID G., "Object recognition from local scale-invariant features", in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, vol.2, 1999, pp. 1150-1157

OSELLO, A., *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, Dario Flaccovio Editore, Torino, 2012, p.33

PIANO, R., *La terra trema, ecco il mio progetto. Il sole 24 ore*, 2 ottobre 2016

FACCIO P., *Teoria e tecnica delle costruzioni storiche*; (slide in formato pdf a cura di...), Università IUAV di Venezia, a.a. 2013-2014

RINAUDO R., *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in F. SACERDOTE, G. TUCCI (a cura di), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice, Firenze 2007, p. 27.

SCARZELLA P., ZERBINATTI M. (a cura di...), *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*. S.1, Alinea editrice, 2009, p.56.

SCARZELLA P., ZERBINATTI M. (a cura di...), *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*. S.1, Alinea editrice, 2009

SCARZELLA P., ZERBINATTI M. (a cura di...), *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Alinea editrice, 2009, p.187

SCARZELLA P., ZERBINATTI M., *Problemi conservativi relativi a materiali lapidei naturali o artificiali con decorazioni presso la Cappella 13, la Cappella 17 e le cappelle 23, 27, 29, 34 al Sacro Monte di Varallo Sesia*, 2010, Giornata Seminariale Progetto REFRESCOS

TRIGGS B.; MCLAUCHLAN P.; HARTLEY R.; FITZGIBBON A., "Bundle Adjustment — A Modern Synthesis". ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms. Springer-Verlag., 1999, pp. 298–372

ARTICOLI

ALBERY E., LINGUA A., RINAUDO F., *Tecniche e strumenti innovativi per il rilievo metrico dei beni culturali*, in "Atti di convegno: Giornata nazionale di studi del CIPA", 2000, p.79

Associazione Città Italiane Patrimonio UNESCO, Luoghi italiani patrimonio dell'Umanità, Eliotecnica s.n.c., Ferrara, p. 9.

CHIABRANDO F., SPANÒ A T., *I sistemi laser scanning nei progetti e percorsi formativi d'Architettura*, in "Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia", n.3, SIFET, 2012, pp. 65-84.

CHIABRANDO F.; LINGUA A.; MASCHIO P.; RINAUDO F.; SPANO A., *Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico*, in "Una giornata informale per i 70 anni del Prof. Carlo Monti, 3 maggio 2012", (2012), p.1.

GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in "Archeologia e Calcolatori", N° 22, (2011), p. 171.

GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in "Archeologia e Calcolatori", n.22, 2011, p.169

GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in "Archeologia e Calcolatori", N° 22, (2011), op. cit., p. 175.

GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., *Principali tecniche e strumenti...*, op. cit., p. 174.

Sacri Monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2007, p. 40.

Sacri monti, Rivista di arte, conservazione, paesaggio e spiritualità dei Sacri Monti piemontesi e lombardi, Tipolitografia di Borgosesia, Borgosesia, 2007, p.94

SITOGRAFIA

- <http://www.unesco.beniculturali.it/index.php?it/9/requisiti-per-liscrizione>
- <http://www.viestoriche.net/indexold/sacrimonti/libro/sacri-it-ch.html>
- <http://www.sacri-monti.com/>
- <http://whc.unesco.org/uploads/nominations/1068rev.pdf> Ultima consultazione 17/03/2017.
- <http://whc.unesco.org/en/list/1068>

- <http://www.sacrimonti.net/DocumentFolder/Documento-n-1.pdf>
- <https://www.invalsesia.it/home/tag/sacro-monte-di-varallo/>
- <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/mapI.html>
- <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-ii/05.jpg>
- http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292
- http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/
- <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-ii/06.jpg>
- <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/uploads/2011/07/07.jpg>
- http://www.sacromonte-varallo.com/?page_id=292
- http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/
- <http://www.sacromonte-varallo.com/wp-content/gallery/cappella-iii/08.jpg>
- http://www.sacromontedivarallo.org/wp/course/03_cappella2lannunciazione/
- <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15255>
- <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo>
- <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15023>
- <http://www.parks.it/riserva.sacro.monte.varallo/dettaglio.php?id=15255>
- <https://www.microgeo.it/it/laser-scanner-full3d-multipletargets/laser-scanner-riegl-vz400i.aspx>
- <https://www.microgeo.it/it/quante-tipologie-di-laser-scanner-esistono.aspx>
- <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/triangolatori--alta-precisione/faro-freestyle-3d.aspx>
- <https://www.microgeo.it/it/quante-tipologie-di-laser-scanner-esistono.aspx>
- <http://www.steamfantasy.it/blog/2012/01/07/i-piccioni-fotografi-di-neubronner/>
- <https://www.infobuild.it/prodotti/cam2-laser-scanner-focus-3d/#>
- <http://www.djitop.com/it/droni-dji/dji-phantom-4-pro-detail>
- <https://www.dji.com/it/phantom-4-pro/info>
- <https://www.faro.com/it-it/prodotti/costruzione-bim-cim/faro-scene/>
- <http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3->
- <http://www.treccani.it/enciclopedia/photo/>
- http://www.treccani.it/enciclopedia/linguaggio-c_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/
- <https://micmac.eng.eu/index.php/Accueil>
- https://micmac.eng.eu/index.php/MicMac_tools
- https://micmac.eng.eu/index.php/MicMac_tools
- <http://www.alspergis.altervista.org/lezione/22.html>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree>
- <https://www.danielgm.net/cc/>
- http://www.treccani.it/enciclopedia/interoperabilita_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/
- <http://www.ibimi.it/it/cose-e-come-e-fatto/>

- <https://www.iso.org/standard/51622.html>
- <https://www.rhino3d.com/it/>
- <https://knowledge.autodesk.com/it/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ITA/Revit-Analyze/files/GUID-264F079B-0134-4C34-A753-B4561C30F300-htm.html>
- <https://www.gidhome.com/>
- <http://www.wikitecnica.com/elementi-finiti/>
- [https://www.2si.it/software/documenti/PRO_SAP%20Brochure%202018%20\(Video\).pdf](https://www.2si.it/software/documenti/PRO_SAP%20Brochure%202018%20(Video).pdf)
- <http://biblus.acca.it/focus/adeguamento-sismico-e-miglioramento-sismico/>

TESI DI LAUREA

SANNA S., *Rilievo metrico e modellazione BIM per alcuni edifici del Sacro Monte di Varallo Sesia*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, pp. 73-74

CONIGLIONE F., *Gestione del patrimonio storico architettonico con metodologia HBIM: il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, pp. 79.

MATRONE F., *Rilevamento metrico 3D e modellazione HBIM per la manutenzione programmata del patrimonio architettonico. Il caso studio del Sacro Monte di Varallo*, Tesi di Specializzazione, Politecnico di Torino, 2016, p.76.

UFFREDI V., *Metodologie innovative di rilievo e modellazione BIM applicati a beni culturali. Realizzazione di un database per la manutenzione programmata*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria Edile, A. A. 2015/2016,

MANUALI

- Manuale d'uso *Faro SCENE*
- Manuale *Mic-Mac*
- Manuale *Pro-Sap RY2018*

DOSSIER E NORMATIVE

- Dossier di Candidatura dei Sacri Monti per la *WHL* UNESCO.
- Piano Unitario di Gestione dei Sacri Monti.
- DM 17/01/2018, Norme tecniche delle costruzioni 2018, cap. 2.6.1, Stati limite ultimi
- DM 17/01/2018, Norme Tecniche delle Costruzioni 2018, par. 7.3.3.2
- DM 17/01/2018, Norme Tecniche delle Costruzioni 2018, par. 7.3.4.2

Allegati

Coordinate compensate

	E	N	Elev. Description
20000	177.06100	4300.43000	598.13300
21000	265.40500	4312.14600	589.89800
22000	227.48500	4309.81500	591.51400
23000	214.32600	4278.55000	591.64100
23100	199.91500	4262.37900	592.93300
23300	212.46500	4260.75700	592.96800
23200	196.62800	4243.26000	594.63900
24100	216.70476	4224.17796	586.56829
24000	211.82876	4258.17469	592.92617
m0106	226.77116	4238.49167	594.63923
m0102	231.32164	4246.91826	594.63934
m0107	233.64328	4233.68175	594.63855
f0008	229.10184	4235.17180	594.63910
f0012	241.57313	4233.29702	594.63858
f0009	232.90302	4232.09119	594.63905
f0006	225.68604	4251.26426	594.63916
f0001	228.95508	4273.32642	596.43857

24500	233.82228	4247.59965	590.02770
m0101	232.79279	4249.94377	591.99466
m0102_2	231.32188	4246.91773	591.80890
m0103	229.12771	4245.44266	591.49471
m0104	215.97726	4254.02035	592.93423
m0108	209.17803	4257.49785	595.03931
m0109	210.10240	4260.33454	595.24334
f0006_2	225.68859	4251.25876	590.55320
f0001_2	218.49736	4260.15805	591.09355
f0002	237.86627	4266.52933	591.11623
f0100	222.17182	4256.53719	594.66641
f0101	228.09038	4252.40133	594.43301
f0102	230.50460	4245.88599	595.02818
f0103	231.84500	4248.64068	596.69135
f0104	227.22679	4246.08813	591.08252
24200	243.25996	4231.25176	588.19668
f0012_2	191.83528	4215.06280	588.08929
m0112	232.91132	4237.09044	586.44762
f0104_2	224.67652	4243.00775	586.45070

f0113	227.69676	4244.25582	586.59834
f0009_2	232.90000	4232.09346	584.76564
m0104_2	227.79395	4245.37966	588.51349
m0105	227.35251	4242.62514	588.44327
m0106_2	226.76778	4238.49053	587.29158
m0114	225.49199	4246.24645	587.17357
m0115	204.11459	4242.93351	592.54202
m0116	213.64440	4229.66891	588.95829
m0110	227.40936	4238.15796	587.60800
m0111	233.44825	4236.69883	587.94137
m0107_2	233.64030	4233.67999	587.50555
m0117	241.55599	4238.70675	590.75870
m0118	244.85548	4236.09739	590.57832
24300	255.02717	4225.83172	581.83465
m119	239.78162	4232.27602	588.78260
m120	234.56427	4237.25665	589.59851
m121	236.13252	4239.68464	590.88415
m122	236.17614	4243.38438	590.46731
m117	241.55528	4238.70843	590.86521

m115	204.10281	4242.84385	592.65180
m116	213.66489	4229.60252	589.06898
f012	241.58030	4233.30067	588.21028
f009	232.91472	4232.08442	584.83906
f008	229.10086	4235.14878	586.17176
f010	248.74567	4238.48689	587.66305
f011	252.97687	4233.14755	584.01418
24400	233.29668	4243.88571	589.75157
m0126	232.34173	4247.33563	590.89063
m0127	237.56259	4246.11502	590.77296
m0128	235.54795	4249.27106	591.33245
m0108_2	209.18331	4257.49331	595.04212
m0109_2	210.10681	4260.33036	595.24580
m21	235.24318	4240.64638	591.04575
m22	236.19755	4243.39578	590.36324
m23	240.25762	4241.04656	591.11072
m24	232.38563	4242.68149	590.82950
m25	231.40390	4243.52433	590.87505
m128	235.54829	4249.27156	591.33594

m129	244.79084	4232.87200	588.50762
m130	245.21145	4235.10751	590.64197
m131	246.87200	4239.03085	589.36993
m132	247.77031	4241.12068	590.41553
24600	239.03355	4268.94824	591.31299
m109	210.12765	4260.33885	595.24826
m136	245.80180	4242.30729	590.98559
m133	243.51994	4246.63773	592.22599
m137	243.72605	4246.41140	590.69198
m134	239.26229	4248.72184	590.81160
f002	237.89053	4266.52486	591.14885
f004	251.91912	4252.68711	588.05144
f003	241.64225	4250.67050	589.69325
f150	244.07362	4246.83073	594.97660
f151	242.88269	4244.51468	598.24898